



Universidad
Nacional
de Córdoba



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y HUMANIDADES
SECRETARÍA DE POSGRADO

Aproximaciones epistemológicas a
las ciencias de los sistemas complejos
Metateorías, fundamentos y perspectivas

Andrés A. Ilcic

Director: Dr. Pío García

Co-Director: Dr. Miguel A. Fuentes

Tesis presentada para optar al título de Doctor en Filosofía

Abril, 2022
Córdoba, Argentina



Presentación de Tesis FFyH - RDU - UNC. Distribuido bajo licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0). <https://rdu.unc.edu.ar/>

A Víctor Rodríguez,

un radiador gauchesco que viola todas las leyes de la termodinámica y cuya naturaleza cuántica le permite hasta computar el halting problem (aunque sólo mientras nadie le pida que escriba la respuesta).

Agradecimientos

Como es bien sabido en el mundo académico, las tesis son apenas una excusa para escribir la sección de agradecimientos, quizás para hacer más sencilla la tarea de algún osado sociólogo de las ideas del futuro que crea que en ellas hay alguna idea que merezca ser rastreada. Esta tesis no es la excepción, y las conexiones aquí hacen a la única complejidad emergente que hay en las páginas que siguen a esta.

De los símbolos de la página anterior creo que se puede interpretar cuánto agradezco a Víctor Rodríguez por ser un modelo de búsqueda de conocimientos y un sistema agitador de los espines más arraigados de la naturaleza, tanto de cerebros como de microprocesadores.

Agradezco también profundamente la constante influencia de Marisa Velasco. Después de todo, mi vida intelectual es un lento darme cuenta de que Marisa tenía razón desde el principio (aunque eso no aplica a sus preferencias por sistemas operativos ni editores de texto, al menos por ahora).

Pío García y Miguel Fuentes han funcionado de reguladores interpretativos, mucho más allá de su rol formal de directores; e incluso mucho más de lo que ellos mismos creen. Algún genio más benigno que maligno les ha otorgado configuraciones internas que se manifiestan a través de muchas virtudes, especialmente la de la paciencia. Si en las páginas que sigue hay algún acierto, ellos son los culpables; los errores van de mi parte.

Miembros de varios grupos, conjuntos, redes, sistemas de los que soy parte, ya sea por su colectividad o por su individualidad (les desafío a encontrar la diferencia) no sólo me han ayudado a articular muchas ideas a lo largo del tiempo, también han sabido sufrir las consecuencias de algunas de ellas. Sabiendo los riesgos de nombrar nombres, me atrevo a listar por extensión algunos, quien no se encuentre, sepa que hay una equivalencia intencional (e intensional) en algún mundo posible. Entre pasillos, boxes y salas del CIFFyH y sus alrededores, agradezco a Julián Reynoso, Xavier Huvelle, Martina Schilling, Sofía Mondaca, Ignacio Heredia, Penélope Lodeyro, Silvia Polzella, Maximiliano Bozzoli, Nicolás Venturelli, Marzio Pantalone, Luciana Pesenti, Diana Rabinovich. Todavía nos queda pedir un subsidio para investigar si la razón del grupo es hacer filosofía de la ciencia o aprovechar la mesa grande para comer torta en las reuniones. Aunque, en tanto herederos (o instanciadores) del “grupo de Víctor”, creo que su misión principal continúa siendo la de salvar a los filósofos del existencialismo.

Un conjunto muy particular de influencias ha gravitado principalmente torno al Coloquio de la Técnica, aunque poco sepamos ya por qué se dice de la técnica ni qué lo hace coloquio: Javier Blanco, Agustín Berti, Dario Sandtone, Diego Lawler, Loreta Magallanes, Aldana D’Andrea, Manolo Rodríguez, Diego Parente y Andrés Vaccari. Ni ellos ni

yo logramos entender cómo todavía no han logrado hacerme leer a Simondón.

Allá por SADAF se ha formado un sistema complejo que tiene, entre otros, como componentes a Hernán Miguel, Leandro Giri, Ada Czerwonogora y Griselda Ríos, quienes son responsables de muy peculiares propiedades emergentes.

Oficialmente también por el CIFYH, pero más por Skype, Juan Durán, Manuel Barrantes e Itatí Branca me invitaron a instanciar un grupo de explicación científica que todavía me hace dudar si el *explanans* explica el *explanandum* o es al revés. Itatí se merece un reconocimiento especial por todas las veces que me ha tenido que decir «todavía está muy abstracto» o «esta oración es un poco larga», y no siempre con respecto al contenido académico.

Entre formalidades e informalidades, Luis Urtubey, Diego Letzen, Alba Massolo y Sandra Visokolskis me han ayudado a mucho a darle sentido a los símbolos lógicos y a darle símbolos lógicos al sentido. Entre clases y charlas, Francisco Tamarit, Walter Lambert, Aaron Saal, Hernán Severgnini y Norma Goethe tienen más culpas históricas en esta tesis de la que creen (y quisieran) tener. Los pasillos de la facultad también dieron lugar a significativas conversaciones con Federico Mina, Malena León, Carolina Scotto, Laura Dánón, Daniel Kalpokas, Mariela Aguilera. Hablando de hablar, me he enriquecido mucho a través de conversaciones en distintas oportunidades y lugares Sergio Barberis, Dante Chialvo, John Norton, Julian Barbour, Katie Robertson, Annais White, Paul Hoyningen-Huene y Michael Esfeld.

Debo agradecer también a algunos seres cuya obra han tenido un profundo impacto en mi manera de ver el mundo y que podría haber citado mucho más de lo que hago: Daniel Dennett, Douglas Hofstadter, Richard Rorty, William Wimsatt y Cliff Hooker. Don Knuth es uno de los culpables de hacerme ver la vida en términos de algoritmos y artes, culpa que también comparte su secuaz Leslie Lamport; además, de no ser por \LaTeX , este manuscrito sería una imposibilidad lógica o metafísica o computacional. Bueno, quizás no imposible, pero mucho más improbable, sin duda.

No menor ha sido el trabajo de soporte que han realizado Martín Faillace, Carolina Manzo, Lucía Cabrera, Karen Bauk, Celeste Frascarolli y Victoria Bruno. Lo mismo debo decir de la familia, que quizás ahora puedan darse una idea de qué es lo que estuve haciendo estos años. Especialmente, agradezco a mi madre, quien me enseñó a amar los símbolos en papel, y a mi padre, quien me enseñó a amar a las máquinas.

Esta investigación se financió fundamentalmente a través de una beca doctoral de CONICET (2016–2022) y estuvo enmarcada dentro de un proyecto con subsidio de FONCyT (PICT-2016-1524) dirigido por Pío García y un proyecto CONSOLIDAR dirigido por Marisa Velasco, con subsidiado otorgado por la SECyT (UNC).

Índice general

| | |
|---|-----------|
| 1. Introducciones | 9 |
| 1.1. Introducción a la introducción | 9 |
| 1.2. Introducción (propriadmente dicha) | 17 |
| 1.2.1. Sistemas y modelos | 17 |
| 1.2.2. Mapa (o modelo simplificado) de los capítulos | 17 |
| 1.3. Notas de lectura | 20 |
| | |
| 2. De las máquinas muertas a las máquinas vivas | 21 |
| 2.1. Las muchas “máquinas científicas” | 22 |
| 2.2. El <i>vitalismo científico</i> de Xavier Bichat | 25 |
| 2.3. La fisiología mecánica de Claude Bernard | 30 |
| 2.4. El rol conceptual de las máquinas en el surgimiento de la biología teórica . | 36 |
| 2.4.1. El vitalismo “maquínico” de Reinke | 39 |
| 2.4.2. La armonía legal de las máquinas organizadas | 44 |
| 2.4.3. La teoría de los dominantes y las máquinas como modelos abstractos | 49 |
| 2.5. Jakob von Uexküll: de las máquinas a las supermáquinas | 55 |
| 2.5.1. Obra temprana: biología empírica y máquinas como modelos . . . | 57 |
| 2.5.2. El límite de las máquinas y la biología teórica | 63 |
| 2.6. Resumen (y conexiones) | 71 |
| | |
| 3. Complejidades en las teorías generales de sistemas y las cibernéticas | 73 |
| 3.1. La primera Teoría General de los Sistemas | 74 |
| 3.1.1. Máquinas contra organismos | 75 |
| 3.1.2. TGS, modelos y complejidad | 80 |
| 3.1.3. Perspectivismo y antireduccionismo | 83 |
| 3.2. Las (primeras) cibernéticas | 89 |
| 3.2.1. Prolegómenos cibernéticos | 91 |
| 3.3. ¿Sistemas = modelos = máquinas? | 102 |
| 3.4. Cibernámquinas y cibermodelos | 114 |
| 3.4.1. Cibernética, información, complejidad | 115 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 3.5. | Bertalanffy contra las (ciber)máquinas | 132 |
| 3.6. | Resumen (y conexiones) | 138 |
| 4. | Turing y von Neumann: La complejidad entre la computadora y la matemática | 140 |
| 4.1. | Alan Turing, entre máquinas y modelos | 141 |
| 4.1.1. | Modelos de máquinas y máquinas de modelo | 143 |
| 4.1.2. | De simulaciones, inteligencias y otras búsquedas | 152 |
| 4.1.3. | Búsquedas y heurísticas ajedrezísticas | 167 |
| 4.1.4. | ¿La ciencia como un juego de imitación? | 176 |
| 4.2. | Las máquinas limpias y las máquinas sucias de John von Neumann | 177 |
| 4.2.1. | ¿Una computadora para la computadora? | 186 |
| 4.2.2. | Las primeras redes neuronales artificiales | 189 |
| 4.2.3. | Máquinas para modelar máquinas | 208 |
| 4.2.4. | Máquinas armadas con modelos | 215 |
| 4.3. | Resumen y conexiones | 224 |
| 5. | Una (posible) caracterización filosófica de los sistemas complejos | 225 |
| 5.1. | Características de un sistema complejo | 225 |
| 5.2. | Fenomenología de los sistemas complejos | 227 |
| 5.2.1. | No-linealidad | 227 |
| 5.2.2. | Comportamiento “intrincado” y no-agregatividad | 228 |
| 5.2.3. | Patrones y (ruptura de) simetría | 228 |
| 5.2.4. | Orden y organización espontáneos | 233 |
| 5.2.5. | Irreversibilidad, memoria e historia | 240 |
| 5.2.6. | Adaptabilidad, aprendizaje, evolución | 243 |
| 5.2.7. | Jerarquía y modularidad (y recursividad, otra vez) | 251 |
| 5.2.8. | “No-localidad” y dependencia del contexto | 258 |
| 5.2.9. | Robustez, estabilidad e integridad | 266 |
| 5.2.10. | Robustez <i>redux</i> | 288 |
| 5.3. | Resumen y conexiones | 290 |
| 6. | El arte de estudiar sistemas complejos | 292 |
| 6.1. | Paisajes y más paisajes | 292 |
| 6.2. | Patrones <i>à la</i> Turing | 305 |
| 6.3. | Autómatas celulares | 313 |
| 6.4. | Redes neuronales “artificiales” | 327 |
| 6.5. | Historia (y “sociología”) temprana del estudio de los sistemas complejos | 335 |
| 6.5.1. | El surgimiento de las ciencias de la complejidad | 338 |
| 6.6. | Resumen y conexiones | 341 |

| | |
|--|------------|
| 7. Abstracción y emergencia en (y por) sistemas complejos | 344 |
| 7.1. Emergencia, reducción y complejidad | 346 |
| 7.1.1. La emergencia de la emergencia | 354 |
| 7.1.2. Emergencias contemporáneas | 362 |
| 7.2. Abstracción (y otros conceptos abstractos) | 372 |
| 7.2.1. Niveles, niveles... | 374 |
| 7.2.2. Abstracciones (abstractas y concretas) | 379 |
| 7.2.3. Niveles de abstracción (y abstracción de niveles) | 384 |
| 7.3. La naturaleza artefactual de los sistemas complejos y su conocimiento . . . | 387 |
| 7.4. Resumen y conexiones | 395 |
| Conclusiones (y limitaciones) | 397 |
| Conclusiones | 397 |
| Limitaciones (o lo que queda(ría) por hacer) | 415 |
| Citas en idioma original | 417 |
| Referencias | 452 |

«¿Pero si el mundo no es un rompecabezas cuyas piezas sueltas tenemos ante nosotros, sino una sopa en la cual nadan al azar unos fragmentos que sólo por casualidad se congregan de vez en cuando para formar un conjunto coherente? [...] Perfección, completitud, belleza, ¿no son más que una excepción rara que sólo se presenta porque la cantidad de fragmentos es inimaginable!»

—Stanisław Lem, *La investigación*

«Cuanto más aprendemos sobre el mundo, y cuanto más profundo sea nuestro descubrimiento, más consciente, específico y articulado será nuestro conocimiento de lo que no sabemos, nuestro conocimiento de nuestra ignorancia.»

—Karl Popper, *Conjeturas y refutaciones*

«Lo más curioso del asunto era que los árboles y las demás cosas que los rodeaban no cambiaban nunca de lugar: por más rápido que fueran, no parecían pasar sobre pasar nada. “Me pregunto si todas las cosas se mueven con nosotros”, pensó la pobre Alicia, desconcertada. Y la Reina pareció adivinar sus pensamientos, pues gritó: “¡Más rápido! No intentes hablar!”»

—Lewis Carroll, *Alicia a través del espejo*

Capítulo 1

Introducciones

1.1. Introducción a la introducción

Partiendo desde el papel que parece jugar la palabra “epistemología” en el título de esta tesis, nadie se sorprenderá al leer a continuación que esta tesis es una tesis de epistemología. Pero antes de comenzar incluso la introducción a la tesis propiamente dicha, deseo aclarar algunos detalles acerca de cómo interpreto las preguntas fundamentales de la filosofía y de la epistemología; y en cierta medida hacer explícitas algunas de las influencias de las que soy consciente, consciencia que en muchos casos se fue revelando a lo largo del proceso de escritura y los infinitos procesos que soportan la escritura de un trabajo como este.

Si bien el tema central de esta investigación es el desentramar parte de la historia y de los conceptos centrales de los estudios sobre los fenómenos complejos, es necesario remarcar que toda la escenografía está inspirada en la pregunta por los límites de nuestra capacidad para conocer los múltiples mundos que habitamos, tanto los llamados naturales como los artificiales; mundos entre los que veo, en realidad, una profunda continuidad, por lo que su distinción es apenas una de grado y de historia, no de clase o tipo. La naturaleza interdisciplinar de la ciencia de los sistemas complejos es un lugar ideal para estudiar cómo distintas ramas del conocimiento humano pueden y deben integrarse para dar cuenta de ciertos fenómenos y, fundamentalmente, cómo dicho conocimiento impacta en la manera en la que comprendemos la manera misma de comprender el conocimiento, especialmente aquel que suele llamarse conocimiento científico.

De Wilfrid Sellars aprendí que la tarea central de la filosofía está en trazar puentes entre nuestra manera habitual o cotidiana de movernos y vivir en el mundo del que somos conscientes —el mundo de la imagen manifiesta, en sellarsiano— y aquel de la mesa

“llena de vacío” sobre la que gustaba escribir Sir Arthur Eddington y que forma parte de la imagen científica. Requerir del diseño y de la implementación de estos puentes veo como uno de los supuestos básicos de una posición naturalista en filosofía; aunque Sellars, creo, me objetaría que mi naturalismo tiene más sabor quineano —y por tanto algo amargo— para muchos filósofos y quizás más para otros filósofos accidentales; lamentablemente la malaria no se puede eliminar sin algunos tragos amargos de quinina.

Mi primera exposición al significado y al poder del naturalismo en el laboratorio de la filosofía provino de un pasaje de Richard Rorty al que continuamente me veo volviendo para usar como base para pensar en las continuidades, tanto filosóficas como naturales:

Ser naturalista en este sentido es ser el tipo de antiesencialista que, como Dewey, no ve cortes en la jerarquía de los ajustes cada vez más complejos a una estimulación nueva —la jerarquía que, en el fondo, hace a las amebas adaptarse a los cambios de temperatura del agua, bailar a las abejas y a los jugadores de ajedrez hacer un jaque mate, y en la cúspide lleva a las personas a fomentar revoluciones científicas, artísticas y políticas—. (Rorty, 1991, p. 109)

Una de las consecuencias de un naturalismo bajo una interpretación fuerte puede ser la tendencia a intentar reducir las explicaciones de los fenómenos que se observan —por “mera” observación o por aquellos observables resultado de acciones en el mundo—. Esto suele estar asociado a algunas concepciones de lo mecánico como criterio validador para las explicaciones, una vez que se toma a alguna mecánica como el principio que explica el comportamiento de las entidades últimas que se postulan como fundamentales y quizás inmutables de la ontología del mundo. Uno de los objetivos de esta tesis es señalar cómo la concepción de lo mecánico, bajo distintas formas, efectivamente ha estado debajo de nuestras mejores explicaciones para los fenómenos, pero siempre envuelta en una serie de tensiones y reajustes con profundas consecuencias para la cosmovisión de una época. Una de esas tensiones que encuentro particularmente interesante y en cierta medida funciona de guía en esta investigación es la del contraste entre lo “mecánico” y la noción de “máquina”, contraste que en muchas ocasiones puede verse en términos de lo que sería natural, por un lado, y artificial, por el otro. Curiosamente esta es una distinción que volvió a cobrar fuerza tras las artificialidades que condujeron a la revolución científica hacia finales del Renacimiento, el siglo XVI. La concepción de lo mecánico que surgió tras la aceptación generalizada de la concepción newtoniana del mundo mecánico puso de manifiesto una tensión esencial entre lo que se aceptaría como buenas explicaciones de los fenómenos y la llamativa dificultad de llevar a cabo explicaciones de esa clase en un rango de fenómenos que hoy llamaríamos complejos, especialmente aquellos relacionados a los organismos. Muchas de las posturas resultantes de la aparente imposibilidad de explicar la complejidad de la naturaleza —especialmente de lo asociado a la variedad de formas de vida, las reacciones químicas, las capacidades mentales, etc.—

Mientras más abstracta y universal parecía volverse la mecánica, más lugar daba a la aparición de nuevas sustancias últimas para completar la ontología y llenar el espacio explicativo; aunque por momentos los descubrimientos de leyes —o mejor aún, principios— en la mecánica se traducían a restricciones sobre los comportamientos de las otras sustancias, como el caso de la conservación de la energía. Muchas formas de dualismos interactivos —al estilo del postulado por Descartes— continuaron emergiendo y, como lo fue para el mismo Descartes, lo que puede explicarse en términos de las máquinas construibles en una época resulta ser una peculiar forma de heurística metodológica para el desarrollo de estas concepciones; muchas veces por oposición, esto es, observando qué es lo que no se puede explicar *como si* fuese una máquina.

Sin perder de vista la pregunta por nuestra capacidad de explicar y conocer las muchas caras de los fenómenos asociados a la complejidad, es esta tendencia a usar a las máquinas como un “puente conceptual” o “interfaz” lo que exploro y exploto en esta investigación. A lo largo de la elaboración de esta tesis, me he terminado de convencer de que todo acto o acción de conocimiento radica, en última instancia, en una suerte de interfaz que se replica en muchas dimensiones de análisis, especialmente en las tres “clásicas” usualmente consideradas en la filosofía de la ciencia: la ontología, la epistemología y la metodología. Sean esas u otras las categorías o dimensiones que empleemos para describir y prescribir prácticas de conocimiento, el desafío, creo, está en poder encontrar una forma de describir el pasaje o la transición de una a la otra en los contextos mismos de generación y uso de conocimiento. En varios puntos en esta tesis me refiero a esto como un acto de proyección, algo que será crucial para comprender la manera en la que entiendo a las abstracciones, uno de los conceptos que para, un tanto para mi sorpresa, resultó ser crucial para comprender las maneras en las que sistemas complejos —como los seres humanos— pueden llegar a ser y a comprender.

Así como Sellars se quejaría de la clase de naturalismo que él mismo me ayudó a ver, Ernst Mach también se quejaría de que fue él quien me ayudó a comprender la centralidad de la abstracción como parte de lo que nos permite hacer proyecciones, muchas de esas hacia y desde la ontología:

La importancia del concepto para la investigación científica se comprende fácilmente. Cuando clasificamos un hecho con un concepto, lo *simplificamos*, despreciando todos los caracteres que no son esenciales al fin que perseguimos. Pero, al mismo tiempo, *enriquecemos* este hecho, puesto que le hacemos participar de todos los caracteres de esta clase; los dos motivos económicos, ordenadores y simplificativos mencionados anteriormente, la *permanencia* y la *diferenciación* suficiente, no pueden intervenir con provecho sino cuando el sujeto está ya dividido por abstracción. (Mach, 1905/1948, p. 119)

Ya sean teóricas o instrumentales, las abstracciones se hacen sobre lo que se puede des-

cribir como un alfabeto de símbolos bajo el que se estarán codificando tanto las acciones que un agente epistémico pueda hacer sobre el sistema que estudia como los cambios que se puedan detectar tras esas transformaciones.

El desafío del científico será encontrar una serie de reglas sobre las representaciones codificadas que ante el esquema correcto de mediación permita hacer afirmaciones sobre los observables posibles y volverlos esperables y entendibles, similar a cómo un mensaje encriptado puede volverse comprensible bajo la llave de encriptación adecuada.

Con las múltiples infinitas distancias que nos separan, Albert Einstein también supo aprovecharse parcialmente del fenomenalismo machiano y conectarlo con esa “intuición física” que, al menos por momento, parecía ser inexplicable, al menos en cuanto a pretender formalizar en una metodología objetiva esos aspectos tan humanos del proceso de descubrimiento científico. En una conferencia en honor a Max Planck en 1918, comentaba Einstein acerca del rol de los físicos, de lo que años más tarde llamaría la inexplicable explicabilidad del mundo y de la razón por la que los físicos y los epistemólogos no suelen llevarse del todo bien:

La tarea más importante del físico es, por tanto, buscar las leyes elementales más generales de las que se puede obtener la concepción del mundo [*Weltbild*] por pura deducción. Ningún camino lógico conduce a estas leyes elementales, sino únicamente la intuición basada en la experiencia. Con esta incertidumbre metodológica, se podría pensar que sería posible cualquier número de sistemas de física teórica igualmente justificados; esta opinión es ciertamente cierta en principio. Pero el desarrollo ha demostrado que de todas las construcciones teóricas concebibles, una sola resulta ser absolutamente superior a todas las demás. Nadie que haya profundizado realmente en el tema negará que el mundo de la percepción determina el sistema teórico de forma prácticamente inequívoca, aunque no haya ningún camino lógico que conduzca de las percepciones a los principios de la teoría. Más aún: este sistema conceptual, claramente asignado al mundo de la experiencia, es reducible a unas pocas leyes básicas a partir de las cuales se puede desarrollar lógicamente todo el sistema. Con cada nuevo avance importante, el investigador ve superadas sus expectativas, ya que esas leyes básicas se simplifican cada vez más bajo la presión de la experiencia. Se asombra al ver el caos aparente transformado en un orden sublime, que no se debe a la acción de su propia mente, sino a la naturaleza del mundo de la experiencia; es lo que Leibniz llamó tan felizmente “armonía preestablecida”. Muchos epistemólogos son criticados por los físicos por no apreciar lo suficiente esta particularidad. (Einstein, 1918, p. 31)

Al igual que Einstein lo hace aquí, en esta tesis oscilo entre el desorden o caos de la experiencia y la posibilidad de encontrar por medio de nuestros sistemas conceptuales aquella “armonía preestablecida” del mundo natural. Sin embargo, desde este punto de partida debo ya distanciarme un tanto del optimismo de Einstein, aunque pienso que él también fue lentamente abandonando algo de la esperanza a medida que la intuición física empezaba a tener que ser abandonada por una intuición matemática que, por momentos, puede

volverse un tanto abstracta. Además, creo que parte del problema de la incapacidad de la deducción pura para dar cuenta de las intuiciones de la experiencia yace precisamente en la fortaleza de esa clase de sistema: la infalibilidad *a priori*. Si fuésemos seres infinitos y el tiempo nos fuera tan solo una ilusión, quizás podríamos apreciar al mundo natural y al mundo “artificial” que sobre él construimos en sus mismos términos, a base de un esquema conceptual o proceso de codificación para la experiencia que pueda demostrarse ser último, óptimo y único. Quizás, y es un gran quizás, podamos hacer algo semejante para un muy reducido ámbito de la experiencia, y hasta de eso estoy dispuesto a dudar. Ahora bien, pese a nuestra finitud de acceso a todas las escalas de experiencia y la consecuente necesidad de un esquema de traducción o codificación entre esas escalas —que, encima, provendrá de la aplicación de un esquema anterior y provisorio; pero no por eso menos útil ni necesario—, algunas facetas de un orden parece quedarnos a la mano, pero para eso necesitamos ser capaces de algo que ninguna deducción pura puede hacer: tenemos que aprender. Y tenemos que hacerlo de la misma forma en la que lo hace la naturaleza de la que somos parte: mediante la resignificación de los errores para crear novedad.

David Hume, aquel gran despertador de los más profundos sueños dogmáticos, no podía creer en el azar como una fuerza real, mucho menos como algo que podía tener una acepción positiva, mucho menos todavía ser una condición de posibilidad de gran parte de lo que es:

Está universalmente admitido que nada existe sin una causa de su existencia y que el azar, cuando se lo examina estrictamente, es una mera palabra negativa y no significa ninguna fuerza real, que pueda tener un ser en alguna parte de la naturaleza. (Hume, 1748/1956, p. 98)

Es recién a las sombras de Darwin y de las máquinas de la revolución industrial que viejas ideas de azar y caos lentamente fueron tomando cada vez un papel más protagónico en las imágenes científicas y cotidianas, aunque la aceptación de la posibilidad misma del universo mismo como abierto, contingente y al menos potencialmente destinado a sufrir una agonizante y lenta muerte por exceso de entropía, tardó todavía un tiempo en salir de algunos recodos de conversaciones científicas y producir un cambio profundo en la imagen y la razón del ser humano en ese universo a la deriva.

Lo que necesitamos, en medio de tanto caos y desorden, es una forma de aprovechar tanto caos y desorden, y la forma de lograrlo es mediante la memoria, que es la manera de hacer que un proceso histórico logre diferencias que hacen, luego, diferencias. En lo que entiendo como punto de partida de la clase muy particular de naturalismo, muy influenciado por Darwin, Mach comienza señalando la continuidad de los seres vivos y como la memoria puede amplificar sus capacidades para sobrevivir en un ambiente:

Dentro de condiciones simples, constantes y favorables, los seres vivos inferiores se

adaptan a las circunstancias por reflejos innatos y esto es suficiente generalmente para asegurarles durante cierto tiempo la conservación del individuo y de la especie. En condiciones más complicadas y menos constantes, el animal sólo resiste si es capaz de adaptarse a las modificaciones más considerables del medio. Para ello le es necesario ver más lejos en el espacio y en el tiempo; llega a eso ante todo gracias a órganos de sentidos más perfectos y como consecuencia del crecimiento de necesidades, la inteligencia se desarrolla más. En el hecho, un ser vivo teniendo memoria, posee desde el punto de vista psíquico un campo de acción más extenso que aquel que sus sentidos le permitirían alcanzar directamente en el espacio y en el tiempo. Lo que aseguró al hombre primitivo una ventaja cuantitativa sobre los animales con quienes vivía, fue simplemente la potencia de su memoria individual, sostenida progresivamente por los recuerdos comunes de los antepasados y de la raza. (Mach, 1905/1948, p. 17)

En lo que respecta al naturalismo, la posición que está detrás de gran parte de esta tesis es —y que por momentos es un punto de partida y, en otros, uno de llegada— es aquella que sostiene la continuidad de todo lo existente, pero es una continuidad no homogénea en el sentido de que permite que haya diferencias radicales en la constitución de una misma “cosa” o “elemento”, al punto en que para poder interactuar necesiten alguna otra clase de elemento que puedan utilizar como puente o interfaz. Es sólo en términos de la interpretación y de la acción que este tercer elemento en juego puede llevar a cabo que configuraciones distintas de elementos constituyentes básicos pueden decirse equivalentes. Esto, creo, es tan cierto de los quarks como de los jaguares y de los sistemas conceptuales, ninguno de los cuales es “menos real” que el otro, especialmente en virtud de provocar cambios en todo aquello con lo que puedan interactuar. Qué tan significativos sean esos cambios dependerá de cómo puedan ser detectados y accionados por todo aquello que esté presente en los ambientes de interacción.

Esta “relatividad significativa” tiene profundas implicancias para nuestra manera de comprender nuestra manera de comprender. El ascenso semántico pseudoquiniano de la repetición en esa expresión es un efecto, no un defecto. Ahora bien, tranquilamente podría interpretarse como un error. Y ese es precisamente el punto de mi naturalismo, que tiene al azar como una “fuerza” tan real que hace a todo en el universo oscilar entre accidentes y necesidades, entre simetrías y diferencias, perfecciones y errores. Es en este interjuego de equilibrios muy distintos que todo ocurre, especialmente la creación de nuevos “niveles” de realidad que pueden interpretar eventos como significativos o como errores; de hecho uno gracias al otro.

Una de las maneras en la que tanto la naturaleza como nosotros cuando buscamos conocerla y al crear artefactos con ella “capitalizamos” sobre los errores es mediante una abstracción. Este es uno de los conceptos centrales en los que se apoya esta investigación aunque no se hace del todo explícito sino hasta el final. En parte esto está dado por el derrotero histórico de la tesis, tanto de aquello de lo que trata como de su proceso

de investigación y escritura. Uso el término “proceso” muy a propósito porque tal vez sea conveniente decir algo no tan abstracto de lo que entiendo por una abstracción: un proceso por el que una serie de procesos son encapsulados y tratados o interpretados como una unidad. Resultará fundamental, además, que distintos procesos pueden dar lugar o conllevar a la formación de una misma unidad. Por tanto, esta concepción de abstracción creo que puede usarse como un soporte para estudiar uno de los problemas clásicos de la filosofía: el problema de la representación, otro término que empleo en repetidas ocasiones y cuya reconstrucción adecuada debo para algún futuro. Pero sí puedo adelantar ahora una de las maneras en las que el concepto de abstracción ayuda a comprender algunos aspectos claves del problema que considero la piedra de toque de los problemas de la filosofía de la ciencia: ese que Eugene Wigner bautizó en términos de la «irrazonable efectividad de las matemáticas en ciencias naturales». El enlace entre este problema y la abstracción, tal y como aquí la estoy empleando, está en precisamente en ser un enlace; es decir, las abstracciones generan una interfaz mediante la cual elementos de naturalezas muy distintas pueden interactuar. Esto significa volverse semejantes bajo una operación o transformación, que necesariamente es un proceso que transcurre en el tiempo porque, en el proceso, crea al tiempo mismo, que depende de la posibilidad de detectar cambios de estado.

Uno de los conceptos filosóficos con el que conecto a las abstracciones es el de realizabilidad múltiple, una de las muchas formas en las que en la filosofía de la mente se usaron para criticar la llamada teoría de la identidad que, valga la redundancia, identificaba a cada estado mental con un estado físico particular, abriendo paso a una reducibilidad completa de lo mental a lo físico. Esta misma forma de argumentar fue luego empleada por aquellos que pretenden defender alguna forma de fisicalismo no reduccionista y ahora está ganando terreno en las discusiones sobre filosofía de los sistemas complejos, incluso fuera de la filosofía de las neurociencias y de las ciencias cognitivas; de hecho es uno de los temas centrales en la discusión contemporánea sobre metafísica científica. Me considero parcialmente heredero de algunas de estas discusiones, pero intento siempre mostrar que parte de las confusiones en torno a este concepto están no considerar los límites a los que los agentes epistémicos se enfrentan en cualquier intento de hacer afirmaciones significativas sobre los patrones que pueden detectar, describir y cambiar en el ambiente en el que se encuentren. Una consecuencia de mi manera bastante extendida de entender a la tesis de la realizabilidad múltiple es que esta tesis misma es múltiplemente realizable. Es decir, el mismo efecto podría haberse logrado con patrones de palabras muy distintos, pero en algún punto esa interfaz o equivalencia bajo interpretaciones, estimo, es posible o realizable. Así, esta tesis bien puede pensarse desde una teoría de tipos o desde una teoría de categorías, teorías formales que, como cada tanto se puede notar en algunos pasajes, condicionan mi manera de aproximarme a algunos tópicos. Aquí, sin embargo, como lo que está en juego, en última medida, es nuestra capacidad para describir con nuestros

modelos aspectos que se desenvuelven en la interfaz del mundo físico con el mundo conceptual o artefactual que se construye sobre ese mismo mundo natural como soporte, la tesis de interfaz entre estos dos mundos que más condiciona esta investigación, tanto en términos de su posibilidad como de su metodología es la tesis de Church-Turing. Y es gracias a ella que me permito, por momentos, abandonar el abstracto mundo de los conjuntos y los tipos y las categorías para ir por algo que creo un poco más fácil de manipular: la vía de las máquinas. De la misma forma en la que, como exploro en varias oportunidades, las máquinas de una época constituyen una heurística extremadamente fértil para producir conocimiento del mundo, también creo que son al menos igual de fértiles para hablar de nuestro conocimiento del conocimiento. Esto, espero, justifica los múltiples excursos en el camino hacia exploraciones del campo de la inteligencia artificial; una de las tantas herramientas en manos de los filósofos que buscamos las posibilidades de un naturalismo como el que persigo. De hecho está a la base de lo que en última instancia permite sortear el problema de la “indefinibilidad” de las intuiciones a las que Einstein apelaba y, correctamente, dejaba fuera del reino de la deducción pura. Creo que esas intuiciones pueden ser naturalizada mediante una forma particular de instanciar o realizar inferencias en general, de las cuales la deducción son apenas un caso particular: la computación. Quizás este punto haga menos sorprendente mi apoyo en la noción de abstracción que está más en dirección a cómo se la entiende y usa en ciencias de la computación; aunque, y esta es otra consecuencia de mi naturalismo, la noción de computación sobre la que también me apoyo no se limita a los aspectos formales, sino que es algo más de lo que puede ocurrir en los mundos naturales y los “artificiales” construidos sobre ellos. Es en términos de una computación que, propongo, debe entenderse aquella interpretación de las diferencias de estados mencionada más arriba, interpretación que es lo que permite, en última instancia, crear complejidad, introduciendo diferencias donde no las hay e introduciendo similitud donde había diferencias. Este ir y venir entre patrones de tiempo y de espacio que hacen a los múltiples mundos naturales y artificiales que creamos y habitamos. En la IA encuentro un aliado conceptual para comprender todavía más la continuidad entre lo natural y aquello tan artificial y tan humano como las prácticas de generación de conocimiento.

Este aspecto es uno más que surge de seguir, muchas veces a ciegas, los hilos que dejaron en el laberinto de la complejidad tanto Alan Turing como John von Neumann, quienes se hicieron en varias ocasiones, y con distinto grado de confianza en la respuesta, la misma pregunta:¹

De hecho, sería deseable dar sólo una discusión basada en el problema más amplio:
¿hasta qué punto el razonamiento humano en las ciencias puede ser reemplazado más eficientemente por mecanismos? (Goldstine & von Neumann, 1945/1963, p. 318)

¹Una manera menos indirecta de decirlo es: “Tanto la existencia de esta tesis como su contenido es culpa de Turing y von Neumann”, pero optaré por mantener la versión indirecta y dirigir al lector a los agradecimientos para buscar más culpables.

Será, pues, un medio para intentar comprender la más filosófica e infantil de todas las preguntas posibles: ¿por qué X?, donde es no sólo es válido, sino casi un axioma de necesidad reemplazar la variable X por «¿por qué X?». Al hacerlo, habremos creado una nueva y compleja abstracción, un nuevo orden desde el cual encontrar el orden oculto, y esconder tantos otros que requerirán nuevos reemplazos de variables. Lo emergente, entonces, será nuestro asombro:

Porque cuando hayamos explicado lo maravilloso, desenmascarado el patrón oculto, emerge un nuevo asombro al ver cómo se tejió la complejidad a partir de la simplicidad. La estética de las ciencias naturales y de las matemáticas está unida a la estética de la música y de la pintura; ambas se basan en el descubrimiento de un patrón parcialmente oculto. (H. A. Simon, 1996, p. 2)

1.2. Introducción (propriadamente dicha)

1.2.1. Sistemas y modelos

Quizás pocos términos tengan tantas acepciones e interpretaciones posibles como “sistema” y “modelo”, aunque quizás a la lista podrían sumarse “información” y quizás “teoría”. Un objetivo parcial de esta investigación tanto aprovechar como delimitar la riqueza semántica de estos conceptos, curiosamente empleando otro concepto que debería estar en la lista de más buscados semánticamente: “abstracción”. Además, que “sistema” o “modelo” sean sustantivos que pocas veces aparecen sin un adjetivo que los califique, sugiere que denotan un concepto tanto básico como flexible de nuestra manera de lidiar con lo que ocurre en el mundo. En un sentido muy general, y recurriendo un tanto abstractamente a algunos aspectos todavía algo difusos de la cognición humana, de la lingüística y de los intentos de fundamentar la matemática, que podamos desplazarnos de sistemas a modelos, es lo que nos permite tipificar y categorizar lo que ocurre en el mundo cuando *volvemos* de los modelos a los sistemas, solo para empezar el ciclo de nuevo, ahora con un grado de abstracción mayor y, con algo de suerte, con un grado de generalidad que nos permite, tanto como individuos o como comunidades (dos extrañas consecuencias del conjunto vacío) aprender de las tipificaciones y comportarnos *como si* muchas situaciones nuevas fueran semejantes a las anteriores. Si nuestra predicción falla, sólo será cuestión de volver a intentarlo; de buscar una nueva equivalencia entre la extensión de lo fenoménico y nuestras intenciones modeladoras.

1.2.2. Mapa (o modelo simplificado) de los capítulos

Capítulo 1. Introducciones

(Usted está aquí, en algún lugar.)

Si bien la metodología de investigación a lo largo de toda la tesis ha sido de una historia de la ciencia guiada conceptualmente (si es que no una filosofía de la ciencia históricamente guiada, para el posible enojo de Kuhn), los primeros tres capítulos (aunque por razones históricas o artefactos de la implementación comiencen desde el número 2) pueden verse como los “más históricos”.

Capítulo 2. De las máquinas muertas a las máquinas vivas

Aquí comienza el recorrido por la manera en que distintas ideas asociadas a la noción de máquina comenzaron a tener un rol heurístico en las investigaciones asociadas a la naturaleza de lo viviente, que tomo como caso prototípico de lo que en la época se consideraba como algo complejo, muchas veces por no poder reducirse a las explicaciones mecánicas —o maquinicas— que en otros contextos se aceptaban como las ideales. En los distintos vitalismos y mecanicismos aquí comentados se verá la constante tensión entre los criterios explicativos y la búsqueda de posibles soluciones. Destaco también la preocupación de los biólogos por la autonomía de su ciencia y la influencia que hasta muy entrado el siglo XX continuó teniendo la posición planteada por Kant en la segunda parte de su *Crítica del juicio*

Capítulo 3. Complejidades en las teorías generales de sistemas y las cibernéticas

Un nuevo capítulo se abre en la aparente oposición entre las máquinas y los organismos cuando ya en el siglo XX la idea misma de máquina comienza a complejizarse, como también ocurre con la misma idea de qué constituye conocimiento científico. Herederas de la discusión anterior, la Teoría General de los Sistemas y la Cibernética son consideradas como las primeras metateorías que plantean un interpretativo para el estudio de los sistemas complejos. Aunque entre las dos existen muchos puntos en común, y comparten una preocupación epistemológica directa y explícita sobre el uso de modelos en ciencia, la manera en la que reinterpretan el rol que pueden tener las máquinas para el estudio de los sistemas complejos va en dirección contraria, lo que también lleva a diferencias en la manera de ver el papel que puede jugar una teoría de la información. Dentro de las muchas posibles figuras para destacar en la cibernética, me concentro particularmente en la obra de W. Ross Ashby, destacando algunas conexiones posibles entre sus reflexiones en torno a la complejidad y la inteligencia con las de Alan Turing y Herbert Simon.

Capítulo 4. Turing y von Neumann: La complejidad entre la computadora y la matemática

Alan Turing y John von Neumann no solo son cruciales en la historia de la complejidad por haber ayudado a catalizar y cristalizar teórica e ingenierilmente una herramienta central para el trabajo científico —y crucial para el estudio de los sistemas complejos— como lo es la computadora digital, también lo son para esta tesis. Al explorar su obra desde este punto

de vista de su papel en la historia temprana de la complejidad, me enfoco principalmente en su manera de abordar y reflexionar sobre los problemas científicos y la articulación de estrategias que ambos supieron demandar para incorporar aspectos empíricos en la matemática y cómo las diversas limitantes encontradas en torno a la capacidad de cálculo, de los mismos límites de los sistemas formales y del progreso científico-tecnológico sugieren una peculiar forma de interpretar el rol de los modelos en ciencia. Un efecto que exploro en términos de cómo la computación como forma generalizada de ver las capacidades de las máquinas y de la naturaleza aporta aspectos conceptuales cruciales para una epistemología de los modelos y las simulaciones computacionales.

Capítulo 5. Una (posible) caracterización filosófica de los sistemas complejos

Sin abandonar por completo el hilo histórico, en este capítulo me concentro en explorar algunas características de los sistemas complejos y los desafíos epistémicos y epistemológicos que presentan. A su vez, busco incorporar reflexiones y casos que provienen de diversas áreas, destacando algunos de la biología y de la economía, en donde la naturaleza evolutiva —si es que no, directamente, creativa— de los sistemas complejos se puede ver desplegada con mayor facilidad. Comienzo también una exploración un tanto más sistemática de las reflexiones de Herbert Simon acerca de cómo caracterizar, estudiar y *diseñar* sistemas complejos. Sugiero que tanto los sistemas complejos como sus modelos deben verse y analizarse como robustos y, cruzando la noción de patrón con algunos señalamientos de von Neumann sobre la forma de pensar a los errores, sugiero que la robustez puede verse en términos de la capacidad de aprovechar y corregir errores.

Capítulo 6. El arte de estudiar sistemas complejos

El núcleo de este capítulo está en una selección altamente sesgada de maneras de estudiar sistemas complejos, en las que los aspectos claves a destacar provienen de las reflexiones de los capítulos anteriores: la aplicación de modelos matemáticos y de simulaciones que se destacan por haber surgido o ser empleados en disciplinas o áreas cuyo objeto de estudio suele considerarse, *a prima facie*, muy distinto. Además de sugerir la interdisciplinariedad del estudio de los sistemas complejos, los modelos tratados también señalan algunas de las formas en las que se manifiestan las habitualmente denominadas “propiedades emergentes” como característica distintiva de esta clase de sistemas.

Capítulo 7. Abstracción y emergencia en (y por) sistemas complejos

Este capítulo comienza con una breve exploración de las vías que han sido empleadas para el análisis de la emergencia y su “contraparte” más tradicional: la reducción. El determinismo y el azar hacen algunas apariciones, casi al azar, pero como estaba determinado por la trayectoria histórica en la que se mueven estos conceptos. De aquí se perfilan distintas formas de entender las “jerarquías” de la naturaleza con varias posibles consecuencias

para nuestra forma de comprender la comprensión y la compresión del mundo. Finalmente, busco concretizar —o *implementar*— la abstracción como un recurso conceptual para desarticular algunos de los puntos de vista tradicionales con respecto a la emergencia y la naturaleza misma de la complejidad, de donde puede emerger una mirada artefactual de los sistemas complejos y un “naturalismo computacional” si hubiese que ponerle un rótulo.

Conclusiones y limitaciones

La conclusión, finalmente, es otra versión, tanto más abstracta como más concreta, de la introducción.

1.3. Notas de lectura

Salvo errores u omisiones en algún que otro rincón del laberinto de palabras que se encuentra a continuación, la mayoría de los lectores de PDF en los que se opte leer y descifrar la configuración de bits que hacen a esta tesis deberían soportar los enlaces internos para desplazarse por el documento si hiciera falta haciendo *click* en alguno de los siguientes elementos:

El año de las referencias bibliográficas en el cuerpo del texto lleva directamente a la ubicación de dicho elemento en la lista de referencias al final.

Las referencias en el texto a secciones, páginas y figuras también deberían llevar a la ubicación del objeto referenciado en el ambiente.

Las llamadas de las notas al pie llevan al pie de página, aunque raramente se trata del pie de otra página.

Gran parte de las citas textuales cuentan con una llamada a su final en números romanos en mayúsculas. Se puede consultar mediante el enlace que contienen la cita en idioma original, que en quizás en algunos casos pueda resultar útil, si no para su comprensión, al menos para encontrar la referencia con más facilidad en el original. Salvo donde se ha referenciado una traducción publicada, la recodificación en español fue hecha por mí, aunque quizás incluso las partes más “nativas” en castellano incluso suenen un tanto extranjeras, el diccionario cerebral todavía no ha sido actualizado a la última versión, quizás por un problema de interfaz.

Capítulo 2

De las máquinas muertas a las máquinas vivas

Llegará el momento en el que el modo de representación mecánico y atomístico será completamente reemplazado en las mentes buenas, y todos los fenómenos aparecerán como dinámicos y químicos, confirmando cada vez más así la vida divina de la naturaleza.¹

Johann W. Goethe, *Tagesbuch* III, 4,271 (ca. 1812)

El objetivo de este capítulo de la investigación es dar comienzo a una posible historia conceptual de la disciplina que en la actualidad suele denominarse como «ciencias de la complejidad» o «ciencia de los sistemas complejos». Las dos grandes metateorías históricas que nuclearon gran parte de la producción científica y la reflexión filosófica en torno al estudio de los sistemas complejos —la Teoría General de los Sistemas y la Cibernética— son herederas directas de la manera en la que en las décadas anteriores se concibió a algo que parecía tan complejo: la vida. En tanto los fenómenos en torno a los organismos vivos parecía no podía explicarse en términos de la misma clase de operaciones mecánicas con las que se podían explicar muchos de los otros fenómenos en principio más simples, el estudio del reino de lo biológico muchas veces se legitimó como adecuado y autónomo por oposición a las explicaciones físicas y a veces químicas, incluso al punto de tener que sugerir la existencia de sustancias o fuerzas propiamente biológicas y, por tanto, en términos contemporáneos, ontológicamente irreducibles a las operaciones físicas. Ahora bien, en muchos casos, incluso quienes sostenían alguna variante de vitalismo a veces recurrían a analogías con máquinas como un recurso o heurística de descubrimiento, otras por medio de una exploración teórico-conceptual de la capacidad última de las máquinas. A su vez, muchos mecanicistas debieron apelar a nociones con tintes vitalistas para

explicar algunos de los procesos o principios que caracterizarían a lo biológico.

A continuación, por tanto, tras una primera breve presentación de las distintas formas en la que la tradición filosófico-científica concibió a lo mecánico, hago un recorrido por algunas de las maneras en las que el antagonismo entre lo mecánico (o maquínico) y lo viviente impactó en la obra de distintos científicos abocados a estudiar los fenómenos vitales y en las reflexiones acerca de su naturaleza y, en algunos casos, su intento de reconciliación. Muchas de estas tensiones continuarían en el siglo XX, coaccionando la manera en la que se comprenderían los fenómenos hoy asociados a la complejidad. Las figuras centrales de esta escena son Xavier Bichat, Claude Bernard, Johannes Reinke y Jakob von Uexküll.

2.1. Las muchas “máquinas científicas”

Para algunas ciencias como la biología y gran parte de la química, el siglo XIX fue su verdadero siglo de revolución científica; y su avance proveyó de nueva tierra conceptual fértil para la recepción en nuevos campos de la transformación de la imagen del mundo que la revolución científica del siglo XVII había iniciado. Las “filosofías científicas” de Descartes, de Newton y de Galileo *inter alios* recién lograron mostrar todo su potencial cuando el avance de las técnicas científicas experimentales estuvieron a la altura de lograr modificaciones controladas de situaciones creadas lo suficientemente complejas para poder discriminar los efectos de las operaciones concretas realizadas sobre ellas —o *por* ellas—, o bien ser usadas como instrumentos para la “simple” observación de aquello que ocurre naturalmente. Como suele suceder, muchos de estos descubrimientos suelen estar motivados por demostrar que la concepción del mundo que guio muchos de los descubrimientos anteriores es una concepción equivocada, en tanto no podría dar cuenta de algunos aspectos que no fueron considerados o bien no habían sido descubiertos aún. La concepción recibida por el siglo XIX es la del mecanicismo moderno y que será adaptada y refinada durante su transcurso. Si bien se suele aceptar que el mecanicismo que se recibe es la visión newtoniana del universo como un reloj mecánico, no es la única manera de interpretar el término ni la concepción que intenta atrapar. Siguiendo a Dijksterhuis (Dijksterhuis, 1950/1969), es conveniente considerar al menos tres interpretaciones del término:

- La del universo como “máquina”: esta es la visión que normalmente se le atribuye a Newton y que si bien es bastante anterior a habría recibido del autor inglés su coronación, en tanto sin importar la complicación de la máquina universal a fin de cuentas siempre estarían operando detrás de sus operaciones movimientos más bien simples, predecibles en principio con las leyes del movimiento. Para Newton la máquina en sí no era tan perfecta y necesitaba la intervención de Dios para ajustarla de

manera tal que pudiera seguir operando con normalidad. Probablemente la primera aparición explícita de esta concepción sea la popular introducción a los elementos de la astronomía ptolemaica *De sphaera mundi* escrita por Johannes de Sacrobosco alrededor del 1230 en la que se refiere al universo como “*machina mundi*” [la máquina del mundo].¹ El término latino proviene de la traducción del griego *mēkhanē* [μηχανή], que hace referencia a una grúa usada en el teatro griego desde el siglo V a.C. para introducir a los dioses en las presentaciones, y de ahí también el origen de la expresión “*deus ex machina*”. La principal razón que da Dijksterhuis para sostener que no es ésta la concepción que permitiría hablar de la “mecanización de la imagen del mundo” es que la imagen que subyace va en contra de la concepción no determinista del universo que tenían ya muchos griegos, especialmente los atomistas como Demócrito para quien “todos los procesos que ocurren en el mundo son absolutamente irregulares, movimientos puramente accidentales de diminutas partículas inmutables” (Dijksterhuis, 1950/1969, p. 495–6).

- La de la mecánica como ciencia del movimiento: de ésta interpretación existen dos posibilidades, una ligada a los métodos de la ciencia y otra que hace referencia a los “modelos mentales”. La primera se opone a una concepción teleológica del mundo en la que es necesario entender qué es lo que quiere lograr una máquina para entender por qué hace lo que hace, lo que implicaría conocer también a su creador, lo que puede resultar difícil cuando el creador está por definición fuera del alcance de la ciencia humana. Bajo esta mirada, entonces, el mecanicismo no plantea que haya que estudiar a los fenómenos naturales como máquinas sino como “sistemas mecánicos”, descomponiendo en movimientos más simples y más fáciles de entender como los de mecanismos reales como engranajes y poleas —ejercicio elemental de la ciencia clásica— o mecanismos prototípicos generales tales como “el impacto” y los remolinos de Descartes, que podían ser usados para explicar fenómenos mucho más generales como el movimiento de los planetas y el desplazamiento de la luz. La otra posibilidad de interpretación atiende a que el término muchas veces fue empleado en relación a tener un modelo mental recurriendo a estos movimientos cada vez más abstractos, en los que la conexión con los instrumentos mecánicos simples se pierde en favor de imágenes mentales más completas. La coronación de esta tendencia está en el concepto de fuerza de Newton, al que se consideró como la característica principal del mecanicismo ya lejos de las máquinas originales. Como bien señala Dijksterhuis: “incluso al más habilidoso de los mecánicos le es imposible construir aparatos en los que los objetos materiales se mueven por consecuencia de su gravitación mutua; sin embargo, se continuaba designando a las explicaciones gravitacionales del movimiento planetario como mecanicista” (Dijksterhuis, 1950/

¹Si bien por “mundo” se refiere al universo o a “los cielos” y no a la Tierra, el libro contiene varios argumentos a favor de la creencia de que la Tierra también es una esfera.

1969, p. 497).

- La interpretación matemática: esta última es a la que suscribe el mismo Dijksterhuis, quien sugiere que la mecanización de la imagen del mundo debería interpretarse en término de la gradual incorporación de las matemáticas en la descripción básica del comportamiento de los fenómenos naturales. “Mecanístico” queda así descrito como “con ayuda de la mecánica” y esta queda desprendida del estudio particular de las máquinas a ser ahora una rama de la física que estudia los fenómenos naturales que se mueven de acuerdo a las leyes del movimiento de Newton. La matematización no es un mero recurso de economía del lenguaje, sino que es un elemento esencial de esta ciencia ya sus conceptos básicos son matemáticos y abstractos, como la definición de fuerza, que muestra con claridad que la descripción matemática, pero metafísica del mundo como ya proponía Platón es accidental y externa, al igual que la versión psicológica o subjetiva que puede estar detrás del concepto de fuerza en un modelo mental (Dijksterhuis, 1950/1969, p. 500).

Estas tres formas de interpretar al mecanicismo tranquilamente pueden verse en un continuo, con muchas zonas de solapamiento, propio del progreso de la empresa científica, que a medida que desarrolla nuevas herramientas para comprender un fenómeno puede ir reemplazando las toscas imágenes de antaño por imágenes con mayor resolución hasta que una descripción más general y abstracta permite, en el nivel adecuado de descripción, realizar cierta economía intelectual epistémicamente provechosa. En los capítulos 4 y 7 trataré con más profundidad la descripción de alto nivel de estas estrategias, de la mano de los “nuevos mecanicistas”, quienes han dado los primeros pasos en utilizar estrategias propias de los modelos de sistemas complejos para entender la dinámica científica. Lo que me interesa ahora es mostrar cómo la falta de herramientas conceptuales que pudieran ser aplicadas para entender fenómenos tan complejos como la vida forzaban a quienes intentaban hacerlo a miradas bien motivadas, pero incapaces de dar respuestas lo suficientemente satisfactorias como para ser aceptadas o bien a tener que introducir conceptos que parecían estar lejos del alcance del método científico como se lo entendía en ese momento.

Una instancia de la primera propuesta es el intento de Descartes en el siglo XVII de dar una explicación de las funciones corporales de alto nivel por medio de una analogía con el funcionamiento de las máquinas, invitándonos a que las funciones de los organismos como la alimentación, la respiración e incluso una parte de las cualidades mentales

sean consideradas todas estas funciones sólo como consecuencia natural de la disposición de los órganos en esta máquina; sucede lo mismo, ni más ni menos, que con los movimientos de un reloj de pared u otro autómatas, pues todo acontece en virtud de la disposición de sus contrapesos y de sus rudas. Por ello, no debemos concebir en esta máquina alma vegetativa o sensitiva alguna, ni otro principio de movimiento y de vida. Todo puede ser explicado en virtud de su sangre y de los espíritus de la

misma agitados por el calor del fuego que arde continuamente en su corazón y cuya naturaleza no difiere de la de otros fuegos que se registran en los cuerpos inanimados. (Descartes, 1664/1980, pp. 116–117)

Sus intentos de dar una descripción mecanicista de la formación y el funcionamiento de las plantas y los animales son consecuencia del reemplazo general de la concepción aristotélica del mundo, aunque nunca llegó a publicar en vida una presentación de sus ideas probablemente por considerar que sus logros todavía no eran lo suficientemente abarcadores.² En su “nueva física” no hay diferencia cualitativa entre la materia celeste y la terrestre, mucho menos necesita recurrir a una noción de forma substancial para explicar el ordenamiento de la única materia que existe ahora, que sólo posee las propiedades de forma o figura, el movimiento, el tamaño y la manera en la que están organizados (Descartes, 1664). La diferencia que encuentra Descartes entre lo que vive y lo que no lo hace, ya no está en la clase de materia que lo compone, sino en poseer o no un alma, entendiendo por alma no otra cosa que “mente”, la razón por la que podemos pensar, querer, recordar conscientemente y dudar. Los animales no humanos simplemente no tienen alma —en lugar de un alma sensitiva como proponía Aristóteles— por lo que le era necesario dar una explicación del comportamiento de los animales y de las plantas en términos de las “limitadas” capacidades de la nueva materia, quedando así estos seres vivos reducidos a meros autómatas.

Más allá de las especificidades —y la verosimilitud— de las explicaciones propuestas de Descartes al origen, la formación y el funcionamiento de lo vivo, nos interesa señalar en este trabajo la manera en la que el siglo XIX reaccionó a estos intentos de “reducir” la complicada vida de los organismos a las simples y, en general, a las concepciones mecanicistas del mundo.³

2.2. El vitalismo científico de Xavier Bichat

Quizás no sea una exageración decir que la gran pregunta científica y filosófica con la que se enfrentó el siglo XIX fue la de qué hacer con la explicación mecánica de los fenómenos

²Dada su identificación de las ciencias naturales con la matemática y ésta última como medio de conocimiento ineludible, es probable que Descartes haya considerado a sus explicaciones sobre biología insuficientes por todavía estar enmarcadas en la primera forma de mecanicismo y lejos de ser susceptible a una explicación que se pueda identificar con la matemática de una manera más análoga a como había logrado hacerlo con sus consideraciones sobre la física. Escrito alrededor de 1630, *El hombre* sería publicado recién de manera póstuma, traducido al latín en 1662, y en francés en 1664, como parte de *El Mundo*, como era originalmente. La recepción de esta obra es una parte fascinante de la historia de la ciencia y en particular de todos los intentos de concepciones corporalizadas de la cognición. En esta investigación me concentro en apenas un sector de la punta del iceberg, un mejor y autoritativo mapa es (Antoine-Mahut, 2016).

³Para más detalles sobre la concepción cartesiana de los animales recomendamos el exhaustivo trabajo de Gary Hatfield (G. Hatfield, 2008). Sobre la mecanización de los aspectos más humanos, ver Hatfield (G. Hatfield, 2012) y Schmitter (Schmitter, 2008).

naturales y con la representación de la imagen del mundo que puede traer aparejada. Uno de los primeros desafíos que recibió con respecto a la concepción de lo viviente fue la del vitalismo, de la que nos ocupamos brevemente ahora.⁴

En su versión más sencilla, el vitalismo es la posición que sostiene que en todos los seres vivos opera algún principio que no puede ser reducido a las operaciones básicas que realizan sus elementos y es éste principio el responsable de que los seres vivos sean efectivamente vivos. Es decir que hay una diferencia fundamental entre las propiedades de lo vivo y de lo meramente físico o, en una versión quizás algo más débil, que están regidos por principios diferentes. Decir “que no puede ser reducido” no implica que los vitalistas no puedan recurrir a una clase de reducción metodológica, en la que la investigación de los cuerpos vivos opere descomponiendo las funciones de los mismos hasta encontrar aquellos elementos que tienen la propiedad vital que se considera sólo disponible en esta clase de cuerpos y que pareciera que no puede explicarse apelando a los elementos que los constituyen. Ésta última estrategia fue a la que recurrieron los vitalistas cuya actividad científica se centraba en la fisiología experimental, como el caso de Xavier Bichat (1771–1802). En su *Recherches physiologiques sur la vie et la mort* publicado en 1800, el fisiólogo francés empieza por definir a la vida de manera abstracta como “la totalidad de aquellas funciones que resisten a la muerte”, ya que “[e]l modo de existencia de los cuerpos vivos es tal que todo lo que les rodea tiende a su destrucción” (Bichat, 1800/1809, p. 1) . La taxonomía general de la vida tiene dos categorías: la vida orgánica (o vegetativa) y la vida animal. La primera, encargada de las funciones vitales autónomas, es caracterizada por una plena irregularidad de sus componentes, pequeñas diferencias entre distintos especímenes de una misma especie, una multitud de causas operando a lo largo del cuerpo, y una “casi continua sucesión de modificaciones que, alternando entre alargar y acortar el círculo de estas funciones, nunca los deja en un estado fijo” (Bichat, 1800/1809, p. 26) . La vida animal, cuyo centro de operaciones es el cerebro, en cambio, está caracterizada por la simetría de los componentes y la armonía de sus operaciones, lo que es por sobre todo necesario para evitar que el cambio constante y la multiplicidad de sensaciones impidan la voluntad y el juicio humanos. El esfuerzo intelectual de Bichat en esta obra y en gran parte de su empresa científica es justamente el de encontrar las razones por medio de las que se pueda explicar estas diferencias entre las clases de vidas y sus operaciones específicas, sin recurrir *a priori* a ciertos principios fundamentales como lo habían hecho algunos vitalistas anteriores, como el caso del alma y los movimientos tónicos preferidos por el químico, médico y filósofo alemán Goerg Ernst Stahl (1659–1734).⁵ A ellos les critica explícitamente

⁴La otra gran corriente “reaccionaria” es la del energeticismo, cuya descripción adecuada, lamentablemente requiere más energía y tiempo de la disponible en este trabajo.

⁵Aunque habría creído en la existencia de los átomos, su posición en química también era antimecanicista. Quizás el lector lo recuerde por haber recurrido a la teoría del flogisto de Becher (1635–1682), que había sido publicada en su *Physica subterranea* de 1667, para explicar los fenómenos químicos. La contribución de Becher en su obra fue la de reemplazar a los elementos naturales clásicos provenientes del mundo griego por tres formas de tierra (*lapidea*, *fluida* y *pinguis*), siendo la presencia de ésta última la razón por la que las

por haber “procurado descender del estudio de la naturaleza hacia el de sus fenómenos, en lugar de ascender desde lo que lo señala la observación a lo que es sugerido por la teoría” (Bichat, 1800/1809, p. 64), por lo que podríamos clasificar a Bichat en un vitalismo de otro orden, uno que pretende responder al método científico en tanto es consciente de la incapacidad de encontrar las causas primeras de todos lo que ocurre en la naturaleza y de la facilidad con la que la búsqueda de éstas causas y la infinidad de deducciones que de ellas se pueden hacer, pueden llevar más hacia el error que hacia el conocimiento. Hay, pues, en Bichat un primer intento de darle a la “ciencia de los animales” el lugar que le corresponde identificando el nivel de análisis propio para sus principios y leyes, en claro contraste con las de las leyes de las ahora “ciencias auxiliares” de la fisiología como la física y la química. La inherente irregularidad de los fenómenos biológicos, en particular los concernientes a la vida orgánica, hacen a la principal diferencia que tienen las leyes vitales con las leyes físicas, lo que implica la imposibilidad de aplicar un mecanicismo matemático para comprender la naturaleza de lo viviente:

La invariabilidad de las leyes que gobiernan a los fenómenos físicos nos permite calcular todas las ciencias de las que son objeto, mientras que si aplicamos la matemática a las acciones de la vida no puede ofrecernos reglas generales. Uno puede calcular el retorno de un cometa, la resistencia de un fluido al pasar por un canal inerte, la velocidad de un proyectil, mas calcular con Borelli la fuerza de un músculo, con Keil la rapidez de la sangre o, como [Lavoisier] la cantidad de aire que entra en los pulmones, es construir un edificio sólido sobre arenas movedizas, que pronto caerá a falta de cimientos fijos. (Bichat, 1800/1809, p. 66)

Esta irregularidad propia de los fenómenos vitales, que impide a la fisiología recurrir a una explicación mecánica de corte matemático, también le obliga a descartar otras técnicas como el análisis químico, dado que la naturaleza de los fenómenos que estudia la química es la misma que la que está detrás de las regularidades de la física. Bichat le llama a todos estos intentos “cálculos metafísicos”:

La inestabilidad de los poderes vitales ha sido el obstáculo a todos los cálculos metafísicos del pasado. Las variaciones habituales de los fluidos vivientes, que se derivan de esta inestabilidad, pueden ciertamente considerarse un obstáculo no menos serio incluso a los análisis químicos del presente. [...] La física y la química se aproximan porque las mismas leyes gobiernan sus fenómenos, pero es un espacio inmenso el que las separa de la ciencia de los cuerpos organizados, ya que existe una enorme diferencia entre dichas leyes y aquellas de la vida. Decir que la fisiología es la física de los animales no es sino dar una idea imperfecta de lo que es, de la misma manera en la que podría decir que la astronomía es la fisiología de las estrellas. (Bichat, 1800/1809, pp. 66–67)

substancias inflamables podían sostener la combustión. Stahl fue quien extendió y dio forma a la teoría del flogisto además de proveer la primera evidencia experimental, iniciando lo que se suele llamar la revolución química del siglo XVIII, dejando atrás la “época oscura” de la alquimia.

Reconocer este espacio inmenso que separa la vida de los cuerpos organizados de la fría existencia de las regularidades mecánicas le obligan a Bichat a reconocer que la fisiología está obligada a revisar los conceptos básicos a los que recurre para explicar el funcionamiento de la vida, incluso a cambiar el lenguaje empleado, de manera tal que los fisiólogos no se vean confundidos por emplear los términos que se encuentran en las disciplinas de las regularidades. Bichat hace una referencia al término “economía”⁶ para referirse al nivel propiamente biológico:

Es fácil ver, después de lo que se ha dicho, que la ciencia de los cuerpos organizados debería ser tratada de una manera enteramente diferente de aquellas que tienen por su objeto a los cuerpos inorgánicos. Sería necesario usar un lenguaje distinto, ya que la mayor parte de las palabras que traemos de las ciencias físicas a la de la economía animal o vegetal continuamente nos recuerda a ideas que no tienen conexión alguna con los fenómenos de esta ciencia. (Bichat, 1800/1809, p. 66)

Si bien el principio explicativo al que va a recurrir Bichat es de corte netamente vitalista, en tanto no busca reducir las operaciones de los cuerpos vivos a los efectos de las propiedades físicas y químicas de éstos, al menos algunos efectos y propiedades del “poder vital” pueden ser estudiados al punto de poder establecer correlaciones entre lo que ocurre dentro del cuerpo y sus manifestaciones. Los poderes vitales tienen el mismo estado en fisiología que la ley en física. Para determinar la centralidad de este principio, Bichat realiza una taxonomía—con clara aspiración linneana—de las propiedades de los órganos, en la que el criterio más importante para la identificación de la clase es si son propias de la vida o dependen de su organización y de la textura de sus tejidos. Los poderes vitales se clasificarán según provean la capacidad de sentir estímulos del exterior o bien si a través de la contracción pueden dar origen al movimiento. Todos los poderes vitales vienen en dos especies, de acuerdo a si le son propios a la vida animal o a la vida orgánica. Ahora bien, existen fuentes no vitales de la contractibilidad, que radica en la naturaleza de los tejidos que lo conforman. Hay una propuesta que se puede leer como mecanicista, en tanto permite descomponer a los cuerpos hasta los tejidos y predecir sus propiedades y funciones de acuerdo a la textura que los compone. Para los lectores más contemporáneos y para los historiadores de la medicina, es en los trabajos “más científicos” de Bichat sobre los distintos tejidos en donde se encuentran sus principales aportes a la medicina, ya que permitieron establecer ciertos vínculos entre la patología orgánica y la patología celular, pese a no haber utilizado un microscopio para sus trabajos. Recién la aparición teórica celular propiamente dicha, principalmente promovida por Rudolf Virchow siguiendo los pioneros trabajos de Theodor Schwann, obligarían a descartar a los 21 tejidos básicos identificados por Bichat como los elementos básicos que constituyen los órganos. Lo que

⁶Según los diccionarios de la época, era común usar el término para referirse a la “disposición o arreglo de una obra, como la economía de un poema” o directamente a “las operaciones regulares de la naturaleza en la generación, nutrición y preservación de los animales o las plantas; como en economía animal; economía vegetal” (Webster & Howe, 1828).

para esta investigación nos interesa rescatar es que pese a su vitalismo, además de intentar establecer un límite para lo que la física y la química pueden hacer para la fisiología, hay un esfuerzo de identificar dentro de esta disciplina qué partes pueden ser explicadas por principios más básicos y cómo es que estos interactúan con los poderes vitales, lo que lo obliga a estudiar cómo es que el organismo está organizado. Hay claras referencias en su obra a “leyes de la organización” que no se refieren a la organización estructural de los órganos, sino a cómo éstos interactúan entre sí, siguiendo ciertos principios propios de la totalidad del organismo.

De la misma manera en la que en las ciencias físicas se puede explicar todo recurriendo a ciertas leyes fundamentales, en el nivel de análisis propio de la fisiología, las leyes de la organización y los poderes vitales tienen la misma capacidad explicatoria:

De las propiedades que acabo de explicar resultan todas las funciones y todos los fenómenos de la economía animal: no hay alguno que no pueda en un análisis final referirse a ellas, de la misma manera en la que en todos los fenómenos físicos nos encontramos con los mismos principios, las mismas causas, a saber, la atracción, la elasticidad, etc. (Bichat, 1800/1809, p. 92)

Creo que ya se puede apreciar cómo Bichat está motivado por una clara comprensión de la dificultad —a convertirse en imposibilidad— de *reducir* las explicaciones de los seres vivos a las leyes de la física y de la química. Mas la forma en la que sugiere investigarlos, dotando a la fisiología de una serie de principios propios cuya organización estructural y sus interacciones (que pueden ser estudiados descomponiendo los fenómenos para determinar dicha organización) se puede comprender como un intento de aplicar una clase de mecanicismo como método de investigación en fisiología. Por este motivo creo que, aunque propiamente un vitalista, Bichat puede recurrir a un «mecanicismo metodológico».⁷

La profundización y complejización que se produciría en la biología ya en el mismo siglo XIX hicieron que los trabajos de Bichat, interrumpidos por su temprana muerte, fueran atacados por demasiado simplicistas y casi metafísicos, dado el rol central de los poderes vitales. Uno de los golpes más fuertes que sufrió el vitalismo —aunque no mortal— fue la síntesis de la urea lograda por Wöhler en 1828, que se considera el primer caso de

⁷ Quizás como era de esperarse, el término “mecanicismo metodológico” también es altamente polisémico. Una concepción distinta y muy interesante de una clase de mecanicismo metodológico es la que señala Salvatico como la “mecanización de los medios de producción del conocimiento [...]. Varios autores del siglo XVII concibieron métodos que, aplicados a cierto conjunto de datos producirían, nuevos conocimientos. Dichos métodos se concebían como mecánicos en el sentido de que el resultado surgía automáticamente, sin la intervención de una mente creadora” (Salvatico, 2006, p. 32). Algunos contextos actuales de producción de conocimiento científico dependen de procesar grandes volúmenes de datos por medios automatizados indican una clara vigencia de concepciones en esa dirección, que sin duda también hacen a uno de los espacios metodológicos de una ciencia de los sistemas complejos. Algunos de estos aspectos son trabajados a lo largo de esta investigación; mientras que otros señalamientos pueden encontrarse en (A. A. Ilcic & Reynoso, 2018).

una sustancia orgánica creada en condiciones de laboratorio desde componentes no orgánicos. Esto alimentó las posiciones reduccionistas, incluso en fisiología, como es el caso de Claude Bernard, quien a la vez, como podremos observar a continuación, era consciente de la especificidad de las “teorías” de la biología.

2.3. La fisiología mecánica de Claude Bernard

Claude Bernard (1813–1878) es considerado por muchos como el fundador de la medicina experimental moderna. Más allá de los numerosos resultados científicos que logró mediante la experimentación, entre los que se destacan el descubrimiento de la función del páncreas en la digestión (1848) y la aislación de la glicogénesis en el hígado (en 1857), la razón por la que algunos historiadores le otorgan este título honorífico radica en sus contribuciones a una metodología de la investigación científica en medicina, especialmente en su *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale* (Bernard, 1865/2005). El autor propone una metodología experimental que pueda funcionar como un ideal regulativo, lo que le obliga a evaluar, entre otras cosas, qué es lo que hace a una ciencia ser una ciencia, como clase de conocimiento con una propiedad distintiva en términos de su autoridad para hablar sobre los procesos naturales. Su claro objetivo de ataque son los vitalistas, quienes al considerar que había algo que se escapaba de la materia misma y que debía ser postulado como principio fundamental, negaban desde la partida el acceso de biología a la categoría de ciencia. Bernard considera que la única forma de mostrar el error de los vitalistas consiste en utilizar el mismo método experimental, que es la piedra de toque del conocimiento en física y en química, para demostrar que existe una continuidad entre los principios que rigen los cuerpos inertes y aquellos que regulan la vida. El determinismo, figura esencial de la ciencia, también está presente en las “máquinas vivas”, por lo que se puede estudiarlas por el método científico. Además de notar cómo una preocupación por cómo hacer ciencia en biología le obliga a Bernard a una mirada mecanicista de los cuerpos vivos, lo que nos interesa señalar para nuestra investigación es la presencia de numerosas tensiones en su obra, que provienen de reconocer que el método todavía no tiene las herramientas necesarias para poder ser aplicado a un fenómeno tan complejo como la vida y no entrever una clara manera de conectar estos puntos sin caer en un credo vitalista. Un claro ejemplo de esto es que Bernard debe introducir conceptos que en algunos momentos hasta parecieran ir en contra del mismo método que él propone, especialmente dado que su introducción no está justificada por ninguna teoría, como es el caso del *milieu intérieur* o mundo interno, que será expandido y bautizado como “homeostasis” por Walter Cannon en 1932. Veamos ahora con más detalles su propuesta científica para entender a la biología.

Para Bernard la esencia de la ciencia consiste en el determinismo, es decir en la posibilidad de conocer la “causa inmediata o determinante de los fenómenos” (Bernard,

1865/2005, p. 143). Dado que sólo podemos actuar sobre el determinismo o las causas de los fenómenos, cualquier intento de ir “más allá de los fenómenos” y postular alguna clase de principio sistemático que pueda estar operando por detrás es una actividad netamente anticientífica y de corte metafísico. Bernard no reconoce las razones dadas por los vitalistas que excluyen a los fenómenos de la vida del régimen de la física y de la química y especialmente aquellos que consideran que el método de estudio debe ser uno distinto al que se aplica para conocer los cuerpos inertes. El método experimental, que consiste en controlar y manipular las condiciones en la que se manifiesta un fenómeno para poder comprobar o descartar una hipótesis mediante la observación o la experimentación, también está disponible para el fisiólogo:

En efecto, hay un determinismo absoluto en todo fenómeno vital; por lo tanto, hay una ciencia biológica y en consecuencia todos los estudios a que nos entreguemos no serán inútiles. La fisiología general es la ciencia biológica fundamental hacia la que todas las otras convergen. Su problema consiste en determinar la condición elemental de los fenómenos de la vida. (Bernard, 1865/2005, p. 111)

Dados su problema y su método, la biología experimental puede proceder a enfrentarse a su gran desafío, que es la complejidad de los fenómenos que pretende estudiar, que dificulta la realización de las intervenciones experimentales:

Es preciso, pues, recurrir a un estudio analítico sucesivo de los fenómenos de la vida, haciendo uso del mismo método experimental que sirve al físico y al químico para analizar los fenómenos de los cuerpos inertes. Las dificultades que resultan de la complejidad de los fenómenos de los cuerpos vivos, se presentan únicamente en la aplicación de la experimentación; porque en el fondo el objetivo y los principios del método, continúan siendo exactamente los mismos. (Bernard, 1865/2005, p. 111-112)

Es por esta complejidad intrínseca de la vida que la biología, ciencia de la que constantemente Bernard nos recuerda el estado prematuro en el que se encuentra si se la compara con la física o la química de la época, “debe tomar a las ciencias físico-químicas el método experimental, pero debe conservar sus fenómenos especiales y sus leyes propias” (Bernard, 1865/2005). Una de las razones por la que la biología se encuentra en este estado temprano de desarrollo es porque no está en condiciones de dar leyes numéricas en el mismo sentido en que lo hace la física:

En biología, si se quiere llegar a conocer las leyes de la vida, no sólo hay que observar y constatar los fenómenos vitales, sino que además hay que fijar numéricamente las relaciones de intensidad en las que se encuentran los unos con relación a los otros. Esta aplicación de las matemáticas a los fenómenos naturales, es el objetivo de toda ciencia, porque la expresión de la ley de los fenómenos debe ser siempre matemática. [...] Ahora bien, pienso que las tentativas de este género son prematuras en la mayor parte de los fenómenos de la vida, precisamente porque estos fenómenos son de tal manera complejos, que junto a algunas de sus condiciones que conocemos, debemos

no solamente suponer, sino estar ciertos de que existe una multitud de otras que nos son aún absolutamente desconocidas. (Bernard, 1865/2005, pp. 226–227)

¿Cómo debe proceder, entonces, la biología para aplicar el método experimental y determinar las causas próximas de los complejos fenómenos de la vida? Es simple, ya que “no se trata, en efecto, para el fisiólogo más que de descomponer la máquina viva, a fin de estudiar y de medir, con ayuda de instrumentos y de procedimientos tomados a la física y a la química, los diversos fenómenos vitales cuyas leyes trata de descubrir” (Bernard, 1865/2005, p. 164). El principal argumento por el que Bernard defiende la aplicabilidad del mismo método experimental parece depender de la continuidad ontológica entre los niveles físico-químicos y los biológicos. Ahora bien, reconoce en estos últimos una diferencia que surge de la complejidad de su organización: a medida que el fisiólogo experimentador desciende en el interior de la máquina viva que está descomponiendo no puede dejar de notar que existen “determinismos internos”, los mismos que llevaron a los investigadores anteriores a postular principios vitalistas. Usando de nuevo la continuidad ontológica, Bernard no ve razón alguna para no creer que dentro de este “mundo interno” opera el mismo determinismo que se puede observar en el resto de los fenómenos. Es esta “separación de mundos” la razón por la que los organismos más complejos, i.e. las máquinas que han logrado perfeccionarse a sí mismas, obtienen mayor libertad del medio que les rodea. Algo semejante ocurre con las máquinas que crean los hombres, con la clara diferencia que a quien las estudia no le está vedado el proceso que las mantiene funcionando, por depender de un determinismo mucho más sencillo para su funcionamiento. Es con directa analogía con las máquinas artificiales que Bernard expone su creencia en un mecanicismo orgánico para defender el uso del mismo método experimental:

Las máquinas vivas están pues creadas y construidas de tal manera, que al perfeccionarse devienen cada vez más libres en el medio cósmico general. Pero no por ello deja de existir siempre el determinismo más absoluto en su medio interno, el que, a consecuencia de ese mismo perfeccionamiento orgánico, se ha aislado de más en más del medio cósmico externo. La máquina viva mantiene su movimiento, porque el mecanismo interno del organismo repara por medio de acciones y de fuerzas sin cesar renacientes, las pérdidas que entraña el ejercicio de las funciones. Las máquinas que crea la inteligencia del hombre, aunque infinitamente más groseras, no están construidas de otro modo. Una máquina a vapor posee una actividad independiente de las condiciones físico-químicas externas; puesto que en lo frío, lo caliente, lo seco y lo húmedo, la máquina continúa funcionando. Pero para el físico que desciende al medio interno de la máquina, esta independencia no resulta más que aparente, y el movimiento de cada rodaje interior está determinado por condiciones físicas absolutas, de las que él conoce la ley. De igual modo el fisiólogo, si puede descender al medio interno de la máquina viviente, encuentra allí un determinismo absoluto que debe convertirse para él en la base real de la ciencia de los cuerpos vivos. (Bernard, 1865/2005, p. 136-137)

Esto sigue sin resolver el problema de la dificultad de acceso al estudio de este *milieu interieur*, el que ahora es el objeto particular de estudio de la fisiología. Según Bernard, la única técnica a la que puede recurrir el fisiólogo para estudiar *in situ* este determinismo complejo es el de la vivisección:

Pero, ¿cómo conocer ese medio interno del organismo, tan complejo en el hombre y en los animales superiores, si no es descendiendo en cierto modo a él, penetrando en él por medio de la experimentación aplicada a los cuerpos vivos? Lo que quiere decir que, para analizar los fenómenos de la vida, es preciso necesariamente penetrar en los organismos vivientes con ayuda de los procedimientos de vivisección. (Bernard, 1865/2005, p. 171)

Estos comentarios, que podrían sorprender al lector moderno, son mucho menos desactualizados de lo que se podría esperar en primera instancia, dado que la vivisección y técnicas similares son todavía una de las fuentes de conocimiento indispensables en neurociencias y otras disciplinas biológicas. Así como la similaridad en las organizaciones entre los distintos animales le permitían a Bichat razonar analógicamente y justificar que los resultados obtenidos en una clase animal eran válidos para otra, encontramos en Bernard una consideración similar, ya que es la similaridad de funciones la que permite que el método de la vivisección aplicado sobre animales particulares pueda servir como fuente de conocimiento experimental sobre la fisiología animal general, incluyendo la fisiología humana. Ahora bien, en sus reflexiones acerca de las dificultades que se le presentan al fisiólogo para aplicar el método experimental sin más, Bernard reconoce que la biología presenta otra diferencia radical con la química y la física, que también se sigue de la importancia de su organización interna, y con la que el fisiólogo francés tiene claros problemas para dar una explicación de la misma que no recurra, nuevamente, a consideraciones vitalistas. Éste es el problema de la finalidad aparente de los cuerpos vivos.

Una de las ventajas con las que cuentan las ciencias elementales como la física y la química es que pueden, si es que no deben, considerar el sistema que estudian en total aislamiento del ambiente en el que se suelen encontrar. A la biología, en cambio, le está vedada esa opción, ya que si en sus experimentos un fisiólogo no recuerda que “existe en las manifestaciones de los cuerpos vivos una solidaridad de fenómenos muy especial”, este olvido le llevaría “incluso experimentando bien, a las ideas más falsas y a las consecuencias más erróneas” (Bernard, 1865/2005, p. 150). Para lidiar con este problema, el fisiólogo debe siempre considerar que el determinismo de los fenómenos de la vida que estudia “no es solamente un determinismo muy complejo, sino que al mismo tiempo es un determinismo armónicamente jerarquizado”, en el cual “una serie de fenómenos simples se determinan los unos a los otros asociándose o combinándose para un objeto final común” (Bernard, 1865/2005, p. 151). Bernard, de una manera bastante astuta, se abstiene de decir que la finalidad de estos determinismos complejos es la vida misma y se limita a hacer algunas analogías con la “solidaridad orgánica o social” que mantiene en los

cuerpos un movimiento constante, que los dota de cierto cierre circular, que les permite, mediante una jerarquía de determinismos, aislarse y protegerse del ambiente. La imagen que propone al pasar como correcta es la de un ouroboros o uróboro, imagen clásica usada ya por Platón para describir la perfección del cosmos, por los alquimistas para describir la unidad y organicidad cíclica de todo lo creado. El problema es que meramente recurrir a estas ilustraciones o ideas místicas sólo sirven para dar una imagen general, pero no se pueden utilizar para explicar el fenómeno de la vida, porque eso significaría caer en el problema de los antiguos y de los malos científicos. Lo que hay que hacer es, pues, describir el mecanismo que puede generar esta organicidad:

Estos puntos de vista, aunque tengan un lado justo, siguen siendo falsos en sus conclusiones generales, y han perjudicado considerablemente el adelanto de la ciencia. Es justo decir, sin duda, que las partes constituyentes del organismo son inseparables fisiológicamente las unas de las otras, y que todas concurren a un resultado vital común; pero no se podría concluir de ello que no hay que analizar la máquina viviente como se analiza una máquina inerte, cuyas partes tienen igualmente que desempeñar su papel en un conjunto. Debemos, tanto como nos sea posible, y con ayuda de los análisis experimentales, transportar los actos fisiológicos fuera del organismo; este aislamiento nos permite ver y captar mejor las condiciones íntimas de los fenómenos, a fin: de perseguirlos en seguida en el organismo para interpretar su rol vital. (Bernard, 1865/2005, pp. 154–155)

La herramienta que le permite a Bernard estudiar el difícil problema del determinismo complejo de los fenómenos de la vida es el de *milieu interieur*. Ahora bien, según nuestra lectura, Bernard no llega a “descubrir” esta herramienta, sino que la concibe, en términos contemporáneos, como un recurso teórico, que no puede comprobar experimentalmente, ya que funcionará como guía misma de los experimentos en fisiología. Puede llegar a esta idea mediante una reflexión acerca de los fundamentos de la incipiente disciplina científica, en la que se vio guiado por importar de la física y de la química no tanto el método de manera directa sino más bien la concepción mecanicista detrás de éstas, a efectos de justificar la aplicabilidad de dicho método en fisiología. Es decir que lo que promueve la cientificidad de la fisiología no es meramente el recurso experimental en sí, sino la concepción básica del mundo que está por detrás, que permite dicha metodología.⁸

⁸Con un conocimiento muchísimo más profundo de la obra de Bernard que el nuestro, Holmes (1986) describe con cuidado las distintas etapas que tuvo la concepción de Bernard del *milieu interieur* y las otras maneras de concebir mecanismos fisiológicos de regulación que surgieron a mediados del siglo XIX. Holmes sostiene, en contraste con quienes suponen que Bernard razonó de manera inductiva desde los resultados sobre la constancia de los niveles de ciertas sustancias en el cuerpo de los animales sujetos a distintos regímenes alimenticios, que “La fuente original de la idea parece haber sido una simple analogía entre la relación de los tejidos con sus fluidos circundantes y la relación de todo el organismo con su entorno [*ambient environment*]” (Holmes, 1986, p. 5). En vena similar a nuestra lectura, tras citar una de las primeras maneras en las que Bernard formuló abiertamente el concepto, el historiador agrega: “Acostumbrados como estamos a creer que en una ciencia como la fisiología las nuevas generalizaciones surgen principalmente de las investigaciones experimentales —convicción que Claude Bernard compartía—, podemos observar a partir de este ejemplo que el incentivo de tener que reflexionar sobre los fundamentos de la propia ciencia

Decimos que el *milieu interieur* es un recurso teórico en el sentido contemporáneo, ya que Bernard tenía otra concepción de teoría, una que de hecho va en contra de la posibilidad del principio que él propone. Una teoría no es más que una hipótesis que ha sido verificada por el método experimental, ya sea mediante la observación del mundo o mediante la intervención sobre él y la posible creación de fenómenos nuevos. Es ésta la manera en la que cree que puede avanzar la ciencia, ya que, si en lugar de buscar la comprobación experimental se busca la “comprobación” en la lógica, el investigador ha caído nuevamente en la trampa de los sistemistas. Su sugerencia, tras criticar al mismísimo positivismo de caer en la misma trampa por ser un sistema él mismo, es que “para encontrar la verdad, basta con que el investigador se ponga frente a la naturaleza y la interroge siguiendo la medicina experimental, con ayuda de medios de investigación cada vez más perfectos. Pienso que en tal caso, el mejor sistema filosófico consiste en no tener ninguno” (Bernard, 1865/2005, p. 387).

Fue no otro que Pierre Duhem quien criticara a Bernard por su concepción extremadamente naif del método experimental, en particular sobre su capacidad de decidir y poner a prueba la veracidad de *una* hipótesis particular, sosteniendo la primera variante de lo que hoy conocemos como la tesis Duhem-Quine, según la cual cuando se realiza un experimento no se comprueba sólo una hipótesis, sino todo un sistema sobre el que se apoya esta hipótesis y del que esta última es una parte, lo que impide la existencia de experimentos cruciales.⁹ Ahora bien, más allá de las fallas netamente filosóficas que se pueden encontrar en la propuesta metodológica general de Bernard, lo que nos interesó señalar es cómo la complejidad misma de los fenómenos que intentaba explicar de una manera mecanicista le obligaron a considerar un recurso externo a dicho método como elemento que pudiera explicar la espontaneidad de los fenómenos biológicos sin recurrir a términos vacíos y oscuros como “la vida”. Si bien, como ya mencionamos, Bernard era muy consciente del estado inmaduro en el que se encontraba la fisiología de su época y de la permanente perfectibilidad a la que se someten las teorías, no considera que parte del proceso de maduración de una ciencia nueva implica, entre otras cosas, la postulación y posterior ajuste, de principios que van más allá de la mera inducción de resultados experimentales, incluso cuando él mismo se vio en la necesidad de postular un principio con esas características. Es recién a comienzos del siglo XX en donde se puede notar el surgimiento de la biología teórica, variante de la biología que puede darle un rol primordial a un concepto mucho más fino de “teoría” que el que era común encontrar en el siglo XIX.

En lo que resta de esta sección buscaremos mostrar cómo detrás de dicho surgimiento de la biología teórica seguía operando un intento de dar respuesta a los mismos interrogantes sin recurrir a un reduccionismo simple ni a variantes del vitalismo original —posición que todavía tenía adherentes— pero conservando algo del mecanicismo que ha-

para enseñarlos también puede conducir a importantes conocimientos.” (Holmes, 1986, p. 8).

⁹Ver especialmente el capítulo 6 de la segunda parte de (Duhem, 1906/2003).

bía caracterizado a buena parte de la ciencia del siglo XIX. Es recién con la aparición de la Teoría General de los Sistemas que se vislumbra la posibilidad de explicar los fenómenos de la vida sin mecanicismos ni vitalismos, aunque no sin pagar cierto precio metafísico, como veremos en seguida en el capítulo siguiente, aunque a continuación nos detenemos en dos figuras claves en la historia de la cristalización de la biología teórica como campo disciplinar particularmente interesado por las explicaciones de lo complejo: Johannes Reinke y Jakob von Uexküll.

2.4. El rol conceptual de las máquinas en el surgimiento de la biología teórica

La “última” aparición y versión de un vitalismo se dio ya en el siglo XX, de la mano de los primeros trabajos que hacían directa referencia a tratarse netamente de biología teórica. El término es introducido por Johannes Reinke (1849–1931) en 1901, en su libro de introducción a dicha ciencia (Reinke, 1901). El claro objetivo en dicha obra es el de separarse de la línea de la biología empírica —aunque sin descartarla— y explicar los fenómenos biológicos desde posiciones más bien conceptuales. Reinke parece ser una figura un tanto descuidada en la historia de la biología, lo que quizás se deba a que lo que él entendía por una posición conceptual hoy comprendemos como algo de corte más bien filosófico, al punto en que en la actualidad cualquier lector lo consideraría más bien un trabajo de introducción a la filosofía de la biología que a la biología teórica. Sin embargo, también es un autor poco tratado en la historia de la filosofía de la ciencia por lo que aprovecharé una parte de este capítulo para marcar algunas de sus ideas que claramente influenciaron en la manera en la que se “resolvió” lo que a esta altura ya podemos denominar como el problema de la *antítesis mecanicismo-vitalismo*. Más allá del aporte propio como concepto para la biología teórica desarrollado por el mismo Reinke —la teoría de los *Dominanten* que exploraremos en breve— lo que nos interesa señalar es cómo ya en 1901 el autor diagnóstica hacia dónde deben dirigirse los esfuerzos para encontrar una respuesta un tanto más satisfactoria a dicha antítesis que la originalmente propuesta por Kant. Según mi lectura —y que espero poder ilustrar en las páginas que siguen— Reinke fue uno de los primeros pensadores recurrir a lo que en la actualidad entendemos como modelo científico como recurso heurístico a la hora de enfrentar la complejidad de un fenómeno a explicar, además de identificar un problema central en (y mediante) la idea de organización.

Lo primero a remarcar es la clara orientación filosófica de su obra. En los capítulos de la primera sección encontramos la manera en la que él entiende la relación entre la filosofía y la biología y en particular la defensa de que, dada la naturaleza de lo que está bajo estudio, la biología necesita de la filosofía para llevar a cabo su tarea científica. Esto se debe a que los problemas de la biología pueden ser empíricos (o accesibles [*erreichbar*]) o trascendentales (Reinke, 1901, p. 13). Es especialmente en esta última clase de proble-

mas en los que la biología teórica debe centrarse, recurriendo (y aportando) a la discusión filosófica sobre los problemas trascendentales, que son justamente los más difíciles de explicar, ya que sólo “son accesibles a nuestros pensamientos e imaginación, en los que la observación se detiene y comienza la ‘deducción’¹⁰” (Reinke, 1901, p. 13).¹¹ En uno de los primeros señalamientos a la necesidad desde una “mirada desde la totalidad”,¹² Reinke indica que además de atender a la filosofía, la biología debe estudiarse con respecto a la totalidad de los procesos de la naturaleza, ya que descuidarlos van en contra de la idea misma de obtener conocimiento acerca de cómo funcionan dichos sistemas vivos:

Por el contrario, quisiera enfatizar aquí que la biología estaría flotando en el aire si pretendiera ignorar la relación de los procesos vitales con la totalidad de los fenómenos de la naturaleza. En todas estas relaciones, la biología toca consideraciones filosóficas y evadirlas sería sólo para su propio detrimento. Esto es porque se trata parcialmente de puntos de vista decisivos e impercederos, los cuales siempre deberán ser puestos en consideración en la ciencia biológica. (Reinke, 1901, p. 13)

Una posición similar sobre la necesidad de la filosofía para la biología se podrá observar en la sección siguiente, que trata brevemente la obra del otro padre de la biología teórica —y quien también fue una profunda influencia para Bertalanffy—, Jakob von Uexküll. En ambos se encuentra un esfuerzo intelectual enorme por superar la “pobre” solución kantiana original, que pese a que como *solución* debe ser actualizada, sigue siendo parcialmente válido el reconocimiento del problema y su continuidad; dicho sea de paso, esta es otra tensión característica, entre la inmediatez y efimeridad de los datos, sensaciones y experiencias por un lado, y la en comparación relativa persistencia de las elucubraciones teóricas.

El primer diagnóstico que realiza Reinke al revisar la historia hasta ese entonces del debate entre los vitalistas y los materialistas (o mecanicistas) es que ambas son concepciones extremas o radicales que se definen por oposición a la concepción que atacan, pero que justamente por ese motivo no pueden avanzar en la solución al problema,

¹⁰Reinke sustantiva el verbo alemán *erschliessen* que puede significar “deducir”, pero también “abrir”, “desarrollar” y “revelar”.

¹¹Señalamiento que, pese a sus años, hoy bien podría aplicarse a casi toda área de la empresa científica. Pese a su gusto casi platónico por la tradición oral, me atrevo a poner por escrito una sugerencia que muchos escuchamos decir al Prof. Rodríguez en varias ocasiones, algunas más especulativas que otras: “A ojo de buen cubero o a *grosso modo*, suele poderse dividir un área del conocimiento de la naturaleza en tres grandes clases de acuerdo a su ‘relativa distancia’ de lo que se tome por ‘mundo’ en un momento determinado: una zona de trabajo más empírica, una teórica y otra especulativa”. No sólo creo que esta expresión es válida, también creo no es una parte menor de la reflexión filosófica en torno a las ciencias poder señalar las conexiones y la necesidad de estas tres aproximaciones complementarias. De ser necesaria una referencia bibliográfica un poco menos platónica —en términos de metodología filosófica—, (Margenau, 1935) es un buen lugar para empezar la exploración.

¹²Como se señaló en las secciones anteriores y se insiste en las posteriores, estas “miradas desde la totalidad” son un presagio de las “miradas de la complejidad” necesarias para entender a los sistemas complejos de los mundos naturales y artificiales y, casi paradójicamente, algunos de los más simples.

que debería incorporar los mejores elementos explicativos de cada uno, ya que, evidentemente, ninguna posición por sí sola puede pretender explicar dichos fenómenos. Es por esta razón que no sólo necesita encontrar una posición intermedia, sino al mismo tiempo crear un campo disciplinar propio en donde la misma pregunta por dicha posición intermedia tenga sentido. Ahora bien, por ser teórica esta disciplina no pretende separarse de los resultados de las investigaciones empíricas sino, más bien, complementarlos. La biología teórica es “esencialmente sintética” en tanto se alimenta de la empiria —cuyo fin es el mero incremento de datos o materiales— teniendo como objetivo una simplificación [*Vereinfachung*] de dichos materiales o datos (Reinke, 1901, pp. 29–30). Una gran parte de la tarea de simplificación debe ser la de “unir los puntos” en las descripciones del comportamiento de los organismos. Antes de comparar la tarea de la biología teórica con la de un lingüista que debe reconstruir una gramática desde el vocabulario de un idioma —una metáfora bastante adecuada para la biología de sistemas contemporánea—, Reinke señala que

Mientras el análisis divide a los fenómenos en procesos elementales llevados a cabo por mecanismos elementales, la síntesis busca encontrarles a todos los elementos el ligamento [*Band*] que los conecta con los sucesos biológicos; y casi de manera inconsciente aspiramos a la mayor simplificación posible de la intuición [*Anschauung*].(Reinke, 1901, p. 30)

Así el objetivo de la biología teórica se vuelve dar una explicación, lo más simple posible, de cómo los mecanismos elementales interactúan entre sí para lograr la “acción biológica”.¹³ Una de las primeras decisiones de Reinke es dar una definición de vida completamente abstracta, cosa de quedar lejos de las definiciones que buscan reducir la vida a un principio fundamental e inaccesible (como el “poder vital” de los vitalistas) pero también de cualquier movimiento o mecanismo básico como pretenden los materialistas. La palabra “vida” no es más que “un concepto general, una abstracción, una síntesis” (Reinke, 1901, p. 33) y es sólo a través de una descripción sintética que la biología puede cumplir su tarea de explicar la “conexión legaliforme *gesetzmässige* entre forma y función, ya que sólo la demostración de las leyes constituye una descripción completa de la naturaleza” (Reinke, 1901, p. 38). Llegar a esta descripción no es tarea fácil y la propuesta de Reinke para llegar

¹³Esta inconsciente (aunque no siempre) tendencia hacia la suposición de mecanismos simples —que uno tranquilamente podría denominar “la tentación de la navaja de Ockham”— tiene un rol casi de ideal regulativo y que si bien muchas veces ha sido provechosa, hay casos en los que puede resultar un obstáculo para el progreso científico. Hacia el final de esta investigación notaré algunas particularidades de las “paradojas de la complejidad” (o del doble filo de la navaja de Ockham) en tanto lo complejo no siempre necesita causas complejas y a veces lo simple necesita explicaciones muy complejas. De hecho aquí ya vemos cómo estaría operando una suerte de explicitación de la creación y determinación de entidades sobre la base del conocimiento que se puede tener de ellas, sólo para permitir que el ciclo empiece nuevamente. Esto es, en términos que también se introducen más cerca del final, la abstracción que se realiza en principio metodológicamente como medio para hacer más manejable el fenómeno que se pretende conocer, conlleva una *proyección ontológica* que luego puede tomarse como base “en el mundo” sobre la que construir tanto nuevo conocimiento como nuevas entidades.

a la misma tiene dos partes fundamentales. La primera es lograr una primera síntesis de lo que la biología ha logrado hasta ahora, ya que tanto las explicaciones mecánicas como las vitalistas han logrado, en definitiva, explicar algo acerca de cómo funcionan los organismos vivos. La segunda, es encontrar usando esta nueva perspectiva el “lugar” en el que dicha conexión legaliforme entre forma y función pueda ocurrir. Cumplidas estas dos tareas esenciales, lo último es dar una explicación de dicha conexión en términos de una teoría biológica. Veamos ahora cómo lograr la primera síntesis.

2.4.1. El vitalismo “maquínico” de Reinke

Según Reinke, las dos posiciones extremas del vitalismo y el mecanicismo han cometido cada una un error fundamental. La primera en generar un principio explicativo vacío de contenido científico y extremadamente abarcador, la segunda en perder de vista lo fundamental de los seres vivos y, en el proceso, intentar reducirlos a las mismas operaciones que caracterizan al mundo inorgánico. El siglo XIX, como vimos en el capítulo anterior, es un siglo de transición para la biología, en el que cada nuevo descubrimiento de las ciencias básicas que podía ser incorporado a las explicaciones biológicas hacía que el vitalismo perdiera adherentes, especialmente por su falta de “cientificidad”.¹⁴ Ahora bien, los éxitos del materialismo en biología aparecían más por contraste con el vitalismo que por méritos propios, ya que gran parte de lo que todavía no era reductible a una explicación física o química debía recurrir a principios de una suerte de orden superior. El “gran error” del materialismo es abstraer demasiado y en dicho proceso suprimir la complejidad de las explicaciones biológicas:

El ideal era una fórmula matemática, no sólo para la célula, sino que sirviera también tanto para un rosal como para los hombres, que prestara una expresión exhaustiva de los fenómenos de la vida. De esta forma el materialismo se reveló como una abstracción que sin cuidado alguno dejaba de lado las imponentes dificultades. Su proceso era esencialmente deductivo, en tanto comenzaba por la premisa de que en los seres vivos no había ninguna otra necesidad ni conexión que no estuviera ya en lo inanimado, rechazando como inadmisibles a toda explicación que no siguiera esta demanda dogmática. (Reinke, 1901, p. 51)

¹⁴ Desde una mirada todavía más metafilosófica, quizás una de las figuras más influyentes en la lenta conversión a una “materilización” de las explicaciones vitalistas que pudiera mantener la necesidad teórica de conceptos teleológicos sin tener que apelar a fuerzas vitales de naturaleza distinta es Hermann Lotze (1817–1881). Lotze puede verse como un pionero del giro anti-idealista en la filosofía alemana que buscó recuperar a Kant pero intentando incorporar a los sistemas filosóficos los avances científicos de la época, sin por eso que la filosofía pierda su rol como contribuyente de sentido en las cosmovisiones. Gran parte de las filosofías del siglo XIX y de comienzos del siglo XX pueden verse como una respuesta, a veces indirecta, a posiciones sugeridas o críticamente reconstruidas por Lotze. En algunos contextos científicos, quizás su influencia se haya visto un tanto apagada por la de otro médico con el mismo nombre de pila y también devenido filósofo: Hermann von Helmholtz (1821–1894), quien particularmente en epistemología era mucho más naturalista —si es que no psicologista— que Lotze. (G. C. Hatfield, 1991) es un excelente punto de apoyo para comenzar a desentramar esta historia.

El principal problema del materialismo no es tanto el objetivo (dicha “fórmula matemática” que se aplique a todo lo viviente) sino más el método por el cual pretende llegar a dicha descripción, ya que en la tarea de abstraer y simplificar el fenómeno a explicar se termina causando la misma desaparición del fenómeno. Es en parte por esta clase de observaciones que considero que Reinke es uno de los primeros científicos y filósofos en atender *filosóficamente* a la idea de modelo científico y las dificultades epistémicas que atañen a los mismos, en particular el de cuándo una idealización ha ido demasiado lejos, al punto tal de ya proveer explicaciones más bien vacuas sobre lo que se cree que ocurre en la naturaleza. Es así que Reinke considera a esta clase de explicaciones materialistas, tan vacías de contenido —y científicas— ellas mismas como las explicaciones de la vida por alguna clase de “poder vital” a las que pretenden reemplazar. En su “abstracción de las fuerzas de la naturaleza inorgánica”, el materialismo cometió el “error lógico de incluir a las plantas, a los animales y a los hombres” (Reinke, 1901, p. 52). Si bien ambas posiciones son extremas y radicales, el “error lógico” de cada una de ellas es distinto, ya que en el materialismo hay buenas razones (como el éxito de las explicaciones en física y en química) para atender a una reducción de lo biológico en dicha dirección; mientras que en el caso del vitalismo hay también una sobre simplificación, pero no yace tanto en las explicaciones sino en el fenómeno mismo de la vida y la complejidad de los procesos biológicos. Reconociendo que las explicaciones energéticas o materialistas han avanzado en su capacidad para explicar cada vez más fenómenos, incluso los que tratan sobre el substrato energético básico de las células, Reinke busca identificar cuáles son las características esenciales de los organismos vivos que requieren ser explicados por la biología misma y que hacen a su campo de estudio propio y que no podrían ser reducidos a las explicaciones de las “ciencias básicas”. En sus palabras:

Estos fenómenos producen un remanente al interior de los procesos de la vida que se pueden denominar como específicamente vitales y cuyas leyes especiales deben ser estudiadas por la biología, ya que son diferentes de las leyes de la naturaleza inorgánica. (Reinke, 1901, p. 53)

Inmediatamente agrega en un comentario que demuestra la influencia kantiana que la búsqueda de explicaciones energéticas puede permanecer como una regla metodológica de manera tal de “reducir a un mínimo los procesos ‘vitales’ restantes” aunque sin embargo dicho mínimo “puede siempre permanecer como un mínimo considerable” (Reinke, 1901, p. 53).

¿Cuáles son, entonces, las características básicas que son específicas al mundo de los organismos? Reinke identifica tres: la organización funcional,¹⁵ la reproducción y la

¹⁵El término alemán que usa Reinke es *zweckmässig* y habla entonces de “die zweckmässige Organisation”. He decidido traducirlo como “funcional” ya que pese a la carga semántica del término creo que representa mejor la idea de “tener un propósito” o “ser adecuado para” que es lo que pretende dar cuenta Reinke y es, según mi lectura, lo que pretendía Kant también al introducir dicho término en la *Crítica del Juicio*.

inteligencia. Estas características constituyen lo que Reinke denomina “principio de vida” [*Lebensprinzip*] que define de una manera muy distinta al poder vital del vitalismo y que a mi juicio representa un punto clave en la historia de la ciencia, puesto que representa por qué es necesario generar una entidad a estudiar que dé cuenta de lo esencial de un fenómeno natural y que funcione como medio para estudiarlo, ya no *pese* a su abstracción sino gracias a ella. Dice Reinke, pues, que dicho principio “no es una fuerza, sino la expresión simbólica de un intrincado mecanismo de transmisión [*verwickeltes Getriebe*] de numerosos efectos individuales por cuyo resultado la funcionalidad [*Zweckmässigkeit*] resplandece por doquier” (Reinke, 1901, p.55, el énfasis es mío). La posición intermedia que pretende exponer Reinke consiste en reconocer que existen dos “abstracciones o principios globales que gobiernan la naturaleza: el principio energético y el principio de vida, el primero funciona causalmente, el segundo de manera causal-teológica” (Reinke, 1901, p. 55). Según mi lectura Reinke es uno de los primeros en abrazar la idea de mantener la dualidad descriptiva y explicativa de ambos principios o, en términos más contemporáneos, podríamos decir plantear una mirada no reduccionista en la que varios modelos de distinta naturaleza son necesarios simultáneamente para brindar la mejor explicación posible y no final (en el sentido de que pueden ser corregidas con el tiempo y el avance científico) de un fenómeno intrincadamente complejo.¹⁶ Así a Reinke le parece que el materialismo “ya puede ser superado por una intuición [o concepción, *Anschauung*] que se puede denominar mecanístico-vital [*mechanistische-vital*] que hasta ahora no ha sido formulada ni tan fácilmente como el vitalismo ni tan consecuentemente como el materialismo” (Reinke, 1901, p. 49). La pregunta que surge es cuál es el componente más *mecanístico* de la biología teórica que permite estudiar lo vital. Al igual que Bernard, Reinke ve en el estudio de las propiedades de las máquinas construidas por el hombre una forma de acercarse a esta pregunta por la naturaleza de lo viviente aunque ahora él no pondrá el énfasis sólo en los aspectos “deterministas” que hacen funcionar a una máquina, sino en cómo la misma está configurada para incorporar la funcionalidad o propósito *para* la que fue diseñada. La “inversión” de Reinke con respecto a la forma en la que Bernard pensaba al estudio de las máquinas vivas es que el estudio no debe hacerse de la misma manera sino por analogía y de manera abstracta. Es decir, no se pretende “aislar a la máquina viva” y estudiarla de la misma manera en la que se estudia a una máquina sino, más bien, estudiando abstractamente qué es lo que hace que una máquina funcione como funciona poder aplicar las mismas ideas para explicar el fenómeno vital, pero incorporando en dicha descripción abstracta las posibles conexiones causales entre las partes. “Los organismos”, dice Reinke, “son aparatos construidos funcionalmente [*zweckmässig*]” y eso es lo que comparten con las máquinas, “las que por medio de la configuración funcional [*zweckmässig*] de sus partes utilizan correctamente [*zweckmässig*] la energía operativa que se les provee” (1901, p.

¹⁶Esta postura clave de la necesidad de múltiples modelos es presentada desde la discusión contemporánea en filosofía de las ciencias en la tercera parte de esta investigación, aunque como ya se podrá observar en esta breve historia del surgimiento de los modelos y del estudio de la complejidad, es uno de los hilos conductores principales.

56). Inmediatamente agrega que según su parecer “uno de los problemas más importantes de la biología es el de si toda funcionalidad orgánica está basada en la funcionalidad de las máquinas [*Maschinenzweckmässigkeit*]”. En su propia teoría de los *Dominanten* va a explicar que la razón de la funcionalidad de los animales y de las plantas yace en que comparten la misma *configuración* que provee su funcionalidad a las máquinas, aunque admitirá que lo que todavía no puede explicar dicha teoría son las funciones psicológicas o mentales [*Geistesfunctionen*] del hombre.

Antes de pasar a la siguiente subsección, que pretende explorar con más detalle la respuesta de Reinke a esta pregunta fundamental de la biología, considero que puede resultar útil señalar algunas de las influencias que operan detrás de su obra. Por un lado, Reinke había sido un atento lector de la obra de Bernard, al punto de sugerir que se consideraba en gran medida en concordancia con su pensamiento. Si bien no hace explícito que haya obtenido la idea para nombrar a su posición mecanístico-vital de personajes como Bernard, Reinke cita un breve pasaje de una obra de Bernard en la que encuentra resumida su actitud científica en la que hace referencia a un término similar:

No es la acción lo que es vital y de esencia particular, es el mecanismo lo que es específico, particular, sin ser de un orden distinto. La doctrina que profeso podría ser llamado *vitalismo físico*; creo que es la expresión más completa de la verdad científica. ((Bernard, 1879, p. 219); citado en (Reinke, 1901, p. 57), el énfasis es mío) ^{II}

Este pasaje proviene de capítulo segundo tomo del capítulo XIV de un libro póstumo de Bernard titulado *Lecciones sobre los fenómenos de la vida, comunes a los animales y a los vegetales* [*Leçons sur les phénomènes de la vie, communs aux animaux et aux végétaux*]. En dicho capítulo, Bernard pretende reivindicar la posición filosófica de Lavoisier y no tanto sus resultados científicos. En uno de los hechos más importantes de la historia de la ciencia del siglo XVIII, Antoine Lavoisier llevó a cabo el primer ataque sistemático contra la teoría del flogisto, que hasta ese entonces era la manera ortodoxa de describir el proceso de combustión de los elementos. Si bien varios químicos de la época se encontraban haciendo experimentos con el “aire deflogizado” (el oxígeno) y el “aire inflamable” aislado por Henry Cavendish, todos los resultados se interpretaban dentro de la teoría del flogisto. Uno de los experimentos de Lavoisier (realizado en colaboración con Laplace) logró sintetizar agua combinando oxígeno e hidrógeno, lo que por primera vez hizo que el agua dejara de tener el rol de elemento fundamental que había ocupado durante mucho tiempo además de dar una mejor explicación de por qué los ácidos liberaban hidrógeno al reaccionar con ciertos metales y de lo que ocurría en el proceso de combustión. Claramente no es este el resultado que ataca Bernard en el capítulo mencionado sino el intento de Lavoisier y Laplace de reducir un fenómeno fundamental de la vida como el de la respiración a un mero proceso de combustión. Escribiendo ya un siglo después Bernard comenta sobre las “numerosas y decisivas” críticas que dicha teoría y sus partes accesorias recibieron y porque “ya lo

único de ellas que puede subsistir es el principio general y filosófico de que no hay más que una ciencia y un solo orden de las fuerzas de la naturaleza” (Bernard, 1879, p. 204).¹⁷ Sin embargo, más allá del aprecio por este principio general que acercó la química a la biología, a la hora de dar una explicación más detallada de cómo es que el proceso de la respiración se da en los animales, Bernard se encuentra con un problema similar al que se encontró cuando pretendía explicar los determinismos internos, como pudimos apreciar en el capítulo anterior. Esto lo obliga a dar una postura “sintética”, que es la que aprecia Reinke, entre las posiciones “químicas” que intentan reducir lo que ocurre en el organismo a las reacciones que se pueden observar en el laboratorio y las explicaciones vitalistas que terminan explicando apelando, en el caso de los vitalismos metafísicos, a principios que están fuera del laboratorio y de los organismos. Bernard sugiere así la búsqueda de un “mecanismo vital específico al agente vivo”, que será el objeto propio de estudio de la fisiología (Bernard, 1879, p. 218).

Por otro lado, es necesario destacar que Reinke está claramente influenciado por un rechazo a las posturas darwinistas de la época, de una manera similar en la que también rechaza a las explicaciones de la biología empírica. La principal dificultad que encuentra en el mismo es su incapacidad de explicar el origen de la vida, dado que si se produjo por accidente debería haber sido un accidente demasiado improbable y que va en contra de cualquier concepción del orden de la naturaleza,¹⁸ del que Reinke está convencido, probablemente dadas sus creencias religiosas:

El origen de los primeros seres vivos desde el material inorgánico no fue acto alguno

¹⁷Un excelente ensayo sobre la teoría de la respiración de Lavoisier y sus modificaciones, en particular sobre como el rechazo temporario de las conclusiones biológicas de Lavoisier permitieron llevar al estudio de la respiración desde la teoría del calor y del metabolismo al progreso dado por las teorías fisiológicas, es (Culotta, 1972).

¹⁸Esta idea de la regularidad de la naturaleza no solo tiene un trasfondo religioso. De hecho si bien la Alemania del siglo XIX fue uno de los lugares en el que la teoría de Darwin recibió las mejores y más rápidas recepciones —en particular gracias a la pronta traducción (e interpretación) de George Bonn. La otra razón para la rápida aceptación fue la popularización y desarrollo de la teoría llevada a cabo por Ernst Haeckel (1834-1919), en quien la lectura de la obra de Darwin en 1864 produjo un profundo impacto. De hecho Haeckel es conocido por su gran intento en su obra *Morfología General* de 1866 de generar una síntesis entre la postura darwiniana, la concepción lamarckiana de la evolución y la *Naturphilosophie* característica de los filósofos alemanes de comienzos del siglo XIX, incluyendo a Friedrich Schelling y a Goethe. En dicho intento Haeckel inventó los términos de ontogenia y filogenia, y presentó su teoría evolucionaria de la historia de la vida, resumida en la frase “la ontogenia recapitula la filogenia”, apelando así a resultados de la embriología dada la falta de registros fósiles para llevar a cabo una tarea similar. Una excelente presentación de la importancia para la recepción alemana de Darwin sobre la traducción y el ensayo final que realizó Bonn del *Origen de las especies* es (Junker, 1991). La figura y la obra de Haeckel ha sido muy criticada a lo largo de la historia de la biología; sin embargo, se trata de una pieza fundamental para entender la dirección que tomó la biología en el siglo XIX y se trata también de uno de los precursores de los intentos de unificar las visiones del mundo que provenían de la ciencia y de la filosofía, ya no directamente desde la filosofía como fue el caso de Lotze (ver nota *supra*) sino desde la ciencia. Con un claro cambio de método y con un objetivo mucho más acotado, la influencia de Haeckel también puede notarse en la obra de Reinke. Sobre la vida y obra de Haeckel, uno de los trabajos más detallados disponibles es (Richards, 2014).

de la necesidad —ya que [si lo fuera] debería repetirse siempre— ni un acto del azar, ya que sería demasiado improbable, demasiado inaudito, en una palabra, impensable; en cambio, se trata de un acto de libertad creativa. Esta perspectiva no me es difícil puesto que estoy convencido de la razonabilidad del orden del mundo y no de su irracionalidad. (Reinke, 1901, p. 561)

Reinke sostiene la necesidad de una causalidad externa al mero mundo del material inorgánico para comprender la emergencia de la vida, algo similar deberá asumir para explicar el surgimiento de la inteligencia en el hombre. No pretendo concentrarme en estos aspectos de la obra de Reinke sin embargo es un punto a tener en cuenta a la hora de comprender las motivaciones para buscar estas posiciones intermedias y, a su vez, poder reconocer los límites de cada una de las disciplinas y la evolución de los mismos, en tanto como el mismo Reinke ya reconocía, aspectos del mundo que sólo pueden ser abordados en un tiempo determinados por una “filosofía especulativa” pueden luego ser convertidos en un campo científico propio o parte de uno ya establecido gracias a nuevos descubrimientos, tanto técnicos como teóricos.¹⁹

2.4.2. La armonía legal de las máquinas organizadas

De manera tal de intentar asegurar el lugar entre las ciencias que le corresponde a la biología frente a los embates reduccionistas de la física, de la química y de todo materialismo radical, Reinke se enfrenta con el problema de dar una definición de ley de la biología que no se separe tanto de la concepción de ley en las otras ciencias y que sin embargo le provean el suficiente espacio para poder explicar los fenómenos propios de los seres vivos que tienen la aparente propiedad de surgir y mostrar un orden armónico. A su vez, dado el objetivo principal de la biología teórica —el de determinar qué tanto de la funcionalidad de los seres vivos puede ser entendido en términos de la funcionalidad de las máquinas—, Reinke debe encontrar la manera de conectar estos dos aspectos; el de descubrir leyes de la biología y justificar su descubrimiento mediante el estudio de las máquinas. Para lograrlo debe dar cuenta de por qué lo central tanto en las máquinas como en los organismos es la manera en la que estos están organizados. De esta manera,

Cuando formulamos una ley biológica, lo que buscamos obtener una *expresión para una secuencia ordenada de los procesos* en los organismos. A través de la ley buscamos presentar de una manera resumida los fenómenos que ocurren constantemente: por lo tanto, la ley se convierte en una descripción de los procesos. (Reinke, 1901, p. 153, el énfasis es mío)

Inmediatamente Reinke reconoce que la propia naturaleza de las leyes obliga a reconocer cierto “espacio de trabajo” para poder aplicarlas a distintos casos:

¹⁹La pregunta por el origen de la vida, en tanto una instancia del problema de la concepción de las denominadas “propiedades emergentes” y del origen de la complejidad, es uno de los núcleos de investigación en la Ciencia de los Sistemas Complejos, tratado brevemente en las secciones 5.2.9 y 7.1

Mas si la ley expresa la constancia de una acción, la ley se presenta a sí misma como una *abstracción* de fuerzas o una combinación de fuerzas [*Kraftcombinationen*]. En ello se puede reconocer una cierta *fluidéz* en los conceptos de ley y de fuerza. (Reinke, 1901, pp. 153–154. Los énfasis son míos)

A mi entender, estos son los dos supuestos esenciales que hace Reinke y que en retrospectiva nos permiten verlo como uno de los primeros científicos y filósofos en trabajar el concepto abstracto de modelo relacionado con una máquina en tanto una máquina es algo que puede verse como una “secuencia ordenada de procesos”. Según esta interpretación que propongo, el “espacio” o “fluidéz” que tiene el concepto de ley es lo que permite que una ley general sea adaptada para dar cuenta de un fenómeno particular.²⁰ Es esta misma fluidéz la que le permite a Reinke distinguir dos clases de leyes biológicas operando en los organismos, en cuyo interior ya operan las leyes físico-químicas. Las leyes biológicas pueden ser generales y pueden considerarse como “leyes biológicas básicas” [*biologische Grundgesetze*] (Reinke, 1901, p. 154). Sus ejemplos son una ley morfológica como la “ley del desarrollo” y una fisiológica como la “ley de la auto-preservación”. La biología teórica puede ir más lejos todavía y obtener leyes todavía más generales como la “ley de la armonía de las partes y las funciones”. Como veremos, son estas clases de leyes las que harán central al concepto de organización.

A su vez la biología puede encontrar leyes específicas y, para Reinke de esta variedad de leyes las hay en infinidad ya que la historia del desarrollo [*Entwicklungsgang*] de cada especie de organismos representa una ley. A su vez, estas leyes son interesantes porque pese a ser “leyes” deben incorporar alguna clase de flexibilidad que dé lugar a las posibles variaciones en el desarrollo de una especie y entre los individuos que forman parte de ésta. Así es que “en las leyes de las especies, como en todas las leyes morfológicas especiales, hay un cierto espacio de juego [*Spielraum*] en sus efectos, tal y como suele ser el caso con las leyes humanas” (Reinke, 1901, p. 155). Claro que este espacio de juego o de trabajo se encuentra limitado por el orden general operante dentro de la ley específica y de las leyes generales. Dado que la creación del cuerpo de un animal o de una planta no puede producirse “desde partículas de material almacenadas arbitrariamente” sino sólo por medio de una “dirección ordenada”, las leyes de la biología deben poder explicar dicha dirección de funcionamiento. Cualquier estudio del cuerpo de un animal o una planta tiene un único objetivo, este es el de “descubrir la conexión entre los órganos con sus funciones”, de lo que se podrá reconocer “por un lado, las funciones necesarias para la existencia de los organismos o de las especies, y por otro una demostración adecuada de la

²⁰En términos contemporáneos estaríamos dispuestos a afirmar que una ley es tan abstracta que necesita un modelo como mediador para ser una descripción de algo que efectivamente se presenta en el mundo. Según mi lectura, Reinke tiene esto en mente aunque no hace uso del término modelo. Cartwright (1983) ha sido una de las pioneras en sugerir este rol a los modelos científicos, que influyó profundamente en la reelaboración de esta idea por parte de Morgan y Morrison (1999), edición que ayudó a cambiar el énfasis en qué es lo que se entendía por “modelo” en el *mainstream* de la filosofía de la ciencia

forma [*Gestalt*] de los órganos para su función” (Reinke, 1901, p. 163). Así, es la función de cada parte la que debe ser estudiada, tanto de los componentes más grandes de un animal o una planta y la de sus elementos constituyentes, hasta las células mismas.

Hasta aquí se puede observar una cierta tendencia más bien reductiva, esto es, a explicar el funcionamiento de los órganos superiores por cómo trabajan los componentes que lo conforman; las partes *materiales* o *mecánicas* que lo conforman y que pueden ser estudiadas de manera más directa. Sin embargo, insiste Reinke, las acciones de las partes o los órganos son dobles (y, por lo tanto, también su estudio): por un lado, los órganos “trabajan en el sentido energético de la palabra, es decir, que [su trabajo] es realizado mecánicamente y que principalmente consiste en una transferencia [o aplicación, *Umsetzung*] química”. Al continuar describiendo la segunda clase de acción de los órganos, Reinke describe en qué consiste realmente un organismo: “Los órganos actúan en su trabajo de manera armónica y conjunta, y en ello consiste la esencia del organismo: la organización” (Reinke, 1901, p. 163). Estudiar este fenómeno y definirlo como la esencia de los organismos es lo que le permite a Reinke invertir el orden del debate entre el mecanicismo y el vitalismo y, en dicho proceso, construir el marco teórico que la biología necesita para estudiar el complejo fenómeno de la vida. La inversión radica en que es justamente el aspecto mecánico y maquinico, abstraído ya de la noción de material, lo que, casi paradójicamente, permitiría explicar lo más *vital* de los seres vivos. El problema fundamental de la biología pasa ahora a ser el estudio de la *organización* de los seres vivos como fenómeno en sí mismo. A mi juicio es ésta una de las principales contribuciones de Reinke al estudio de la complejidad de los organismos, y que será de profunda influencia para el estudio posterior de este fenómeno, en particular el llevado a cabo por von Uexküll y por von Bertalanffy, aunque con algunas diferencias como señalo más adelante.

Las preguntas que debe responder Reinke antes de dar su teoría general sobre los seres vivos son, precisamente, la de cómo entender a la organización y la de cómo estudiarla. Para dar su definición de organización, Reinke recupera las propiedades de las leyes e introduce el concepto de estructura:

La esencia de la organización consiste pues en una estructura especial del organismo y en los movimientos específicos del aparato mecánico que son condicionados [*bedingen*] por dicha estructura, los que son mantenidos por medio de fuerzas legalmente ordenadas. (Reinke, 1901, p. 164)

Sin mencionar directamente a las leyes de la termodinámica, pero que operan dentro del marco de las leyes específicas y generales de los organismos, la primera manera en que Reinke pretende introducir a las máquinas como una posible forma de estudiar a los organismos es reconociendo que los organismos toman energía del ambiente y que si bien siempre terminan por liberar un mínimo de energía de vuelta al ambiente en forma de calor, la mayor parte de la energía es usada para sostener la estructura y los movimientos

que la misma permite. Estos últimos son las propiedades generales que distinguen a los seres vivos de cualquier sistema material del mundo abiótico:

Es por medio de dicha estructura y por las particularidades de los procesos de movimiento que proceden de la misma que el sistema material de un organismo difiere fundamentalmente de todos los sistemas materiales de la naturaleza inanimada, incluso de los cristales; hasta cierto límite sólo encuentran semejanza en productos del conocimiento humano, a saber, en las máquinas y en los distintos aparatos cuyas funciones y operaciones son comparables a las de las máquinas. (Reinke, 1901, p. 165)²¹

Esto se debe a que las máquinas deben realizar una transformación de la energía que recibe de una fuente y convertirla en alguna clase de trabajo. La clase de trabajo que produzca la máquina dependerá de cómo sus partes estén arregladas. Si bien hay un claro límite en la analogía entre máquinas y organismos —y aquí Reinke reconoce la influencia de Descartes y especialmente de Kant— en tanto a fin de cuentas un organismo parece ser mucho más complejo y perfecto que una máquina dado que, por ejemplo, un ser vivo puede encargarse de su propio mantenimiento mientras que la máquina requiere de la intervención humana, Reinke ve que, bajo cierta interpretación de las máquinas (que ahora proviene de la biología teórica misma) la analogía está justificada como método de estudio de los seres vivos. La razón es que más allá de las diferencias, “tanto en la máquina como en el organismo hay dada una configuración de las partes esencialmente constante, en la que ocurre un flujo de transformación de energía por la ejecución [*Verrichtung*] de un trabajo mecánico” (1901, p. 166). Una intuición que parece tener Reinke es que debe existir alguna suerte de equivalencia entre el trabajo mecánico y la forma de energía que se está transformando, de manera que uno pueda convertirse en el otro y viceversa cuando la configuración es lo suficientemente compleja como para permitirlo. Así podría incluso hablarse de un *principio de conservación biológica* como una ley de alto nivel similar al principio de conservación de la energía. Reinke no es explícito en esto, pero las leyes más generales de la biología podrían inspirarse en las leyes más fundamentales de la física.

Ahora bien, Reinke sí es explícito en que el concepto de ley especial, como las leyes de cada especie de organismo, tiene lugar para la interpretación de las máquinas que puede darse de la biología, completando así uno de los pasos necesarios para poder recurrir a la analogía para beneficio de la biología:

En cada máquina se expresa²² una ley especial y también en esto coincide con el

²¹En este apartado e inconsciente del hecho, Reinke hace un aporte fundamental a la filosofía de la tecnología: serían las máquinas el medio a usar para entender el funcionamiento de los aparatos más simples y no los aparatos más simples el medio para entender a las máquinas más complejas. Probablemente la razón yace en el hecho de que los aparatos normalmente deben ser operados por un ser humano y su propia estructura termine por *ocultar* el verdadero e intrincado funcionamiento detrás del aparato.

²²El término en alemán es *verkörpern* que literalmente quiere decir “encarnar”, “tipificar” y hasta “representar”. En inglés está disponible el verbo “to embody”. He elegido traducirlo como “expresar” ya que creo que recoge mejor el sentido activo de la ley que quiere dar Reinke que quedarían algo más ocultos usando

organismo. La presión, el impulso y las acciones químicas actúan en la máquina sólo a través de su configuración específica dada de manera legaliforme; y así sucede tanto en la célula como en los organismos más organizados como las plantas y los animales. *Por lo tanto, la biología teórica está justificada para hablar de una ley general de la estructura maquina de los organismos* (Reinke, 1901, p. 166. El énfasis es mío).^{III}

La otra característica esencial que comparten las máquinas y los organismos es la de la funcionalidad. Este hecho vuelve fundamental a la analogía entre organismos y máquinas ya que es mucho más fácil para el biólogo estudiar la funcionalidad de las máquinas que la de los organismos, dado que el acceso tanto a sus partes como a su diseño —y diseñador— es mucho más sencillo. Así, si se acepta como válida al menos una parte de la analogía, dicha validez permite traspasar conocimiento de un campo al otro dado que la analogía ya fue recortada y apropiada por la disciplina científica que necesita aprovecharse del conocimiento de otra área. Este *insight* es clave para el desarrollo de una ciencia basada en modelos y especialmente para la Ciencia de los Sistemas Complejos y es en esta obra de Reinke donde se pueden observar los primeros esbozos de una posición filosófica acerca de la validez de la analogía abstracta entre campos disciplinares distintos como recurso heurístico para hacer que dichos campos progresen en términos de su capacidad de explicación sobre ciertos fenómenos.

Para Reinke, y tanto las máquinas como los organismos poseen una “funcionalidad inherente”, ya que ambas clases de entidades hacen uso de su configuración interna para hacer un uso funcional —o *con propósito*— de la energía que les está disponible, por lo que “precisamente en este aspecto las máquinas parecen copias [*Nachbildungen*] de los organismos” (Reinke, 1901, p 167). Si uno no pierde de vista que el objetivo de una “ingeniería inversa” de las máquinas es obtener una descripción general de cómo todas las partes de un mecanismo se integran para producir un comportamiento ordenado y funcional, uno no sólo puede estudiar un reloj de la misma manera que estudia una célula, sino que puede estudiar un reloj para explicar cómo funciona una célula, dado que en ambos se pueden observar cómo “de la misma manera en un reloj como en un organismo, tanto la naturaleza como el orden de las partes están motivados por su relación (correlación) con la funcionalidad del todo” (Reinke, 1901, p. 167). Reinke aclara por qué califica entre paréntesis a dicha relación como “correlación”, pero a la luz del párrafo siguiente, uno está tentado de dar una interpretación muy contemporánea (para nosotros) de dicha aclaración basándonos en las maneras en que es necesario *integrar* modelos diferentes en la ciencia actual. Reinke suena, así, al mismo tiempo extremadamente clásico y contemporáneo —lo que quizás puede indicarnos algo acerca de cierta atemporalidad en algunos problemas epistemológicos— cuando comenta qué clase de explicación es la que se gana con dicha analogía:

verbos como “representar” o “plasmarse”, o incluso “incorporar”, que pese a mantener la noción de cuerpo, no suele ser usado en este sentido sino más bien en el de “agregar”.

Con esto hemos ganado una explicación final de la estructura maquinaica de los organismos; dicha explicación, como toda explicación, es una descripción profunda. Habremos así llegado a la pregunta de si una explicación final puede ser acompañada por una explicación causal. [...] Mientras se decida aceptar la explicación sólo como una parte de la descripción, mediante el uso futuro de la analogía entre los organismos y las máquinas se podrá al menos llegar a entender la naturaleza de las dos clases de fuerzas funcionalmente activas y efectivas en ellos. (Reinke, 1901, p. 167)

Bajo mi lectura, que quedará un poco más clara después de la sección siguiente, encuentro en Reinke un claro reconocimiento de que la analogía entre las distintas clases de entidades tiene una clara intención modeladora y heurística en la que un modelo funcional o una comparación se propone como una parte de una explicación, como una propuesta temporal en busca de modelos aún más generales que permitan dar cuenta de un fenómeno tan complejo como el de la organización de las máquinas y de los organismos.

En la siguiente sección me concentro brevemente en la propuesta del mismo Reinke para completar dicha explicación. Si bien desde una perspectiva contemporánea podríamos tender a querer describir a su propia teoría como un avance poco prometedor en lo que concierne a la capacidad predictiva y explicativa de los fenómenos de los que pretende dar cuenta, encuentro que la forma en la que interpreta su teoría como un modelo abstracto es altamente significativa, no sólo para el desarrollo científico posterior, sino que es un claro ejemplo de uno de los primeros intentos de dar una interpretación filosófica de cómo dichos modelos se integran en un marco explicativo general, algo que debe ser un tenido en cuenta en las aproximaciones epistemológicas de la complejidad, si es que no para cualquier disciplina.

2.4.3. La teoría de los dominantes y las máquinas como modelos abstractos

En esta última sección de la investigación dedicada directamente a la obra de Reinke, quiero señalar algunos puntos en la forma en la que él presenta su propia teoría y que se pueden considerar como un primer intento de una metateoría de la complejidad y, a su vez, una reflexión interesante sobre los límites del conocimiento de la naturaleza y de la necesidad de postular entidades abstractas para entender su funcionamiento. Lo interesante es ver cómo ahora aplica la analogía entre las máquinas y los organismos para elaborar su teoría, una teoría que debe poder dar cuenta de por qué la misma analogía puede funcionar y, a la vez, de por qué los organismos son, todavía, mecanismos más complejos que las mismas máquinas. Encuentro a estas reflexiones de Reinke acerca de la naturaleza mecánica de las máquinas y de los organismos increíblemente cerca de lo que podríamos denominar una “proto-teoría de la información” y ahora intentaré mostrar por qué. Más allá de la influencia de Reinke sobre von Uexküll y von Bertalanffy, el rol clave de la noción de información como elemento fundamental para entender a los mecanismos no será bien comprendida

hasta los trabajos de Wiener y von Neumann, quienes teniendo el acceso a mejores y más complejas máquinas que el paso del tiempo les permitió, pudieron formular teorías abstractas del funcionamiento de los procesos de la naturaleza que integraran dicha noción de una manera más profunda y, a la vez, menos misteriosa o “vitalista”.

Para comenzar la descripción del “concepto general de los dominantes” [*allgemeiner Begriff der Dominanten*], Reinke recupera una idea que había sido señalada por Lotze acerca de cómo funcionan nuestras máquinas: con una “fuerza de segunda mano” (Reinke, 1901, p. 169) (Lotze, 1856, p. 81).²³ Esta fuerza debe de alguna manera particular ser ordenada de manera tal de poder permitirle a la máquina cumplir su función de transformar una energía o fuerza de primera mano en un trabajo efectivo. “Dominante” no es más que una expresión [*Ausdruck*] para cada una de estas fuerzas de segunda mano — hoy estaríamos tentados a leer “de segundo orden”— introducida por Reinke en su intento de demostrar que, así como dichas fuerzas operan en las máquinas, entidades semejantes deben encontrarse funcionando activamente en los organismos. Si bien de alguna manera van a depender de la energía del organismo o de la máquina, Reinke es muy consciente de que se trata de una entidad diferente, de distinta naturaleza: “Han de ser distinguidas de la energía, ya que ellas dirigen, controlan y transforman la energía, la concentran, la dividen y la regulan, mas nunca pueden por sí mismas convertirse en energía” (Reinke, 1901, p. 169).²⁴ Si la misma fuente de energía (como es el caso de un resorte tensado) puede dar lugar a comportamientos dinámicos muy distintos (Reinke pone como ejemplos a un reloj y a una caja musical), debe existir en el conjunto de fuerzas en acción sobre la máquina alguna parte que no produce de hecho trabajo mecánico alguno, sino que en combinación con su estructura dirige la transformación de la energía para lograr el efecto o resultado deseado. Esta parte del conjunto de fuerzas que no es energético hace al “sistema de dominantes del instrumento” (Reinke, 1901, p. 170). Así, los dominantes quedan subsumidos al conjunto de fuerzas. La nota distintiva es la posición netamente epistémica que bajo mi lectura realiza Reinke de este sistema de dominantes. Esto se debe a que si no introduce alguna clase de distinción (al menos interpretativa) de cómo comprender a dicho sistema, es muy probable que se lo acuse de introducir entidades vacuas tales como el mismísimo poder vital que quiere evitar. Su estrategia es considerarlos como una abstracción, como una heurística de investigación:

Al igual que los conceptos de fuerza y ley, el concepto de dominante es una abstracción de la efectividad [*Wirksamkeit*] de las numerosas causas individuales [*Einzelursachen*], un símbolo para las condiciones de los acontecimientos reales; una fórmula mecánica para la razón suficiente de los fenómenos, siempre que esta razón no sea energética. (Reinke, 1901, p. 170)

²³Ver también nota al pie sobre Lotze en p. 39

²⁴En lo que ya Reinke se acerca mucho a la conocida expresión de Wiener sobre la necesidad de que todo materialismo acepte que “información es información, no es ni materia ni energía”. Ver 3.3, p. 102 *infra*.

De esta manera, los dominantes se tornarían en una suerte de “centro de control”, dirigiendo la actividad de los mecanismos elementales y produciendo así la armonía que se puede observar en los organismos. Lo importante es que se trata de una entidad teórica y abstracta a la que se recurre para explicar, desde un orden superior, una función del organismo. El otro punto sobre los dominantes en el que va a insistir Reinke es en su capacidad de *dirigir* la energía disponible para producir un trabajo mecánico gracias a la estructura que puede convertir dicha energía en alguna clase de acción particular. Adelantándose de nuevo a la cibernética, compara a los dominantes con el timonero de un barco o con el curso de las vías de un tren y hasta con un organista, quien puede dirigir al instrumento de acuerdo a una serie de instrucciones para obtener la melodía deseada. Recuperando la analogía con las máquinas, comenta que “los dominantes actúan también en los organismos de manera legaliforme por medio de la causalidad natural, al igual que en las máquinas” e insiste en que no son fuerzas energéticas, sino que se tratan de “fuerzas sobreenergéticas [*überenergetische Kräfte*]” (Reinke, 1901, p. 172).

La pregunta que surge casi naturalmente es por qué tanta insistencia en su calidad de no ser energéticas. Aparentemente esto se debe a la clase de acceso epistémico que está disponible para comprender la acción de estas abstracciones, aunque quizás también quiera estar tomando distancia de las varias posiciones “energetistas” que surgieron principalmente durante el siglo XIX. Jakob von Uexküll, como veremos a continuación con algún detalle, tomará una posición similar respecto a este fenómeno, con una influencia kantiana más notable incluso que la que tiene Reinke. El conocimiento que podemos obtener de los aspectos energéticos que ocurren en el organismo es directo o no mediado [*unmittelbare*] y es el que puede ser estudiado mediante la biología empírica. Pero el conocimiento de los dominantes que nos es asequible es completamente mediado e indirecto. Reinke sugiere que podemos deducirlos solo negativamente, esto es, de los límites que conocemos de la naturaleza energética de los organismos y de su comportamiento morfológico. “La energía es externa mientras que los dominantes son internos y heredables, y hacen a una causa interna de los fenómenos del organismo” (Reinke, 1901, p. 172). Otra forma de conocerlos es apelando a las entidades cuyo sistema de dominantes es más fácil de estudiar (las máquinas) y, apelando a la analogía ya justificada, usar el conocimiento de las máquinas para explicar el fenómeno natural. Ahora bien, al recurrir a este conocimiento mediado ahora por la analogía, Reinke puede introducir también una distinción clara entre las máquinas y los organismos, ya que siguiendo el *dictum* kantiano, los organismos deben ser más complejos que las máquinas en algún sentido. Su forma de dar cuenta de esto es distinguir dos clases de dominantes, que denomina “dominantes de trabajo” [*Arbeitsdominanten*] y “dominantes de forma” [*Gestaltungsdominanten*]. “Sólo los primeros”, nos dice Reinke, “son directamente comparables con los dominantes de las máquinas; la actividad de los últimos va mucho más allá de las de las máquinas” (1901, p. 172). Así, el estudio de las máquinas sólo permite estudiar los procesos mecánicos que en conjunto

con la estructura producen en el organismo los efectos naturales. Lo que la analogía no puede explicar, entonces, es el proceso mediante el cual la estructura básica del organismo es formada originalmente: cómo, de hecho, se puede formar a sí misma mientras que en el caso de las máquinas se requiere de “la mano constructora del hombre” (Reinke, 1901, p. 174).

Ahora bien, este límite no le quita valor al rol de la analogía para estudiar a los organismos y, de hecho, ayuda a nuestra comprensión de las máquinas mismas, que si bien no es el objetivo propio de la biología teórica, la interpretación biológica de las máquinas que la analogía permite se puede tornar un recurso válido estudiar a estos dispositivos técnicos. La analogía con las máquinas le permite a Reinke dar cuenta de por qué los dominantes pueden ser un recurso explicativo para las otras propiedades fundamentales de los organismos: su finalidad, su funcionalidad y la dependencia de ésta de una fuente de energía. La energía por sí sola no puede contener finalidad ni funcionalidad por lo que es necesario que los dominantes de forma estén presentes en el organismo para explicar su finalidad —la tarea que cumple el diseñador y el fabricante humanos en una máquina— mientras que la presencia de los dominantes de trabajo permite dar cuenta de la funcionalidad. Su operación y efectividad, como todo evento en la naturaleza depende de fuerzas y por lo tanto todo objetivo y toda función que regulen los dominantes dependen de la energía disponible, a la vez que generan las instrucciones para convertir dicha energía en el trabajo específico necesario para el organismo. “En la finalidad de los dominantes la analogía con las máquinas se vuelve clara nuevamente”, sostiene Reinke, puesto que “en ellas el tamaño y la forma de cada eje, cada engranaje, cada tornillo, etc., [están] medidos objetiva [con un fin] y funcionalmente, y expresan un dominante funcional” (Reinke, 1901, p. 176). Lo mismo sucede en los organismos, pese a que estos puedan ir todavía un paso más allá dado que en ellos se puede observar el grado más alto de funcionalidad, que a las máquinas de su época todavía no les está disponible: “este grado mayor de funcionalidad se expresa en los dominantes de los que dependen la capacidad adaptativa de los organismos, la habilidad de reacciones finales funcionales y la autoregulación estructural” (Reinke, 1901, p. 177). Reinke no parece creer que pueda haber máquinas que tengan estas propiedades, aunque de nuevo su preocupación es estudiar los organismos y no las capacidades de las máquinas. Será von Uexküll quien usará directamente a la biología teórica para estudiar el límite de lo que se puede lograr maquínicamente, como veremos en la sección siguiente.

Si bien Reinke está lejos de sostener la posibilidad de que ciertas estructuras complejas emerjan armónicamente de las interacciones más básicas —es decir, sin un dominante de orden superior que dirija la interacción entre las partes— y mucho menos que la funcionalidad surja de manera espontánea dada la combinación de los elementos básicos, en su estudio teórico logra varios avances fundamentales que hasta hoy en día son necesarios para nuestra comprensión de los fenómenos más complejos de la naturaleza y

que serán redescubiertos constantemente en la breve historia de la complejidad, y cuya influencia se le puede atribuir indirectamente dada la influencia que su obra habría tenido en los científicos que encararon el mismo problema posteriormente. Ya he mencionado y explorado casi todas: la introducción de un concepto abstracto de modelo científico como recurso heurístico, el rol clave de la analogía con las máquinas, la necesidad de una posición intermedia entre el mecanicismo y el vitalismo, que se logra gracias a la analogía con las máquinas con la introducción de un principio explicativo abstracto como los dominantes, que son consecuencia de un estudio abstracto y teórico de lo que sucede en el organismo, sin por eso pretender ser la causa efectiva y mecánica de lo que “en verdad” sucede en el fenómeno que está siendo explicado,²⁵ concepto que en retrospectiva puede bien verse como una proto-teoría de la información, concepto muy utilizado —aunque no por eso bien definido— en la biología contemporánea, y que también resulta de extrema riqueza para el estudio de las propiedades de los sistemas complejos.

Hay dos aspectos más que quisiera señalar, en los que considero que sus intuiciones son correctas y que serán un problema que cualquier metateoría de la complejidad debe abordar. Más allá de lo simple o vagas que sean sus expresiones sobre las mismas, creo que deben ser apreciadas dado el temprano estado de la ciencia a comienzos de siglo. Por un lado, intuye la necesidad de dar cuenta de una estructura jerárquica y por otro lado la necesidad de una comprensión dinámico-estructural de los fenómenos, estando ésta última ligada a la naturaleza misma de los dominantes como teoría abstracta.

Con respecto a la necesidad de pensar en jerarquías, Reinke nota que más allá de cualquier interdependencia que las partes del organismo puedan tener cuando el organismo se encuentre totalmente desarrollado, cada parte se desarrolla por sí misma bajo la influencia de un dominante específico, dejando lugar incluso a que los dominantes de forma puedan tener cierta relación o influencia sobre otro (lo que puede explicar factores epigenéticos del desarrollo). Ahora bien, y en consonancia con las leyes generales de la biología, el organismo en sí “se desarrolla por las relaciones armónicas de dichas partes que dependen de un dominante general, que debe ser considerado como la causa de dicha armonía” (Reinke, 1901, p. 175). Así, habría al menos dos niveles para distinguir en

²⁵Esta posición con respecto a explicaciones “como-si” parece ser un punto de vista común entre los teólogos que debieron enfrentarse tanto a Kant como al avance científico, cuyo exponente más citado en la filosofía reciente es Hans Vaihinger (1922), quien, con justicia, es señalado como uno de los precursores de una de las interpretaciones filosóficas contemporáneas de los modelos científicos que se conoce como “ficcionalismo”, del que hay tantas variantes como ficcionalistas. El reinterés por la postura de Vaihinger se vio revitalizado especialmente por Arthur Fine (1993) y una serie de conferencias y trabajos posteriores dedicados al tema. La colección a cargo de Mauricio Suárez (2009) da cuenta de parte de la variedad de posiciones que pueden llamarse ficcionalistas para la interpretación de los modelos en ciencia. El énfasis se ha desplazado ahora hacia cómo interpretar las idealizaciones a las que se recurre constantemente en la práctica científica para producir modelos efectivos (ver, p. ej. Cassini & Redmond, 2021; Weisberg, 2013). Adelantando algunos puntos del capítulo siguiente, Vaihinger fue tanto influencia académica directa como amigo personal de von Bertalanffy.

una jerarquía de dominantes, en tanto los de forma pueden interactuar entre sí pero no pueden afectar al dominante general, el que, en su carácter de ley, sí puede afectar a los dominantes específicos.

El segundo aspecto aparece mencionado en varias ocasiones, pero el momento más claro es cuando Reinke se enfrenta a la pregunta por la razón de los dominantes (1901, p. 177). Enfatiza el hecho de que habla de “razón” o “fundamento” [*Grund*] y no de “causa” [*Ursache*] ya que “conceptualmente los dominantes son abstracciones lógicas de procesos reales”, de manera que “la pregunta por su causa última queda fuera del dominio de la ciencia natural, como es el caso con todos los otros fenómenos naturales”. Sin duda es una afirmación bastante fuerte y de neto corte kantiano, en tanto se ve obligado a aceptar a las abstracciones como la única forma de estudiar los fenómenos. Inmediatamente compara a los dominantes de los seres vivos con otras fuerzas de la naturaleza cuya verdadera causa está más allá de nuestras capacidades: “En lo que respecta a su causa, los dominantes son tan inexplicables como cualquier fuerza de la naturaleza, la gravedad, la inercia, la composición química”. Ahora bien, y siguiendo los pasos de Kant, quien en su momento también intentó ir un tanto más allá del famoso “*hypothesis non fingo*” de Newton, Reinke rescata la posibilidad de construir hipótesis acerca de las razones más inmediatas para dichos fenómenos y aquí nos encontramos de nuevo en el terreno epistémico en el que las analogías pueden de nuevo ser fértiles:

Tal hipótesis puede surgir nuevamente de la analogía entre los dominantes de los organismos y los dominantes de las máquinas. Los dominantes de estas últimas están basados en la estructura de los aparatos, en el tamaño y la forma relativos de las partes y en sus interacciones [*Zusammenwirken*]. La inferencia por analogía lleva pues a la conclusión de que los dominantes de los organismos también tienen su razón en la estructura del organismo. El concepto de dominante permite *simbolizar* la configuración de las partes a través del efecto sobre la energía. *La configuración es un concepto estático, mientras que los dominantes son el concepto dinámico correspondiente.* (Reinke, 1901, p. 177. Los énfasis son míos)

Así, es la analogía lo que permite construir la hipótesis acerca de cuál puede ser la razón próxima para explicar la estructura y el funcionamiento de los organismos. La funcionalidad de un aparato o de un organismo está supeditada a la estructura y a la dinámica que la misma permite para convertir energía en trabajo siguiendo a las “instrucciones” que están simbolizadas de manera abstracta en el concepto *lógico* de los dominantes. Tanto la estructura (la forma en la que están ensambladas) y sus interacciones (la dinámica general) son claves para entender la funcionalidad tanto de un aparato como de un organismo. La idea fundamental del materialismo clásico, que todo se puede explicar por el movimiento de partículas elementales, queda absorbida en este “mecanicismo vital” gracias a la introducción de un elemento abstracto que permite dar cuenta del surgimiento y mantenimiento de la estructura de los organismos y de la dinámica de sus partes. Así, “cualquier sistema

material puede ser explicado a través de su configuración y de su movimiento” (Reinke, 1901, p. 180).

Más allá de la simplicidad de sus explicaciones, las intuiciones de Reinke apuntan en la dirección correcta y, según mi lectura, la dirección a la que señalan es a la necesidad de desarrollar una ciencia que permita dar cuenta de cómo es que las interacciones entre los distintos elementos de un sistema pueden ser lo suficientemente ordenados para generar un comportamiento complejo y cómo el estudio de esta dependencia entre la dinámica y la estructura debe estar mediado por una descripción abstracta de los elementos que entran en juego. Su teoría de los dominantes bien puede leerse como una proto-teoría de la información, concepto clave para la biología contemporánea que no sólo tiene su lugar en el ADN, otra entidad que debe describirse dinámica y estructuralmente.

Como se podrá observar en las secciones que siguen, la influencia de Reinke es más que perceptible en la obra de otras figuras claves en lo que he dado a llamar la historia temprana de la complejidad, en particular se destaca su influencia sobre von Uexküll y von Bertalanffy. Von Uexküll reconoce desde temprano el rol que los modelos mecánicos pueden tener para la biología, pero será varios años más tarde en los que empieza a pensar en una biología teórica en el que el concepto de máquina sea llevado hasta el límite de lo que las máquinas de la época (y las posibles “teorías de las máquinas”) permiten describir, usando así la misma analogía de Reinke pero en sentido inverso. Von Bertalanffy, por el contrario, intentará sacarse de encima la referencia a las máquinas y en el proceso generar una estructura de trabajo teórico que pueda dar cuenta de por qué las analogías entre los distintos campos de conocimiento pueden dar lugar a modelos que se apliquen a fenómenos muy distintos, otro avance clave necesario para cualquier metateoría de la complejidad.

2.5. Jakob von Uexküll: de las máquinas a las supermáquinas

Cuando se ha agudizado la visión de lo divino y se ha descifrado la melodía de las plantas y los árboles, entonces se puede volver a decir que “una dríade vive en cada árbol”. La mitología emerge triunfante de la ciencia seca. Un renacimiento es posible aquí, y si se lograra, Alemania sería la tierra natal.

Carta de Von Uexküll a Houston Stewart Chamberlain (1921).

Uno de los resultados experimentales que más impresionó a los biólogos de fines del siglo XIX fue obtenido por el embriólogo (y posterior filósofo de la biología) Hans Driesch (1867–1941). La impresión se debió a que el resultado ponía en cuestión la forma mecánica

de entender el desarrollo de los embriones que reinaba en la época y sugería la necesidad de, nuevamente, postular principios vitales a modo de explicación. La concepción mecánica del desarrollo había llegado a su punto más alto con los experimentos con células embrionarias de sapos llevados a cabo por Wilhelm Roux (1850–1924) en Alemania a finales de la década de 1880. Tomando embriones de dos células, Roux logró usar una aguja a alta temperatura para destruir una de estas células y pudo observar que el embrión resultante consistía en la mitad del desarrollo normal del espécimen. Esto lo llevó a concluir que ya en la etapa de dos células el desarrollo del embrión se encontraba determinado y a postular su teoría de la embriogénesis por mosaico, en la que después de un número de segmentaciones (o clivajes), cada célula es responsable de una parte del desarrollo mecánico del embrión (Roux, 1888). Más allá de este resultado experimental y de la forma de trabajo asociada, todo el programa de investigación de Roux giraba alrededor de lo que él denominó *Entwicklungsmechanik* (es decir, mecánica del desarrollo) que buscaba explicar el desarrollo de los embriones desde un punto de vista mecánico y reduccionista, en tanto esperaba, a fin de cuentas, poder explicar dicho proceso apelando a las leyes de la física.

Influenciado por este programa, Driesch intentó replicar los resultados de Roux con otro organismo utilizando una técnica distinta, que no implicaba destruir células embrionarias sino separarlas y observar su desarrollo posterior. En 1891 realizó una serie de experimentos con embriones de erizo de mar, en los que logró separar las células y observar bajo el microscopio que, en lugar del resultado esperado de una larva mal formada, para su gran sorpresa, conseguía dos larvas bien formadas, si bien de aproximadamente la mitad de tamaño que las normales. Su conclusión inicial consistió en dar una explicación epigenética de lo acontecido, apelando a medios mecánicos. Si bien sus resultados entraban en contradicción con los de Roux, su primera interpretación permaneció en el marco de la comprensión mecánica reinante. En contra del determinismo celular, Driesch consideró que cada célula era totipotente, es decir que incluso cuando son separadas del embrión, cada una de ellas tiene la capacidad de convertirse en cualquier célula del organismo a desarrollar tal y como ocurre antes de la segmentación. Si bien todavía dentro del marco mecanicista, la concepción del organismo es bastante diferente ya que, si cada célula es totipotente, la especialización que sufren las mismas a lo largo del desarrollo debe explicarse por otra vía que la predeterminación temprana. Para esto Driesch apela a la interacción de las mismas bajo las condiciones normales. Más allá del debate con el mismo Roux y la evolución del pensamiento de Driesch, quien lentamente fue convirtiéndose al vitalismo ante su incapacidad de replicar sus resultados con otros organismos, lo que me interesa señalar es el impacto que tuvo este resultado en la obra de uno de los biólogos teóricos que más influencia tendría a principios del siglo XX: Jakob von Uexküll (1864-1944).

La obra del biólogo estonio es extensa y complicada. Por suerte se puede encontrar un creciente número de artículos y libros dedicados a su obra, especialmente motivada

por sus contribuciones a la biosemiótica y por la aparente influencia de su obra en los trabajos de importantes filósofos como Martin Heidegger y Maurice Merleau-Ponty. Más allá de algún excursus temporario en los conceptos más importantes de la obra de von Uexküll —como el de *Umwelt* (ambiente o mundo circundante) y el de *Funktionkreis* (círculo de función)— el objetivo de esta sección es explorar dos puntos presentes en su obra que han sido menos discutidos por esta creciente literatura y que atiende a dos puntos claves en el desarrollo de la historia temprana de la complejidad.²⁶ Se trata, nuevamente, del uso de los modelos (y de su interpretación) y de la propuesta de un estudio lógico de las máquinas, a fin de determinar qué les es posible hacer y, de esta manera, fijar el límite superior de cualquier explicación biológica que apele a dichas entidades artificiales. Una vez encontrado dicho límite, la introducción de explicaciones de corte vitalista estarían, al menos en principio, más que justificadas. Dicho límite funciona, a la vez, como piedra de toque para distinguir lo vital de lo meramente material, pero, a su vez, puede funcionar como una heurística de investigación una vez que ese límite ha sido superado, a conciencia de lo “ficcional” que puede ser el recurso.

2.5.1. Obra temprana: biología empírica y máquinas como modelos

En esta subsección me concentro en una de las obras del primer período de producción de von Uexküll, que pese a tratarse de uno de los momentos más empíricos de su trabajo no deja de estar repleta de reflexiones y motivaciones filosóficas.²⁷ De estas, deseo concen-

²⁶El interés actual por la obra de von Uexküll está especialmente ligado a indagar en sus contribuciones a la noción de ambiente o mundo circundante [*Umwelt*] y sus trabajos sobre los círculos de función [*Funktionskreis*], los que se pueden leer en la misma dirección que los mecanismos de autoregulación que caracterizaron a la cibernética temprana, por lo que von Uexküll habría sido uno de los primeros en explorar dicha clase de mecanismos. Si bien no hacen al corazón de este trabajo, es necesario definir estos conceptos cuidadosamente ya que forman los pilares de la concepción biológica de von Uexküll, implícitamente en su obra temprana y trabajados en detalle en la obra tardía. Por círculo de función, se entiende un ciclo cerrado autocontenido en un animal, el que mediante una estructura puede reconocer estímulos del mundo y responder a estos de una manera específica y crear estímulos nuevos en consecuencia de dicha acción (von Uexküll, 1920/1928, p. 100). Por ambiente, es necesario entender algo mucho más englobador que la “totalidad de lo que rodea a un sujeto”, para lo que se fija el término *Umgebung*, y tener en mente el mundo alrededor del animal tal y como es creado por él y, así, el conjunto de las acciones que el animal puede realizar sobre el mundo exterior y de los estímulos que provienen del mismo y que hacen al mundo interior del animal, gracias al que puede guiar su accionar.

²⁷Acepto y sigo la clasificación que hace Brentari (Brentari, 2015, pp. 55–56) de la obra de von Uexküll en tres períodos: el de educación y primeros trabajos desde 1892 a 1909, caracterizados por una exposición de resultados de su trabajo empírico. El segundo período comienza con la publicación de *Umwelt und Innenwelt der Tiere* [*Mundo circundante y mundo interior de los animales*] (von Uexküll, 1909) e incluye la publicación de una compilación de artículos que dejan en claro la necesidad de una justificación filosófica mucho más profunda para los resultados empíricos obtenidos, en la que a su vez cuestiona al darwinismo como base para una mirada biológica del mundo, recopilación con el sugerente título de *Elementos para una concepción biológica del mundo* (von Uexküll, 1913). El tercer período comienza con la preparación y publicación de su obra sobre biología teórica, en donde su estudio de las propiedades de las máquinas tiene su punto más alto y que es analizada en la subsección siguiente (von Uexküll, 1920/1928).

trarme en su caracterización de la biología, en los recursos que propone como método de estudio y en la clase de posición vitalista que comienza a elaborar y que recién tendrán su más clara exposición en *Biología Teórica* de 1920.

La obra más importante de este período es su *Guía para el estudio de la biología experimental de los animales acuáticos* [*Leitfaden in das Studium der experimentellen Biologie der Wassertiere*] (von Uexküll, 1905). En ella no sólo aparecen explicitados dos conceptos claves que acompañarán a toda su obra —el de funcionalidad [*Zweckmässigkeit*] y el de “plano de construcción” [*Bauplan*— sino que también hay un interesante primer uso de las máquinas como recurso heurístico para la investigación en biología, como si fueran un modelo del animal que se está estudiando. En esta obra, von Uexküll comienza por hacer una distinción clara entre el estudio de la naturaleza abiótica, que responde al orden de la causalidad, y el de los seres vivos que responde tanto al orden de la causalidad como al de la funcionalidad. Lo interesante es que desagrega —a manera de diagnóstico del estado y la dirección de la ciencia de la época— el estudio de lo vivo en lo que puede ser explicado por la causalidad y que le corresponde al campo de la fisiología y la biología, en cambio, se ocupa del estudio de la funcionalidad (von Uexküll, 1905, p. v). Si bien valida la científicidad de la fisiología y reconoce lo especulativa que pueden ser algunas instancias de la biología, su objetivo principal es el de dar cabida a las explicaciones biológicas que apelan a conceptos de corte vitalista, mas sin por ello perder la posición de ciencia. Aquí ya se puede observar un directo ataque a todos aquellos que consideran que la fisiología es todo lo que hay y tiene que haber con respecto al estudio de los seres vivos, es decir, un ataque contra los “meros mecanicistas”. Según von Uexküll, en la ciencia de la vida se puede observar un gradual crecimiento de una “corriente antibiológica” que consideró que el objetivo final de dicho estudio, embanderado por la fisiología, radicaba en la formulación matemática de la vida, descuidando cualquier actividad específica de las especies animales por tratarse de preguntas “no-científicas” [*unwissenschaftlich*] (von Uexküll, 1905, p. 4). Para la fisiología antibiológica hay solo dos clases de problemas, el problema de las cantidades de materia y el problema de las cantidades de fuerza. En esta dirección reduccionista, la ciencia de la vida perdió de vista lo que realmente caracterizaría a los seres vivos que es su capacidad de organizarse y la ciencia que puede estudiar dicha organización, que es la biología:

Y así fue como sucedió que en la última división de la ciencia de lo orgánico se perdió a la ciencia de la organización.

Ahora bien, la biología no puede ser completamente sofocada por la química fisiológica puesto que incluso el más radical de los químicos debe admitir que lo vivo es *al menos una máquina*, no algo meramente mecánico [*nicht bloss etwas Maschinelles, sondern zum wenigsten eine Maschine*]; no es algo que pueda ser meramente estructurado, sino que necesita de una estructura planificada, no es meramente algo orgánico, sino que es un organismo. (von Uexküll, 1905, p. 4. El énfasis es mío),

Curiosamente —si es que no un tanto paradójico—, son nuevamente las máquinas las que pueden “rescatar” a la biología del “reduccionismo mecánico”. Es gracias a la comparación con las máquinas que von Uexküll puede comenzar a desarrollar el lugar que le corresponde a la biología como ciencia de la organización de los seres vivos. Esto se debe a que el estudio de las máquinas presenta ciertas similitudes con el estudio de los organismos vivos. A esta altura de su obra, la clara influencia filosófica es Kant —a quien se refiere en apenas una nota al pie mencionando la *Crítica del juicio*— y no Reinke, quien sí será una profunda influencia (aunque silenciosa) en la obra tardía del estonio. El componente fundamental que extrae von Uexküll de nuestra capacidad de entender a las máquinas es el recurso al “plano de construcción” o *Bauplan*. De la misma manera en la que no podemos entender una máquina estudiando su estructura química y debemos recurrir a estudiar su estructura y organización de acuerdo al *Bauplan* propio de dicha máquina, el estudio de los seres vivos debe recurrir a una estrategia similar. La clara diferencia que hay entre las máquinas y los animales radica en el rol que el propósito [*Zweck*] juega en ellos: “las máquinas son funcionalidades [*Zweckmässigkeiten*] con un propósito” mientras que los organismos son “funcionalidades sin propósitos”, siempre interpretando dicha diferencia “desde nuestra capacidad de comprender” [*Auffassungsvermögen*] (von Uexküll, 1905, p. 6). Con esta frase von Uexküll comienza otro un juego kantiano a la hora de recurrir a las máquinas como posibles medios para obtener explicaciones para los fenómenos de los seres vivos. El propósito conocido de las máquinas puede ser usado para inferir algún propósito de las funcionalidades de los seres vivos, aunque el propósito propio del organismo siempre permanecerá desconocido por estar más allá de nuestra capacidad de entendimiento.

Si bien las caracterizaciones de las máquinas en esta obra temprana son limitadas y no van mucho más lejos de lo dicho hasta el momento sobre el rol del propósito, se pueden observar las semillas de sus reflexiones acerca de ellas que serán centrales en su obra posterior. En particular, en lo que von Uexküll insistirá a lo largo de toda su obra será en la autonomía del mundo animal en comparación con la dependencia de las máquinas de la actividad del hombre. Si bien en ambos hay un balance entre la forma y la energía, sólo en el caso de los animales este balance lleva a la producción de una entidad autónoma:

En los organismos animales encontramos una interrelación [*Wechselwirkung*] entre el uso de la fuerza y de la materia, las que dependen constantemente la una de la otra. [...] De esta manera surge una unidad [*Einheit*] que se separa del mundo circundante por medio de la clase de entrelazamiento de sus actividades químicas y físicas y lleva una existencia autónoma (von Uexküll, 1905, pp. 6-7).

Claro que dicha separación no es total ya que el animal interactúa con el mundo circundante para poder mantener dicha autonomía. Precisamente lo que caracterizará a la biología como ciencia es que puede diferenciarse de la física y de la química en tanto puede introducir explicaciones que den cuenta de este nivel de interacción entre el organismo y

el ambiente. Precisamente por este hecho es que considero que la importancia de su obra para una historia de la complejidad.

Los conceptos clave que introduce von Uexküll en este momento son los órganos receptores [*Rezeptoren*] y los órganos efectores [*Effektoren*]. Los primeros son los que le permiten al animal detectar señales en el ambiente que le son necesarias para su supervivencia mientras que los últimos son los que le permiten interactuar y responder a los estímulos, normalmente mediante movimientos, aunque también habla de respuestas químicas como las secreciones de sustancias. Consciente de que dichos órganos bien podrían ser explicados *mecánicamente* por la fisiología —y, por lo tanto, directamente reducibles a las explicaciones físico-químicas—, von Uexküll sostiene que a la biología no le interesa el contenido de materia y energía que lleva a cabo la acción sino sólo “la forma ordenada en la cual están conectados entre sí los movimientos [de energía y materia]” (von Uexküll, 1905, p. 8).²⁸ Este nivel un tanto más abstracto de explicación de fenómenos se vuelve el objeto de estudio propio de la biología y en gran parte consistirá en reconstruir, apelando a experimentos y otras conclusiones el plano de construcción del animal:

Y esta conexión de los órganos está de hecho presente [*vorhanden*]. Una parte es accesible directamente por la experimentación, una parte debe ser reconocida a través de laboriosas conclusiones sobre su apariencia parcial. A esta conexión general en la construcción y en el orden de los órganos, que permite la combinación de todas las actividades individuales en una actividad total, la denominamos el plano de construcción del animal. (von Uexküll, 1905, p. 9)

Uno de los casos concretos que fue muy estudiado en la época y que representa una de las formas básicas en la que los órganos receptores y efectores interactúan entre sí es el del arco reflejo y que von Uexküll aprovecha para introducir cómo éste debe y puede ser explicado desde la biología y no meramente desde la fisiología.²⁹ Lo que me interesa remarcar

²⁸Además de la clara similitud con los sistemas de retroalimentación que serán uno de los objetos de los principales objetos de estudio de la cibernética (ver capítulo siguiente), la descripción de Herbert Simon de un sistema orientado hacia un objetivo es muy similar a la de von Uexküll salvo por la clara referencia a un concepto de información, que Simon toma de la cibernética y que no le está disponible a von Uexküll. Simon comenta sobre lo siguiente acerca de las condiciones mínimas para describir un sistema como uno orientado a fines: “La condición de cualquier sistema de búsqueda de objetivos es que esté conectado al entorno exterior a través de dos tipos de canales: los canales aferentes, o sensoriales, a través de los cuales recibe información sobre el entorno y los canales eferentes, o motores, a través de los cuales actúa sobre el entorno” (H. A. Simon, 1996, p. 121). Dicho sea de paso, esto también señala parte de la razón por la que algunas comunidades de reflexión sobre la inteligencia artificial han vuelto a la lectura de von Uexküll, particularmente por la forma en la que caracterizó a los “signos” según los cuales los animales se podían manejar en el ambiente y creaban su propio mundo. (De la obra de Simon me ocupo más adelante, especialmente en 5.2.9.)

²⁹El estudio de este fenómeno fue muy importante durante todo el siglo XIX y su relevancia para el proyecto mecánico de la fisiología llegó a un punto máximo con la publicación por parte de T.H. Huxley de su ensayo “Sobre la hipótesis de que los animales son autómatas, y su historia” (T. Huxley, 1874), que tuvo profunda influencia entre muchos filósofos y psicólogos, entre ellos los mismísimos William James y John Dewey (Phillips, 1971). Entre las otras muchas figuras que se verían influenciados por este texto, particularmente a comienzos del siglo XX, podríamos destacar a Joseph Needham, quien antes de su giro a la

para los efectos de esta investigación es cómo el uso de la analogía con las máquinas también sigue siendo un recurso válido incluso para las explicaciones biológicas, asumiendo que los seres vivos no son *realmente* máquinas pero que no pueden ser comprendidos sin apelar a estructuras como las de las máquinas. En efecto, von Uexküll es explícito en lo ficcional que van a ser las explicaciones que apelen a dichas estructuras mas no por ello dejarían de ser científicas, en tanto el fenómeno en sí se escapa del conocimiento humano por lo que es necesario encontrar una representación intermedia y pensar al fenómeno natural *como si* fuera una máquina:

No es realmente importante con qué clase de máquina se compare al arco reflejo, pero lo que es muy importante es que se lo trate como una máquina, desarmándolo hasta sus partes individuales, examinando estas partes y poniendo a prueba sus actividades, para luego observar sus interconexiones. En resumen, se trabaja como si se tuviera una máquina entre las manos. ^{IV} (von Uexküll, 1905, p. 10)

De esta manera, von Uexküll inaugura en biología un nuevo capítulo en la forma de pensar a las máquinas como modelos posibles de los organismos vivos, en la que se asume que el recurso a la explicación “maquinística” (a diferencia de una meramente mecánica) no tiene tanto que ver con la realidad de dichos procesos, sino más bien con nuestra capacidad de conocimiento, en líneas similares a lo sugerido, entre otros, por Reinke. De cierta manera, las representaciones en forma de máquina se vuelven un recurso heurístico para lidiar con la imposibilidad de acceder al fenómeno de manera directa y complementan los resultados que se puedan obtener mediante experimentos.

Una de las preguntas fundamentales de la biología será, entonces, su capacidad de *representar* las funcionalidades de los seres vivos. La idea de máquina y de su configuración específica para generar cierto comportamiento le sirven a von Uexküll para criticar lo que bien podría considerarse como parte del mismo juego de representación: el de la formulación matemática de los fenómenos. Esto se debe a que dicha formulación siempre está mediada por una simplificación exagerada y reduccionista de lo que ocurre en el organismo, por ejemplo, reemplazando a los fluidos por un mero concepto de movimiento o el de “fluido nervioso” por uno supuestamente equivalente como el de estimulación o excitación [*Erregung*]:

sinología se dedicó con profundidad a la concepción del ser humano y lo biológico en términos de máquinas. La obra de Needham en su período “pre-China” es increíblemente fértil, tanto en extensión como en los temas que abarca con sutileza y profundidad. Además de (Needham, 1928), obra de provocador título que recuerda mucho a (Mettrie, 1748), la colección de sus ensayos sobre el tiempo (Needham, 1943) es buena muestra de la multiplicidad de sus intereses y enfoques a preguntas científicas, en donde se deben destacar también las múltiples menciones que hace Needham, usualmente con alguna crítica, a la obra de Arthur Eddington (aunque los más mencionados son Engels, Lucrecio, Lenin y Whitehead), lo que también marca una conexión entre las reflexiones de Needham y la obra de Alan Turing, quien también se vio profundamente motivado por problemas y preguntas similares (comento algunos aspectos de esta parte del pensamiento de Turing en el capítulo 4).

Este lamentable intercambio entre una idea intuitiva [*anschaulichen*] por un concepto vacío llevó a los investigadores a la creencia de que tenemos en las manos que no posee propiedades independientes, sino que meramente se trata de una función que fácilmente podría ser reducida a una fórmula matemática. (von Uexküll, 1905, p. 11)

En cambio, las explicaciones en términos de máquinas son específicas ya que para cada animal le corresponde al menos una máquina específica por lo que no habría un reemplazo reductivo de lo que se está estudiando en el animal sino que en la nueva representación la complejidad del fenómeno se mantiene, simplemente se hace más accesible su configuración. En este pasaje ya se puede observar otra de las estrategias que von Uexküll utilizará constantemente para fundamentar las explicaciones en biología y que consiste en aprovechar la riqueza semántica del término alemán *anschaulich*. Dicho término se suele traducir por “intuitivo”, siguiendo el uso que hicieron los traductores de Kant al equiparar “*Anschauung*” con “intuición”. Ahora bien, en alemán el término tiene una connotación mucho más gráfica, en tanto se usa para referirse a lo relativo a una imagen, i.e. “gráfico” o “eidético”, a algo que es comprensible o claro y hasta algo que es descriptivo o demostrativo.³⁰ Von Uexküll se aprovecha constantemente de esta riqueza semántica y dotará a todas las explicaciones biológicas de esta idea “pintoresca” que, al menos para él, es “intuitiva”. De esta manera, el proceder de la explicación netamente biológica puede olvidarse de los procesos físicos y químicos y explicar desde un nivel diferente, un nivel desde el que se puede dar cuenta de la funcionalidad de los organismos.³¹ Von Uexküll es explícito en lo diferente que es el nivel y en lo ficcional o artificial que es el método de estudio que propone: “Estamos obligados a explicar los procesos biológicos mediante un esquema artificial [*künstliche Schema*], que ciertamente no concuerda con los procesos físicos y químicos reales” (1905, p. 41). Sin esta clase de esquemas ficcionales o modelos maquínicos, no hay biología posible ya que si no se recurre a ellos es imposible dar cuenta de cómo los distintos factores que hacen a la vida interactúan entre sí para llevar a cabo el plano de construcción del animal y, en el proceso, no omitir a la vida misma.³² Si bien no es explícito sobre el cambio de nivel de explicación que lleva a cabo (ya que todavía no posee el vocabulario para ponerlo en dichos términos) recurre a una metáfora que parece seña-

³⁰Lo cual también sugiere una reinterpretación de lo que Kant tomaba por “intuición”, pero, pese a las apariencias, esta tesis no es sobre Kant.

³¹Ya hemos visto que Reinke también recurre al mismo término. Quizás también sea interesante notar que la riqueza semántica del término *anschaulich* no fue sólo aprovechada por biólogos. Quizás uno de los casos más interesantes en la historia de la física sea la aparición de dicho término en el paper de Werner Heisenberg de 1927 en el que introduce el principio de incertidumbre, titulado “Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik” [“Sobre el contenido perceptivo de la cinemática y la mecánica cuántica teórica”].

³²En otra obra de la época von Uexküll lo expresa de esta manera y remarca que el diagrama puede mostrar pero no demostrar: “Sólo el diagrama estructural *anschaulich*, que puede mostrar, aunque no probar, el trabajo en conjunto de todos los factores diferente, es adecuado para el requisito de llevar a los procesos de la vida a una unidad inteligible sin omitir la vida misma” (von Uexküll, 1907, p. 185). Jennings (1909) recopila y traduce citas de varias obras de von Uexküll de la época sobre la noción de *Anschauung* y presenta una crítica interesante, desde la posición de fisiología, a las “indemostrables” explicaciones de von Uexküll.

lar claramente el traspaso de dominio al que recurre al redefinir el objeto de estudio de la biología a través de estos esquemas ficcionales maquínicos para estudiar la funcionalidad de los seres vivos:

La tarea del biólogo es la investigación de la funcionalidad [*Zweckmässigkeit*] en los fenómenos de la vida del animal individual. Esta funcionalidad no puede ser inferida lógicamente, sino que debe ser explorada cada vez con ayuda de la *Anschaung*. El reordenamiento de los problemas biológicos no significa otra cosa que verter los contenidos conocidos en otras vasijas. Nuestra tarea, sin embargo, debería ser también la de incrementar estos contenidos (Uexküll, 1905, p. 96).

Lo que queda por comprender es cómo von Uexküll resuelve la clara tensión que se genera al recurrir a esquemas ficcionales maquínicos para explicar los procesos de la vida y, a la vez, declararse vitalista en tanto reconoce que la máquina no puede explicar *todos* los procesos de la vida. ¿Qué es lo que las máquinas no pueden explicar?

2.5.2. El límite de las máquinas y la biología teórica

Una casa es un máquina de vivir.^V

Le Corbusier, *Vers une architecture* (1923)

Hacia 1908, von Uexküll reconoce explícitamente la contribución de Driesch —a quien había conocido en Nápoles en 1891, precisamente en el tiempo de sus experimentos con el erizo de mar— en poner el último clavo sobre el ataúd de las explicaciones mecánicas en biología. Comenta von Uexküll que

Driesch consiguió demostrar que la célula germinal no posee ningún rastro de estructura maquinal, sino que está formada por partes equivalentes. Con ello cayó el dogma de que el organismo es sólo una máquina. Incluso si la vida se produce en la criatura totalmente organizada de una manera similar a una máquina, la organización de un germen sin estructura en una estructura complicada es un poder *sui generis*, que se encuentra sólo en los seres vivos y no tiene analogía. [...] No se puede negar que los vitalistas son los vencedores en toda la línea. Después de haber acabado con el darwinismo, se han apoderado de todo el campo de la producción de la forma animal, y ahora amenazan las últimas posiciones de sus oponentes. ^{VI}(von Uexküll, 1908) (citado en Harrington, 2009, p. 51)

El organismo no puede ser *sólo* una máquina, ya que entendiéndolo meramente en forma de máquina hay algunos aspectos que no pueden ser explicados en términos meramente maquínicos como su origen, su auto-mantenimiento y su regulación. Sin dejar de otorgarle el valor que le corresponde a la heurística de utilizar a las máquinas como un modelo posible de explicar lo que ocurre en un organismo ya desarrollado, desde 1909 en adelante von Uexküll comienza un estudio filosófico sobre las capacidades de las máquinas y de

su relación con la ciencia, motivado por comprender qué es lo que se puede explicar sin tener que recurrir a algo que se escape de las leyes de la causalidad, que son las que rigen para las máquinas. Todo esto ocurre cuando plantea el “problema del protoplasma” que se va a tornar el verdadero objeto de estudio de la biología teórica tal y como la entiende el biólogo estonio. Dicho problema y la solución que plantea hacen al núcleo de su vitalismo. Esto se debe, a fin de cuentas, ante la imposibilidad de imaginar la existencia de “máquinas líquidas”:

Como hemos visto, ya que se pueden comparar a los animales superiores ya desarrollados con máquinas, se podría suponer que los animales unicelulares también deben compararse con las máquinas. Aquí vino la gran dificultad fundamental que jugó un papel tan fatídico en los 80 años de historia del protoplasma. La dificultad se puede expresar de manera más sucinta en las palabras: ¿puede haber máquinas líquidas? (von Uexküll, 1908, p. 14)

El protoplasma es una entidad que debe ser *postulada* para poder explicar aquello que la concepción más completa de las máquinas es incapaz de dar cuenta: las propiedades supermaquínicas [*übermaschinelle Eigenschaften*] de los organismos, que son las tres antes mencionadas: la de su origen y morfogénesis, su capacidad de reparación y su autorregulación. La diferencia esencial con las propiedades maquínicas es que éstas pueden ser expresadas en términos de una estructura, ya sea animada o no. En cambio, las “capacidades supermaquínicas que están involucradas en la formación del plano de construcción no pueden encontrarse en una estructura, por lo que le son completamente exclusivas al protoplasma. Por lo tanto, el problema del protoplasma coincide con el problema de las capacidades supermaquínicas en los seres vivos” (von Uexküll, 1909, p. 26). Von Uexküll recurre a una metáfora para explicar la función del protoplasma:

Para hacer mucho más clara la relación entre el protoplasma y la estructura, uno puede imaginarse que nuestras casas y máquinas no son construidas por nosotros, sino que se cristalizan independientemente de una papilla o masa uniforme [*Brei*]. Cada piedra de la casa y cada pieza de la máquina conservarían consigo una porción extra de masa de reserva, que llevaría a cabo las reparaciones y las regulaciones necesarias; además, cada casa y cada máquina tendría una gran acumulación de la masa original, que serviría para la producción de nuevas casas o de nuevas máquinas (von Uexküll, 1909, pp. 27-28).

Más allá de lo vívida que es la metáfora, creo que en ella von Uexküll logra captar precisamente el problema de la biología y las limitaciones de las teorías de la época. Él mismo sugiere que la metáfora hace un buen trabajo en señalar el carácter doble de todos los organismos vivos, ya que por un lado consisten en un protoplasma y por el otro en los productos del protoplasma, que son las estructuras. “La función de la estructura nos es comprensible”, nos dice, mas “la función del protoplasma es un milagro [*Wunder*]” (von Uexküll, 1909, p. 28). El milagro radica en la imposibilidad de imaginarse un mecanismo

mediante el cual las acciones que lleva a cabo el protoplasma puedan ser entendidos en términos de comportamientos más básicos. Esto se debe a que la ciencia como él la entiende sólo puede trabajar con una noción de causalidad relativamente sencilla, la que se encuentra normalmente a la vista en el funcionamiento de una máquina y que, a la vez, depende de una manera lineal de pensar el tiempo y el espacio:

Sólo las unidades mecánicas son entendibles [por la ciencia], en las que, como en las máquinas, todas las partes son mutuamente dependientes al mismo tiempo en el espacio. No parece tener sentido que algunos factores influyan sobre otros en [otro] tiempo. Para nuestro intelecto, el tiempo sólo permite el efecto de lo que procede sobre lo que le sigue y no en sentido contrario. Si tal cosa ocurriera, esto es, si lo que siguiera fuera influenciado por lo que le precede, estaríamos dispuestos a hablar de un milagro. (von Uexküll, 1909, p. 29)

La naturaleza de los seres vivos pone a la ciencia en una encrucijada ya que, si se acepta que sólo esas clases simples de comportamientos pueden ser entendidos por la ciencia, estrictamente el funcionamiento de los seres vivos no puede ser entendido con los medios disponibles, en tanto se trata de un milagro, puesto que esta violación del principio de causalidad es lo único que podría dar cuenta de las capacidades supermaquínicas de los organismos:

Ahora bien, esto es precisamente lo que ocurre en el protoplasma. No es la estructura actual, sino la que está por venir, la que determina el comportamiento del protoplasma en cada caso de creación de estructura. [...] Este hecho es un milagro, no por estar desprovisto de leyes, sino precisamente porque prueba la acción de leyes incomprensibles. (von Uexküll, 1909, pp. 28-29)

Es precisamente este límite sobre la capacidad humana de entender los procesos del mundo natural que lo llevan a replantear los fundamentos de la biología como disciplina científica. Si bien esta es una tarea que fue realizando en paralelo a sus investigaciones de corte más empírico, como se ha podido observar en lo tratado hasta el momento en sus reflexiones, la culminación de dichas reflexiones toma lugar en *Biología Teórica* de 1920 (con una segunda edición en 1928, von Uexküll (1920/1928)), obra en la que desde el título se puede observar cierta influencia de la obra de Reinke. Sin embargo, las referencias a Reinke son escasas y si bien hay ciertos puntos de confluencia entre sus posturas, von Uexküll es mucho más radical que Reinke en la dirección que debe tomar la biología teórica. De hecho, hasta los mismos héroes en *Biología Teórica* —Kant y Driesch— son atacados regularmente, ya por incompletos, ya por equivocados.

Kant le asignó la causalidad a la actividad constitutiva del intelecto, mientras que la finalidad se la asignó al uso regulativo de la razón. Esto da la impresión de que un plan nunca puede ser una parte integral del objeto, sino meramente una regla imaginada por el hombre, si bien es necesaria. Driesch atacó este problema de manera detallada y demostró que el propósito también debe ser incluido en las propiedades constitutivas.

Y eso resuelve el problema. (von Uexküll, 1920/1928, p. 199).

Ahora bien, la forma en la que el problema queda resuelto no es mediante la interpretación del plan en términos de una entelequia (Driesch, 1908) sino más bien en cómo es que una estructura puede implementar o “encarnar” una regla y seguirla paso por paso. De esta manera, el vitalismo de von Uexküll pretende ser distinto a sus antecesores, ya que la conformidad con el plan se logra de manera local y no por la “acción a distancia” de una entelequia. Ahora bien, para lograr esto, von Uexküll debe introducir una serie de “impulsos” que funcionan como mediadores entre las reglas no espaciales [*unräumliche Regeln*] y el protoplasma, siendo dichos impulsos los desencadenantes de los procesos del protoplasma. El punto clave es no interpretar a dichos impulsos de una manera estrictamente causal y material sino dotarlos de un “carácter inmaterial” que les permite tanto “iniciar nuevas series causales” pero, al mismo tiempo, ubica su efectividad bajo el control de una regla que está en conformidad con el plan. Como una analogía iluminadora para este caso, sugiere pensar en la manera en la que “los sonidos aparecen bajo la coerción de la melodía” (von Uexküll, 1920/1928, p. 149). Curiosamente el gran descubridor de los impulsos y quien puede “salvar” a la biología del darwinismo más radical no es otro que Gregor Mendel y sus leyes de la genética.³³ A la hora de presentar su propia interpretación de los resultados de Mendel, von Uexküll toma un desvío para hacerlo en términos de la “génesis de los implementos [*Gegenstände*]” lo que vuelve a poner a las máquinas en el centro de su investigación y que es la línea que pretendo seguir, ya que introduce la idea de abstraer las propiedades de los implementos de manera tal que se pueda obtener una base en común para poder encontrar las similitudes y las diferencias entre dichos implementos y los organismos.

Lo interesante aquí es la “inversión” a la que recurre von Uexküll, ya no son los implementos ni las máquinas los que permiten estudiar a los organismos sino más bien es la biología lo que permitiría estudiar de manera correcta a las máquinas, en tanto para estudiar a todos los implementos “es necesario descomponerlos tanto morfológica como fisiológicamente hasta sus elementos básicos [*Bausteine*], si es que pretendemos hacerle justicia a los hechos” (von Uexküll, 1920/1928, p. 151). De esta manera, la historia de creación de un artefacto se vuelve un punto clave para su estudio, incluyendo todas las decisiones que sus creadores debieron tomar, decisiones que pueden ser reconstruidas a medida que se descompone el objeto que está siendo estudiado, en particular distinguiendo entre las uniones o juntas [*Fugen*] que son funcionales y aquellas que son producto de que el implemento tuvo que ser fabricado en partes por separado y luego ensamblado. Esta deducción y reconstrucción se puede evitar cuando se conoce el proceso de creación

³³El nombre de “gen” para la unidad de la herencia biológica no provino de Mendel sino que los genes fueron bautizados por el biólogo danés Wilhelm Johannsen en 1905, aunque el término se comenzó a usar tras la traducción y ampliación de su libro, publicada en alemán en 1909 como *Elemente der exakten Erblchkeitslehre* [*Elementos de una teoría exacta de la herencia*]. También creó los términos “fenotipo” y “genotipo”.

del artefacto, pero es inevitable cuando se trata de un objeto desconocido y es tanto más necesario para el estudio de los seres vivos.

Esta “inversión”, que bien puede verse como señalando la necesidad de una multiplicidad de perspectivas para estudiar tanto a un objeto como a un ser vivo, da lugar a una de las primeras referencias en la que una noción de diseño o de estilo se vuelve clave para el estudio científico, postura que tendrá su primer gran defensor de la mano de Herbert Simon (ver capítulo 7). Según von Uexküll, al insistir en la búsqueda de una ciencia como la morfología para el caso de los implementos humanos uno termina considerando a la ciencia del estilo arquitectónico, pese a que “el modo de génesis [de los implementos] es muy distinto al de los organismos” (von Uexküll, 1920/1928, p. 155). Es decir que, pese a dicha diferencia, que radica en el rol que tiene el ser humano como diseñador arbitrario y que tiene que ser considerado a diferencia del caso de los organismos, es posible una ciencia similar a la morfología para el caso de los implementos, en tanto al igual que ésta, la “ciencia del estilo” [*Stilkunde*] está “basada en la comparación y busca los signos de génesis y no los signos de función. Estudia la homología, no la analogía” (von Uexküll, 1920/1928, p. 155).³⁴ Von Uexküll no está pensando en la arquitectura en sí misma –ya que la misma requiere pensar la función de lo que se implementa– sino en una reconstrucción como la que puede hacer un historiador al crear una taxonomía basada solamente considerando el origen común de las estructuras y descartando su posible rol funcional. Este “guiño” hacia el diseño es otra forma en la que von Uexküll parece reconocer la complejidad que puede existir en el mundo artificial y que requiere de un estudio similar a la de la complejidad del mundo de lo viviente.

La referencia a los impulsos, aquellos cuyo verdadero descubrimiento von Uexküll atribuye a Mendel, es uno de los conceptos más usados y menos explicados en la obra del estonio y es precisamente gracias a su lectura de Mendel que dicho concepto se torna un poco más claro. Básicamente, los impulsos son los factores inmateriales que median toda acción en el mundo, ya sea de manera consciente o inconsciente, logrando mediante dicha mediación que las acciones puedan seguir una regla. Dichos factores están presentes tanto en la creación de los artefactos humanos, en cuyo caso están mediados por la acción de quien fabrica el artefacto, quien introduce los factores en lo que fabrica, como en la creación de un organismo. En este último caso, los factores no provienen de afuera, sino que están presente en el germen del organismo: “El proceso entero de génesis gira en torno a una serie de acciones independientes, las que se mantienen en equilibrio a través reglas de impulso [*Impulsregeln*]” (von Uexküll, 1920/1928, p. 159). Los factores se pueden

³⁴En biología se considera que una homología es la expresión fenotípica de una misma combinación genética en individuos de distinta especie, por lo que señalarían un antepasado común. En cambio, una analogía es una estructura funcionalmente semejante entre individuos pero que no comparte el mismo origen ni desarrollo embrionario. En este caso, la semejanza o convergencia evolutiva es producto de la equivalencia de la presión de selección.

entender como un conjunto de instrucciones paso a paso para la creación de un organismo, es decir, una serie de pasos que permiten obtener y fijar una estructura partiendo desde los elementos constitutivos y así lograr que dicha estructura instancie la regla original, lo mismo que sucede en la creación de una máquina por parte de un ser humano. Para generar las propiedades de un artefacto o de un ser vivo hace falta un proceso similar: “para hacer posible el desarrollo de las propiedades desde sus factores, introducimos un número determinado de impulsos en un orden determinado, los que permitirán al material original [*Fermentmaterial*] la liberación de las acciones particulares [*Teilhandlungen*] de acuerdo con el plan” (von Uexküll, 1920/1928, p. 160).

Si bien en retrospectiva las explicaciones de la biología teórica a comienzos del siglo XX pueden parecer algo crudas y un tanto especulativas, creo que se puede afirmar que fue dicha disciplina la que inauguró una forma de trabajo en cuya base está la exploración de las posibles explicaciones de fenómenos cuya lógica va más allá de lo que en una época se identifica con la “lógica de la causalidad”. Como ya se pudo entrever y se podrá ver mejor en los capítulos que siguen, dicha “lógica de la causalidad” o de lo que es físicamente posible es algo que va cambiando a medida que nuestro conocimiento del mundo natural se expande y quizás la mejor manera de entender dicha lógica consista en determinar qué clases de máquinas se consideran factibles en una época determinada. A su vez, para la biología teórica la exploración de lo maquínico sirve como piedra de toque para determinar qué es la vida. La característica principal de un ser vivo, para von Uexküll, es la posesión de un protoplasma, que él creía que podía ser anatómicamente demostrada. ¿Qué se obtiene, pues, al quitar al protoplasma de un ser vivo? Según von Uexküll,

Cuando esta separación se lleva a cabo, nos damos cuenta de que un organismo sin su protoplasma representa una máquina ideal. Este conjunto de arco-reflejos habilitosamente entrettejido, con sus receptores y efectos perfectamente contruidos, se ha vuelto una máquina independiente, respondiendo a las influencias del mundo exterior por medio de sus propias acciones. Pero estas acciones son inalterables y automáticas y es aquí que vemos demostrado la oposición más esencial entre lo vivo y lo muerto. Si, gracias a su estructura, una criatura se comportara fisiológicamente como un organismo vivo pero, sin embargo, estuviera desprovista de protoplasma, nos veríamos obligados a describirla como muerta. (von Uexküll, 1920/1928, p. 97)

Dentro de los fenómenos de la biología, el caso más evidente que no puede explicarse en términos de capacidades mecánicas es el de la reproducción celular:

El problema de construir un aparato capaz de dividirse a sí mismo en dos aparatos es técnicamente irrealizable. No se puede construir una estructura de manera tal que se divida y se duplique. Por la función de una estructura siempre debemos entender su efecto hacia afuera. Una estructura que se disuelve o se divide ya no puede realizar una función [...] y en la división celular se requiere de una función que no sólo sirva para dividir el aparato de la célula sino también para hacer que se duplique. (von

Uexküll, 1920/1928, p. 202)

Dado que la célula de hecho realiza un aparato que permite su división y su duplicación, el proceso que se lleva a cabo resuelve un problema mecánicamente imposible, por lo que debe considerarse como un proceso supermecánico. Una supermáquina es aquella que puede incluir dentro de sí lo que en una máquina sólo puede ser realizado desde afuera:

Las capacidades supermecánicas [*übermaschinellen Fähigkeiten*] de todos los organismos consisten en que incluyen todas aquellas actividades que los seres humanos deben realizar sobre las máquinas. Hacen a las máquinas desde su mismo cuerpo, las ponen en funcionamiento y se encargan de sus reparaciones. (von Uexküll, 1920/1928, p. 97)

Lo que permite en los seres vivos esta plasticidad funcional es la presencia a nivel celular del protoplasma, que envuelve al espacio celular y la transforma en supermáquina ya que en él pueden tener efecto los impulsos de los elementos que siguen la regla, tanto para su creación como para su mantenimiento:

Existe un orden no material, que puede por sí mismo darle a la materia su estructura –una regla de vida. Esta regla se manifiesta en tanto crea a la estructura, la que se realiza de una manera particularmente individual, de acuerdo con las respectivas propiedades del protoplasma. (von Uexküll, 1920/1928, p. 98)

Es decir que sobre el protoplasma actúa una regla que permite combinar y reordenar los elementos presentes en él de manera tal de generar una estructura que expresa una función. Ahora bien, no es la función la que define la regla (tal como lo sería si la función fuera la causa final) sino que la regla define la función mediante la estructura generada, que puede ser comparada paso a paso con la regla, mediante la acción de los impulsos intermediarios. Esto da lugar a una diferencia en la concepción uexkülliana con la de las entelequias aristotélicas, en la que cobra importancia una noción de ley para poder definir cómo es que un sistema puede seguir una regla de orden no material. Es esta forma de entender el rol del plano de construcción en el que la distancia con el vitalismo de Driesch es máxima.

La interpretación de lo que ocurre en el mundo de la física y de la química gira en torno a causas y efectos y a poder medir los unos y los otros y establecer leyes que permitan, dadas una serie de causas, explicar los efectos que les siguen. Esto permite definir a los objetos como aquellos elementos que puedan explicarse de acuerdo a las leyes de la causalidad. Sin embargo, tanto en el mundo de la naturaleza como en el mundo de las actividades humanas existe otro plano de interacciones que no puede explicarse mediante el principio de la causalidad ya que dichas interacciones dependen de una regla subjetiva, que es necesaria para poder sistematizarlas. Esta regla subjetiva es la conformidad con un plan. Esto es lo que distingue a los objetos de los implementos, en cuya explicación ne-

cesariamente se debe apelar a una regla que defina cómo es que sus partes se relacionan con el todo. La única metáfora a la que puede recurrir von Uexküll es a la de la melodía: las partes se relacionan entre sí como los sonidos individuales a la melodía. Ahora bien, ¿cómo explicar la presencia de una melodía o regla, tanto para las máquinas como para los organismos? La solución del estonio es una variante de una posición clásica: apelar de alguna u otra manera a una noción de diseño. Ahora bien, quizás lo más interesante y más original en su obra es la manera en la que, para describir la clase de diseño que estaría operando en los organismos y su diferencia con las máquinas y otros implementos o instrumentos, von Uexküll analiza cuál es el límite máximo de las capacidades de una máquina y cómo es que una regla no material puede ser “implementada” en un medio físico y el alcance de la misma.

Por esta razón su vitalismo no consiste en la mera apelación a un principio vital inexplicable, sino en darle el lugar correcto a las explicaciones mecánicas y, una vez reconocidos los límites de las mismas, introducir un principio regulador que pueda permitir las operaciones naturales que no pueden llevarse a cabo ni explicarse sólo en términos de causas. Este principio regulador es la conformidad con un plan, la regla subjetiva que distingue a los objetos de los implementos. En el caso de las máquinas, la función de la regla es fijar una estructura [*Gefüge*] que puede realizar una función. El diseñador de una máquina es quien puede determinar la estructura de acuerdo a la regla. Ahora bien, lo importante para von Uexküll es que la estructura nunca puede *incluir* una regla, sólo puede instanciarla. Una forma de interpretar esto, puede ser en términos de un comportamiento describable a partir de una regla, la que habría hecho su diseño, aunque el comportamiento mismo no *integre* la regla. Esto impide que haya explicaciones meramente mecánicas de algunos comportamientos biológicos, ya que requieren apelar a una regla que, por definición, no puede estar dentro de la máquina. Según mi lectura, aquí yace gran parte de la diferencia con Reinke, en tanto él veía la necesidad de un concepto abstracto, pero no por ello nouménico, que diera cuenta de la dinámica “encapsulada” en la estructura. En este sentido, el punto de vista elaborado por Reinke está mucho más cerca de una proto-teoría de la información que la postura de von Uexküll, quien cambia el plano de existencia de las reglas, de manera que puedan escapar al orden mecánico y lineal de la causalidad.

El comienzo de la biología teórica fue el último intento de darle a una posición vitalista un rol científico y no meramente metafísico a fin de dar cuenta de la complejidad de los fenómenos del mundo de la vida. Más allá de las obvias dificultades para mantener una posición semejante frente al avance de las explicaciones mecanicistas y reductivas, como espero haber mostrado con las secciones anteriores, todavía hay algo para aprender de dichas posturas filosóficas. Por un lado, todo el aparato conceptual que generaron en su intento de darle autonomía a la biología como ciencia es sin duda el comienzo mismo de la filosofía de la biología y en tanto los fenómenos biológicos todavía en la actualidad se pueden identificar como los más difíciles de explicar, no creo que sea exagerado decir

que también son el comienzo de la epistemología de la complejidad. Por otro lado, como comenta Ernst Mayr, la lógica de los vitalistas era, después de todo, “impecable”:

Ridiculizar a los vitalistas sería ahistórico [*ahistorical*]. Cuando uno lee los trabajos de uno de los vitalistas principales como Driesch, uno está obligado a acordar con él en que muchos de los problemas básicos de la biología simplemente no pueden ser resueltos por una filosofía como la de Descartes, en la que el organismo es simplemente considerado una máquina. Los biólogos del desarrollo en particular se hicieron algunas preguntas muy desafiantes. Por ejemplo, ¿cómo puede una máquina regenerar partes perdidas, como pueden hacer muchos organismos? ¿Cómo puede una máquina replicarse a sí misma? [...] La lógica de la crítica de los vitalistas era impecable. Pero todos sus esfuerzos para encontrar una respuesta científica a todos los fenómenos llamados vitalistas [*vitalistic*] fallaron. Generaciones de vitalistas trabajaron en vano para encontrar una explicación científica para la *Lebenskraft* hasta que finalmente se tornó bastante evidente que dicha fuerza simplemente no existe. (E. Mayr, 2004, p. 16)

Por último, esta forma tardía del vitalismo remarcó la necesidad de buscar conceptos positivos sobre los que identificar su posición, a diferencia de ser simplemente “filosofías en contra de”, asumiendo que de alguna manera podían hacer a una suerte de “tercera posición”, desde la cual el viejo debate quedara tan resuelto como un debate puede quedar. En el proceso, sugirieron una manera interesante de estudiar a las máquinas como modelo de lo vivo, lo que probablemente uno esperaría más del lado de los mecanicistas que de los vitalistas. Los primeros, sin embargo, solían ser más reduccionistas que “mecánicos” y fueron los vitalistas los que se tomaron el trabajo de analizar con mayor precisión las capacidades de las máquinas y, por extensión, la de las explicaciones que recurren a máquinas.

2.6. Resumen (y conexiones)

Si bien en términos ontológicos, existía un profundo antagonismo entre las concepciones vitalistas y las mecanicistas, en lo que podrían llamarse contextos de prácticas, el antagonismo podía resultar fértil como una herramienta heurística para guiar el razonamiento para la explicación de los fenómenos naturales. Esta suerte de “tensión esencial” ya deja entrever uno de los puntos centrales que todavía están presentes en la discusión filosófica contemporánea y que constantemente se manifiesta en la reflexión acerca del estudio de los sistemas complejos. Por un lado, la sugerencia de la existencia de un estrato último de la realidad formado por partículas que fueran gobernadas por leyes mecánicas, promovía una visión de un determinismo ontológico según la cual, al menos en principio y para seres con recursos inferenciales óptimos e infinitos, la explicación de la totalidad de los fenómenos de la naturaleza —incluyendo, por tanto, los relativos a la vida y a las facultades mentales de los seres humanos— podía darse a partir del conocimiento de dichas

reglas y del estado de las partículas elementales en un momento dado. Además de los vitalismos propiamente dichos en biología, en círculos filosóficos y literarios, hacia finales del siglo XIX comenzó a tomar forma una corriente "reaccionaria" que sería de profunda influencia para los filósofos cercanos a la ciencia de la época que comenzaron a intentar concebir concepciones de la naturaleza y de la ciencia que pudieran promover, por un lado, la unidad y la continuidad del mundo natural sin, por el otro lado, caer en la unidad metodológica, abocando por tanto a una autonomía de las ciencias "particulares" como la biología, la psicología, la economía, y la sociología. En sintonía con estas "filosofías de la vida" (por el alemán *Lebensphilosophie*), pensadores como Henri Bergson propondría una mirada muy distinta a la puramente mecanicista y, por tanto, artificial, especialmente con respecto la vida y su incesante capacidad para crear novedad y cada vez más variedades y complejidades; en su lugar, la vida debía verse como un reflejo del sistema natural del universo como un todo:

no ponemos en duda la identidad fundamental de la materia bruta y de la materia organizada. La única cuestión consiste en saber si los sistemas naturales que llamamos seres vivos deben ser asimilados a los sistemas artificiales que la ciencia recorta en la materia bruta, o si no deberían mejor ser comparados a este sistema natural que es el todo del universo. Acepto que la vida sea una especie de mecanismo. ¿Pero se trata del mecanismo de las partes artificialmente aislables en el todo del universo, o del mecanismo del todo real? El todo real podría ser muy bien, decíamos, una continuidad indivisible: los sistemas que recortamos en él no serían entonces, hablando con propiedad, partes; serían consideraciones parciales tomadas sobre el todo. Y con estas consideraciones parciales reunidas no obtendríais ni siquiera un comienzo de recomposición del conjunto, como tampoco multiplicando las fotografías de un objeto, bajo mil aspectos diversos, no podríais reproducir su materialidad. Así, en cuanto a la vida y a los fenómenos fisico-químicos en los que se pretendiese resolverla. El análisis descubrirá sin duda en los procesos de creación orgánica un número creciente de fenómenos fisico-químicos. Y a ellos se atenderán los químicos y los físicos. Pero no se sigue de ahí que la química y la física deban darnos la clave de la vida. (Bergson, 1907/1963, p. 464)

Estas propuestas holistas resonarían tanto en las primeras postulaciones de propiedades emergentes, que pudieran justificar la autonomía de las ciencias aunque sin la necesidad de postular dualismos, como en las sugerencias de reinstaurar ciertas intuiciones, relativas a la manera de pensar y de hablar de la experiencia, que pudieran dar lugar a miradas centradas más en lo orgánico y en las relaciones que en la idea de mecánico y de máquina. En lo que respecta directamente al estudio de la complejidad, esto es más fácil de ver en el contraste y la evolución de dos metateorías tempranas para darle sentido a lo complejo y su estudio: la Teoría General de los Sistemas y la Cibernética, que son el objeto del capítulo siguiente. La discusión directa sobre la emergencia deberá aguardar hasta el capítulo 7 (sección 7.1).

Capítulo 3

Complejidades en las teorías generales de sistemas y las cibernéticas

Si una teoría general de los sistemas es un objetivo demasiado ambicioso, quizá no sea vano buscar propiedades comunes entre amplias clases de sistemas complejos.

Herbert A. H. A. Simon (1996, p. 173)

El objetivo de este capítulo es explorar algunos de los puntos de convergencia y desencuentro entre la Teoría General de los Sistemas (TGS) y la Cibernética, aproximándome a ellas desde el trasfondo de la discusión “máquina vs. organismo” planteada en el capítulo anterior. Al mismo tiempo, propongo una exploración epistemológica en lo que respecta a ellas como posibles “metateorías” de la complejidad, con especial énfasis en las reflexiones que surgieron desde ellas mismas con respecto a cómo se deben estudiar fenómenos complejos y, como consecuencia, la manera en la que entendían la generación y validación del conocimiento científico *tout court*. Un punto principal a destacar en esta dirección es la preocupación que ambas posiciones manifiestan sobre la centralidad de los modelos en ciencia y la manera en que se puede justificar el pasaje o la transferencia de modelos entre dominios científicos quizás muy distintos. En esto, podrá ya apreciarse una preocupación por, por ejemplo, la clase de prácticas que habilita una teoría científica como una medida de su fertilidad epistémica al margen de su posibilidad de ser reducida a una “más fundamental”.

El término “metateoría” proviene originalmente de mi lectura de (Scott, 2007), donde lo emplea, sin definirlo con precisión, para describir no tanto disciplinas sino lo que podríamos llamar marcos interpretativos o programas de investigación que al buscar puntos en común entre sistemas de diversa naturaleza —como pueden ser los organismos

biológicos y las sociedades humanas— necesariamente trascienden las fronteras de una disciplina. Además de la Cibernética y la Teoría General de los Sistemas, identifica como metateorías a la «Ciencia no-lineal» (la propuesta del mismo Scott, con claros adherentes como Mainzer (2013), la «Matemática biológica» (que se formó principalmente alrededor de Rashevsky), la «Mecánica estadística de no equilibrio» (primariamente propuesta por Ilya Prigogine y su escuela en Bruselas), la «Teoría de las catástrofes» (propuesta por René Thom), la «Sinérgica» (el programa formulado por Hermann Haken en la década de 1970 para estudiar sistemas complejos) y los «Sistemas Adaptativos Complejos» (formulados como tales especialmente por John Holland). No con la profundidad con la que exploro a la TGS y la Cibernética en este capítulo, las otras metateorías serán tenidas en cuenta especialmente en las discusiones de los capítulos 5 y 6, que se enfocan en una exploración filosófica de las características de los sistemas complejos tales como su estudio se ve en la actualidad.

3.1. La primera Teoría General de los Sistemas

Tal y como su nombre parece indicar, la Teoría General de (los) Sistemas (TGS o GST por su nombre en inglés) es un campo de suyo bastante grande y abarcador y, como su nombre pareciera no indicarlo tanto, mucho menos sistemático de lo que se esperaría. Escapa a los límites de este trabajo realizar una reconstrucción general de la TGS por lo que la presentación que sigue está sesgada por ciertas preguntas filosóficas guías, a saber: ¿qué puede aportar para elaborar un concepto de “sistema”? ¿Puede la TGS servir como marco general para una “teoría de la complejidad”? ¿Se puede observar algún impacto de la TGS en la práctica científica actual o en la filosofía de la ciencia? Como espero que quede claro después de esta sección, el principal aporte de la TGS como campo de metareflexión sobre la ciencia debe buscarse en su insistencia en la importancia de los modelos en la práctica científica, en particular a la hora de lidiar con sistemas complejos.

Sin duda, el personaje principal de esta sección es Ludwig von Bertalanffy (1901–1972), filósofo austríaco devenido en biólogo teórico y a quien se lo considera el padre intelectual de la TGS, teoría a la que comenzó a darle forma a finales de los años 1930 y continuaría siendo el principal objeto de sus esfuerzos intelectuales hasta el fin de su vida. Su formulación estuvo motivada principalmente por el desencanto de Bertalanffy con la manera en la que la naciente filosofía de la ciencia interpretaba a la ciencia —especialmente el poco lugar que le daba a la biología como ciencia legítima— y el punto muerto en el que se encontraba la reflexión sobre la biología que provenía de los mismos biólogos, en tanto la discusión seguía oscilando entre las posiciones mecanicistas y vitalistas.¹ La Teoría Ge-

¹Bertalanffy conocía muy de cerca al positivismo lógico, movimiento que inició formalmente a la filosofía de la ciencia como una disciplina propia dentro del espectro de la filosofía. Si bien nunca fue un miembro, asistió a muchas reuniones del Círculo de Viena, ya que fue alumno de Mortiz Schlick, quien fue su director de doctorado que culminó con una tesis co-dirigida por Robert Reininger sobre Gustav Fechner (1801–1887),

neral de los Sistemas surge como una “tercera posición” en este debate y deviene en una mirada filosófica particular sobre la ciencia en la que el concepto de modelo científico se torna central. Sobre este punto se puede observar una clara influencia de Reinke, aunque probablemente la influencia más fuerte sobre la importancia de los modelos y de la aplicabilidad de la matemática a la biología que recibe Bertalanffy es la de Alfred J. Lotka (1925), aunque criticaría su concepción “estadística” del individuo “como una suma de células” y no propiamente como un sistema, que era la manera en la que concebía a las comunidades de animales (von Bertalanffy, 1968/1976, p. 10).²

Antes de bosquejar los rasgos principales de la TGS y de evaluarla como metateoría de la complejidad, es necesario adelantar una conclusión. La formulación de la TGS de Bertalanffy es diferente a la de otros sistemistas, por eso he decidido denominarla como la “primera” teoría de los sistemas y presentar su evolución después de la sección 3.3 sobre la cibernética. Esto se debe a que luego de la interacción de los sistemistas con otras comunidades más cercanas a esfuerzos computacionales, muchos les dieron un lugar central a conceptos provenientes de los campos de la cibernética y de la naciente ciencia de la computación, siendo el concepto de información uno de los más notables junto con el de máquina. Bertalanffy, aunque no inmune a su influencia, les dará un rol mucho más limitado en su formulación de los sistemas y sus leyes, insistiendo siempre en una visión más humanística y menos centrada en la tecnología.

3.1.1. Máquinas contra organismos

Uno de los principales objetivos que busca la TGS es la de dar cabida en la práctica científica a numerosos conceptos que la concepción mecanicista y el fisicalismo que le siguió habían descartado por tratarse de anticientíficos o, directamente, metafísicos. Entre tales conceptos se incluyen la totalidad, la teleología o finalidad y la creatividad. Estos términos son vagos y generales, aunque no por ello anticientíficos. Una estrategia que tomará la TGS para darles el lugar que le corresponde a dichos términos es desagregar sus referencias y cambiar el nivel al que se aplican. Al comentar sobre la vaguedad detrás de la totalidad, Bertalanffy sostiene que, en realidad, con ella se hace referencia a “problemas de organización, fenómenos no descomponibles en acontecimientos locales, interacciones dinámicas manifiestas en la diferencia de conducta de partes aisladas o en una configuración superior, etc.; en una palabra, ‘sistemas’ de varios órdenes, no comprensibles

uno de los pioneros de la psicología experimental y fundador de la disciplina conocida como psicofísica. Sus propuestas para investigar la relación entre la percepción y los estímulos físicos que produce fueron de gran influencia en figuras importantes como Wilhelm Wundt y Charles Sanders Peirce (Cadwallader, 1975; Hawkins, 2011; Heidelberg, 2004).

²El modelo depredador-presa, también conocido como modelo de Lotka-Volterra, es interesante como ejemplo del trabajo con modelos para estudiar un sistema complejo y de cuyo uso se pueden extraer interesantes consecuencias epistemológicas especialmente por la clase de idealización que está operando y el hecho de tratarse un modelo de corte fenomenológico o “de alto nivel”, y de uno de los sistemas no-lineales más sencillos. En esta investigación, aparece nuevamente en 267.

por investigación de sus respectivas partes aisladas” (1968/1976, p. 37). El último punto es fundamental, ya que la gran diferencia con la mirada tradicional yace en la necesidad de estudiar cada componente en interacción con los otros componentes que hacen a su medio y no aisladamente. El otro aspecto que lleva a la formulación de la TGS es el reconocimiento de que muchas de las explicaciones en forma de leyes en un campo disciplinar particular son formalmente idénticas a las leyes formuladas en un campo en el que la naturaleza de las entidades involucradas es totalmente distinta. Estas razones son las que llevan a Bertalanffy a “proponer una nueva disciplina científica, que llamamos teoría general de los sistemas. Su tema es la formulación de principios válidos para ‘sistemas’ en general, sea cual fuere la naturaleza de sus elementos componentes y las relaciones o ‘fuerzas’ reinantes entre ellos” (1968/1976, p. 37). En su forma más lograda, dicha teoría “sería una disciplina lógico-matemática, puramente formal en sí misma pero aplicable a varias ciencias empíricas”, por lo que podría ser para las “ciencias que se ocupan de ‘todos organizados’” lo mismo que la probabilidad “para las ciencias que se las ven con ‘acontecimientos aleatorios’” (1968/1976, p. 37). Bertalanffy nunca llegará a darle tal forma más lograda, sin embargo, el rol de la matemática es crucial para entender su propuesta, y de hecho podría decirse que fue gracias a reconocer la aplicabilidad de la matemática para el estudio de los sistemas que la obtención de principios generales que se aplicarían a todos ellos sin importar la naturaleza de los componentes se volvió un objetivo viable de perseguir.

Con lo poco ya dicho es posible notar una tensión —producto de una ocasional directa equiparación— entre su postura filosófica y la disciplina científica que intenta crear; tensión que será claro punto de ataque para sus críticos, pero que deja entrever el trasfondo epistemológico involucrado en la creación de una disciplina científica. De hecho, y como espero poder mostrar en la reconstrucción que propongo, creo que el verdadero logro de la TGS de Bertalanffy debe leerse del lado filosófico y es el de poner el foco en el rol crucial de los modelos en las distintas disciplinas y en especial para cualquier estudio de sistemas complejos. La riqueza de su postura radica en que, a diferencia de cómo entenderán los filósofos a los modelos científicos desde los años 1960 en adelante, atados a la teoría de modelos de la lógica matemática, la TGS entenderá a los modelos no como una reconstrucción lógica de aquellos sino como una abstracción de sus propiedades en el mismo lenguaje en el que fueron formulados.

El principal avance teórico en biología de Bertalanffy es su concepción del organismo como un sistema abierto. Esta concepción es el pilar fundamental para la formulación de la teoría general de los sistemas y es, a la vez, una extensión de sus primeras reflexiones sobre la naturaleza del organismo vivo, en las que ya se puede observar una transición entre la mera concepción de los seres vivos como organismos a pensarlos como “sistemas organizados”, que puede encontrarse en su gran obra *Biología Teórica* de 1932 (Pouvreau & Drack, 2007, p. 311), obra que se convertiría en uno de los principales libros

de texto en Alemania. Con referencia directa al nombre o no, la concepción organísmica de los seres vivos será central para la biología del siglo XX y para superar la ahora vieja dicotomía entre mecanicismos o fisicalismos y el vitalismo (E. Mayr, 1997, p. 2). Dar la primera formulación acabada de dicha concepción fue lo que le trajo reconocimiento internacional a Bertalanffy con la publicación de su *Kritische Theorie der Formbildung* en 1928.³ Allí explicita que el estudio de las propiedades de sistemas deja atrás el irresoluble debate entre vitalistas y mecanicistas, tomando lo mejor de ambas posiciones e incorporándolas en un nivel de descripción diferente, paso crucial para evitar el estancamiento que caracterizó al viejo debate:

El conflicto entre el "mecanicismo" y el "vitalismo" puede, por tanto, decidirse de una manera que no justifica incondicionalmente ninguno de los dos puntos de vista, sino que recoge los rasgos valiosos de ambas teorías, por ejemplo, el conocimiento de que las propiedades características de la vida se basan en sistemas materiales del mecanicismo, el reconocimiento de la "totalidad" de los fenómenos vitales del vitalismo. Más allá del mecanicismo y del vitalismo está la posibilidad de una "biología organísmica". Este punto de vista ve la característica esencial de la vida en su carácter de sistema, y la principal tarea de la biología en el futuro es el establecimiento de las leyes de los sistemas biológicos. (Bertalanffy 1928/1933, p. 188)

Un ingrediente fundamental para lograr la descripción de los organismos como sistemas y luego como sistemas abiertos es el desplazamiento del énfasis hacia el desarrollo y el crecimiento como problema fundamental de la biología, dejando atrás las explicaciones funcionales y mereológicas. Esto requiere, a su vez, un cambio en el lenguaje que se usa para describir los fenómenos y Bertalanffy lo encuentra en la posibilidad de dar un modelo matemático del crecimiento de los animales. Influenciado por los modelos de crecimiento disponibles entonces, particularmente los de D'Arcy Thompson (1917) y de Julian J. S. Huxley (1924), y por la aplicación de la matemática que habían hecho, independientemente, Alfred Lotka y Vito Volterra para problemas de poblaciones, Bertalanffy da un modelo de crecimiento para animales acuáticos basado en el ritmo metabólico. En su modelo propone una generalización de la idea básica sobre el proceso del metabolismo como un equilibrio entre la descomposición de nutrientes para obtener energía (catabolismo)

³Dicha obra fue bastante influyente, especialmente entre los biólogos ingleses. Un caso interesante es el de Joseph Woodger (1894-1981), quien influenciado por la obra de Bertalanffy publicó *Biological Principles* en 1929 aunque con claras intenciones positivistas, ya que en dicha obra pretende dar comienzo a una unificación de la biología a base de principios formales y clara relación con resultados experimentales sin depender de explicaciones narrativas, a las que considera como características de una ciencia inmadura. Probablemente dicho libro haya sido la causa del desprecio de las historias naturales y del estudio de la evolución en las universidades anglófonas en la década de 1930. Woodger tradujo el libro de Bertalanffy al inglés, publicado en 1933 como *Modern Theories of Development: An Introduction to Theoretical Biology*. Woodger también fue uno de los fundadores del grupo *Theoretical Biology Club*, según Popper "sin duda uno de los círculos de estudio más interesantes en el campo de la filosofía de la ciencia" (Popper, 1981, p. 329). Popper asistió a algunas reuniones de dicho grupo, aunque nunca fue un miembro estable, como sí lo fueron, entre otros, Joseph y Dorothy Needham, C.H. Waddington, John Bernal y Dorothy Wrinch. (Peterson, 2016) es una de las mejores historias disponibles de dicho club.

y el consumo de dicha energía para construir y mantener las estructuras del organismo (anabolismo). A modo de simplificación se puede considerar que el catabolismo depende de la masa del cuerpo mientras que el anabolismo depende de la superficie del cuerpo, dada su conexión con la respiración. Dado que a medida que el volumen aumenta, el ritmo de crecimiento de la superficie disminuye, es de esperar que los animales tengan una tendencia a dejar de crecer cuando los procesos anabólicos y catabólicos encuentren un equilibrio. Es precisamente esta “morfología dinámica” la que Bertalanffy puede expresar con la siguiente simple ecuación, en la que el exponente a tiene el valor $\frac{2}{3}$, $m(t)$ es la masa en función del tiempo y q y p parámetros:

$$\frac{dm(t)}{dt} = pm(t)^a - qm(t)$$

Es importante señalar que p y q son parámetros empíricos, que deben ajustarse a los datos de observaciones disponibles y no a predicciones teóricas. Esto es característico de toda la obra de Bertalanffy: toda creación de modelos de un fenómeno no puede estar alejada de los datos empíricos disponibles.

La descripción del organismo como un sistema abierto surge precisamente como una forma de dar mayor sustento teórico a este modelo.⁴ La obvia contraparte a los sistemas abiertos son los sistemas cerrados, es decir, aquellos que no intercambian materia ni energía con el medio que los rodea. Una de las características de estos sistemas es su profundo respeto por la segunda ley de la termodinámica, lo que los lleva tan pronto como es posible al equilibrio en el estado menos ordenado, en donde su entropía es máxima y las diferentes configuraciones que se pueden distinguir en ellos son mínimas. Esta descripción, evidentemente, no es válida para los seres vivos:

Todo organismo viviente es ante todo un sistema abierto. Se mantiene en continua incorporación y eliminación de materia, constituyendo y demoliendo componentes, sin alcanzar, mientras la vida dure, un estado de equilibrio químico y termodinámico, sino manteniéndose en un estado llamado uniforme [*steady*] que difiere de aquél. Tal es la esencia misma de ese fenómeno fundamental de la vida llamado metabolismo, los procesos químicos dentro de las células vivas. ¿Y entonces? Es obvio que las formulaciones habituales de la física no son en principio aplicables al organismo vivo *qua* sistema abierto y en estado uniforme, y bien podemos sospechar que muchas

⁴Sobre el posible uso heurístico de los modelos y de las concepciones teóricas “generales” comenta Bertalanffy: “Es claro que principios generales como los que vamos a desarrollar no llegan a suministrar una explicación detallada de estos problemas; podrán, cuando menos, indicar el fundamento físico general de una característica esencial de la vida, la autorregulación del metabolismo y la conservación de componentes a través del cambio. El modo especial como esto se realiza en los procesos metabólicos sólo lo puede determinar la investigación experimental. Es de esperarse, no obstante, que la consideración general despierte la atención hacia posibilidades hasta la fecha apenas tenidas en cuenta, y que las formulaciones propuestas, o ecuaciones parecidas, permitan describir fenómenos concretos” (von Bertalanffy, 1968/1976, p. 128). El capítulo es un trabajo originalmente de 1940, “Der Organismus als physikalisches System betrachtet” (von Bertalanffy, 1940)).

características de los sistemas vivos que resultan paradójicas vistas según las leyes de la física son consecuencia de este hecho. (von Bertalanffy, 1968/1976, p. 128)

Es ese constante flujo de elementos lo que le permite al organismo mantenerse en un estado de *no equilibrio* (contrastado con el equilibrio termodinámico). El término que introduce Bertalanffy en alemán para denominar a este estado es “*Fliessgleichgewicht*”, que se podría traducir por “equilibrio de flujo” y sin duda haber comenzado el estudio matemático de estos sistemas es uno de los principales aportes científicos de esta época, partiendo de una ecuación general como la siguiente para un sistema de varios elementos descritos por un sistema de ecuaciones simultáneas:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial t} = T_i + P_i$$

en la que Q_i representa la magnitud del elemento i -ésimo del sistema, T_i la velocidad de transporte de dicho elemento en un punto definido del espacio y P_i la producción de dicho elemento en el mismo punto. Inmediatamente después de introducirla, comenta sobre su generalidad diciendo que “muchas ecuaciones que aparecen en física, biología y hasta sociología pueden ser consideradas casos especiales de [esta ecuación]” (von Bertalanffy, 1968/1976, p. 130). Es precisamente esta generalidad del modelo, que le permite ser aplicado a distintas clases de fenómenos bajo una misma descripción, lo que fomentará el estudio general de los sistemas abiertos que podría conducir a resultados en otras disciplinas como los obtenidos en biología mediante la descripción del organismo como sistema abierto. Esto es lo que dotaría a dichos modelos de cierto “principio unificador”:

Hace años se apuntó que las características fundamentales de la vida, el metabolismo, el crecimiento, el desarrollo, la autorregulación, la respuesta a estímulos, la actividad espontánea, etc., pueden a fin de cuentas considerarse consecuencias del hecho de que el organismo sea un sistema abierto. La teoría de tales sistemas, pues, sería un principio unificador capaz de combinar fenómenos diversos y heterogéneos bajo el mismo concepto general, y de derivar leyes cuantitativas. Creo que esta predicción ha resultado correcta en conjunto y que atestiguan en su favor numerosas investigaciones. (von Bertalanffy, 1968/1976, p. 155))

La Teoría General de los Sistemas puede verse como una extensión natural de la teoría de los sistemas abiertos, siendo esta última una parte integral de la primera. La expresión alemana original “*allgemeine Systemlehre*” hace referencia a algo así como “estudio general de sistema”, la incorporación del plural y la traducción de “*Lehre*” por “teoría” fue producto de la traducción al inglés de la expresión como “General Systems Theory”, expresión que no era del agrado de Bertalanffy, pero que continuó usando.⁵ El claro ob-

⁵Si bien “*Lehre*” se suele traducir como teoría como es el caso, por ejemplo, de la teoría de conjuntos (*Mengelehre*), una traducción más fiel al alemán sería “doctrina” o “enseñanza”. Peuvreu y Drack (2007)

jetivo de esta nueva disciplina será “la formulación y derivación de aquellos principios que son válidos para los ‘sistemas’ en general” (von Bertalanffy, 1968/1976, p. 32).⁶ Uno de los lugares donde más claramente se puede apreciar el alcance de dicho objetivo es en el programa de investigación de la primera sociedad creada para fomentar el estudio general de los sistemas:

La Sociedad para la Investigación General de Sistemas fue organizada en 1954 para impulsar el desarrollo de sistemas teóricos aplicables a más de uno de los compartimientos tradicionales del conocimiento. Sus funciones principales son: 1) investigar el isomorfismo de conceptos, leyes y modelos en varios campos, y fomentar provechosas transferencias de un campo a otro; 2) estimular el desarrollo de modelos teóricos adecuados en los campos que carecen de ellos; 3) minimizar la repetición de esfuerzo teórico en diferentes campos; 4) promover la unidad de la ciencia mejorando la comunicación entre especialistas.(von Bertalanffy, 1968/1976, p. 14)

Los últimos tres objetivos son esencialmente consecuencia del primero, por lo que se puede afirmar que el objeto de estudio de la TGS es la relación posible entre modelos de distintas disciplinas y sus características, en busca de explicitar los principios comunes que yacen detrás de ellos. Así la TGS también puede —y pretende— volverse una suerte de árbitro para determinar cuándo un modelo de un sistema particular es un buen modelo.

3.1.2. TGS, modelos y complejidad

Propuesta desde el comienzo como una teoría que pretende aplicarse a fenómenos tan complejos como los organismos vivos y el comportamiento social a gran escala, considero que la TGS puede verse como el primer candidato completo en la historia para una metateoría de la complejidad, por lo que es un buen lugar para explorar lo que pueden llamarse *desiderata* para una buena metateoría de la complejidad. Cualquier aporte epistemológico significativo sobre la complejidad puede verse como una contribución a dicha metateoría. La TGS fue pionera en este sentido, aunque en retrospectiva puede verse como un tanto incompleta. Sin embargo, sentó las bases para las interpretaciones de la complejidad que

sugieren usar en inglés “general sistemology” como una mejor traducción, que se podría expresar como “sistemología general” en español. Si bien reconozco lo poco feliz que es la carga semántica del término “teoría”, conservo la expresión original.

⁶Si bien el punto de partida para la generalización a sistemas es el sistema abierto, Bertalanffy siempre hace referencia a la organicidad detrás de la TGS, en el sentido de su concepción organísmica. Al criticar el rol hegemónico de la física para la comprensión de la ciencia y de la tecnología, no duda en aludir a la “revolución organísmica” como la única concepción que puede hacerle frente: “Mientras tanto, sin embargo, han surgido nuevas ciencias, las de la vida, el comportamiento y sociales. Piden un lugar en una visión moderna del mundo y deben lograr contribuir a una reorientación básica. Menos divulgada que las revoluciones contemporáneas en la tecnología, pero igualmente preñada de futuras posibilidades, es una revolución que se basa en modernos adelantos en la ciencia biológica y del comportamiento. Llamémosla, en dos palabras, *revolución organísmica*. Su meollo es la noción de sistema -en apariencia un concepto palido, abstracto y vacío; pleno, sin embargo, de sentido oculto, de levadura y de potencialidades explosivas” (Bertalanffy, 1968/1976, p. 196. Énfasis en el original).

vendrían.

Una de las primeras cosas a señalar es que la teoría general de los sistemas no entra en detalle en considerar cuándo un sistema es complejo y cuándo no, aunque da algunas indicaciones de que en su mayoría trata de sistemas complejos. Ahora bien —y éste es quizás uno de los aspectos más paradójicos de la TGS—, Bertalanffy nunca logra dar una definición lo suficientemente robusta de “sistema”, de hecho, las primeras definiciones son bastante tardías. Una de las definiciones más precisas aparece casi accidentalmente, como una aclaración a por qué se pueden identificar ciertas características comunes entre fenómenos de fisicoquímica y de economía:

Se da el caso de que iguales sistemas de ecuaciones se aplican en ciertos campos de la fisicoquímica y de la economía. Esta correspondencia se debe a que las entidades consideradas pueden verse, en ciertos aspectos, como «sistemas», o sea complejos de elementos en interacción.⁷ (von Bertalanffy, 1968/1976, p. 33. El énfasis es mío)

En este caso tampoco encontramos una definición de complejo por lo que quizá sea mejor interpretarlo como sinónimo de conjunto es decir una cantidad por lo que el peso de la definición de sistema pasa por el término “interacción”. Así, un sistema estaría caracterizado por ser un conjunto de elementos interconectado entre sí, pero cuyas interacciones ni el resultado de las mismas pueden ser comprendidos mediante métodos analíticos, visto que “el problema de los sistemas es esencialmente el problema de las limitaciones de los procedimientos analíticos en ciencia” (Bertalanffy, 1968/1976, p. 17). Por dichos procedimientos, Bertalanffy entiende el análisis por descomposición, característico de la ciencia mecanicista, que pretende desarmar cualquier conjunto de elementos y volverlos a sumar considerando que no hay interacciones entre dichas partes o bien son tan débiles que pueden ser dejadas fuera del análisis. La otra condición necesaria para el análisis es la linealidad de las relaciones existentes en la descripción de las partes. Dando otra “definición accidental” de sistema, dice Bertalanffy que “semejantes condiciones no las cumplen las entidades llamadas sistemas, o sea consistentes en partes ‘en interacción’”. Inmediatamente, comenta sobre la forma en la que se pueden representar dichos sistemas: “el prototipo de su descripción es un conjunto de ecuaciones diferenciales simultáneas, que son no lineales en el caso general. Puede ser circunscrito un *sistema o ‘complejidad organizada’* merced a la existencia de interacciones [...] no lineales” (von Bertalanffy, 1968/1976, p. 18. El énfasis es mío).

La expresión “complejidad organizada” es un préstamo de Warren Weaver. Weaver (1948) introduce una distinción entre tres clases de problemas científicos. Los primeros son los “problemas de simplicidad”, que son aquellos que pueden resolverse mediante el análisis mecánico que caracterizaron al éxito predictivo y explicativo de la física en el pe-

⁷Esta cita se encuentra en el capítulo II, cuyo núcleo es el artículo “General System Theory” (Bertalanffy, 1955).

río entre los siglos XVII y XIX. En el otro extremo, Weaver coloca a los “problemas de complejidad desorganizada” que son aquellos que involucran un número de elementos o variables muy elevado, quizás con comportamiento individual bastante errático o incluso incognoscible, pero que “como un todo posee ciertas propiedades promedio ordenadas y analizables” (Weaver, 1948, p. 538). Estos son problemas que se pueden atacar mediante las herramientas matemáticas desarrolladas a finales del siglo XIX y principios del XX en la teoría de la probabilidad y de la mecánica estadística. Weaver reconoce explícitamente el impacto de esta concepción sobre nuestra visión del mundo y sus implicancias para la epistemología:

La estructura entera de la física moderna, nuestro concepto actual de la naturaleza del universo físico y de los datos experimentales accesibles que le conciernen descansan sobre estos conceptos estadísticos. De hecho, hoy se reconoce que toda la pregunta por la evidencia y la manera en la que el conocimiento puede ser inferido de la evidencia dependen en estas mismas ideas estadísticas, por lo que las nociones de probabilidad son esenciales para cualquier teoría del conocimiento mismo. (Weaver, 1948, p. 538)

Los problemas de la complejidad organizada son aquellos que quedan entre estos dos extremos, en los que ni el análisis simple ni la perspectiva estadística pueden, por sí mismos, dar cuenta de lo que ocurre en dichos fenómenos. La mayoría de los problemas biológicos, sociológicos y económicos entran dentro de esta categoría, por lo que cualquier intento de utilizar las herramientas “clásicas” de las ciencias necesariamente dejarán una gran parte del fenómeno fuera de la imagen y muchas veces la parte que queda fuera es crítica para entender, explicar y predecir dicho fenómeno. La tarea que Weaver le encomienda a la ciencia es la de transformarse para poder lidiar con estos problemas:

Estos nuevos problemas, y el futuro del mundo depende de mucho de ellos, requieren que la ciencia haga un tercer gran avance, un avance que necesita ser incluso mayor que la conquista del siglo XIX sobre los problemas de simplicidad o que la victoria durante el siglo XX sobre los problemas de complejidad desorganizada. La ciencia debe, durante los próximos 50 años, aprender a lidiar con estos problemas de complejidad organizada. (Weaver, 1948, p. 540)

De manera análoga a como el peso en la definición de sistema está puesto en las interacciones y no en el conjunto de los elementos, en la definición de este universo de problemas el énfasis está en la noción de organización. Bertalanffy comenta así sobre la diferencia de este universo comparado con los “clásicos” y el rol que la TGS puede tener para lidiar con ellos:

En contraste, hoy el problema fundamental es el de la complejidad organizada. Conceptos como los de organización, totalidad, directividad, teleología y diferenciación son ajenos a la física habitual. Sin embargo, asoman a cada paso en las ciencias biológicas, del comportamiento y sociales, y son de veras indispensables para vérselas

con organismos vivientes o grupos sociales. De esta manera, un problema fundamental planteado a la ciencia moderna es el de una teoría general de la organización. La teoría general de los sistemas es capaz en principio de dar definiciones exactas de semejantes conceptos y, en casos apropiados, de someterlos a análisis cuantitativo. (von Bertalanffy, 1968/1976, p. 34)

Claro que, según la postura de Bertalanffy, dicha transformación de la ciencia facilitada por la TGS debería estar acompañada por un cambio en la visión del mundo en general y, en particular, un cambio sobre la concepción del conocimiento. La TGS podría ser también un facilitador en dicha búsqueda. Además de la nueva mirada del “mundo como organización” (von Bertalanffy, 1968/1976, p. 196) —en obvia contraposición con el mundo como caos del siglo y medio anterior—, la generalidad propia de los modelos de la TGS le permitirían tener un rol protagónico no sólo a la hora de organizar el conocimiento científico sino también para su regulación. Casi como es de esperarse, el concepto de modelo será clave en esta transformación de la ciencia y del mundo promovida por la TGS.

3.1.3. Perspectivismo y antireduccionismo

El énfasis en los sistemas —aunque a esta altura quizás convenga hablar directamente del énfasis en los modelos— es lo que le permite a Bertalanffy explicitar su visión de la estructura del conocimiento científico de manera más detallada y el rol de la TGS como reguladora de la ciencia. El nombre que le da a su posición epistemológica es el de “perspectivismo” con lo que quiere enfatizar que toda concepción de un hecho no es más que una de las tantas perspectivas posibles y que no hay ninguna que pueda agotar al hecho, en el sentido de poder cubrir a todas las perspectivas. La primera consecuencia de dicho perspectivismo para el conocimiento científico es una clara oposición a la mirada de corte reduccionista favorecida por el positivismo lógico, según la cual la verdadera naturaleza de los fenómenos yacía estrictamente en su naturaleza física, por lo que era éste el lugar para buscar las buenas explicaciones y todas las explicaciones de las otras disciplinas científicas debían reducirse a una buena explicación en el nivel de la física. El perspectivismo rechaza esta visión y la reemplaza por una en la que la autonomía de cada nivel es crucial, por lo que considera que puede haber buenas explicaciones en cada uno de ellos, apelando a leyes propias de cada nivel. Sin duda en este movimiento hay un intento de recuperar los aportes intelectuales de principios de siglo —como los de Reinke y de von Uexküll— que pretendían darle a la biología un espacio propio e irreductible en el campo de las disciplinas científicas. Ahora bien, pese al énfasis puesto sobre la biología, el perspectivismo no intenta fundamentar un “biologismo”, según el cual la biología debería verse como el ideal científico y que pretende explicar todos los fenómenos como si fueran biológicos.⁸

⁸“El biologismo no ha revelado sus méritos, y ha resultado fatal en materia de consecuencias prácticas. La concepción organísmica no significa el predominio unilateral de concepciones biológicas. Aunque haga hincapié en isomorfismos estructurales generales entre diferentes niveles, asevera al mismo tiempo su autonomía y posesión de leyes específicas” (von Bertalanffy, 1968/1976, pp. 90–91).

Los modelos o representaciones esquemáticas de la realidad son lo central en esta nueva perspectiva del conocimiento científico. De hecho, Bertalanffy parece identificar directamente a las leyes científicas con los modelos:

La estructura de la realidad es tal que permite la aplicación de nuestras construcciones conceptuales. Nos damos cuenta, sin embargo, de que *todas las leyes científicas no representan más que abstracciones e idealizaciones que expresan ciertos aspectos de la realidad. Toda ciencia es una imagen esquematizada de la realidad*, en el sentido de que determinada construcción conceptual está inequívocamente vinculada a ciertos rasgos de orden en la realidad; precisamente como los planos de un edificio no son el edificio, ni lo representan en modo alguno cabalmente. (von Bertalanffy, 1968/1976, p. 85. El énfasis es mío)

Así, los modelos son construcciones conceptuales que pueden expresar condensadamente ciertos rasgos ordenados de la realidad, opuestos a un mero ruido caótico.⁹ Además, ningún modelo puede dar una descripción acabada de un fenómeno por lo que la TGS cumple con el requisito de la necesidad de múltiples modelos de las metateorías de la complejidad:

No se plantea la cuestión de la «verdad» última, es decir, de hasta qué punto el plano de la realidad tal como lo traza la ciencia sea correcto o susceptible de mejoramiento; ni la cuestión de si será expresable en un solo plano -el sistema de la ciencia humana- la estructura de la realidad. Es de suponerse que serían posibles o incluso necesarias diferentes representaciones [...]. (von Bertalanffy, 1968/1976, p. 168)

Claro que aquí Bertalanffy está permitiendo que otras representaciones además de los mismos modelos científicos sean susceptibles de describir algunas facetas del mundo real, representaciones que pueden ser también artísticas, por ejemplo. Ahora bien, más allá de que no se plantee la pregunta por la “verdad última”, sí se plantea la necesidad de determinar cuándo una representación científica es una buena representación de un fenómeno. Si bien Bertalanffy está de acuerdo en aceptar muchas representaciones para un mismo fenómeno natural, no toda representación tendrá el mismo peso epistémico. Su perspectivismo no es un relativismo y la tarea de llevar a cabo la selección de “buenos” modelos es parte de la actividad de la TGS como integradora y reguladora de la ciencia. Es decir, será el rol de la TGS determinar cuando un modelo está lo suficientemente fundado en la realidad, en cuanto captura cierto orden relevante de ésta, para decir que se trata de un buen modelo.

Para justificar la factibilidad de esta capacidad de arbitraje por parte de la TGS, Bertalanffy identifica tres clases de descripciones en la práctica científica, a los que denomina analogía, homología y explicación. Las analogías consisten en meras semejanzas

⁹Es importante notar que Bertalanffy no hace un uso técnico del término caos, sino que lo emplea metafóricamente como azar o como ruido, aquello contrario al orden, pese a sus conocimientos de teoría de sistemas dinámicos; el caos como fenómeno bien identificado dentro de dicha teoría sería mucho más estudiado recién durante la década de 1970 (ver A. A. Ilcic, 2015, especialmente pp. 50–57).

superficiales entre fenómenos, es decir que no presentan correspondencia alguna entre factores causales ni las leyes que se usan para describirlos. Un ejemplo de una analogía *per se* sería la descripción de un bosque como un organismo, ya que se sabe que la asociación entre los integrantes de un bosque es muy diferente de la de un organismo. Por otro lado, una homología se da cuando se conoce que los factores eficientes o causales de dos fenómenos son distintos, pero se pueden emplear las mismas descripciones o modelos, ya que comparten alguna dinámica de mayor orden. (Para la TGS es mucho más importante el énfasis en la dinámica por sobre la estructura.¹⁰) El uso del gradiente, un concepto propio de la hidrodinámica, para los potenciales eléctricos es un claro ejemplo de una homología: formalmente es la misma ley pese a que la materialidad de los dos casos sea completamente distinta. Dada la interpretación abstracta de la dinámica que está detrás de la homología, Bertalanffy no duda en colocar a las “homologías lógicas” en el centro de atención de la TGS:

Es de homologías lógicas de lo que se ocupa la presente investigación. Esto es expresable así: si un objeto es un sistema, debe tener ciertas características de los sistemas, sin importar de qué sistema se trate. La homología lógica no sólo permite el isomorfismo en la ciencia sino que, como modelo conceptual, está en situación de dar instrucciones para la consideración correcta y la eventual explicación de fenómenos. (von Bertalanffy, 1968/1976, p. 87)

Esta “eventual explicación” es el tercer nivel o clase de descripción científica y consiste en la adecuación de una homología lógica para un caso particular, apelando también a las condiciones y leyes específicas necesarias para el caso, provenientes del conocimiento de dominio propio del ámbito del fenómeno a explicar. Si se parte por ejemplo de una homología lógica expresada por una ecuación general (como la indicada más arriba), el reemplazo de las funciones generales por las específicas para expresar las propiedades del caso más las condiciones iniciales sería una explicación. Para Bertalanffy, más allá de lo útiles que puedan ser las explicaciones de fenómenos particulares, el verdadero progreso científico radica en la obtención de más y mejores homologías ya que son las que responden a la consideración de ciertos fenómenos como sistemas. Es precisamente con respecto a las homologías que la TGS puede jugar su rol clave en tanto que puede hacer de regulador y árbitro para identificar cuando una similitud identificada es una mera analogía o puede tratarse de una verdadera homología y, por lo tanto, poder utilizar un modelo general para el nuevo fenómeno identificado como similar a otro:

Las analogías son científicamente inválidas. En cambio, las homologías a menudo proporcionan modelos valiosos; de ahí su amplia aplicación en física. De modo similar, la teoría general de los sistemas puede servir de *dispositivo regulador para discernir analogías y homologías, parecidos sin sentido y traslados significativos de modelos*. Esta

¹⁰“En la ciencia moderna la interacción dinámica parece ser el problema central en todos los campos de la realidad. La teoría de los sistemas definirá sus principios generales” (von Bertalanffy, 1968/1976, p. 91).

función se aplica particularmente a ciencias que, como la demografía, la sociología y grandes áreas de la biología, no encajan en el marco de la física y la química; no obstante, hay leyes exactas que pueden enunciarse por aplicación de modelos adecuados. (von Bertalanffy, 1968/1976, p. 88. El énfasis es mío)

Quizás pueda parecer una exageración, pero dado el énfasis en los modelos y el rol de la TGS como árbitro de buenos modelos y de cuándo los mismos pueden ser trasladados entre diferentes dominios de conocimiento —creando en el proceso el nivel de los sistemas como dominio propio de conocimiento— me hacen pensar en la TGS como una teoría general de los modelos, en el que la noción de sistema es más bien un medio para señalar cómo es que los modelos científicos pueden dar cuenta de fenómenos generales (o de sistemas) y de fenómenos particulares (mediante explicaciones) y es mediante los modelos de sistemas que se puede dar mejor cuenta de las jerarquías de la naturaleza y de los procesos de abstracción científicos gracias a los cuales se pueden formular los principios relativos a sistemas.

En otros pasajes, Bertalanffy es todavía un poco más explícito con respecto a la relación entre modelos y sistemas, destacando al mismo tiempo la importancia de la analogía para el razonamiento científico:

Se conviene de ordinario en que «sistema» es un *modelo* de naturaleza general, esto es, un análogo conceptual de algunos rasgos muy universales de entidades observadas. El uso de modelos o construcciones analógicas es práctica general en la ciencia (y aun en la cognición cotidiana), y es asimismo fundamento de la simulación analógica con computadora. La diferencia con respecto a las disciplinas tradicionales no es esencial sino que reside más bien en el grado de generalidad (o abstracción): «sistema» alude a características muy generales compartidas por gran número de entidades que acostumbraban ser tratadas por diferentes disciplinas. De aquí la naturaleza interdisciplinaria de la teoría general de los sistemas; al mismo tiempo, sus enunciados atañen a comunalidades formales o estructurales, dejando a un lado la «naturaleza de los elementos o fuerzas del sistema», de [las] que se ocupan las ciencias especiales (y sus explicaciones). (Bertalanffy, 1968/1976, pp. 262–263. Énfasis en el original.¹¹)

La centralidad del concepto de modelo para la TGS es doble entonces, porque por un lado identifica la importancia de dicho concepto para la práctica científica y por otro lado busca generar un espacio de conocimiento sobre las propiedades generales de dichos modelos, a fin de poder identificar propiedades comunes entre ellos, apoyándose en la *abstracción*

¹¹El pasaje es del primer apéndice de la edición revisada de (Von Bertalanffy, 1968), que fue la base de la traducción al español (von Bertalanffy, 1968/1976). Si bien el apéndice, titulado “Notas sobre adelantos en la teoría matemática de los sistemas”, se identifica como de 1971, año de la edición revisada, dicho apéndice está basado en una conferencia no publicada de 1947, lo que, nuevamente, sugiere la manera en que la preocupación por las analogías y su posible formalización —y la transferencia de conocimiento entre dominios distintos que esto habilita— fue uno de las preocupaciones centrales que condujeron a sugerir una teoría general de sistemas.

de sistemas. Y es aquí donde creo que debe verse la principal contribución filosófica de la TGS, en señalar al espacio de modelos científicos como núcleo epistémico a ser trabajado por la filosofía de la ciencia, casi 40 años antes del “giro pragmático” en la concepción filosófica de los modelos.¹²

Además del énfasis en los modelos, el perspectivismo sugerido por la TGS tiene como consecuencia un cambio radical en la concepción de la naturaleza de la empresa científica, ya que de ninguna manera busca reducir los modelos de una disciplina a los de otra “más básica” sino que defiende constantemente la autonomía de cada uno de los niveles de explicación de dichas disciplinas, niveles que se corresponden con los niveles presentes en la realidad, niveles que sólo pueden identificarse adecuadamente desde la perspectiva de los sistemas:

La homología de características de sistemas no implica reducción de un dominio a otro inferior. Pero tampoco se trata de mera metáfora o analogía; es, antes bien, una correspondencia formal fundada en la realidad, en la medida en que puede considerarse constituida de «sistemas» de la índole que sea. (von Bertalanffy, 1968/1976, p. 88)

Esta concepción del conocimiento científico en el que no hay reducción de los modelos a un nivel más básico, en tanto se considera que el dominio de explicación es autónomo no es una mera concepción epistemológica, sino que al estar sujeta a dicha “correspondencia formal fundada en la realidad”, la interpretación de dicha realidad de múltiples “estratos” o “capas” sugieren que Bertalanffy pensaba en una ontología basada en niveles entre los cuales pueden existir superposiciones, aunque son claramente distintos. Bertalanffy no es explícito en qué es lo que los distingue pero por todo lo anterior y los ejemplos que utiliza creo que se puede afirmar que él veía por un lado una ruptura o un espacio entre dichos niveles creado por el tipo de fenómenos que puede sostener cada nivel, medidos con respecto a la complejidad de su organización, mientras que por otro lado consideraba que existían ciertas “uniformidades estructurales” entre las características de cada nivel y que son ellas las que se pueden apreciar mediante el estudio de los sistemas y la verdadera garantía de la unidad de la ciencia, ya que podrían identificar lo común dentro de la variedad de estratos de la realidad. En sus palabras:

La realidad, concebida de un modo nuevo, se presenta como un tremendo orden jerárquico de entidades organizadas que va, en superposición de numerosos niveles, de los sistemas físicos y químicos a los biológicos y sociológicos. La unidad de la ciencia no es asegurada por una utópica reducción de todas las ciencias a la física y la química.

¹²Quizás sea este un buen lugar para remarcar que Mary Hesse, una de las pioneras en llevar a cabo un ajuste de la reflexión filosófica sobre modelos científicos para que sea mucho más cercana a la forma en la que fueron y son usados en contextos de descubrimiento y generación de conocimiento, también se vio motivada por una preocupación semejante: el rol de las analogías como estrategia de descubrimiento y la pregunta por qué clase de práctica epistémica legitiman (Hesse, 1961, 1964, 1965, 1966).

ca, sino por las uniformidades estructurales entre los diferentes niveles de la realidad.
(von Bertalanffy, 1968/1976, p. 90)

Aquí es importante la introducción del orden jerárquico, ya que la posición de los niveles en dicha jerarquía depende justamente de la clase de entidades organizadas que pueden sostener, lo que presupondría, como dije antes, alguna forma de medir el grado de organización de dichas entidades. Más allá de señalar la importancia de las interacciones no lineales, Bertalanffy no ofrece explícitamente una forma de establecer con precisión el grado de complejidad de las entidades, sino que parece depender en una suerte de reconocimiento por sus efectos o bien por la dificultad de aplicar los métodos analíticos o mecanicistas para su análisis.

Si bien Bertalanffy tampoco es del todo explícito a la hora de exponer su ontología, muchas veces la dinámica es puesta en el foco de atención mientras que la estructura tiende a quedar relegada pese a que muchas veces es la estructura la que puede dar lugar a una dinámica rica y compleja, por lo que esta interacción y dependencia entre dinámica y estructura no está del todo bien analizada. Creo que dicho análisis y poder dar cuenta de su dependencia debería ser un requisito para una buena metateoría de la complejidad. El hecho de que Bertalanffy no lo haya considerado así puede ser resultado de la influencia de Whitehead, cuya metafísica de procesos y filosofía del organismo fueron sin duda claves para las primeras reflexiones de Bertalanffy sobre la concepción organísmica de la naturaleza. Esto es algo que también se ve reflejado en el desprecio que presenta por la posible utilidad de los conceptos de máquina y el de información, que serán presentados en la sección 3.5, tras una breve reconstrucción de la cibernética, disciplina muy cercana a la TGS en la cual estas nociones son centrales.

Quizás la principal lección que una metateoría de la complejidad puede obtener de la TGS en la formulación de Bertalanffy sea reconocer la importancia de atacar explícitamente el problema de los niveles de la naturaleza (en tanto problema ontológico) y el problema asociado de los posibles órdenes de su *organización*, lo que incluye determinar cuándo una descripción de un fenómeno está dada desde las partes y cuándo desde el todo. Son las partes las que interactúan, mientras que el todo está *relacionado*. Esta distinción puede ser utilizada para describir con mejor detalle cuándo dos interacciones dan lugar a una novedad, en tanto surge un fenómeno que no podía ser predicho ni descrito desde la descripción de cada una de las partes por separado, lo que hace al núcleo del concepto de emergencia. A su vez podría dar cuenta de cómo las relaciones, una vez establecidas, condicionan ciertas posibilidades de las interacciones, lo que suele asociarse a descripciones no-lineales. Estos puntos de análisis son centrales y emergen constantemente a lo largo de esta investigación.

Antes de presentar las reflexiones de Bertalanffy sobre los límites de las máqui-

nas y las otras direcciones que tomaron las investigaciones en el marco de la teoría de los sistemas, en la siguiente sección reconstruyo los puntos esenciales de la cibernética, disciplina que se desarrolló en paralelo a la TGS. La interacción de ambas comunidades generó una suerte de hibridación entre las dos posturas que se puede apreciar en la evolución de las mismas y en cómo sus conceptos fueron lentamente incorporados en el vocabulario de disciplinas más bien canónicas.

3.2. Las (primeras) cibernéticas

Desde el final de la Segunda Guerra Mundial, he estado trabajando en las numerosas ramificaciones de la teoría de los mensajes. Además de la teoría electrotécnica [*electrical engineering theory*] de la transmisión de mensajes, hay un campo más amplio que incluye no sólo el estudio del lenguaje, sino el estudio de los mensajes como medio de control de la maquinaria y la sociedad, el desarrollo de máquinas de computación y otros autómatas similares, ciertas reflexiones sobre la psicología y el sistema nervioso, y una nueva teoría tentativa del método científico.

Norbert Wiener (1954, p. 15)

La cibernética es quizás uno de los campos “más oscuros” de la historia de la ciencia, especialmente porque si bien dejó rastros y consecuencias por todos lados, como campo disciplinar en la actualidad es prácticamente inexistente. A su vez, es un campo poco estudiado por las historias de las disciplinas a las que más afectó, como la ciencia de la computación, las ciencias cognitivas y algunas ramas de la ingeniería. También, desde una suerte de prejuicio histórico, la creencia de que las máquinas que nos rodean en la actualidad son tan distintas a las máquinas que existían o se pensaban en la época en la que surgió la cibernética llevó a no tener en cuenta los posibles *insights* que los padres fundadores podrían haber tenido sobre las distintas formas de pensar a las máquinas. Es mi intención en esta sección poner de relieve algunos aspectos de esta disciplina que considero que la vuelven un lugar crucial para cualquier indagación sobre la naturaleza de los sistemas complejos y de nuestro acceso epistémico a ellos. Aunque lo haga bajo distintas denominaciones, me parece que es relativamente seguro afirmar que el “pensamiento cibernético” —en las múltiples acepciones que un término semejante puede tener— está más vivo que nunca y que su mirada sobre distintos aspectos de la complejidad son todavía válidos y necesarios de aplicar para una buena comprensión no sólo de los fenómenos complejos sino también de las oportunidades y de los peligros de la tecnología.

No pretendo aquí dar cabida cuenta del “pensamiento cibernético”, no es una tarea que pueda hacerse en tan solo una sección de una investigación. Las cibernéticas bien

podrían ser el objeto de estudio de varias tesis de doctorado por sí mismas. Mi reconstrucción estará sesgada por lo que considero sus aportes fundamentales para el estudio de la complejidad, con un claro énfasis puesto en la noción de modelo que se puede reconstruir y que considero central tanto para cualquier ciencia de los sistemas complejos como para la cibernética misma. Algunos aspectos de dicho énfasis en los modelos son similares a los planteados por la teoría general de los sistemas; sin embargo, por varias razones que aclararé, los métodos y los alcances son distintos. En particular, a diferencia de la TGS, para la cibernética los conceptos de máquina y de información son esenciales. Esto hace que al contrario de lo que sostenía Bertalanffy, quizás sea más conveniente ver a la TGS como una parte de la cibernética en sentido amplio que a la segunda como una parte limitada de la primera (ver sección siguiente).

La utilidad del concepto de información es hartamente reconocida en algunas disciplinas formales, pero también en disciplinas empíricas como la biología y de a poco también ha encontrado su lugar en la física, especialmente a medida que los informáticos abrieron embajadas en la tierra de los físicos (y estos hicieron lo mismo con sus nuevos colegas). También cobra un rol cada vez más importante en algunas corrientes filosóficas. Si bien me ocupé puntualmente de esta evolución más adelante en esta investigación, es importante remarcar que las semillas de todas estas interacciones fueron sembradas por los cibernetas, de las que me paso a ocupar a continuación.

Aunque es necesario primero aclarar algo sobre el uso del plural en “cibernéticas” y justificar el paso al singular. Uno de los referentes obvios del plural es el hecho de que se suelen distinguir entre la cibernética de primer y de segundo orden. La cibernética de segundo orden es una suerte de aplicación recursiva de la cibernética a la misma cibernética. Bajo este esquema, la cibernética de primer orden trataría sobre un fenómeno o sistema particular que se está estudiando mientras que la cibernética de segundo orden trataría sobre el sistema que observa el sistema, sobre el observador y no sobre lo observado. Esta distinción fue propuesta especialmente por von Foerster, con la que pretendía reaccionar ante el giro hacia la ingeniería que la cibernética había tomado durante la década de 1960, retomando explícitamente algunos señalamientos sobre el rol del observador y su influencia sobre el sistema que está siendo estudiado. Si bien esta posición es tan sugerente como interesante, no la voy a tratar directamente aquí, pero sí se verá que algunos de los puntos señalados por la cibernética de segundo orden ya estaban tratados por los primeros cibernetas. Esto hace a la segunda razón por la que se puede hablar de “las cibernéticas”: la cibernética de cada autor pone énfasis en diferentes aspectos por lo que se podría caracterizarla individualmente. Ahora bien, más allá de las diferencias, hay muchos puntos en común que a mi juicio alcanzan para ubicar toda esta serie de posiciones bajo una misma rúbrica, especialmente cuando se la entiende como una metateoría de la complejidad. De hecho, considero que el aporte fundamental de la cibernética radica en el reconocimiento de la importancia de la complejidad como objeto científico en sí mismo,

contando con conceptos como el de información y el de modelo como recursos.

3.2.1. Prolegómenos cibernéticos

Los nombres que uno puede asociar al “movimiento cibernético” son muy variados, especialmente de acuerdo a cómo se identifique el núcleo conceptual de la disciplina y a si un autor mismo se identificó alguna vez como “cibernético” o no. Por ejemplo, muchos no dudan en darle el rótulo a personajes como John von Neumann y Alan Turing, sin embargo, ellos nunca se dieron el rótulo de cibernéticos (especularé sobre algunas de las posibles razones por la que no lo hayan hecho en el capítulo siguiente, que está dedicado a sus ideas sobre el modelado y la forma de aproximarse a los fenómenos complejos). Sin duda el atractor principal del movimiento cibernético durante la década del 1940 es Norbert Wiener (1894–1964). Aunque algunos tardarían algo más en proclamarse cibernetas, otros miembros del movimiento —término que utilizo apenas descriptivamente, la cibernética no fue en sentido estricto un “movimiento”— fueron Warren McCulloch (1898–1969), el ya mencionado Heinz von Foerster (1911–2002), Ross Ashby (1903–1972) y Stafford Beer (1926–2002). Quizás relajando el requisito de haber usado el título de cibernético o ciberneta, en el conjunto se destacan miembros como Kenneth Building (1910–1993), Humberto Maturana (1928–2021), Francisco Varela (1946–2001), Margaret Mead (1901–1978) y Gregory Bateson (1904–1980).

En lo que sigue me enfoco especialmente en la obra de Wiener y en la de Ashby. La obra de Wiener es sin duda la más conocida. Su *Cibernética* fue la obra que se encargó de popularizar tanto el término cibernética como la disciplina y fue la introducción de muchos cibernetas a la cibernética como forma de pensar. La obra de Ashby, especialmente el caso de sus libros, es mucho más técnica y difícil de leer, pero contiene a mi juicio la exposición más clara de los tópicos centrales de la cibernética y es un claro ejemplo de las primeras reflexiones en torno a la epistemología del modelado. Pese a esto es una figura un tanto descuidada en las reconstrucciones históricas, especialmente de las ciencias cognitivas (Pickering, 2010; Venturelli, 2016).

Dos de los primeros trabajos fundamentales publicados sobre la cibernética no incluyen la palabra “cibernética” en ningún lugar; el término recién aparece cuando Wiener bautiza y define al “campo entero de la teoría del control y de la comunicación, ya sea en la máquina o en el animal, con el nombre de Cibernética, que formamos del griego κυβερνήτης [*kybernetes*] o timonero” (Wiener, 1961, p. 11).¹³ Se trata de dos artículos pu-

¹³En el trabajo de 1948 Wiener comenta que reconocen la influencia en la selección del término del trabajo de Maxwell, quien en 1868 publicó el primer tratamiento teórico sobre un mecanismo de retroalimentación: el regulador de Watt (Maxwell, 1868). En inglés el término para regulador es “*governor*” que proviene del latín *governare*, que es la forma que tomó el préstamo del griego *kybernao*. Quizás haciendo una referencia a Platón, quien había usado el término en el *Alcibíades* con referencia al auto-gobierno de una persona, Ampère utilizó el término en francés “*cybernétique*” en 1834 para referirse a la ciencia política. En la segunda

blicados en el *Philosophy of Science* en 1943 y en 1945, en los que los autores reflexionan en particular sobre algunos conceptos que debieron incorporar en su trabajo científico, especialmente durante sus aportes al acervo teórico detrás de la Segunda Guerra Mundial. En colaboración con Julian Bigelow (1913–2003), el trabajo de Wiener durante este período se enfocó en el diseño de un mecanismo de control automático para las armas antiaéreas. Para lograrlo esto es necesario reemplazar al operador humano por una máquina para que realice las operaciones mecánicas del sistema antiaéreo y, a su vez, para que realice la parte más difícil: calcular la posición futura del objetivo de manera tal de poder encontrar una configuración óptima de todos los componentes en juego para maximizar las chances de derribar al objetivo. El problema es extremadamente complejo, ya que se trata de un caso de predicción en tiempo real con información incompleta. Normalmente desde información de radar e inspección visual se infiere una función de movimiento que describe la trayectoria instantánea del objetivo, con lo que se logra una configuración inicial del arma. Si se procede a efectuar un disparo, la trayectoria del proyectil inicial se vuelve un dato más para el cálculo siguiente y puede usarse para corregir la configuración de acuerdo al error medido entre las dos trayectorias originales. El bucle continúa hasta que el objetivo es derribado o bien escapa el rango de acción del sistema de defensa.

Wiener y Bigelow pensaron en términos de una analogía con caso cotidiano que representa un problema similar de retro-alimentación: levantar un objeto con la mano. Tanto si el objeto está en movimiento como si está estacionario, el cerebro debe hacer un cálculo similar corrigiendo a cada momento el movimiento del brazo hasta alcanzar el objetivo y evitar el “error de cálculo” que representa no poder agarrar el objeto. Bigelow y Wiener discutieron esta idea con el amigo y colaborador de Wiener, el fisiólogo Arturo Roesenbluth, quien a su vez les informó sobre las distintas enfermedades que podían ocurrir en el sistema nervioso motor que dificultaban o imposibilitaban llevar a cabo la tarea.¹⁴ Sobre la teoría resultante, comenta Heims:

Lo que emergió fue una teoría matemática de gran generalidad, una teoría para predecir el futuro de la mejor manera posible en base a información incompleta acerca del pasado. Era una teoría completamente estadística, se apoyaba en teoremas ergódicos y hacía uso del trabajo anterior de Wiener sobre ecuaciones integrales y análisis

edición de *The Human Use of Human Beings* (1954), Wiener comenta que originalmente no sabía del término usado por Ampère (Wiener, 1951/1989, p. 15). El trabajo de Maxwell es sumamente interesante, en particular por cómo conecta los diseños físicos con los modelos matemáticos, usando a los primeros principalmente como excusa para describir clases de comportamiento que pueden modelarse abstractamente, actividad que él mismo tuvo que hacer para lograr escribir su modelo del campo electromagnético. (O. Mayr, 1971) es el mejor artículo que conozco acerca del paper de Maxwell, sus intenciones modeladoras y el entorno histórico en el que fue escrito. El primer regulador moderno digno de ese nombre es bastante anterior al de Watt, en tanto sería el tipo de termostato de mercurio que Cornelis Drebbel (1572–1633) diseñó para su horno —el Athanor—, que aunque nunca logró convertir el plomo en oro sí ayudó a mantener hogares agradables y a incubar pollos (O. Mayr, 1970).

¹⁴Curiosamente, a la máquina también le podían ocurrir algunas de estas enfermedades en las que ciertos intentos de corregir un movimiento podía llevarla a un estado prácticamente caótico.

de Fourier. Esta teoría ayudó a revolucionar el campo entero de la ingeniería de comunicaciones, especialmente poniendo a las consideraciones estadísticas en primera plana, formando así la base moderna de la teoría de la comunicación estadística. (Heims, 1980, pp. 183–184)

Hacia 1942 ya contaban con prácticamente todos los elementos que formarían el núcleo conceptual de la cibernética. Este es un caso filosóficamente muy fértil que puede ser explorado desde distintas aristas, especialmente por tratarse de un caso de descubrimiento simultáneo, ya que gran parte de la construcción teórica de Wiener es análoga a la teoría de la información de Shannon (vuelvo a la conexión entre información y cibernética más adelante). Lo que me interesa remarcar son las conclusiones netamente filosóficas que los mismos autores extraen del caso en los artículos que ya mencioné. El primero fue escrito por Rosenblueth, Bigelow y Wiener y sus objetivos son “definir el estudio comportamental [*behavioristic*] de los eventos naturales y clasificar al comportamiento” por un lado y, por el otro, “resaltar la importancia del concepto de propósito” (Rosenblueth y col., 1943, p. 18). Estos dos objetivos están atados, ya que el propósito les sirve como criterio de distinción para la taxonomía de comportamientos. La característica principal del método comportamental es que, al concentrarse en la relación entre las entradas y las salidas del objeto que se está estudiando, el objeto es tomado como una caja negra, por lo que lo más importante es su relación con el ambiente que lo rodea en tanto no se presume como punto de partida ninguna organización o causa interna que dé cuenta del comportamiento que se observa. Lo único que se asume es el punto de corte entre el objeto y su ambiente. El estudio comportamental se distingue principalmente de un estudio funcional de los fenómenos, en el cual “el objetivo principal es la organización intrínseca de la entidad estudiada, su estructura y sus propiedades”; mientras que “las relaciones entre el objeto y lo que lo rodea son relativamente incidentales” (Rosenblueth y col., 1943, p. 18).¹⁵ Aquí se puede observar, a mi juicio, una de las primeras reflexiones sobre la importancia de seleccionar el correcto nivel de descripción del fenómeno. A su vez, si bien hay un claro énfasis en las explicaciones comportamentales esto no significa que las explicaciones funcionales vayan a quedar de lado, ni tampoco significa una plena aceptación del comportamentalismo o behaviorismo como recurso explicativo óptimo en biología y psicología. De hecho, considero que uno de los grandes aportes de la cibernética es que insistió en mantener las dos clases de explicaciones en paralelo, usando una para iluminar la otra, especialmente mediante el recurso a distintas clases de modelos, gracias a una particular interpretación de qué es un modelo, la que comento más adelante. Por lo pronto es importante remarcar la importancia del *método* propio de la cibernética para estudiar un sistema. Unos años

¹⁵El vocabulario no es común a todos los cibernetas, por lo que hay que tener cuidado cuando se compare el uso de algunos términos. Por ejemplo, Ashby sostiene que esta manera de entender la relación entre el sistema y el ambiente es “funcional”: “Dado un organismo, su ambiente se define como aquellas variables cuyos cambios afectan al organismo, y aquellas variables que son modificadas por el comportamiento del organismo. Por tanto, se define en un sentido puramente funcional, no material, sentido funcional y no material” (Ashby, 1952, p. 36).

más tarde, Ashby lo presentaba de la siguiente manera:

2/8.¹⁶ La operación primaria mediante la cual se adquieren nuevos conocimientos respecto de la “máquina” es la siguiente: el experimentador se vale de su capacidad de mando y regulación para determinar (elegir o imponer) un estado concreto del sistema, y determina (elige o impone) asimismo los valores de las condiciones que lo circunden; deja luego que transcurra una unidad de tiempo y observa el estado a que haya ido a parar el sistema al moverse impulsado por su propia naturaleza dinámica. Dicho de otro modo, observa una transición a partir de un estado concreto y bajo condiciones concretas. (Ashby, 1952, p. 18) (trad., Ashby, 1960/1965, p. 32)

Una vez lograda y observada una transición, la tarea de investigación pasa a ser la de poder explicar cómo dicha transición puede ser posible, lo que no siempre será equivalente a poder establecer por qué ocurrió realmente en el sistema bajo estudio (de hecho, salvo en los casos más sencillos, esto será estrictamente imposible). En este sentido, parte del núcleo del método cibernético consiste en poder determinar cómo un comportamiento puede ser realizado por una configuración, aunque dicha configuración no sea exactamente la misma que ocurre en el fenómeno natural o artificial.

En el trabajo de 1943, los autores plantean una taxonomía de los posibles comportamientos de las entidades naturales, entendiendo por comportamiento “cualquier cambio de una entidad con respecto a su entorno” (Rosenblueth y col., 1943, p. 18). La taxonomía que plantean se puede resumir de la siguiente manera. La primera división es la de identificar si el comportamiento es activo o pasivo, tomando como criterio si la fuente de energía que puede producir dicho movimiento es parte de la entidad o parte del ambiente, respectivamente. Si es activo —que en términos contemporáneos llamaríamos “autónomo”— puede tener un propósito o ser simplemente azaroso. Todo comportamiento con propósito o bien involucra un ciclo de retroalimentación o no lo hace. Si lo hace se trata de un comportamiento teleológico, el que puede ser predictivo (o extrapolativo) o no. Y en caso de ser predictivo, la predicción puede clasificarse según su grado, de acuerdo a cuántos pasos adelante de la situación presente el sistema deba considerar antes de actuar.

La identificación del comportamiento teleológico con los ciclos de retroalimentación representa otro de los elementos centrales de la cibernética, ciclos que pueden entenderse análogamente a los círculos de función introducidos por Jakob von Uexküll. Existen dos clases de retroalimentación. La primera se suele llamar retroalimentación positiva y consiste en una señal a la que meramente se le agrega algo normalmente debido a su misma acción, aumentando el efecto de la señal. Señal se puede interpretar aquí de manera bastante amplia por lo que se podría considerar un término más general como “variable”. Un ejemplo biológico podría ser un conjunto de plaquetas que se activan para detener

¹⁶Casi tan obsesivo como el primer Wittgenstein, Ashby numera de esta forma capítulo y subsección para hacer más eficiente el trabajo con las referencias internas.

un sangrado, en tanto esto activará cada vez más plaquetas para obtener el resultado en un menor tiempo posible. Los ciclos de retroalimentación negativos, por el contrario, son reguladores y en el caso biológico suelen estar asociados con comportamientos homeostáticos, como los descritos por Claude Bernard y bautizados con ese nombre por Walter Cannon. La interpretación cibernética de esta clase de ciclo le agrega un componente clave que es el de un margen de error. Un ciclo de retroalimentación comprenderá un objetivo, entendido como un estado al cual el organismo o la máquina pretende llegar –aquí radica la utilidad del concepto de propósito– y una medida de la distancia o margen de error que separa al estado actual del estado final pretendido. Es el reconocimiento de esta distancia lo que activa el mecanismo que puede disminuir el valor del error y corregir la actividad del mecanismo hasta llegar al estado final. Este estado final no es estático, sino que en la mayoría de los casos se trata de un equilibrio dinámico –análogo al equilibrio descrito por Bertalanffy–, sostenido por el ciclo de retroalimentación.

Una de las ventajas que esta taxonomía aporta, además de recuperar los conceptos de teleología y de propósito, es que revela que “un análisis comportamental uniforme es aplicable tanto a las máquinas como a los organismos vivos, sin importar la complejidad de su comportamiento” (Rosenblueth y col., 1943, p. 22). Esto significa que desde el punto de vista de la cibernética la forma en la que se estudian los animales y las máquinas es la misma; es una analogía creada por el método de investigación y por la actitud epistémica que se toma frente a dichas entidades sin asumir una identificación ontológica entre ellas. Con respecto a esto, comentan los autores:

Los métodos de estudio para con los dos grupos [el de los organismos vivos y el de las máquinas] son en la actualidad similares. Que deban o no ser siempre iguales podrá depender de si en alguno de los grupos existe una serie de características únicas y cualitativamente diferentes que estén ausentes en el otro grupo. Estas diferencias cualitativas no han aparecido hasta ahora. (Rosenblueth y col., 1943, p. 22)

En las décadas que siguieron, el estudio de los organismos vivos continuó una tendencia mucho más cercana a lo que Rosenblueth, Wiener y Bigelow llaman “análisis funcional”, especialmente para los casos más simples en los que una actitud de corte más reduccionista puede ser más exitosa. Por otro lado, las “máquinas” se estudian en su mayoría desde una instancia de diseño, sin embargo, existen ciertas creaciones artificiales que dada su complejidad deben ser estudiadas por un análisis más cercano al que se usa en la actualidad para organizaciones vivas complejas. Un claro ejemplo de esto es la dirección que están tomando algunos trabajos sobre redes neuronales artificiales, que son analizadas con métodos procedentes de las neurociencias (Lillian y col., 2018).¹⁷

¹⁷Las redes neuronales artificiales son una clase de modelos que exploro con más profundidad en el capítulo 6. El término “instancia de diseño” es una referencia a la “actitud de diseño” que fue introducida especialmente por Daniel Dennett, contraponiéndola a la “actitud física” y a la “actitud intencional”. Esta última también pretende rescatar algunos conceptos que podrían interpretarse como subjetivos como re-

En el último párrafo, los autores redondean las ventajas que ofrece su mirada y hacen una serie de comentarios superficiales que dejan ver otros problemas filosóficos que el concepto de teleología esconde y que giran en torno a cómo entender a los procesos causales desde el marco de las explicaciones comportamentales. Después de reiterar la definición acotada de comportamiento teleológico como aquel comportamiento que está regulado por un ciclo de retroalimentación negativa, comentan que

Según esta definición limitada, la teleología no se opone al determinismo, sino a la no teleología. Tanto los sistemas teleológicos como los no teleológicos son deterministas cuando el comportamiento considerado pertenece al ámbito en el que se aplica el determinismo. El concepto de teleología sólo comparte una cosa con el concepto de causalidad: un eje temporal. Pero la causalidad implica una relación funcional unidireccional y relativamente irreversible, mientras que la teleología se ocupa del comportamiento, no de las relaciones funcionales. (Rosenblueth y col., 1943, p. 24)

A mi juicio lo que los autores plantean aquí es que la teleología no es un concepto que puede explicarse en torno a la causalidad, ya que este último concepto está ligado a una relación funcional en la que no hay conexiones con el pasado. En términos más contemporáneos, diríamos que no puede existir una “causalidad hacia atrás”. Esta limitación de las explicaciones funcionales recuerda al problema que había visto ya von Uexküll acerca de la imposibilidad de entender cómo una acción o un estado del futuro pudiera actuar *causalmente* sobre un estado presente para determinar un comportamiento. Esta primera solución de los cibernetas es epistémicamente elegante, en tanto crea un campo de explicaciones rigurosas en donde se eliminan por definición las explicaciones causales en tanto lo que se está estudiando es el comportamiento a nivel macroscópico y no los “detalles finos” de la implementación física de dicho comportamiento. Esta distinción, implícita aquí, entre niveles explicativos deja entrever cómo la cibernética más temprana de todas sugiere una lectura epistémica de las propiedades emergentes, uno de los componentes clave de los sistemas complejos.¹⁸

La *Introducción a la Cibernética* de Ashby deja en claro que esta postura sobre el estudio de los sistemas hace al corazón del método cibernético:

la cibernética es una “teoría de las máquinas”, pero no estudia, objetos, *sino modos de comportamiento*. No pregunta “¿qué es esto?”, sino “¿qué hace?” [...] Es, por lo tanto, esencialmente funcional y conductista.

En sus comienzos la cibernética, en muchos aspectos, estuvo estrechamente asociada

cursos válidos para las explicaciones en biología y en ciencias cognitivas, por lo que se puede interpretar a su obra como una continuación de los esfuerzos llevados a cabo por los cibernetas. Ver especialmente (Dennett, 1989, 1996).

¹⁸Atado a este problema y a la lectura epistémica hay otro problema clave para la complejidad y la cibernética que ya se pudo observar en el diseño de las armas automáticas antiaéreas que es el problema de la predictibilidad, ver especialmente 7.1.

a la física, pero no depende en modo esencial de las leyes de la física o de las propiedades de la materia. Trata todas las formas de conducta en la medida en que son determinadas, regulares o reproducibles. La materialidad o el cumplimiento de las leyes de la física son cuestiones que le atañen marginalmente. [...] *Las verdades de la cibernética no están condicionadas al hecho de provenir de alguna otra rama de la ciencia*. La cibernética tiene sus propios fundamentos.^{VII}(Ashby, 1956/1960, pp. 11–12)

Al igual que la TGS, la cibernética cambia el objeto de estudio enfocándose no en las propiedades de entidades particulares sino en las distintas formas en la que un grupo de entidades abstractas (las “máquinas”) pueden comportarse, más allá de las propiedades físicas o materiales de las que están hechas. Ahora bien, la forma en la que las máquinas abstractas pueden ser estudiadas difiere del método de buscar propiedades generales o de sistemas entre un conjunto de referentes. Así, el sentido de abstracto que va a introducir no es el mismo que el de la TGS, aunque tienen sus puntos en común. Este reconocimiento del valor de la abstracción también estuvo acompañado de una reflexión sobre el rol esencial de los modelos en el quehacer científico, lo que tratan directamente Rosenblueth y Wiener en el segundo artículo publicado en el *Philosophy of Science*.

En dicho artículo se proponen estudiar los objetivos principales de la ciencia, que identifican como el de obtener entendimiento y control sobre alguna parte del universo, desde el punto de vista de cómo se trabaja en ciencia. En este sentido, como había sido también el caso en la TGS, estas reflexiones son pioneras de una incipiente “filosofía de las prácticas científicas”. Los autores notan que estos dos objetivos hacen a una naturaleza más bien dualista de la empresa científica, probablemente debido a que dichos objetivos no siempre pueden satisfacerse simultáneamente. Abstracción y modelos son elementos claves para cumplir dichos objetivos:

Ninguna parte importante del universo es tan simple como para poder ser comprendida¹ y controlada sin abstracción. La abstracción consiste en reemplazar la parte del universo que se está considerando por un modo de estructura similar pero más simple. Los modelos —formales o intelectuales—, por un lado, o materiales por el otro, son, por lo tanto, una necesidad central del proceder científico. (Rosenblueth & Wiener, 1945, p. 316)

Lo interesante de esta forma de concebir la abstracción es que no se trata de meramente eliminar alguna parte del fenómeno a estudiar, sino de *reemplazar* al fenómeno por un modelo. La definición de modelo recurre aquí a una concepción de similitud y de simplicidad que no es trabajada directamente por los autores. El peso de la discusión está sobre cómo los modelos son empleados y en la jerarquía de modelos que se produce mediante las diferentes abstracciones del mismo fenómeno. Es decir, cada abstracción crea un modelo que reemplaza al fenómeno y éste se ubica en un conjunto de los modelos creados para reemplazar a dicho fenómeno y el nivel de abstracción usado en él determina su ubicación y las acciones de intervención que se le pueden aplicar. Su concepción del método cien-

tífico deja a la abstracción en un rol tan central que hasta sugieren que un experimento no es más que un procedimiento de interrogación sobre un sistema físico abstracto que cumple con todos los requisitos anteriores para ser un modelo de un fenómeno. De hecho, esta sugerencia de que los modelos son el objeto de diferentes procedimientos de interrogación mediante técnicas físicas (interventivas) o matemáticas, vuelven a Rosenblueth y a Wiener pioneros en la interpretación artefactual de los modelos científicos que ha aparecido recientemente en la literatura filosófica al respecto (p. ej. Gelfert, 2016; Knuuttila, 2011). Esta actitud epistémica hacia los modelos y, por tanto, hacia el conocimiento que se puede generar mediante ellos es central en toda la cibernética y estimo que es uno de sus aportes centrales, tanto filosóficos como científicos. Esto quedará más claro en la subsección siguiente dedicada a la forma en la que Ashby empleó un modelo para demostrar la posibilidad de ciertos comportamientos para sistemas complejos.

Antes de eso quiero ocuparme de otra sugerencia sobre el trabajo con modelos que aparece en el artículo de Rosenblueth y Wiener que expandiré en la última parte de esta investigación. La sugerencia es sobre cómo interpretar la jerarquía de abstracciones y las operaciones que ella permite. En la cima de su jerarquía ubican a los modelos más abstractos y más generales. La dificultad de estos modelos es que su generalidad no permite la interrogación mediante métodos físicos, por lo que para lograr dicha intervención nuevos modelos deben generarse en la jerarquía, descendiendo hasta obtener modelos con partes lo suficientemente concretos para ser “implementados” (el término es mío) y luego traducidos a un experimento. Aquí hay dos puntos a explorar: el movimiento en la jerarquía de abstracciones y la relación entre los modelos teóricos y los modelos físicos. El movimiento entre las jerarquías puede darse en los dos sentidos mientras que el paso a un experimento requiere una traducción:

Por lo tanto, dos operaciones se ven involucradas en el proceso de formular la prueba para un enunciado general, o en el proceso inverso de construir una teoría a partir de datos experimentales. Una de estas operaciones consiste en moverse hacia arriba o hacia abajo en la escala de abstracción. La otra requiere la traducción de la abstracción a un experimento, o viceversa. (Rosenblueth & Wiener, 1945, p. 316)

El primer punto indica que según su concepción puede existir dos dinámicas de modelado que se podrían llamar *bottom-up* o desde abajo y *top-down* o desde arriba. En la primera, el modelo se construye desde los resultados y se asciende en la jerarquía a medida que las partes más concretas se reemplazan por construcciones teóricas que pueden dar cuenta de los mismos datos o de la misma clase de datos. Un modelo máximamente abstracto sería equivalente a un “modelo de sistemas” según la TGS. El movimiento descendente es el de la complejización de un modelo abstracto para poder permitir explicaciones de casos particulares o generar situaciones de comprobación experimental del modelo. Aquí es donde aparece la conexión con el experimento. El experimento (es decir, la intervención) en sí mismo no sería un modelo por más que esté basado en un modelo concreto o material.

Sobre la distinción entre modelos formales y materiales, comentan Rosenblueth y Wiener que

Un modelo material es la representación de un sistema complejo por un sistema que se asume como más simple y del que también se asume que tiene propiedades similares a aquellas que fueron seleccionadas para estudiar en el sistema complejo original. Un modelo formal es una afirmación simbólica en términos lógicos de una situación idealizada relativamente simple que comparte las propiedades estructurales del sistema real original. (Rosenblueth & Wiener, 1945, p. 317)

Lo que va a servir como justificación de los supuestos de simplicidad y similitud del modelo material con el sistema complejo original es un modelo formal, que es el que tiene la carga de compartir las propiedades estructurales. Ahora bien, el modelo material puede servir para esclarecer al mismo modelo formal cuando las propiedades del primero sean mejor comprendidas que las del segundo. Creo que esta imagen sencilla de cómo interpretar el uso de los modelos en ciencia es esencialmente correcta, aunque necesita algunas complejizaciones. Algunas de estas la llevo a cabo en la última parte de esta investigación, pero una de las complejizaciones más importantes es llevada a cabo por los autores en este mismo trabajo y radica básicamente en hacer uso del método cibernético al estudio mismo de los modelos, de lo que puede surgir una visión de un modelo como un sistema complejo mismo, con muchas partes interactuando entre sí. Si bien Rosenblueth y Wiener no lo dicen directamente en estos términos, creo que es posible entender de esta manera su caracterización. En primer lugar, describen dos clases de problemas fundamentales en ciencia, a los que denominan “problemas de caja abierta” y de “caja cerrada”:

Hay ciertos problemas en ciencia en los que un número finito y fijo de variables de entrada determina un número fijo y finito de variables de salida. En estos, el problema está determinado cuando se conocen las relaciones entre estos dos conjuntos finitos de variables. Es posible obtener la misma salida para la misma entrada con estructuras físicas diferentes. Si varias estructuras alternativas de esta clase fueran encerradas en cajas a las que uno sólo pudiera acercarse por medio de terminales de entrada y salida, sería imposible distinguir entre estas alternativas sin recurrir a nuevas entradas, nuevas salidas o ambas. (Rosenblueth & Wiener, 1945, pp. 318-319)

Según esta lectura, los problemas en ciencia empiezan como un problema de caja cerrada, en los que la estructura interna no se conoce y de hecho pueden existir múltiples estructuras diferentes que para la misma entrada (una intervención) produzca la misma salida o resultado (una variación en un medidor, por ejemplo). Mientras más conexiones de entrada o de salida se puedan conectar a la caja, más abierta podrá considerarse, ya que hay más elementos con los que determinar la estructura interna. En el límite, “un sistema enteramente abierto necesitaría un número indefinido de terminales” (Rosenblueth & Wiener, 1945, p. 319). Bajo esta mirada, el progreso científico consistiría en la progresiva apertura de las cajas y en la transformación de los problemas a la nueva clase. Curiosamente,

aquí hay una extraña inversión de la simplicidad como el objetivo típico de la empresa científica ya que el progreso radicaría en descender en la jerarquía de abstracciones hacia modelos más complejos, abiertos y concretos en lugar de hacia modelos más simples y más abstractos. Ahora bien, cada vez que se *abre* una caja mediante un modelo de su funcionamiento interior, en dicho modelo existirán nuevas cajas negras “más pequeñas”. La cantidad de cajas negras puede servir como un indicador de las partes del modelo que son idealizadas, ya sea porque su estructura no es conocida o porque a los efectos del modelo su comportamiento (es decir, sus salidas dadas ciertas entradas) es el esperado para que el funcionamiento el resto del modelo sea adecuado.¹⁹ Este tratamiento de las idealizaciones en los modelos me parece más adecuado a la dinámica en gran escala del modelado científico que, por ejemplo, la idealización galileana sugerida por (McMullin, 1985), que de hecho se puede considerar como una parte importante, pero sólo una parte, de dicha dinámica. Si bien al reemplazar partes del modelo altamente idealizadas por otras más desidealizadas, la disminución del grado de idealización es sólo parcial y acotado con respecto al modelo original, mas el modelo sofisticado incluye un número no menor de cajas negras:

A medida que los modelos se tornan progresivamente más sofisticados, el número de regiones cerradas puede y suele incrementar, en tanto el proceso puede compararse con la subdivisión de una sola caja original en muchos comportamientos cerrados más pequeños. Muchos de estos compartimientos pequeños pueden permanecer deliberadamente cerrados puesto que se los considera importantes funcionalmente pero no de manera estructural. (Rosenblueth & Wiener, 1945, p. 319)

Es importante notar que en la última oración “funcionalmente” se usa como equivalente a “comportamental” en el *paper* de 1943. Cualquier modelo simple para una caja negra parte de asumir “que un número de variables está solamente acoplado de manera débil [*loosely coupled*] con el resto de las que pertenecen al sistema”. Este supuesto es esencial, ya que “el éxito de los experimentos iniciales depende de la validez de este supuesto” (Rosenblueth & Wiener, 1945, p. 319). La razón por la que este supuesto es esencial es, pues, porque cualquier actividad interventiva que se realice sobre el modelo requiere que su influencia sea acotada para poder determinar el efecto puntual de la intervención. Si las variables estuvieran máximamente acopladas, la capacidad de actuación de dicha caja negra podría desestabilizar todo el sistema.

Esta imagen general, cuya presentación ha sido bastante abstracta hasta ahora siguiendo el planteo original de Rosenblueth y Wiener, quedará más clara después de la

¹⁹Sobre la teoría de las cajas negras, comentaría algunos años más tarde Ashby: “La teoría de la Caja negra es, simplemente, la teoría de los objetos o sistemas reales cuando, al relacionar objeto y observador, se atiende especialmente a la información que proviene del objeto y a cómo se obtiene. Por lo tanto, la teoría de la Caja negra es, sencillamente, el estudio de las relaciones entre el experimentador y su medio ambiente cuando se presta especial atención al flujo de información” (Ashby, 1956/1960, p. 154).^{VIII}

subsección siguiente en la que exploro estas nociones con el trabajo de Ashby sobre el Homeostato. Antes de eso, quiero remarcar dos consecuencias que se siguen de mirar a los modelos como sistemas complejos en sí mismos. La primera es la heterogeneidad de elementos que pueden entrar en juego a la hora de construir un modelo (el juego ingenieril del término “construir” es intencional). “En una etapa intermedia en el curso de la investigación científica”, comentan Rosenblueth y Wiener, “el modelo formal puede, por lo tanto, ser un ensamblaje [*assembly*] de elementos, algunos tratados en detalles, es decir específica o estructuralmente, y algunos tratados meramente con respecto a su rendimiento [*performance*], es decir genérica o funcionalmente” (1945, p. 319). Como también reconocen que la ciencia nunca puede llegar a un modelo perfecto, es probable que acepten mi lectura según la cual sólo es en los casos más sencillos en los que se puede salir de esta etapa intermedia.

De esta mirada más ingenieril del modelado se sigue la segunda consecuencia, que también remarcan los autores y es que los modelos no solamente se utilizan para explicar hechos observados sino también con el proceso inverso, el “proceso de insertar [*embodying*] una estructura abstracta en una entidad concreta de estructura similar, usualmente un aparato o máquina con un propósito definido” (Rosenblueth Wiener, 1945, p. 320). Si bien aquí los autores están pensando el hecho de tener que implementar un modelo abstracto en un sistema físico (por ejemplo, un filtro que distinga mensajes del ruido en una línea telefónica), si eliminamos el requisito de que tenga que ser implementado en una estructura física, el proceso es el mismo que el de la concretización de un modelo. Los requisitos (o en términos más contemporáneos y computacionales, las especificaciones) son “de una naturaleza de caja abierta, pero los elementos utilizados en su construcción pueden ser tratados como cajas negras” (Rosenblueth & Wiener, 1945, p. 320). Considero que estos son los inicios más próximos de lo que se conocerá en la frase de Herbert Simon como las “ciencias de lo artificial”. En los capítulos 5 y 6 retomo algunos de estos puntos en relación a la obra de Simon; por lo pronto, en la subsección siguiente, muestro más “en acción” a estos conceptos de la mano de W. Ross Ashby y su trabajo con modelos para sistemas complejos. En su obra, dicho sea también de paso, se puede encontrar el germen más directo de muchas de las ideas de Simon.

Quizás no sea una exageración decir que la cibernética pudo ser *la* cibernética por el rol central que le dio a los modelos y, como posición epistemológica, por la interpretación que permitió de los mismos. El punto clave, que reconoció también como problema, es el de la relación de los distintos modelos entre sí y del factor dinámico de dicha relación, permitiendo ver el movimiento hacia la concretización y complejización como un factor crucial a la hora de interpretarlos. Además, en dicha concretización vuelve a jugar el aspecto de las relaciones entre modelos ya que involucra que los modelos puedan ser anidados en una serie de capas, pudiendo un modelo ser parte de otro.

3.3. ¿Sistemas = modelos = máquinas?

7/27. Esta forma básica posee muchas más propiedades de interés de las que hasta ahora hemos indicado; pero su exposición meramente lingüística, sin embargo, puede hacerse tediosa y poco convincente. Mediante una máquina construida de modo que conociésemos su estructura con exactitud y en la que pudiésemos observar lo que ocurra en diversas condiciones (a la cual cabría describir como “máquina que piensa por nosotros” o, con expresión más respetable, como “calculadora analógica”) podríamos hacerlas patentes de modo muy preferible. Hemos construido una máquina de esta índole, y la hemos llamado “homeóstato”.^{IX}

William Ross Ashby (1960/1965, p. 121)

El objetivo de esta sección es mostrar cómo la reflexión y el uso de modelos para estudiar sistemas complejos por parte de la cibernética estuvo guiados por el uso de nociones como las de información, orden, control y organización. En el uso de modelos, la noción de “máquina” cobra un rol fundamental que busco aclarar. Al hacer esta exposición sobre la cibernética y su constante apelación a modelos pretendo también aportar algo de luz a cómo entender el *dictum* de Wiener, de alta importancia para la cibernética, según el cual “información es información, no es materia ni energía. Ningún materialismo que no admita esto puede sobrevivir en el presente” (Wiener, 1948/1962, p. 132). Como mostraré en el capítulo siguiente, hay muchos puntos en común con la manera en la que Alan Turing pensó a las máquinas como una estrategia de modelar fenómenos complejos en la naturaleza.

Ross Ashby es el personaje central de esta subsección. Una figura un tanto descuidada en la mayoría de las reconstrucciones de la cibernética, pero sin duda se trata de una de las mentes más profundas detrás del movimiento cibernético. En una nota autobiográfica de 1962, Ashby escribió sobre Ashby, contando que “desde 1928 Ashby ha prestado la mayor parte de su atención al problema de ¿cómo puede el cerebro ser al mismo tiempo mecanístico y adaptativo? Obtuvo la solución en 1941 pero no fue sino hasta 1948 que el Homeostato fue construido para encarnar el proceso especial... Desde entonces ha trabajado para hacer más clara la teoría de los mecanismos semejantes al cerebro [*brainlike mechanisms*]” (Ashby, 1962, p. 452, citado por Pickering, 2010, p. 98). La pregunta fundamental de Ashby se vuelve así la pregunta por los límites de las máquinas y, en el proceso, por su capacidad de servir como herramienta de estudio para comprender sistemas excesivamente complejos como el cerebro humano.

Como lo anticipa el título del primer libro de Ashby, el concepto de diseño va

a ser central.²⁰ Esto es porque va a entender que aplicando el método cibernético al fenómeno que se pretende estudiar, se debería poder construir, material o abstractamente, una máquina que sea capaz de duplicar o simular el comportamiento de dicho fenómeno, sin que deban existir entre ellos semejanzas estructurales. Una verdadera solución al problema sólo puede, por lo tanto, aceptarse si es que en última instancia permite la construcción de un sistema artificial semejante:

Para ser consistentes con los supuestos hechos, hemos de suponer (cosa que el autor acepta) que una solución real a nuestro problema permitiría la construcción de un sistema artificial que, como el cerebro vivo, sería capaz de adaptar su comportamiento. Así, si este trabajo es exitoso, incluirá (al menos por implicación) especificaciones para la construcción de un cerebro artificial que, de manera similar, se autocordine. (Ashby, 1952, p. 10)

Design for a brain (Ashby, 1952) es un libro destinado enteramente a explicar con detalles un modelo mecánico particular del cerebro —o, quizás mejor aún, de alguna clase posible de cerebro— pero también es un libro que elabora las conexiones entre los modelos mecánicos y los modelos matemáticos, ya que, para justificar su construcción, Ashby debe introducir al lector en numerosos detalles de la teoría de los sistemas dinámicos. De hecho, si no fuera por el título uno creería que el libro poco tiene de cerebros. Esto se debe a que primero que nada es un tratado de por qué el comportamiento a gran escala del cerebro en su entorno puede entenderse como un sistema dinámico, esto es, un sistema que evoluciona en el tiempo cambiando de estados. Es esta concepción de alto nivel, en el que los detalles físicos o estructurales del fenómeno quedan excluidos -su interpretación como una caja negra con entradas y salidas- la que le va a permitir diseñar una máquina que tenga, desde este nivel, la misma clase de comportamiento. *Diseño...* es un libro en el que se pone en práctica el método cibernético para poder responder la pregunta que lo guía. La reflexión sobre el método y su justificación tienen su punto máximo en la *Introducción a la cibernética* (Ashby, 1956), un texto que es complementario a *Diseño* y con reflexiones mucho más profundas. Lo que me interesa rescatar de esta serie de reflexiones es la actitud frente a las máquinas como modelos de los fenómenos de la naturaleza que encarna Ashby y que reflejan el ideal de la cibernética; reflexiones que son centrales si se pretende ver a la cibernética como una metateoría de la complejidad.

Son las máquinas las que le van a permitir a la cibernética poner a prueba sus modelos. Esto es, van a ser el recurso empleado para determinar que un modelo de un sistema complejo no está eliminando mediante sus idealizaciones el conjunto de elementos cuya interacción se puede decir compleja y que es la causa del fenómeno que se pretende estudiar. Aquí yace una tensión del modelado que ya que precisamente hay que modelar la complejidad (simplificarla de alguna manera) sin perderla del todo. Esto lleva a que

²⁰La segunda edición del libro de 1960 se tradujo al español como *Proyecto para un cerebro: El origen del comportamiento adaptativo* (Ashby, 1960/1965).

la cibernética reconozca a la complejidad como un fenómeno en sí mismo, que debe ser estudiado científicamente y a postularse como uno de los métodos para poder estudiar dicha complejidad:

En el estudio de algunos sistemas, sin embargo, la complejidad no puede evadirse completamente. [...] Pero la ciencia actual está dando los primeros pasos en el estudio de la “complejidad” encarada como tema autónomo.

La cibernética se destaca entre los métodos para lidiar con la complejidad. Rechaza las ideas vagamente intuitivas que adquirimos al emplear máquinas tan simples como el reloj despertador y la bicicleta, y se presta a construir una disciplina rigurosa sobre lo complejo. [...] La cibernética ofrece la esperanza de proporcionar métodos efectivos para el estudio y el control de sistemas que son intrínsecamente y extremadamente complejos. (Ashby, 1956, pp. 5-6)

Aquí Ashby señala dos aspectos muy importantes. El primero, y sobre el que elaboro más adelante, es que la complejidad es siempre relativa a un sistema (en oposición a un objeto). El segundo es la interpretación clásica de las máquinas y sus limitaciones que recién con la aparición de la cibernética puede ponerse completamente en cuestión dado que se puede comenzar a pensar una clase diferente de máquina, cuyo funcionamiento no esté atado a un propósito de bajo nivel y, por lo tanto, dicho funcionamiento esté limitado por las intenciones del diseñador y los *órganos* que le dotó a la misma durante su fabricación. Uso el término *órgano* en el sentido cartesiano, ya que debemos a Descartes una de las mejores formulaciones sobre la interpretación clásica de las máquinas. En el capítulo 5 de su *Discurso del método*, Descartes comenta sobre su interpretación mecánica de los cuerpos animales y vegetales, los cuales podrían ser reemplazados completamente por partes mecánicas sin que nos pudiéramos dar cuenta del reemplazo, pero es algo que nunca podría suceder en el caso de los seres humanos dada que sus capacidades exceden las capacidades de cualquier máquina por poseer razón, algo que nunca podrían tener las máquinas:

. . . si hubiese máquinas tales que tuviesen los órganos y figura exterior de un mono o de otro cualquiera animal, desprovisto de razón, no habría medio alguno que nos permitiera conocer que no son en todo de igual naturaleza que esos animales; mientras que si las hubiera que semejasen a nuestros cuerpos e imitasen nuestras acciones, cuanto fuere moralmente posible, siempre tendríamos dos medios muy ciertos para reconocer que no por eso son hombres verdaderos; y es el primero, que nunca podrían hacer uso de palabras ni otros signos, componiéndolos, como hacemos nosotros, para declarar nuestros pensamientos a los demás, pues si bien se puede concebir que una máquina esté de tal modo hecha, que profiera palabras, y hasta que las profiera a propósito de acciones corporales que causen alguna alteración en sus órganos, como, *verbi gratia*, si se la toca en una parte, que pregunte lo que se quiere decirle, y si en otra, que grite que se le hace daño, y otras cosas por el mismo estilo, sin embargo, no se concibe que ordene en varios modos las palabras para contestar al sentido de

todo lo que en su presencia se diga, como pueden hacerlo aun los más estúpidos de entre los hombres; y es el segundo que, aun cuando hicieran varias cosas tan bien y acaso mejor que ninguno de nosotros, no dejarían de fallar en otras, por donde se descubriría *que no obran por conocimiento, sino sólo por la disposición de sus órganos*, pues mientras que la razón es un instrumento universal, que puede servir en todas las coyunturas, *esos órganos, en cambio, necesitan una particular disposición para cada acción particular; por donde sucede que es moralmente imposible que haya tantas y tan varias disposiciones en una máquina*, que puedan hacerla obrar en todas las ocurrencias de la vida de la manera como la razón nos hace obrar a nosotros. (Descartes, 1637, pp. 56–57. El énfasis es mío))

Estrictamente el problema no yace en que se necesite “una particular disposición para cada acción particular” (esto es algo que hasta podemos decir del cebero en la actualidad) sino en la manera lineal y aditiva en la que Descartes considera que las configuraciones deben fijarse en la máquina para ser capaz de efectuar determinado comportamiento. En efecto, el límite que heredan las máquinas cartesianas es el límite del diseño que les impone su creador, el que suele ser un ser algo limitado por no ser, básicamente, Dios. Así, un hombre que usa su conocimiento del juego de ajedrez para diseñar una máquina que juegue ajedrez nunca podría diseñar una máquina que sea capaz de jugar mejor que él. En el caso óptimo podría imitar sus jugadas, pero no vencerlo en una partida. La máquina incorpora el conocimiento del diseñador, pero estrictamente no lo usa, sino que opera por una regla que codifica de manera fija dicho conocimiento en la disposición de sus elementos. Dadas las clases de máquinas que podemos fabricar y programar hoy en día, esta caracterización parece algo desactualizada. Sin embargo, en la esencia de la misma yace gran parte de la crítica actual a la inteligencia artificial y sus prospectos. A través del trabajo de Turing, que comento en el capítulo siguiente, esta crítica se conoce como la “objeción de Ada Lovelace” a la posibilidad de “inteligencia maquina” (A. M. Turing, 1950), ya que cuando ella describía el motor analítico de Babbage, dejaba en claro que el mismo no podía inventar ni descubrir ni crear nada “nuevo”:

El Motor Analítico no tiene pretensión alguna de *originar* algo. Puede realizar cualquier cosa que *sepamos cómo ordenarle que la realice*. Puede seguir el análisis; mas no tiene poder alguno de *anticipar* ninguna relación o verdad analíticas. Su lugar es el de asistirnos en hacernos *disponible* aquello con lo que ya estamos familiarizados.^X (Lovelace, en Menabrea, 1843, p. 689. Énfasis en el original)

Como suele ocurrir algunas veces, la “solución” a este problema o límite de las máquinas apareció poco tiempo después de esta afirmación, de la mano de la biología. La teoría de la selección natural, de hecho, puede leerse como una solución al problema de la originalidad por medios meramente mecánicos. Ahora bien, incorporar el método de la selección natural al diseño de las máquinas es algo que debió esperar casi cien años más. Ashby y Turing (ver capítulo siguiente) llegan a conclusiones similares aproximadamente al mismo tiempo y los dos ven a las máquinas como el recurso ideal para comprender los

procesos naturales. El cerebro humano debe realizar una tarea análoga a la de la selección natural para producir comportamiento adaptativo y no hay razón lógica alguna por la que dicho método no pueda implementarse mecánicamente:

espero mostrar que un sistema puede ser de naturaleza mecánica [*mechanistic*] y pese a eso puede dar origen a un comportamiento que sea adaptativo. Pretendo mostrar también que la diferencia esencial entre el cerebro y cualquiera de las máquinas hasta ahora construidas no es otra que en que el cerebro hace considerable uso de un método que hasta el momento se utilizando muy poco en las máquinas. Espero mostrar que mediante dicho método podemos hacer que el comportamiento de una máquina sea tan adaptativo como queramos, y que es posible que con el mismo método pueda explicarse incluso la adaptabilidad humana. (Ashby, 1952, p. 1)

La carga de la prueba estará, claro, en nuestra capacidad de crear máquinas utilicen un proceso semejante al de la evolución, pudiendo utilizar una regla simple para generar “más diseño y adaptación que la regla usada para generarla” (Ashby, 1951, p. 287). En el proceso de crear dicha máquina, Ashby da una interpretación de la teoría de la evolución en términos de sistemas dinámicos, la que le permite ver a los dos procesos como análogos. La máquina que logra fabricar Ashby en 1948 para implementar físicamente lo que ya había imaginado a principio de esa década fue bautizada con el nombre de “Homeostato” en tanto que su comportamiento se puede describir, parafraseando un tanto a Proust, como el de una “búsqueda de la homeostasis perdida”.

Desde el punto de vista técnico, el Homeostato es una máquina bastante simple cuya novedad radica en su diseño y, fundamentalmente, en el comportamiento que puede lograr pese a su simplicidad.²¹ Estrictamente el Homeostato no es *una* máquina sino cuatro máquinas idénticas (llamadas unidades) conectadas entre sí, de manera tal que el estado de cada una de ellas afecta al estado de las otras. Cada una de las unidades es una pequeña torre metálica, arriba de la cual hay un imán suspendido, que es el foco de atención del dispositivo (ver fig. 3.2). El comportamiento del imán está afectado por el campo magnético que generan cuatro bobinas que se encuentran a su alrededor. La corriente de las bobinas proviene de cada una de las unidades, incluyendo una bobina conectada a la misma unidad que se puede entender como de auto-alimentación. Al frente de cada imán hay una pequeña cuba de agua en cuyos extremos hay un electrodo, uno a -2 voltios y en el otro extremo a -15 voltios, creando un diferencial. El imán está suspendido de una pequeña aguja, sobre la que pivota un alambre. Uno de sus extremos se hunde en la cuba de agua, tomando el potencial de acuerdo al lugar en la cuba en el que se encuentre, mientras que el otro extremo del alambre está conectado a un triodo, de donde cada unidad

²¹Este es otro *insight* de la cibernética, que está atado a corregir el sesgo detrás de la concepción cartesiana de que sólo lo infinitamente complejo puede crear algo infinitamente complejo. En realidad, un sistema extremadamente simple puede producir un comportamiento increíblemente complejo a tal punto que no se pueda reconstruir (esto es, modelar) el sistema original a partir de la observación del comportamiento. Retomo este tema directamente en la sección dedicada a autómatas celulares.

emite su corriente de salida, así la intensidad de dicha corriente depende de la posición del alambre que depende, a su vez, del movimiento del imán. Una resistencia conectada al tríodo asegura que cuando el imán esté justo en la posición central la corriente de salida sea nula. Por la forma en la que las unidades están conectadas, esta corriente de salida funciona como una de las entradas de cada una de las otras tres unidades. Esto hace que cada vez que la máquina es encendida los imanes se muevan por las corrientes de las unidades, pero el movimiento de los imanes causa diferencias en las corrientes, por lo que constantemente se generan nuevos movimientos.



Figura 3.1: W.R. Ashby junto al Homeostato.

Las unidades tienen distintos elementos con los que se pueden modificar las “reacciones” del aparato. Por ejemplo, la polaridad de la corriente de entrada a cada una de las bobinas puede ser invertida mediante un interruptor, mientras que, a su vez, cada una de las bobinas cuenta con un potenciómetro por el que se puede regular qué fracción de la corriente de entrada total llega finalmente a la bobina correspondiente. Algunas de las configuraciones posibles llevan al sistema a un estado de equilibrio, en el que todos los imanes quedan en la posición central, lo que representa un equilibrio activo o dinámico ya que el sistema está en constante funcionamiento para permanecer en dicho estado y si se lo perturba de alguna manera busca volver a dicho estado. Otras de las configuraciones

iniciales son completamente inestables, por lo que los imanes nunca quedan fijos en su lugar central. La facultad de retornar al estado de equilibrio (que fue fijado “a mano” me-

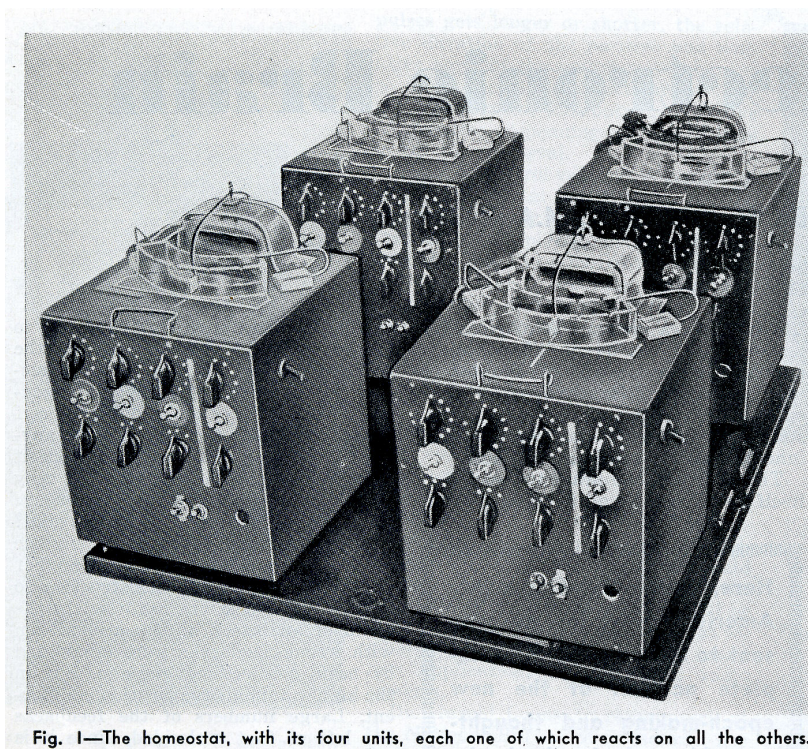


Figura 3.2: Ilustración de Homeostato. En (Ashby, 1949)

dante la configuración inicial) tras recibir una perturbación es una propiedad interesante del aparato, pero no es la central. El comportamiento más interesante del Homeostato se da cuando su configuración no está fijada por los controles manuales, sino que está sujeta a la posición de un uniselector disponible en cada una de las unidades. Un uniselector es una clase de telerruptor o interruptor de paso (también conocido como relé paso a paso). Estos dispositivos electromecánicos permiten que una corriente de entrada sea realizada o direccionada a una de muchas posibles conexiones de salida, cuyo control está regulado por una serie de pulsos eléctricos, aunque también puede ser controlado por un motor rotario.²² El uniselector de Ashby tiene 25 posiciones que fueron seleccionadas al azar, con los valores numéricos procedentes de un libro de números al azar, como los que se podían comprar en esa época. El patrón de la retroalimentación de las unidades está determinado por el valor de salida de los uniselectores de cada una de las unidades, lo que deja al Homeostato con un total de 390.626 combinaciones posibles. La bobina que acciona el uniselector sólo se activa cuando la corriente de salida de la unidad excede el nivel de umbral del relé al que está conectado. Cuando el Homeostato está regido solamente por

²²Este era el caso de los uniselectores utilizados por el “Bombe”, la computadora electromecánica de uso específico diseñada por Alan Turing para descifrar los mensajes que los alemanes codificaban mediante la máquina Enigma. Quizás el uso más popular de esta clase de relés fue en las viejas centrales telefónicas.

los uniselectores, emerge un nuevo comportamiento del sistema ya que cada vez que el comportamiento en una configuración dada es inestable (lo que equivale a decir que el imán está lejos de la posición central), el uniselector varía su estado. Se puede decir que el sistema empieza a buscar su estado de equilibrio probando las distintas configuraciones posibles. Esta es la manera en la que Ashby describe el funcionamiento del Homeostato bajo este modo automático de operación:

En otras palabras, la máquina empieza a cazar una combinación de configuraciones de los uniselectores que dan un sistema estable, esto es, que dan las retroalimentaciones internas correctas. Cuando encuentra una combinación con las retroalimentaciones correctas, la mantiene y demuestra que ha armado el sistema de retroalimentación que resulta en un mantenimiento coordinado de sus variables en un valor óptimo, como un ser vivo. El punto importante es que [el Homeostato] encuentra su propia disposición [*arrangement*] de retroalimentación, el diseñador meramente se limitó a proveerle de mucha variedad. (Ashby, 1949, p. 78)

Dicho mantenimiento de las variables del sistema dentro de un rango determinado es la forma en la que Ashby entiende a la homeostasis y, como describo en el próximo apartado, la noción propia de variable es esencial para la cibernética ya que va a ser el recurso usado para determinar el sistema que está bajo estudio. Algo interesante que puede simularse en el Homeostato es la adaptación a un determinado ambiente, ya que se puede establecer la configuración de una o dos unidades manualmente y dejar que los otros dos sean controlados por el uniselector. Una vez encontrado un equilibrio, cualquier modificación manual de los valores puede ser visto como un cambio en el ambiente, al cual el sistema nuevamente debe adaptarse. Las desestabilizaciones también pueden ser no diseñadas o previstas, ya que se puede intervenir el aparato, por ejemplo, moviendo el imán manualmente, conectando mecánicamente dos imanes para que se muevan en conjunto, cambiarle el recorrido dentro de la cuba, etc. Bajo cualquier intervención no destructiva, el sistema vuelve a explorar el espacio de configuraciones disponibles hasta lograr un estado de equilibrio. Ashby se pregunta si el Homeostato es un cerebro y responde que no lo es, que claramente está muy lejos de *ser* un cerebro. El principal punto en contra en la comparación con el cerebro de un mamífero es que el Homeostato no tiene forma de guardar una configuración a la que volver después frente a un estímulo, su falta de memoria le obliga a descartar toda adaptación para poder adaptarse a las nuevas condiciones que el medio ambiente le impone. Ahora bien, ya para Ashby a finales de los años 1940, la dificultad es menor, ya que se puede solucionar con más unidades y pequeñas alteraciones en las conexiones.²³ De todas formas, el Homeostato nunca pretendió *ser* un cerebro sino servir como un prototipo de una clase diferente de máquinas, para mostrar que uno de los comportamientos más indicativos de un cerebro –su adaptabilidad– es posible mediante

²³La dificultad no resultó ser tan menor, como el mismo Ashby comprobó al intentar escalar del Homeostato a algo un tanto más complejo e interesante, como su proyecto DAMS (por “*dispersive and multistable system*”, “sistema dispersivo y multiestable”), ver (Pickering, 2009, pp. 220-221).

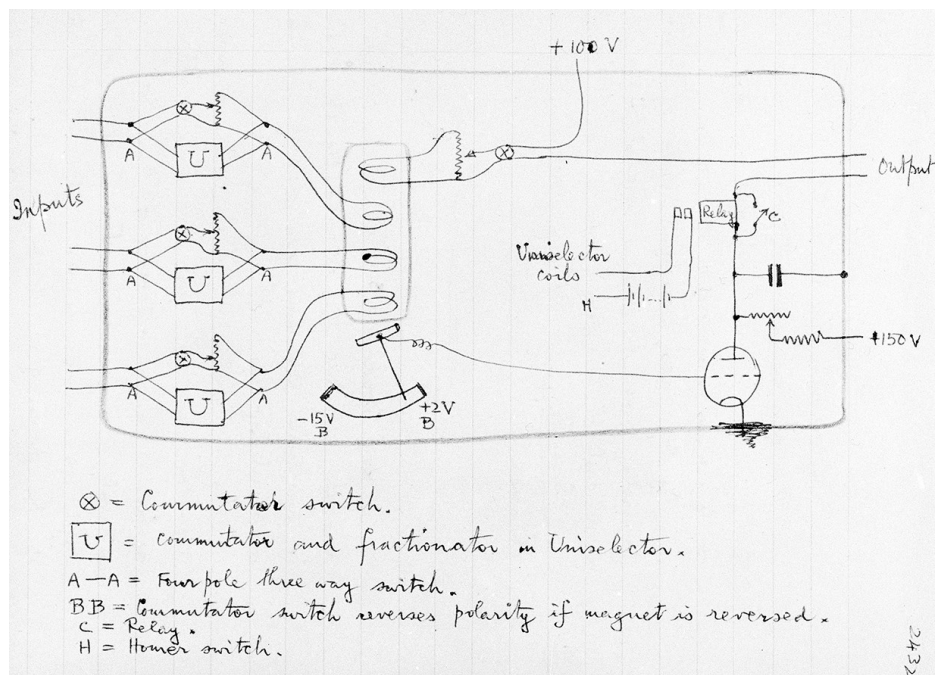


Figura 3.3: Diagrama del Homeostato en los diarios de investigación de Ashby.

procesos meramente mecánicos. Es precisamente en esta adaptabilidad en la que Ashby ve el medio para lograr cualquier clase de *imitación* de un comportamiento inteligente:

La creación de un cerebro sintético requiere ahora poco más que tiempo y trabajo. Pero hay un punto que debe quedar muy en claro: un cerebro sintético adecuado debe desarrollar *su propia* inteligencia [*cleverness*] –no debe ser un mero loro. Sin importar qué tan sorprendente sea el comportamiento, siempre debemos preguntar qué tanto de dicho comportamiento ha sido forzado por el diseñador y qué tanto es contribuido por la máquina misma. (Ashby, 1949, p. 79. Énfasis en el original)

Si bien el Homeostato no es un cerebro, sí es una “prueba de concepto” de que una de las características principales del cerebro puede ser entendida maquínicamente, siempre y cuando se extienda la categoría de máquina para integrar esta nueva *clase* de máquinas, que van más allá de las máquinas clásicas o cartesianas porque no se limitan a llevar a cabo un procedimiento específico que heredan del diseñador, sino que pueden aprender y cambiar su configuración. Si no fuera por la mención del homeostato, la frase siguiente pareciera estar hablando de un modelo de aprendizaje maquínico (*machine learning*) contemporáneo, describiendo a grandes rasgos lo que se conoce como aprendizaje supervisado:

La otra clase de máquina, el Homeostato, está basado en principios diferentes. No necesita instrucciones detalladas, sólo necesita algún método por el que se le informe de la ocurrencia de movimientos no legales y de los jaques mates. Cómo debe hacer la máquina para evitar estas informaciones (retroalimentación) se deja que ella misma lo

averigüe. (Las adaptaciones ya demostradas por el Homeostato fomentan la confianza de que con sólo desarrollos menores la máquina va a tener éxito). (Ashby, 1949, p. 79)

Esto permite ver al Homeostato y al cerebro como instancias de una misma *clase de máquina* dentro del conjunto máquinas posibles, conjunto que no se agota en las dos categorías descritas hasta aquí, aunque sí lo hace para la cibernética temprana.²⁴ Una máquina está en la misma clase si puede usarse para *simular* o *imitar* el comportamiento de una máquina que ya esté en esa clase, lo que vuelve a poner en escena al concepto de comportamiento y el de caja negra, puesto que no se presumen los detalles específicos de la estructura interna, sino que se entiende a la máquina abstraída de tales detalles. Esto es importante porque no sólo señala que debe usarse un método para estudiar al comportamiento de las máquinas abstractas, el núcleo de la cibernética, sino que también deben considerarse la forma mínima en la que una máquina abstracta debe estar configurada, para lograr su comportamiento, lo que hace a su ubicación en la clase de máquina. Ahí yace el balance a lograr entre las explicaciones de alto nivel o comportamentales/funcionales y las de bajo nivel o estructurales, no en sentido específico sino más bien amplio. Aquí también se puede observar parte de la razón por la que cibernética es la primera ciencia de la computación en sentido amplio, ya que, si bien al comienzo no trató específicamente de sistemas computacionales directamente, los recursos que desarrolló para el estudio de las clases de máquinas son la base para el estudio teórico de la computación. Este método también puede ser utilizado para iluminar algunos aspectos del debate filosófico contemporáneo sobre el uso de las simulaciones computacionales y de los modelos en ciencia, sobre los que elaboro más adelante.

Creo que no es exagerado decir que el Homeostato encarna la contribución filosófica más importante de la cibernética en tanto logra mostrar cómo la teoría de la selección natural, el gran avance de la biología del siglo XIX, puede tener lugar en el mundo de las máquinas no sólo en el sentido de que los seres humanos inventan distintas máquinas entre las cuales los mejores diseños son seleccionados para ser usados y mejorados, sino también en el sentido en que la misma operación básica de la máquina, a su misma escala, puede hacer uso de un análogo de la selección natural para inventar su propio propósito de acción. Así, efectivamente, se pueden crear máquinas que simulan haber sido diseñadas y tener un propósito particular pese a que, estrictamente, fueron diseñadas para *no* tener un propósito sino para buscarlo. La dinámica interna, abstractamente concebida, le da un rol fundamental al tiempo, otra característica de los procesos computacionales, que heredan de nuestra concepción de los sistemas dinámicos. Wiener utiliza el término “transitorio” para referirse a la falta de propósito de estas “máquinas darwinianas”, otro término que acuñó él y que recomendó a Ashby para etiquetar a la clase de máquinas como el cerebro y el Homeostato:

²⁴El primero en extender el mapa del conjunto de máquinas posibles fue von Neumann, como señalo en el capítulo siguiente.

Así resulta que en la máquina de Ashby, como en la naturaleza de Darwin, aparece un propósito en un sistema que no fue construido para que lo tuviera, simplemente por ser transitoria la carencia de finalidad de acuerdo con su misma naturaleza. A la larga, el gran propósito trivial de la entropía máxima parecerá ser el más duradero de todos. Pero en las etapas intermedias un organismo o una sociedad de ellos tenderá a permanecer más tiempo en aquellos modos de actividad en los que las diferentes partes funcionan conjuntamente, según una estructura [*pattern*] que tendrá más o menos sentido.^{XI} (Wiener, 1951/1989, p. 38)

La clave está en que dicho “patrón significativo” de acuerdo al cual las partes se comportan para mantenerse alejado del propósito final de cualquier sistema, el estado de máxima entropía al que todo está condenado, no tiene que estar incorporado en el diseño, sino que puede ser creado por la misma operación de la máquina, pudiendo encontrar así otras formas de configuración para mantenerse en ese “equilibrio dinámico” lejos del estado de equilibrio termodinámico. Wiener nota, ya en 1954, que la clase de máquinas que sugiere el Homeostato de Ashby es una contribución filosófica fundamental, no sólo porque cambia totalmente la concepción limitada de las máquinas que era propia de la época sino porque al hacerlo abre la puerta a una infinidad de nuevas posibilidades para la automatización de las tareas de la humanidad:

Creo que la brillante idea de Ashby del mecanismo arbitrario sin propósito que busca uno propio mediante un proceso de aprendizaje es no sólo una de las más valiosas contribuciones de nuestra época a la filosofía, sino además algo que conducirá a progresos sumamente útiles en la automatización. No sólo podemos introducir un propósito en las máquinas, sino que, en la inmensa mayoría de los casos, la máquina diseñada para evitar determinadas fallas de funcionamiento buscará por sí misma un propósito que puede llevar a cabo.^{XII} (Wiener, 1951/1989, p. 38)

El mismo Ashby ya había considerado la posibilidad de que estas máquinas puedan ser utilizadas para controlar aquellos sistemas que son extremadamente difíciles de predecir y controlar debido a que su naturaleza escapa a la comprensión de la humanidad en un determinado momento, lo que implica que dentro de las capacidades de la máquina está la de encontrar leyes de la naturaleza que todavía no conocemos y que quizás sólo podamos conocer mediante dicha clase de máquinas:

La construcción de una máquina que reaccione exitosamente a situaciones más complejas que las que pueden ser manejadas actualmente por el cerebro humano transformaría mucha de nuestras dificultades y perplejidades. Una máquina semejante podría ser utilizada, en el futuro distante, no meramente para conseguir una respuesta rápida a una pregunta difícil, sino también para explorar regiones de sutileza y complejidad intelectual que de momento están más allá de los poderes humanos. Por ejemplo, los problemas políticos y económicos del mundo a veces parecen involucrar complejidades que van incluso más allá de las capacidades de los expertos. Quizás a una máquina semejante se le pueda suministrar enormes tablas de estadística, cantidades

de hechos científicos y otros datos, de manera tal que después de un tiempo puede llegar a emitir como resultado una amplia serie de instrucciones complicadas, un tanto sin sentido para quienes tengan que obedecerlas pero que, sin embargo, lleven de hecho a una resolución gradual de las dificultades políticas y económicas gracias a su entendimiento y uso de principios y leyes naturales que a nosotros todavía nos son oscuros. (Ashby, 1949, p. 79)

Si bien puede parecer una solución un tanto drástica a algunos problemas, soluciones semejantes se están aplicando actualmente en dominios mucho más acotados mediante el uso de modelos que sugieren decisiones, siendo sus resultados producto de la aplicación de redes neuronales artificiales cuyo funcionamiento interno no nos es transparente, ni siquiera para quienes la implementaron.²⁵ Vuelvo sobre este tema más adelante, pero lo importante a remarcar aquí es cómo ya Ashby señalaba que existen ciertos dominios en los que no se puede pretender soluciones simples y elegantes, sino que dada la naturaleza intrínsecamente compleja del fenómeno que se pretende estudiar o controlar, cualquier modelo que se considere un buen modelo para tales efectos va a ser un modelo a su vez intrínsecamente complejo. Si bien es posible crear modelos más sencillos y entendibles que puedan ser usados para comprender algunos aspectos del fenómeno, es necesario reconocer cuáles son los límites del modelado. El Homeostato representa un caso prototípico de modelado de sistemas complejos, mediante el cual se puede reconstruir el comportamiento de un sistema complejo, haciendo que sus descripciones sean equivalentes sólo en determinado nivel de abstracción. Reconocer dicho nivel de abstracción y lo que se gana y se pierde al fijar el mismo es parte esencial de cualquier práctica de modelado y es de vital importancia para justificar el conocimiento que se extrae de los modelos. Esto implica también poder acomodar dicho modelo en la jerarquía de modelos y cómo los mismos están conectados entre sí. La principal lección a extraer es que la relación *modelo-modelo* es al menos tan importante como la relación *modelo-mundo*, y probablemente sea aún más importante que esta última. Extraigo las consecuencias filosóficas de esta posición en el último capítulo de esta investigación. Por lo pronto quedan todavía algunos aspectos importantes de la cibernética para terminar de comprender su relación con los modelos y las máquinas, que son el objeto de la siguiente sección.

²⁵Recuérdese también la nota sobre «mecanicismo metodológico» en la pág. 29.

3.4. Ciber máquinas y cibermodelos

La información es un nombre para el contenido de lo que se intercambia con con el mundo exterior a medida que nos adaptamos a él y le hacemos sentir nuestro ajuste. El proceso de recibir y utilizar la información es el proceso de nuestro ajuste a las contingencias del entorno exterior y de nuestro vivir eficazmente en ese entorno.^{XIII}

Wiener (1951/1989, pp. 17-18)

Al igual que las posiciones mecanicistas más refinadas que le precedieron, en la cibernética también está presente la comparación de los organismos vivos y de sus componentes con las máquinas. Ahora bien, y como se pudo observar especialmente en el caso del Homeostato, la concepción de máquina que introduce la cibernética cuenta con una sofisticación antes no especificada y cuyo núcleo central es el papel que se le da a la noción de información, la que debe entenderse según el *dictum* de Wiener que cité anteriormente como algo distinto de la energía y de la materia. Es decir, es toda una nueva dimensión con la que se puede estudiar un fenómeno complejo, ya que según cómo los va a entender la cibernética, una de sus principales características es que se los puede estudiar apelando a dicha noción, por lo que es esperable que de alguna manera dichos sistemas procesen información. Considero que esto es un aporte clave de la cibernética a nuestra concepción de la complejidad y que es un aspecto fundamental que tiene que considerar una buena metateoría de la complejidad. Por lo tanto, en esta sección me propongo explorar cómo la información entra en los modelos de la cibernética para hacer explícito también el lugar que la información misma tiene para la cibernética, ya que es el pilar fundamental de la cibernética como ciencia, en tanto se puede entender que define a su objeto de estudio. Esta es la forma en la que, por ejemplo, según Stuart Umpleby, el mismísimo Andrei Kolmogorov definía a la cibernética, a la que entendía como “la ciencia que se dedica al estudio de los sistemas de cualquier naturaleza que son capaces de recibir, almacenar y procesar información de manera tal de usarla para el control” (Umpleby, 2000). Para lograr esto es necesario describir las razones por la que la información es una dimensión de análisis en sí misma y es, al menos para la cibernética, epistémicamente irreducible a la materia y a la energía. Dicha afirmación es la que esconde el *dictum* de Wiener, que se tornará central en el estudio de la complejidad.

3.4.1. Cibernética, información, complejidad

En nuestra época, cuando la gente busca explicaciones, la tendencia es cada vez más la de concebir cualquier situación que se intente comprender utilizando una analogía con una máquina.^{XIV}

Donald M. MacKey, *The Clockwork Image* (1972)

La analogía entre las máquinas y los organismos vivos cobra una vida diferente cuando se la ve a través de la luz de la cibernética. Esta disciplina transformó dicha analogía entendiendo a los organismos y a las máquinas a través de la teoría de la información, en la que el concepto de mensaje y de ruido tienen un rol fundamental. Es por esto que Wiener va a sugerir que un organismo puede ser visto *como* como un mensaje, que se distingue del ruido del fondo y en base a dicho mensaje se pueden identificar los *patrones* típicos de un organismo y sus interacciones:

La metáfora a la que dedico este capítulo es una en la que el organismo es visto como un mensaje. El organismo se opone al caos, a la desintegración, a la muerte, como el mensaje se opone al ruido. Para describir un organismo, no se trata de especificar cada molécula que lo compone y catalogarlo poco a poco, sino de responder a ciertas preguntas sobre él que revelan su patrón: un patrón que es más significativo y menos probable a medida que el organismo se convierte, por así decirlo, en un organismo más completo.^{XV} (Wiener, 1951/1989, p. 95)

La noción de información —acompañada por la de “patrón”— se vuelve el elemento clave para realizar las abstracciones que permiten estudiar un sistema sin tener que recurrir a un mapeo de cada uno de sus elementos y sus interacciones, sino que estos se pueden agrupar e identificar de acuerdo a su comportamiento a mayor escala y cómo estos nuevos conjuntos interactúan entre sí, o, siguiendo la metáfora, cómo se *comunican* entre sí. Es a través de la identificación de estos mensajes que el comportamiento del sistema se puede describir como un todo, integrando dichos mensajes en los patrones significativos del fenómeno que se está estudiando, identificando los estados a los que el sistema tiende en busca del equilibrio. Esta es la manera en la que la cibernética interpreta a la idealización, parte clave del modelado. Ashby lo hace en términos de *simplificación* de una máquina, ya que la agrupación de los estados permite identificar isomorfismos u homomorfismos entre las distintas descripciones: “así una máquina puede ser simplificada a una nueva forma cuando sus estados se agrupan adecuadamente. El tratamiento científico de un sistema complejo no requiere que toda distinción posible sea hecha” (Ashby, 1956/1962, p. 105). Aquí hay dos puntos fundamentales que atender. Uno es el de la noción de “distinción”, que retomo más adelante. El otro punto atiende a las distintas formas en la que un sistema puede ser interpretado, lo que introduce el rol del observador a la hora de seleccionar qué parte del sistema se está modelando, lo que equivale, en términos cibernéticos, a seleccionar las variables del “sistema real” que se consideran importantes. Esto es especialmente

importante cuando, dada la complejidad del sistema bajo estudio, es imposible que el observador tenga información completa del sistema como un todo, dado el mero volumen de la misma. Ahora bien, la información que recopila es suficiente para un entendimiento parcial del sistema y “para sus propósitos prácticos fundamentales” (Ashby, 1956/1962, p. 106). Cada observador, de acuerdo a sus necesidades y medios de investigación disponible, recortará al sistema de forma distinta, por lo que es necesario aclarar cada vez que se hace referencia “al sistema”, qué clase de observación se está llevando a cabo, esto es, qué clase de idealización fue la que llevó a la descripción del sistema con la que se está trabajando.²⁶

Ashby extrae dos consecuencias de este hecho. La primera es que “no hay tal cosa como el (único) comportamiento de un sistema muy grande, separado de un observador dado” (Ashby, 1956, p. 106). (Ashby usa indistintamente las expresiones “sistema complejo” y “sistema muy grande”). De esta manera existen tantas “sub-máquinas” como observadores de un sistema, que incluso podrían llevar a descripciones incompatibles, esto es, descripciones de comportamientos que no podrían existir de hecho en el “sistema real”. Al igual que lo hace Ashby en muchas ocasiones uso la expresión “sistema real” entre comillas en tanto que, dado el rol del observador y la necesidad de realizar *distintas* idealizaciones sobre el fenómeno para poder llegar a una descripción del mismo, la pregunta por el “sistema real” pierde fuerza. De hecho, y esta es la segunda conclusión que extrae Ashby, y que ya adelanté al referirme a la importancia de la relación modelo-modelo —y que lo acerca bastante a la posición que defendía Bertalanffy—, es que el objetivo científico no es el de obtener una descripción del sistema tal cual es en la realidad, sino más bien de cómo los distintos modelos posibles de un fenómeno se articulan entre sí para lograr una visión más global y coordinada de lo que se está estudiando. En sus palabras:

[6/14] El enfoque adoptado acá se basa en que la ciencia (según la representan los descubrimientos del observador) no está inmediatamente interesada en descubrir lo que el sistema es “real mente”, sino en *coordinar los descubrimientos de los distintos observadores*, cada uno de los cuales es sólo una porción, o un aspecto de la verdad total.^{XVI} (Ashby, 1956/1960, p. 150. El énfasis es mío)

Esto brinda otra forma de leer la posición de Ashby sobre cuál es el verdadero objeto de estudio de la cibernética, que estudia ya no las máquinas reales, sino las máquinas posibles, desde el punto de vista de su comportamiento, sin importar si han sido efectivamente construidas por la naturaleza o por la mano del hombre (Ashby 1956, p. 3).²⁷ Este conjunto de máquinas posibles también deja ver el lugar central que tiene la teoría de la información para la cibernética, ya que de la misma manera en que la primera sólo puede aplicar

²⁶En el lenguaje de la última parte de esta investigación esto equivaldría a definir el nivel de abstracción que se está considerando.

²⁷Sin duda hay muchos parecidos entre esta posición y la crítica de las teorías coherentistas de la verdad a las teorías correspondentistas. De hecho, creo que se puede ver a la sugerencia de Ashby como una manera de extender las teorías coherentistas “clásicas” para incorporar elementos mucho más complejos —como los modelos— a la “red de coherencia” de un agente o de una comunidad epistémica determinada.

la noción de información a un conjunto de posibilidades, la cibernética sólo tiene sentido cuando puede estudiar un conjunto de máquinas posibles (Ashby, 1956, p. 4). La cibernética puede así reconstruir expresiones simbólicas (modelos formales en el lenguaje de Rosenblueth y Wiener, 1945) con el fin de predecir, controlar y entender a las máquinas reales. Ahora bien, el rol del observador es clave ya que diferentes observadores pueden considerar distintas partes del sistema, de acuerdo a los propósitos que persiga. Es decir, distintos observadores podrán entender como *mensajes* —en lugar de como ruido— distintos comportamientos de la máquina de acuerdo al modo en que estén procediendo la investigación.²⁸ El objetivo de la cibernética es precisamente explorar todas las posibilidades de esos comportamientos para entender cómo están relacionados de acuerdo a las distintas intervenciones que se pueden llevar a cabo sobre la máquina, intervenciones que equivaldrían a conectar otras terminales a la “caja negra”.

El concepto de sistema y el concepto de máquina son increíblemente amplios para la cibernética. De hecho, prácticamente todo el universo puede ser entendido como un sistema dinámico para Ashby, quien en una temprana publicación ya daba una fórmula general para describir lo que se entiende por sistema:

$$\frac{\Delta x_i}{\Delta t} = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \text{ para } i = 1, 2, \dots, n.$$

En principio, siempre y cuando se pueda encontrar una función matemática para el conjunto de variables bajo consideración se está ante la presencia de un sistema. Posteriormente va incluso a ampliar la noción de sistema, ya que el requisito de que tenga que existir una función que relacione las variables va a ser lo que caracterice a una máquina del sistema, entendiendo por sistema así “nada más que una lista de variables” (Ashby, 1956, p. 40) (cf. Ashby, 1952, p. 16). Precisamente lo que transforma a cualquier sistema en una máquina es la posibilidad de que el observador realice predicciones sobre los futuros estados de sus variables, por lo que podríamos decir que la diferencia entre una máquina y un sistema es esencialmente epistémica:

[12/8] Una “máquina” es, en esencia, un sistema cuyo comportamiento es lo suficientemente repetitivo o lo suficientemente sujeto a leyes para que podamos formular algún pronóstico sobre el comportamiento del sistema (S. 7/19). Si esto es posible, la predicción puede adoptar una entre una variedad de formas. Decimos que una máquina es “determinada” cuando *podemos predecir* su estado próximo [...]. Hay otras máquinas cuyo estado próximo no podemos predecir, pero, en cambio, podemos predecir que si las condiciones se repiten muchas veces, se comprueba que las *frecuencias*

²⁸En una línea similar, Ashby expresa que “especificar un objeto real no especifica de manera única el sistema o el comportamiento. Una pregunta tal como ‘¿es el comportamiento del relé de la oficina de correos *realmente* de la forma de función escalón?’ está mal formulada, puesto que pregunta de un objeto real lo que sólo puede ser determinado por el sistema, que debe ser especificado” (Ashby, 1952, p. 90).

de los estados tienen ciertos valores. [...]

Podemos estudiar, por lo tanto, una nueva clase de sistema absoluto: aquel cuyos estados cambian con el tiempo, no mediante una transformación uniforme, sino mediante una matriz de probabilidades de transición. Para que el sistema prosiga siendo el *mismo* sistema absoluto, los valores de las *probabilidades* no deben cambiar. ^{XVII} ()

Esta es la forma en la que la cibernética puede investigar sistemas increíblemente complejos ya que, sin importar el tamaño (entendido como complejidad), si lo que se estudia es un sistema que está “informacionalmente aislado” debe ser posible encontrar una matriz de transición que dé cuenta del comportamiento del sistema y permita hacer predicciones sobre sus estados futuros, pudiendo así éste “ser una máquina”, pese a no ser determinista. El flujo de información es, entonces, la característica esencial y distintiva de una máquina y es lo que pretende investigar la cibernética. Esta es la manera en la que puede determinar si el comportamiento de un sistema respeta una regla o no. Vale la pena enfatizar que la regla es del comportamiento y no del sistema propiamente dicho, ya que el método cibernético no requiere que se conozca la naturaleza misma del sistema que se está estudiando, naturaleza que muchas veces no se puede conocer debido a la complejidad del mismo, lo que nuevamente pone en el telón principal a las cajas negras.

Para Ashby, la complejidad o “tamaño” de un sistema es una suerte de medida del número de veces en que el comportamiento de un sistema se vio constreñido o modificado por tener que “elegir” entre un número de opciones posible para su estado en un momento de tiempo siguiente. Mientras mayor sea el número de variables que determine el estado instantáneo mayor será su complejidad:

En cibernética, el “tamaño” [*largeness*] de un sistema debe referirse al número de distinciones que es posible hacer: sea el número de estados disponibles o bien —si los estados están definidos vectorialmente— el número de componentes en el vector (es decir, el número de sus variables o de sus grados de libertad, 8. 7/13). (Ashby, 1956/1960, p. 90)

La información puede ser utilizada como criterio de cuándo el sistema tuvo que elegir entre dos opciones, ya que tras el proceso de elección existe una disminución de la incertidumbre sobre el estado siguiente. Desde mi punto de vista, el núcleo del método cibernético consiste en brindar un marco que puede aprovechar este “*insight* informacional” para determinar las constricciones que afectan el comportamiento de un sistema, natural o artificial, para poder predecir su comportamiento bajo distintas circunstancias o configuraciones. Es por esta razón que Ashby sostiene que el “concepto más fundamental en la cibernética es el de ‘diferencia’”, por lo que se refiere tanto a que “dos cosas son reconociblemente diferentes o que una cosa ha cambiado con el tiempo” (Ashby, 1952, p. 9). Esto se puede traducir en formas alternativas, pero equivalentes, de investigar un proceso en una lista de variables. Ashby sostiene que, si bien existen diferencias entre los siguientes

métodos de acuerdo al tipo de investigación que se lleva a cabo, todos expresan la misma idea: la de definir la “relevancia” de una variable X con respecto a otra variable Y y cómo los cambios (es decir, las diferencias) de la primera puede producir cambios en la segunda:

1. ¿Es la correlación (correctamente definida) entre X e Y cero?
2. ¿Es $\delta X/\delta Y$ cero en todas partes?
3. ¿Es cero la transmisión (en el sentido de Shannon y de Wiener) entre X e Y ?
4. ¿Son X e Y probabilísticamente independientes?
5. Si cambiamos Y , ¿cambiaría X ? (Ashby, 1970/1981, p. 344)

Una vez obtenida la lista completa de variables de un sistema y que todas hayan sido combinadas y probadas condicionalmente, que es la información que provee al investigador realizar alguno de los métodos anteriores, sólo quedaría determinar cuáles son las variables principales ligadas a la pregunta que se está intentando responder. Si la lista de variables es completa, la “respuesta” debería estar disponible, lo que equivale a decir que se puede establecer con claridad cómo están conectadas las variables entre sí. Ashby ve en esto la esencia de cualquier modelado científico. Si la totalidad de variables no está disponible, el investigador puede optar por una versión más “débil” que es la de usar un número menor de variables y que las otras variables sean expresadas como parámetros. En la “teoría de las máquinas” esto sería equivalente a concebir una máquina con entrada [*input*].

Todo esto se puede llevar a cabo fácilmente para sistemas “simples” pero cuando los sistemas poseen interacciones internas complejas, se debe agregar una serie de pruebas adicionales que tengan en cuenta la posibilidad de que, consideradas como un par, dos variables sean independientes pero que dejen de serlo si se las condicionaliza con respecto a otra variable. En el lenguaje de la teoría de la información se diría que la transmisión $T(X:Y)$ es cero pero que la transmisión condicional $T_z(X:Y)$ no lo es. Esto hace crecer exponencialmente el número de configuraciones para los que es necesario probar la relevancia. Aquí hay varias consecuencias epistemológicas para extraer. Primero, esto significa que existe una cota máxima a nuestro conocimiento de un sistema, cota que está atada a nuestra capacidad de llevar a cabo dichas pruebas de relevancia.²⁹ Dado que a medida que aumenta la complejidad del sistema nuestra capacidad para listar todas las variables y llevar a cabo la prueba de relevancia condicional disminuye, cualquier modelo de dicho

²⁹ Ashby comenta sobre la importancia del límite de Bremermann sobre la capacidad máxima de la materia de transmitir o procesar información, lo cual también me sugiere que algunas de las reflexiones de Ashby pueden leerse en dirección de éste y otros principios que resultan en factores limitantes de la capacidad de procesamiento, como los que podría tener cualquier observador (ver cap. 7).

sistema perderá algo de la complejidad original. La teoría de la información se vuelve el primer recurso de la cibernética para ofrecer una piedra de toque para comparar cuantitativamente dos modelos a fin de determinar su similitud con respecto a una idealización (i.e. eliminar variables) y si esta reduce o no la complejidad de lo que se pretende estudiar. Este punto es clave cuando se presupone que las características que se están estudiando son producto de la complejidad de las interacciones de los componentes del fenómeno bajo investigación. Segundo, si alguna de las variables que no fueron incluidas en el modelo es importante para la pregunta que se está analizando, en la descripción del sistema se encontrarán propiedades emergentes en tanto no pueden ser predichas desde el modelo con el que se está operando. Ashby no utiliza el término “emergencia” pero su intento de “conciliar” la existencia de explicaciones deterministas y no-deterministas sugieren que en términos contemporáneos pensaba en una clase de emergencia epistémica:

[7/21] Estas consideraciones arrojan bastante luz sobre un antiguo problema de la teoría de mecanismos.

¿Es posible que una máquina esté a la vez determinada y sea capaz de cambiar espontáneamente? Si una persona plantea la cuestión, ésta es contradictoria, pero de hecho existe, ya que cuando se habla de los seres vivos una escuela sostiene que están estrictamente determinados, en tanto que otra defiende que son capaces de cambios espontáneos. ¿Pueden reconciliarse estas dos escuelas?

La presencia de mecanismos de escalón [*step-mechanisms*] en un sistema determinado por estados permite que ambos tengan razón, con tal de que los sostenedores de la determinación hablen del sistema constituido por *todas* las variables, mientras que los defensores de la posibilidad de cambios espontáneos se refieran únicamente a las variables principales. (Ashby, 1960/1965, pp. 116–117. Énfasis en el original)

Estos “mecanismos escalonados o de escalón” a los que hace referencia Ashby son aquellos que se comportan de manera análoga al uniselector en el Homeostato y que se pueden describir mediante una función discontinua de tipo escalonada. Para Ashby en el mundo natural abundan esta clase de mecanismos aunque la simplicidad de su comportamiento hace que muchas veces no sean tenidos en cuenta en la descripción de los fenómenos (Ashby, 1952, p. 88).³⁰ En otro pasaje también sugiere que algunos comportamientos “milagrosos”, como los del cerebro humano, se pueden interpretar también como casos de “variables ocultas”:

³⁰Ya hice referencia a algunas similitudes entre el Homeostato y los modelos contemporáneos de aprendizaje automatizado y aquí se puede sumar una más: las funciones escalonadas son una parte importante de la descripción del comportamiento de las neuronas artificiales en las que se basan dichos modelos; usualmente como una de las tantas posibles “funciones de activación” que hacen a la descripción general del funcionamiento de las neuronas o unidades en una red neuronal artificial. Una función escalonada es una función discontinua definida a trozos cuyos intervalos están definidos por una función constante. Su nombre proviene de la similitud de su gráfico con los peldaños de una escalera vista transversalmente.

Debe tenerse en cuenta que tan pronto como alguna de las variables escapa a la observación, el “sistema?” representado por el resto puede desarrollar propiedades notables, y hasta “milagrosas”. Un ejemplo común lo proporcionan los conjuros, que logran milagros, en apariencia, simplemente porque no todas las variables significativas son observables. Es posible que algunas de las “milagrosas” propiedades del cerebro, por ejemplo tener “premoniciones”, “inteligencia”, etcétera, sean milagrosas sólo porque hasta el presente no hemos sido capaces de observar los acontecimientos con todas sus variables significativas. (Ashby, 1956/1960, p. 160)

Por último, la posibilidad de seleccionar distintas variables hace que se pueda llegar a distintos modelos equivalentes para el mismo fenómeno, incluso cuando la pregunta que guía la investigación sea la misma. Para la cibernética, en lugar de ser un problema, esto se vuelve una virtud, ya que le permite estudiar un fenómeno “indirectamente” estudiando cómo los distintos modelos están relacionados entre sí, aplicando recursivamente el método cibernético. A fin de cuentas, va a ser precisamente este punto el que permita a la cibernética identificar las restricciones de posibilidades que sugieren la existencia de invariables y leyes de la naturaleza.³¹ Esto es lo que permite encontrar descripciones simples para comportamientos extremadamente complejos, tal y como ilustra el trabajo con el Homeostato:

[5/14] Podrá comprobarse ahora que todos los gráficos de *Design for a Brain* podrían haberse resumido en una fórmula: “trayectoria de un sistema que marcha, hacia un estado de equilibrio”. El homeostato, en cierto sentido, no hace sino eso: marchar hacia un estado de equilibrio. En *Design for a Brain* se demostró que esta simple frase puede abarcar gran cantidad de modos de comportamiento, intrincados e interesantes, la mayoría muy útiles en fisiología y psicología. (Ashby, 1956/1960, p. 120)

Lo que una buena descripción cibernética debe hacer, entonces, es proveer de una descripción o modelo del sistema que pese a ser de alguna manera “más simple” permita la mayor cantidad de control y predicción sobre el fenómeno. Estrictamente, esto no es otra cosa que la esencia de lo que se entiende por modelado científico y que forma uno de los pilares de la cibernética, tal y como la exploración del trabajo de Rosenblueth y Wiener ilustró. Ahora bien, Ashby elabora algunas conexiones entre la noción de modelo y otros conceptos cibernéticos claves, que comento brevemente a continuación. Ya mencioné que Ashby se refiere al tamaño de un sistema para referirse a su complejidad, entendiendo por complejidad la cantidad de variables necesarias para identificar el estado del sistema y cómo el concepto de información puede iluminar este aspecto. Ahora bien, cuando Ashby se refiere a “información” lo hace en términos de Shannon, interpretándola como entropía, pero reconoce que hay muchos casos en los que esta definición es demasiado estricta y requiere de una concepción más generalizada para expresar para poder dar cuenta –o incluso meramente *señalar*– todo lo que se sigue del hecho de que un sistema tenga que “elegir”

³¹Denomino a esta clase de investigación “análisis de robustez informacional” sobre la que expando en la última parte.

entre distintas posibilidades. Para esto recurre al término “variedad”, detrás del cual creo que se esconde una noción de complejidad bastante interesante porque pretende expresar la capacidad de un sistema para producir una clase de comportamiento determinada, siempre en relación al conjunto de los comportamientos posibles. A diferencia de la noción “pura” de información, la variedad pretende incorporar las restricciones que hacen que un sistema sea predecible. De esta manera, un sistema con variedad muy baja, si bien no produce información, es altamente predecible y un sistema completamente azaroso produce mucha información, pero, al no estar restringido de ninguna forma, su predictibilidad es mínima. Ashby usa la variedad para cuantificar no sólo la estructura de un proceso sino también su dinámica, volviéndose así una forma más general de expresar lo que en *Diseño...* señalaba con el “diagrama de efectos inmediatos” que pretende hacer explícitas las relaciones entre los distintos comportamientos asociados a las variables de un sistema (Ashby, 1952, p. 51).

Cómo construir un buen regulador

Con todos estos elementos se puede obtener una visión más bien global de lo que entra en juego en una descripción cibernética de un fenómeno. Un sistema siempre tiende a un estado de equilibrio. Dependiendo de la complejidad del mismo, el número de estados de equilibrio que puede “encontrar” dicho sistema pueden ser muy pocos o uno solo o pueden ser muchos, como ocurre con el cerebro humano o el Homeostato, por ejemplo. Para encontrar los estados de equilibrio es necesario que el sistema tenga la capacidad de cambiar con el tiempo. Estudiar precisamente *cómo* es que se dan esos cambios es lo que está en juego. De las múltiples formas en las que un sistema puede cambiar, a la cibernética le interesan especialmente los casos en los que el sistema puede generar una nueva estructura interna para acomodar los nuevos valores de sus variables. Esto implica que debe existir un proceso de selección conducido por la presencia de reguladores, que cambian el valor de algunas variables con respecto al valor de otras. El regulador es el punto fundamental de todo proceso de retroalimentación.

Para Ashby los sistemas complejos tienen al menos dos reguladores acoplados. El primero corrige algunas variables para evitar que la distancia entre una serie de valores y otros diverjan, lo que incorpora la noción de error o divergencia como un factor clave. El segundo regulador entra en acción cuando los cambios efectuados por el primer regulador sobre las variables que controla no pueden llegar a un estado de equilibrio, lo que corresponde a no poder seleccionar ninguna configuración. Cuando éste regulador acciona, todo el sistema cambia *bruscamente* de estado, tal y como el Homeostato lo hace cuando opera el uniselector. Dado este cuadro básico, partiendo de un conjunto determinado de variables, lo que un sistema debe incorporar para encontrar estados de equilibrio es el conjunto correcto de reguladores. El *insight* de Ashby yace en identificar dicho conjunto de reguladores con el *modelo* del sistema que se está estudiando. Es por eso que

como sugiere el título de uno de sus últimos trabajos, “todo buen regulador es un modelo de ese sistema” (Conant & Ashby, 1970). Esto significa que lo que permite el método cibernético es reconstruir los *posibles* reguladores de un sistema que son los que determinan su comportamiento y para poder hacerlo debe existir una *relación de modelado* entre el regulador y el sistema. La restricción principal que va a tener dicha relación es la de la “ley de variedad requerida” o “ley de Ashby”. La ley se puede interpretar como una relación entre información y selección o directamente entre el regulador y el sistema que está siendo regulado (lo que implica que está siendo modelado). En términos de información se puede decir que la ley indica que la cantidad de selección que se puede llevar a cabo está limitada por la cantidad de información disponible. Vista así es un análogo al teorema de Shannon que muestra que la cantidad de errores que se pueden corregir en un mensaje nunca puede ser mayor a la capacidad del canal (Shannon, 1949). Volviendo al caso de un sistema siendo regulado, la ley sostiene que un buen regulador debe tener mayor o igual variedad que el sistema que regula. Así, si un sistema tiene más variedad que la del regulador no puede ser controlado, ya que las “variables libres” del sistema generan más ruido, haciendo imposible su tarea. “Sólo la variedad destruye la variedad” es una de las formas en la que Ashby solía resumir la ley (cf. Ashby, 1958, p. 207). En términos matemáticos se puede pensar una función de estado para el regulador y para el sistema de tal manera que para los cambios en una variable independiente generados por las perturbaciones al mismo o aquellos de la función misma, la composición de las funciones produzca un resultado que neutralice la perturbación, lo que implica que la función del regulador debe ser la inversa de la función de estado del sistema.

Una posible interpretación de esta ley y sus implicancias sobre la relación de modelado es que la cantidad de variedad del modelo debe ser igual o mayor que la del sistema que se está modelando. Esto sugiere que, ante un exceso de variedad en el sistema, o bien hay que aumentar la variedad del modelo, o bien disminuir la variedad del sistema, algo que es factible, ya que el sistema se define por sus variables. Efectivamente lo que logra una idealización es cambiar el sistema por uno más simple y cuya variedad esté en consonancia con la capacidad del regulador. Más allá de las obviedades que parece decir la ley, se puede leer aquí una sugerencia importante para entender el proceso de idealización cuando se trabaja con modelos, que suele ser interpretada como una mera simplificación de lo que ocurre a efectos de poder ser capturado por un modelo. Dicha simplificación no es del modelo, sino que es estrictamente del sistema, ya que se cambia el sistema original por uno con menos variedad, uno en el que hay menos variables o en el cual la relación condicional entre las mismas se elimina. En cambio, un modelo puede ser idealizado *aumentando* su variedad, lo que en la presentación de Rosenblueth y Wiener equivalía a bajar en la jerarquía de modelos hacia uno que incorpora todos los aspectos posibles del sistema que se estaba considerando. Ya que conseguir un modelo perfecto para un sistema concreto es imposible, un buen modelo científico será el que consiga un

balance entre el nivel de complejidad del regulador y el de abstracción del sistema. El sistema abstraído ya es, en cierta forma, un modelo del sistema original, por lo que la relación entre el regulador y el sistema es una relación modelo-modelo y no una relación modelo-mundo. Agregar una dinámica más compleja a esta relación y una distinción entre clases de variedades de acuerdo al nivel en el que se presentan es lo que propongo en la última parte de esta investigación.

La forma abstracta en la que Ashby presenta al fenómeno de la regulación no sólo es útil para entender dicho fenómeno, sino también para comprender el alcance del mismo y por qué gran parte del proceder científico se puede considerar como una instancia de regulación y del diseño de la misma. Se parte de una separación arbitraria entre el ambiente y el sistema, considerando un subconjunto de variables como las variables esenciales del sistema que se está estudiando. Dicho conjunto E se ve continuamente afectado por un conjunto D de perturbaciones [por *disturbances*] que hace variar los valores de las variables del sistema. Ahora bien, la influencia del conjunto D sobre E están mediadas por “el duro mundo externo o aquellas cuestiones que el regulador pretendido deberá considerar como fijas” (Ashby, 1956, p. 209), lo que puede ser codificado en una tabla T . El regulador R es aquella parte del sistema cuya tarea es lograr que ante las perturbaciones D , los valores de E queden dentro del rango que el organismo o la máquina necesitan para seguir operando normalmente y que también se encuentra constreñido por los factores fijos que aparecen en T . De esta manera, tanto T como R actúan como una barrera para proteger a E . Toda la variedad producida por D que no pueda ser contrarrestada por T deberá ser controlada por R , en base a su capacidad de generar suficiente variedad para lograrlo. De esta manera queda algo más clara la expresión de la ley de variedad requerida que sostiene que “sólo la variedad puede destruir la variedad”, de lo que se sigue que, si R pretende ser un buen regulador para E , la cantidad de variedad de la que tiene que ser capaz R tiene que ser al menos la misma que la que genera D .

La primera consecuencia que tiene este modelo es que, si el fenómeno general de la regulación se interpreta como un acto de comunicación, la ley de variedad indica que “la capacidad de R como regulador no puede exceder la capacidad de R como un canal de comunicación” (Ashby, 1956, p. 211). Esto deja a la ley en una posición análoga al teorema 10 de Shannon, según el cual la capacidad de un canal de corrección de eliminar el ruido que surja en un canal de transmisión dado nunca puede ser mayor que la capacidad de dicho canal de corrección para transmitir un mensaje (Shannon, 1949). El ruido se corresponde con D , el canal de corrección es el regulador R y la entropía del mensaje es lo que el regulador debe hacer valer cero.

De esta manera, poder conocer cómo funciona un sistema complejo se vuelve una instancia de nuestra capacidad para generar un regulador para dicho sistema, lo que significa poder construir un buen modelo del sistema. Nuevamente, el dejo ingenieril de

“construir” no sólo es apropiado, sino que es característico de esta concepción de modelos, según la cual la forma correcta de hacer un modelo de un sistema es, literalmente, construir otro sistema, muchas veces formal, que se comporte de la misma manera en el nivel de abstracción que se ha determinado como relevante para la investigación que se lleva a cabo. Esta interacción entre modelar y simular es uno de los puntos principales que se seguirán hilando en esta investigación. A su vez, este mismo dejo ingenieril pone de relevancia la pregunta por el diseño, un término que más allá del título brilla por su ausencia en *Design for a Brain*. Hay una interpretación obvia y es que el Homeostato mismo es, literalmente, el diseño para un cerebro en tanto se trata de máquina física que puede simular uno de los rasgos esenciales del sistema y que fue, evidentemente, *diseñada* para tales efectos. Pero hay otro sentido en el que uno puede pensar que *Design for a Brain* y el Homeostato como personaje estrella son un diseño para un cerebro y es uno que retoma cierta idea de circularidad (aunque deberíamos hablar mejor de retroalimentación) en el que el método cibernético se hace objeto de estudio del mismo método cibernético: *Design for a Brain* es así un diseño sobre cómo estudiar un sistema tan complejo como el cerebro, pero por sobre todo no solamente el cerebro, sino cualquier instancia en la naturaleza en que los métodos más tradicionales de estudio no pueden ser empleados. Casi que podría decirse que es más que nada un análisis sobre cómo hacer —i.e. *diseñar*— modelos y, en la misma línea en la que ya lo habían planteado Rosenblueth y Wiener, *modelizando* el mismo proceso de hacer modelos. Visto así, se trata del diseño de un cerebro mucho más abstracto y amplio: el cerebro de quien usa la cibernética como método para conocer la naturaleza y requiere de un modelo para hacer modelos.

En la *Introducción a la Cibernética*, Ashby sí va a ser mucho más explícito sobre esta noción de diseño en términos cibernéticos y, deberíamos agregar hoy en día, casi computacionales. La pregunta guía va a ser la de cómo diseñar y construir no una máquina determinada sino cualquier máquina y, retomando lo que antes había expresado acerca de lo general que puede ser una máquina, la máquina a construir no tiene por qué ser física, lo físico no es más que una instancia de las máquinas posibles. La fórmula general que Ashby utiliza es la de “una entidad *Omega* que diseña una máquina *M*” que debe ser abarcadora para capturar casos como el de “los genes determinando la formación del corazón, [...] una parte del cerebro determinando las conexiones internas en una red nerviosa, [...] un matemático programando una computadora automática para que se comporte de una determinada manera” (Ashby, 1956, p. 252). Estos ejemplos nos hacen pensar que Ashby tiene en mente una descripción totalmente abstracta del proceso de diseño. Y esto está en total acuerdo con el método cibernético, puesto que la pregunta no es por un caso particular o cómo en la práctica una máquina es creada, sino más bien con lo que el denomina la determinación del *modelo* final:

Lo que nos interesa, si nos atenemos al enfoque cibernético, no es el proceso más evidente de formar o unir piezas materiales; nos interesa un problema menos obvio:

qué *determina* el modelo final, o cómo es *seleccionado*. Debemos dedicarnos a analizar extensas cadenas de causa y efecto, para poder relacionar un *conjunto* de posibles causas iniciales con un conjunto de máquinas finales que surge como consecuencia, del mismo modo que un mecánico de teléfonos, con un cable de cien conductores, conecta la punta de cada uno de ellos en un extremo del cable con alguna punta en el otro extremo. Si encaramos así el problema, comprobamos que deben cumplirse ciertas relaciones cuantitativas [...]. (Ashby, 1956/1960, p. 341. Énfasis en el original)

La clave para encontrar las relaciones cuantitativas será concentrar la discusión en cómo lo que tienen en común los procesos usualmente considerados a la hora de finalmente terminar produciendo una máquina dependen de la identificación de las variedades involucradas, por lo que el estudio del diseño de las máquinas —y, por lo tanto, de una importante clase de modelos— consistirá en precisar la dinámica de dichas variedades. Bajo mi interpretación, es aquí donde confluyen todos los elementos teóricos de la cibernética para dar cuenta del desafío epistémico de explicar sistemas complejos. Es la incorporación de una “dinámica darwiniana” al concepto de máquina lo que Ashby exporta a la modelización general y abstracta de estos sistemas. De la misma manera en la que ocurre en la selección natural, que es el mecanismo por el cual la naturaleza ha podido producir una increíble variedad de procesos, el diseño de cualquier máquina, siempre en el sentido amplio del término, consiste en un proceso de selección. Es decir que en todos los casos debe haber una exploración efectiva del espacio de posibilidades. Que dicha exploración sea efectiva es sumamente importante, puesto que el espacio de posibilidades a explorar puede ser inagotable, por lo que es necesario alguna clase de restricción para que dicha exploración termine en algún momento y pueda darse la exploración de un nuevo conjunto de posibilidades, generado por aquello que fue fijado en la exploración anterior. El concepto clave para explicar esto es el de selección. Por alguna razón a explicar todavía, el proceso de exploración se detiene cuando *se elige* una configuración determinada, que es lo que permite acceder al nuevo espacio de posibilidades a explorar. Que el espacio de posibilidades a explorar sea un conjunto de elementos es crucial según la lectura de Ashby, puesto que es lo que permite usar la teoría de la información para estudiar su dinámica:

Debe tenerse en cuenta que los conceptos de proyecto y construcción son esencialmente aplicables a conjuntos, pese a que, por lo común, el término se utiliza en singular [...] Por lo tanto, “el tipo genético determina la forma del corazón” es una manera abreviada de decir que puede establecerse una correspondencia entre los elementos del conjunto de tipos genéticos de diferentes especies y los elementos del conjunto de corazones posibles en las diversas especies, tal como sucede con los conductores en los dos extremos de un cable telefónico. Por lo tanto, el hecho de “proyectar” o “construir” una máquina es, en esencia, un acto de comunicación del Constructor [*Maker*] a lo Construido [*Made*], y se le puede aplicar los principios de la teoría de la comunicación. En particular, las mediciones expuestas [*the measures that were developed*] cuando se encaró el caso en que varios mensajes posibles son reducidos a uno pueden aplicarse ahora al caso en que varias máquinas posibles son reducidas a *una*. (Ashby,

1956/1960, p. 345. Énfasis en el original)

Aquí es importante notar la conexión entre este conjunto de posibilidades que pueden dar lugar a una máquina y el conjunto de modelos abstractos (en la jerarquía planteada ya por Rosenblueth y Wiener) que pueden usarse para describir un fenómeno. Bajo mi lectura, los dos son análogos, y la exploración de las conexiones entre las dos representaciones es uno de los problemas que considero fundamentales no sólo para una epistemología de la complejidad, sino también para cualquier comprensión filosófica de nuestra capacidad de dar cuenta de los fenómenos naturales por parte de la empresa científica. Este tema es explorado con más profundidad en el último capítulo, pero ya se puede ver cómo la interpretación sincrónica de la jerarquía puede beneficiarse de una lectura diacrónica que suele ser normalmente asociada a un proceso evolucionario.

Ashby nos sugiere un experimento mental que puede ayudar a comprender la relación entre la información y el diseño:

Un recurso conceptual [*conceptual device*] útil para subrayar este aspecto es suponer que el acto de proyectar debe efectuarse mediante un teléfono, o por intermedio de cualquier otro canal específico. Por lo tanto, las cantidades de variedad pueden reconocerse fácilmente mediante la identificación de la cantidad real de información que debe transmitirse. (Ashby, 1956/1960, p. 345)

En parte este experimento mental o recurso conceptual es presa de su tiempo, en tanto transmitir un diseño de algo complejo por un teléfono parece una tarea bastante intrincada. Sin embargo, el experimento creo que es muy útil porque por un lado bien se podría argumentar que lo que se hace al utilizar una red como Internet para transmitir contenido es precisamente el envío de diseño por medio de un canal de comunicación. Por otro lado, el experimento sugiere la necesidad de incorporar las capacidades del receptor del mensaje a la hora de codificar el diseño que va a ser transmitido. Aquí se puede ver una suerte de inversión de la relación “clásica” con respecto al flujo de información (o al flujo de conocimiento, si pretendiéramos seguir a Dretske (1981)), en tanto no es el receptor quien intenta averiguar algo de la fuente a través de los mensajes que recibe, sino el emisor quien debe considerar las posibilidades que tiene el receptor de llevar a cabo las instrucciones de diseño que recibe. Mientras mayor sean estas capacidades de decodificación, más simple puede ser el mensaje que se transmite, mientras que, si del receptor se espera muy poco, las instrucciones deben incluir suficientes elementos para generar las capacidades de ejecución del diseño en el receptor. De hecho, una característica de muchos sistemas complejos es que pueden sufrir cambios radicales con una mínima intervención, intervención que muchas veces llega en forma de información, ya sea del exterior o del interior mismo. Es decir, muchas de sus partes pueden actuar tras detectar alguna clase de patrón, sin tener que mediar una interacción basada en energía. Esta es otra forma en la que el valor del *dictum* de Wiener sobre la irreductibilidad de la información a la materia y a la

energía cobra sentido. Otro punto clave de la postura cibernética frente al conocimiento del mundo natural también se ve reflejado en el experimento mental que propone Ashby: el de la continuidad entre los modos de conocer el mundo natural y el de la creación artificial de máquinas, ya que en ambos casos es signo de buena empresa científico-creadora proceder con una multiplicidad de estrategias, produciendo comportamiento desde el diseño y desde el comportamiento imaginar los diseños posibles que pudieran producir esa clase de comportamiento.

Esta idea de concebir al diseño como una reducción del espacio de posibilidades da pie a una interpretación mecánica del acto de diseñar: “El acto del diseñador de seleccionar un modelo entre muchos equivale a algún factor determinante que fije una entrada en un valor permanente” (Ashby, 1956, p. 254). Bajo esta concepción abstracta y general en la que diseñar puede verse como equivalente a fijar el valor de un parámetro que determina la forma de un modelo, Ashby puede subsumir actos en principio tan diferentes como el diseño que realiza quien crea un modelo científico, quien diseña una máquina física e incluso la interacción de las máquinas entre sí o de las partes de una máquina, tanto natural como artificial. Interesantemente, para Ashby estos actos no son tan distintos y el hecho de que se puedan subsumir bajo una concepción general de diseño es lo que permite, a fin de cuentas, utilizar uno de esos productos para *modelar* a otro. Así es cómo, el efecto que una parte de una máquina realiza sobre otra puede modelizarse como el cambio en el valor de un parámetro.³² De la misma manera en la que un operador puede cambiar radicalmente el comportamiento de una caja negra o de una máquina mediante la operación de una perilla (pensemos en el caso de cambiar el modo de trabajo del Homeostato para que funcione mediante el uniselector de alguna de sus unidades), los sistemas naturales pueden interpretarse de la misma manera, como sería el caso del cerebro:

Este mismo punto de vista puede aplicarse al cerebro, y entonces se comprueba que una parte del cerebro puede mostrar, con relación a otra, la misma relación objetiva de comportamiento que existe entre el proyectista [*designer*] y la máquina.³³ Comenzamos a comprender de qué manera una parte —una estructura básica, quizá— puede actuar como proyectista con respecto a la parte a la que domina un circuito neural, por ejemplo.^{XVIII} (Ashby, 1956/1960, p. 348)

Claro que este “diseño” no tiene por qué ser de la clase de reducción de posibi-

³²Esto también es válido para algunas clases de modelos de sistemas complejos, en especial en el uso de redes neuronales artificiales para comprender mejor el funcionamiento de las redes neuronales de los cerebros biológicos (más sobre este punto en los capítulos siguientes).

³³Sospecho que la decisión de Jorge Santos de traducir “design” por “proyecto” puede en parte haber estado motivada por introducir más distancia todavía de interpretaciones que hicieran alusión a la idea de diseño inteligente. Que “diseño” haya sido así traducido en la *Introducción a la cibernética* puede ser, por tanto, una de las razones por la que el título de la versión en castellano de *Design for a brain* también tome este término por “proyecto”. Dicho sea de paso, Santos fue uno de los impulsores de la informática en la Argentina, especialmente a través del proyecto CEUNS en la Universidad Nacional del Sur, finalmente frustrado por el fin de los subsidios en 1962 (Carnota & Rodriguez, 2015).

lidades que tiene un ingeniero cuando diseña una máquina con un propósito específico, sino que, bajo la lectura abstracta de diseño que propone Ashby, dicha reducción puede llevarse a cabo mediante una fuente azarosa que “decida” —es decir, que fije— el valor de un parámetro. Además, pueden existir varias etapas o momentos de reducción en los que la selección tiene lugar. Ashby llama a esto “suplemento de la selección” y “selección por etapas”, respectivamente (1956, pp. 257–259). Aquí, como ya lo había hecho en su descripción de las “máquinas darwinianas” representadas por el Homeostato, Ashby realiza una suerte de “síntesis mecánica” del proceso evolución por medio de la selección natural, que no sólo explica la variedad en el mundo natural sino también la variedad de configuraciones que un sistema complejo puede llegar a mostrar, pero fundamentalmente señala cómo se puede llegar a modelar dichos fenómenos, mediante esta interpretación mecánica del proceso de selección y posterior disminución de variedades.

Muchos de los elementos de la cibernética revisados hasta aquí entran en juego simultáneamente a la hora de considerar la posibilidad de efectivamente modelizar un sistema complejo. Si bien Ashby no habla explícitamente de una jerarquía de modelos, de la manera en la que sí lo hacían Rosenblueth y Wiener, Ashby tiene en cuenta que el conocimiento —y por lo tanto la capacidad de modelar/regular un sistema— depende de la descomposición que se pueda hacer de la estructura de la caja negra que es el sistema complejo original.³⁴ Según mi lectura, esta descomposición es equivalente al descenso en la jerarquía de modelos puesto que pretende dar cuenta de cómo las partes de dicha caja negra se conectan entre sí o, para expresarlo mejor en el lenguaje de la cibernética, como *se comunican* entre ellas. Ahora bien, para poder llevar a cabo dicha descomposición el sistema no puede estar máximamente conectado. Este era el supuesto por el supuesto fundamental que consideraban Rosenblueth y Wiener y que también es crítico para Ashby: la reducibilidad es un requisito para la descomposición.³⁵

Ashby introduce a la reducibilidad en el capítulo cuarto de su Introducción, precisamente el que está destinado a “la máquina con entrada”, en donde hace su aparición el concepto cibernético por excelencia: el de *feedback* o retroalimentación. Para la cibernética, lo interesante del mundo y de las máquinas no está tanto en la composición de sus partes sino en lo que ellas pueden lograr cuando están conectadas entre sí —razón por la cual la considero una de las disciplinas fundamentales del estudio de la complejidad—, por lo tanto, estudiar los flujos de estas interacciones es un objetivo primordial para lograr un buen modelo de un sistema. Cuando el sistema tiene pocas partes, o al menos cuando se pretende hacer un modelo muy sencillo (muy abstracto) del comportamiento del sistema,

³⁴Lo más explícito que llega a ser Ashby a la hora de plantear una jerarquía aparece en términos de un retículo de modelos que tiene un modelo perfecto en la cima y un modelo que no distingue estados en el fondo. Dado el cierre del retículo, hay una diferencia importante en la concepción de esta jerarquía de Ashby y la planteada originalmente por Rosenblueth y Wiener (Ashby, 1956, p. 108).

³⁵Como se podrá ver en el capítulo 5, este requisito también es crítico para Simon.

es probable que modelar en términos de retroalimentación resulte muy útil. Sin embargo, cuando se trata de sistemas que tienen muchas partes conectadas entre sí, y se pretende dar un modelo más preciso de su comportamiento, o uno que pretenda iluminar sobre la posibilidad de intervenir sobre dichos sistemas para llevarlo a un estado deseado distinto de aquel en el que se encuentra, la utilidad de modelar la interacción entre las partes como un flujo de retroalimentación presenta sus límites:

La verdad es que el concepto de “realimentación”, tan simple y natural en ciertos casos elementales, se torna artificial y casi inútil cuando las interconexiones entre las partes se hacen más complejas. Cuando son sólo dos las partes unidas, de modo que cada una afecta a la otra, las propiedades de la realimentación aportan una información importante y útil acerca de las propiedades del todo. Pero cuando el número de partes alcanza a una cifra de cuatro, si cada una afecta a las otras tres, entonces pueden trazarse veinte circuitos entre ellas y el hecho de conocer las propiedades de los veinte circuitos no ofrece información completa sobre el sistema. Tales sistemas complejos no pueden encararse como un conjunto ligado [*interlaced*] de circuitos de realimentación más o menos independientes; deben examinarse como un todo. (Ashby, 1956/1960, pp. 80-82)

Ahora bien, la posibilidad de estudiar a un sistema cuyas partes se puedan identificar dependerá precisamente de la clase de conexión que exista entre sus partes, y es aquí en donde la reducibilidad, tal y como la entiende la cibernética, se vuelve un requisito para iniciar el descenso en la jerarquía de modelos. Un todo se dice reducible si se pueden encontrar al menos “dos partes que son funcionalmente independientes” (Ashby, 1956, p. 60). Dado que la posición general de la cibernética es epistémica, debería quedar en claro que la prescripción de independencia funcional se impone sobre el modelo y no sobre el sistema real, por lo que quedaría abierta la posibilidad de que al seguir descendiendo en la jerarquía de modelos algo que se identificaba como funcionalmente independiente resulte no serlo, lo que obligaría a revisar los modelos anteriores. Aquí se pueden notar al menos dos puntos interesantes. Uno es cómo, nuevamente, esto obliga a revisar la conexión entre los distintos modelos. El otro punto está en lo categórica que es para Ashby el supuesto de independencia, en tanto la independencia funcional excluye cualquier clase de interacción entre las partes. Considera que es una característica bastante común en el mundo y que es gracias a ellas que ciertas estructuras complejas pueden darse:

Para formarnos una idea de cuánta reductibilidad se presenta en el mundo en que vivimos, comparemos su comportamiento ordinario con el que tendría si súbitamente perdiese su reductibilidad, esto es, si cada variable tuviese un efecto inmediato o retardado en las demás. El mero hecho de dar vuelta la página de este libro, en lugar de ser eso y nada más que eso, podría originar un cambio en las luces, un movimiento de la mesa, un cambio en la velocidad del reloj, y así similarmente en toda la extensión del cuarto. Si el mundo fuera realmente irreductible, la regulación sería tan difícil que resultaría imposible, y no podría existir ninguna forma organizada de vida. (Ashby,

1956/1960, p. 357)

A mi juicio, esta postura sobre la reducibilidad es demasiado extrema y debería poder establecerse una suerte de gradiente de interacción, considerando que puede haber conexiones entre las partes del sistema que tengan distintas intensidades. Precisamente esto va a ser uno de los elementos que introdujo Simon y que ahora forman parte de nuestra comprensión general de los sistemas complejos. Ahora bien, como veremos más adelante, la noción de información que la misma cibernética aportó puede ser útil para clasificar las interacciones entre las partes de los sistemas. Otro punto es que sabemos que, al menos bajo ciertos regímenes, algunos sistemas complejos se comportan como si sus partes estuvieran máximamente correlacionadas, por lo que al menos en cierto nivel de explicación los modelos cibernéticos no parecerían poder aplicarse. Sin embargo, creo que el *leitmotiv* de la cibernética como recurso para entender la práctica de modelado, las clases de modelos que se crean y las relaciones entre estas, puede ser epistémicamente muy fértil. Ahora bien, dado el avance que nuestra comprensión de los ámbitos formales, naturales y artificiales ha tenido en estos años, la postura cibernética necesita ser actualizada. Es más, en términos computacionales contemporáneos, se puede afirmar que lo que el método cibernético permite diseñar son las especificaciones de una máquina, es decir la serie de requisitos funcionales que debe cumplir para ser una máquina de ciertas características, independientemente de la realización particular que hagan efectivas a esas especificaciones. Como mostraré más adelante, aceptando la analogía (que como ya vimos está en el centro de la cibernética) entre el diseño de situaciones artificiales y el estudio del mundo natural, verificar que un programa cumpla con las especificaciones es un análogo al problema de crear una *clase* de modelos para un fenómeno de la naturaleza. Turing concibe a nuestro conocimiento del mundo, si no es que, al mundo mismo, de una manera muy similar, como veremos en el capítulo siguiente. Pero antes de cerrar este capítulo es necesario decir algo más sobre la conexión entre la Cibernética y la Teoría General de los Sistemas.

3.5. Bertalanffy contra las (ciber)máquinas

... no hay ninguna propiedad de una organización que sea buena en ningún sentido absoluto; todas son relativas a un entorno determinado, o a un conjunto determinado de amenazas y perturbaciones, o a un conjunto determinado de problemas.^{XIX}

(Ashby, 1962, p. 266)

El trabajo del Dr. W. Ross Ashby es probablemente la mayor contribución moderna a este tema, en lo que respecta a las analogías entre los organismos vivos y las máquinas.^{XX}

(Wiener, 1951/1989, p. 48)

Ya mencioné que no hay tal cosa como *la* Cibernética, por lo que en principio no debería acusarse a nadie de haber interpretado mal a *la* cibernética.³⁶ Sin embargo, más allá de las diferencias entre algunos de sus teóricos, se pueden observar varios temas comunes que más allá de los detalles de su formulación e interpretación, hacen al núcleo de la disciplina. Es precisamente tomándola como una disciplina y pretendiendo ver cómo ella está relacionada con las otras disciplinas que pretenden estudiar el mismo tema que se pueden atender a algunos límites que la visión cibernética recibió, y en especial los que me interesan señalar aquí son los que surgen de cómo algunos abanderados de la Teoría General de los Sistemas leyeron los objetivos y los métodos cibernéticos. Como bien señala George Klir, la TGS se desarrolló en paralelo a la cibernética y algunos de los miembros de estos movimientos teóricos estuvieron en la intersección de las dos disciplinas, tanto a nivel teórico como a nivel social:

La investigación sobre sistemas generales y la cibernética se han desarrollado paralelamente desde su aparición, y se ha producido una considerable fertilización cruzada entre ellas. Quizás la persona más importante en este cruce sea W. Ross Ashby, cuyas profundas contribuciones a la cibernética fueron formuladas y tratadas como problemas de sistemas.^{XXI} (Klir, 2013, p. 49)

Klir continua su comentario sosteniendo su visión acerca de la relación entre las dos disciplinas, considerando que la cibernética es parte de la TGS en tanto no pueden entenderse algunos de sus conceptos fundamentales —como el de información— si no se hace referencia a cierta clase de sistema:

Hay diferentes opiniones sobre la relación entre la investigación de sistemas genera-

³⁶(Ashby, 1962) es una excelente introducción a la forma en la que Ashby se aproximó ya una vez en Illinois a su comprensión de la cibernética como una posible metateoría que englobe más sistemas complejos. El texto original también se encuentra reproducido en (Klir, 2013, pp. 605-620)

les y la cibernética. Según una de las opiniones, que parece haberse convertido en la predominante dentro del movimiento sistémico, la cibernética es una subárea de la investigación de los sistemas generales que se centra en el estudio de los procesos de información en los sistemas, especialmente la comunicación y el control. Comparto plenamente esta opinión [...], ya que considero todas las propiedades y problemas relacionados con la noción de información como propiedades y problemas fundamentalmente sistémicos. De hecho, no puedo concebir la posibilidad de conceptualizar la información sin referencia a algún tipo de sistema.^{XXII} (Klir, 2013, p. 49)

Esto se podría considerar un sesgo por parte de Klir, ya que la interpretación de sistema que el considera es bastante cibernética. Como mencioné antes, para Ashby, un sistema no es más que una lista de variables, y el caso de estudio interesante es cuando dicha lista se puede convertir en una máquina, cuando se encuentra un comportamiento regular que conecte los valores de dichas variables. Tanto Ashby como Klir comparten esa opinión, pero parten de la premisa de interpretar a los sistemas y a las máquinas dentro de un marco cibernético, y esto no es común a todos los proponentes de una TGS. Quizás el más importante que no compartía esta visión y que dejaba a la cibernética como un subconjunto bastante acotado de la TGS era Bertalanffy, quien nunca estuvo muy de acuerdo en darle un rol tan central a la noción de máquina ni a la de información. De hecho, para él la cibernética sigue atada a una concepción extremadamente clásica y limitada de las máquinas, por lo que se puede afirmar con cierta certeza que si es que conocía en detalle los trabajos de Ashby nunca quedó muy impresionado con sus resultados:

El enfoque cibernético conserva el modelo del organismo como máquina cartesiana, la causalidad unidireccional y los sistemas cerrados; su novedad reside en la introducción de conceptos que trascienden la física común, especialmente los de la teoría de la información. A fin de cuentas, esta pareja es una expresión moderna de la vieja antítesis entre «proceso» y «estructura»; tendrá que acabar resolviéndose dialécticamente en alguna nueva síntesis. (von Bertalanffy, 1968/1976, p. 170)

Cómo ya he señalado, uno de los aportes más interesantes de la cibernética a una “teoría de las máquinas” es haber mostrado que el concepto puede ser mucho más amplio que el de las limitadas “máquinas cartesianas”. Además, la misma concepción de las máquinas aporta una nueva manera de ver a la diada entre proceso y estructura en tanto que, para seguir con el pseudo juego hegeliano de Bertalanffy, sugiere una posible forma de síntesis, en donde estructura y dinámica o proceso no se ven como antítesis sino como componentes integrales para el correcto funcionamiento de una máquina compleja, en la que la estructura habilita una dinámica que, a su vez, puede permitir cambios en la estructura, por lo que ninguna “subyace” a la otra ni son, estrictamente, opuestos. Poder dar cuenta de esta “co-dependencia” es un requisito para cualquier metateoría de la complejidad.

El problema fundamental que Bertalanffy encuentra en la cibernética es que no puede dar cuenta de lo que el considera el aspecto fundamental de un organismo que es

el de ser un sistema abierto y organizado. Si bien hay lugar dentro del organismo para los efectos de retroalimentación, que se dan tanto entre el sistema y el ambiente y entre algunas de las partes del mismo sistema, sólo apelando esta clase de procesos no se podría explicar la totalidad de acciones que permiten en especial el desarrollo y la evolución estructural de un sistema:

Un sistema abierto consigue tender «activamente» hacia un estado de mayor organización, es decir, pasar de un estado de orden inferior a otro de orden superior, merced a condiciones del sistema. *Un mecanismo de retroalimentación puede alcanzar «reactivamente» un estado de organización superior, merced a «aprendizaje», o sea a la información administrada al sistema.*

En resumen, el modelo de retroalimentación es eminentemente aplicable a regulaciones «secundarias», a regulaciones basadas en disposiciones estructurales en el sentido amplio de la palabra. En vista, sin embargo, de que las estructuras del organismo se mantienen en el metabolismo y el intercambio de componentes, tienen que aparecer regulaciones «primarias» a partir de la dinámica de sistema abierto. El organismo se toma «mecanizado» conforme adelanta su desarrollo; así, regulaciones posteriores corresponden particularmente a mecanismos de retroalimentación (homeostasia, comportamiento encaminado a metas, etc.). (von Bertalanffy, 1968/1976, p. 156. El énfasis es mío)

Aquí se puede observar lo limitada que es la comprensión de la noción de información para la rama más “organicista” de la TGS, puesto que no se la como un factor a tener en cuenta a la hora de inducir cambios estructurales dentro del organismo, siendo también limitada la capacidad para generar nuevas dinámicas, más allá de lo que lleve al sistema a aprender de su experiencia con el medio. Si Bertalanffy acusa a la cibernética de no haber presentado una alternativa a la concepción cartesiana de las máquinas, los cibernéticos podrían acusarle de quedarse en una comprensión pre-computacional de la noción de información, casi cartesiana, si queremos seguir el juego de las etiquetas. Algunos pasajes en la obra de Bertalanffy dejan en claro como el organismo no podría ser una máquina porque las máquinas no podrían ellas mismas superar las limitaciones que su estructura les provee y dependen de la acción externa para mantenerse funcionando:

El organismo vivo es mantenido en continuo intercambio de componentes; el metabolismo es una característica básica de los sistemas vivientes. Estamos, como si dijéramos, ante una máquina compuesta de combustible que continuamente se consume y, sin embargo, aquélla se preserva. No hay máquinas así en la tecnología de hoy. En otras palabras: una estructura del organismo como máquina no puede ser la razón última del orden de los procesos vitales porque la máquina misma es mantenida en un fluir ordenado de procesos. Por lo tanto, el orden primario tiene que residir en el proceso mismo. (von Bertalanffy, 1968/1976, p. 146)

Aquí Bertalanffy comete un error interpretativo —que veo como muy similar al que había

cometido von Uexküll— al intentar llevar al límite la noción de máquina para mostrarla incapaz de dar cuenta de los procesos vitales, más allá de las virtudes de su uso heurístico en la investigación biológica. Ahora bien, como hemos visto, algunos cibernetas como Ashby estaban también muy conscientes de los límites de la noción de *feedback* como recurso explicativo para fenómenos complejos, pero incluso si estuviera la cibernética provista de solo dicha noción, el panorama general de las máquinas queda ampliamente modificado porque con solo la retroalimentación las máquinas pueden “aprender” de sus errores:

las máquinas dotadas de realimentación [feedback] no están sujetas al dicho, tan repetido, de que las máquinas tienen que actuar ciegamente y no pueden corregir sus errores (afirmación que es verdadera en cuanto a máquinas sin realimentación, pero no en cuanto a máquinas en general) [...].

Una vez que se cae en la cuenta de que la realimentación puede utilizarse para corregir cualquier desviación que nos plazca, se comprende fácilmente que la complejidad del comportamiento de búsqueda de su meta que pueda darse en máquinas enteramente desprovistas de todo factor “vital” carece de límites.^{XXIII} (Ashby, 1960/1965, p. 73. Énfasis en el original)

Ya hemos visto cómo una de las virtudes de la noción de máquina que propone la cibernética es la de darle una nueva interpretación a la idea de error, ya que ahora las máquinas pueden ser provistas de una forma de corregir los errores de funcionamiento a los que se ve sometida, normalmente por las perturbaciones que recibe del ambiente y contra las que tiene que usar la variedad de su regulador para poder mantener a las variables esenciales dentro de los valores requeridos para su funcionamiento. Extender, y de hecho *aprovechar* mucho más todavía la noción de error, es un paso necesario para una mejor comprensión de los sistemas complejos, y ese será el núcleo del capítulo siguiente, puesto que los padres de la computación, Turing y von Neumann, también fueron de los primeros en pensar en la necesidad de una noción de error “menos equivocada” (espero que se me perdone el chiste). Hay un punto más que es necesario enfatizar sobre la cibernética en lo que concierne a la relación con la TGS y su modelo de sistema abierto. Indirectamente, Ashby ataca este problema en el último capítulo de su *Introducción*, que trata sobre la amplificación de la variedad y cómo ésta está relacionada con la selección en etapas. Pero uno de los puntos más interesantes es cómo esta idea de amplificación puede entrar en correspondencia con la jerarquía de modelos y la arbitrariedad que tiene la distinción entre el medio y el sistema propiamente dicho. Cualquier amplificación necesita de al menos dos etapas, puesto que de hacerse en un solo “movimiento” se estaría violando la ley de conservación de la energía (Ashby, 1956, p. 265). Ashby sugiere que todo proceso de amplificación puede verse desde dos puntos de vista, bajo uno de los cuales no hay amplificación real mientras que en el otro sí ocurre y utiliza el ejemplo de una grúa. Para un ingeniero que las diseña, en realidad no hay una amplificación de la capacidad real de la grúa para levantar una

masa, sino que meramente hay una conversión de la energía almacenada en una fuente a una energía que se convierte en trabajo para levantar dicha masa. Pero, desde el punto de vista del operador, sí se produce una amplificación real de *su* capacidad de levantar la masa.³⁷ Todo esto puede parecer inconsecuente, si es que no también obvio, pero, a mi juicio, tiene al menos dos consecuencias epistemológicas interesantes.

Por un lado, está el punto sobre el que insiste Ashby en la separación en etapas de la amplificación y que está en directa correspondencia con los sistemas abiertos de la TGS. Si se considera, por ejemplo, al operador de la grúa como un sistema abierto que se encuentra *soportado* por la grúa, en tanto ésta es su ambiente, el operador puede realizar una tarea que si no fuera por dicha conexión le sería imposible. Esto es, si fuera un sistema cerrado, sin conexión con la máquina, no podría realizar la tarea. Ahora bien, para el diseñador de la grúa quien observa la situación, no hay nada “mágico” ni extraño sucediendo, sino que el sistema que era el operador, junto con la grúa pasan a formar otro sistema, que puede ser descrito en su totalidad por otro modelo. Este punto ya aparecía en *Diseño*: “[3/9.] es posible representar con suficiente exactitud el organismo viviendo en libertad y su medio, tomados conjuntamente, mediante un conjunto de variables que forme un sistema determinado por estados” (Ashby, 1960/1965, p. 51). Esto va de la mano con la interpretación puramente funcional de la distinción entre el ambiente y el sistema, en contraste con una distinción material. Desde mi lectura naturalista, diría que se trata de una distinción netamente epistémica, en contraste con una fuerte distinción ontológica entre el ambiente y el sistema. La distinción depende del punto de vista del observador y de dónde éste trace la línea demarcadora para su modelo. De esta forma la cibernética podría subsumir a los sistemas abiertos de la TGS. Como comento más adelante, pero ya mencioné también en conexión con la cibernética, esto tiene consecuencias epistémicas muy importantes, puesto que, dependiendo de donde uno “corte” el mundo —esto es, haga una distinción de niveles o de partes—, dependerá de si hay o no fenómenos emergentes.

Por otro lado, es interesante remarcar lo que Ashby denomina una “amplificación de la inteligencia” y que incluye una visión abstracta de la resolución de problemas en términos de selección para reducir posibilidades:

“resolver un problema” es, en gran parte, y quizá totalmente, una cuestión de selección apropiada. Tomemos, por ejemplo, cualquier libro popular de “problemas y acertijos”. Casi todos pueden reducirse a la forma: dado un conjunto, indicar uno de sus elemen-

³⁷En términos contemporáneos podríamos llamar a la postura del diseñador una mirada desde la tercera persona mientras que la del operador es de primera. Turing, particularmente, sugiere una analogía entre la forma en que poseer una clave de encriptación puede hacer que una serie de señales sin sentido se vuelva algo significativo para el observador (i.e. la conversión de ruido en señal, ver capítulo siguiente). También se puede pensar en términos de la diferencia entre usar una función o una librería en un lenguaje de programación, en tanto se las toma como una caja negra, mientras que la postura de tercera persona sería el equivalente a escribir la función desde los elementos del lenguaje o del programa que se está usando, sin llamadas externas.

tos. Así, entre todos los números posibles de manzanas que Juan podría tener en la bolsa, se nos pide que encontremos uno determinado; entre todas las líneas que es posible trazar a través de una configuración de puntos dada, se nos pide que hallemos una; entre todas las distribuciones posibles de letras en un conjunto de espacio dado, se nos pide una, distribución determinada. *Es muy difícil pensar en un problema, ya sea con propósitos serios o de simple entretenimiento, que no exija, en última instancia, una apropiada selección necesaria y suficiente para su solución.*^{XXIV} (Ashby, 1956/1960, p. 370. Los énfasis son míos)

Esta manera abstracta de pensar la inteligencia será uno de los disparadores fundamentales de la inteligencia artificial, un área de investigación profundamente relacionada –en retrospectiva-- no sólo con la cibernética sino también con el surgimiento de la ciencia de los sistemas complejos. De hecho, va a ser en la obra de Herbert Simon en donde muchas de estas líneas confluyen como una aproximación al estudio de la complejidad y especialmente al rol crítico de las heurísticas para estudiar cómo encontrar soluciones particulares cuando el conjunto de posibles soluciones es un mar tan vasto que no pueden explorarse *seriatim*.

Ashby concluye su *Introducción* con dos guiños a la obra de Turing y cómo ésta se presta a una interpretación cibernética (aunque bien podríamos decir que es, de suyo, cibernética). El primero es sobre la definición de inteligencia y la posibilidad de ser “simulada” por una máquina artificial (A. M. Turing, 1950):

No es, por lo tanto, imposible que aquello a que nos referimos comúnmente como “poder intelectual” sea equivalente al “poder de selección apropiada”. Por cierto, si una Caja negra parlante presentase un elevado poder de selección correcta en tales problemas –de manera que al plantearle interrogantes difíciles, siempre respondiese de modo correcto–, apenas podríamos negar que estamos en presencia del equivalente, *en comportamiento*, a la “inteligencia superior”.

Si esto es así, y como sabemos que el poder de selección puede ser amplificado, parece deducirse que el poder intelectual, al igual que el poder físico, también puede ser amplificado. Que no se diga que es imposible, pues los tipos genéticos lo ejercen cada vez que conforman un cerebro que termina por ser algo mejor que lo que el tipo genético podría haber especificado en detalle. Lo que hay de nuevo es que ahora podemos hacerlo sintética, consciente y deliberadamente.^{XXV} (Ashby, 1956/1960, 370–371. Énfasis en el original)

Crear computadoras, podríamos decir, es la ruta que tomó nuestro cerebro para explorar un mundo más allá de nuestros cerebros, así como crear un cerebro fue la ruta que tomaron nuestros genes para explorar el espacio de posibilidades más allá de ellos. Como el operador de la grúa, las máquinas que amplifican la inteligencia nos dejan llegar a estados epistémicos que sin ellas serían, al menos en la práctica, imposibles de obtener de otra forma.



Figura 3.4: Miembros del Ratio Club, incluyendo a W. Ross Ashby y Alan Turing. Foto probablemente tomada en Cambridge, 1951. En el Turing Digital Archive, AMT/K/7/17. <http://www.turingarchive.org/viewer/?id=527&title=17>

3.6. Resumen (y conexiones)

Una de las preocupaciones centrales de la Teoría General de los Sistemas y de la Cibernética es la manera en la que el conocimiento de un sistema particular, que se toma como el objetivo o *target* de una investigación, puede trasladarse y ser fértil en un contexto muy distinto al original, al mismo tiempo que *insights* provenientes de otros campos pueden ayudar a la formación de modelos sobre el sistema que se está estudiando. Esto llevó a los miembros de estas comunidades a preocuparse por el tipo de justificación que permitía el traslado de conocimiento entre disciplinas y la manera en la que ese traslado podía volverse epistémicamente fértil. De particular interés creo que es la manera en la que estas aproximaciones a lo que constituye un modelo, y cómo se evalúa su relación con los sistemas que con ellos se pretenden estudiar, está mucho más cercana a aproximaciones

filosóficas contemporáneas al uso de modelos en ciencia que la forma en la que la tradición de filosofía de las ciencias se acercó a este punto.

En el contraste entre la TGS y las Cibernéticas, la principal diferencia encontrada está en la forma en la que se concibió el rol heurístico que podían tener las máquinas en múltiples contextos de producción y justificación de conocimiento. A su vez, esto se tradujo en una preocupación por las nociones de información, de azar y de simulación, y una primera forma de convergencia de todas ellas bajo el concepto de abstracción, que exploro principalmente en el capítulo 7.

Al destacar aquí la obra de W. Ross Ashby, también pretendí señalar la influencia que su manera de aproximarse a los problemas científicos y por la continuidad entre lo natural y lo artificial, dejan entrever parte del *milieu* intelectual en el que surgirían la reflexiones en torno a la complejidad de Herbert Simon; en quien también fueron muy influyentes las reflexiones de otros allegados a estas comunidades cuya obra exploro a continuación con respecto a la pregunta por la mejor manera de entender a la complejidad y nuestra capacidad para lidiar con ella por medios “artificiales”: Alan Turing y John von Neumann.

Capítulo 4

Turing y von Neumann: La complejidad entre la computadora y la matemática

Otra coincidencia de ideas: tanto Turing como von Neumann escribieron sobre “organismos” más allá de las meras máquinas de computación

Stan Ulam
(carta a Andrew Hodges)

Tanto la computación como disciplina teórica y la historia de las mismas máquinas de computar son un componente clave de la historia conceptual de la ciencia de los sistemas complejos. Como ilustran los distintos capítulos de esta investigación, son muchos los aspectos de esta relación que son dignos de investigar y que tienen profundas implicaciones epistemológicas. En este capítulo, continúo la línea demarcada por los anteriores acerca de la centralidad de la concepción de máquina como recurso tanto epistémico como epistemológico.

En esta dirección, un objetivo secundario de este capítulo es servir de introducción a ciertos elementos sobre la historia de la computación misma puesto que, según mi postura, el avance de la ciencia está intrínsecamente ligado al progreso de nuestra capacidad de cálculo y, especialmente en el caso de la complejidad, a nuestra comprensión de qué es un sistema computacional. Esto deviene en poder aplicar avances teóricos de la computación a sistemas naturales, no solamente en tanto poder de cálculo numérico (lo que en inglés suele llamarse *number crunching*) sino en términos de nuevas clases de modelos y recursos conceptuales, precisamente por las clases de máquinas que se vuelven factibles

y entendibles. Tanto Alan Turing como von Neumann fueron pioneros de la computación pero casi que se podría decir que ese hecho, que hayan sido los padres fundadores de la computación, es un efecto secundario de algo que llamo “actitud epistémica”, en tanto corresponde a una forma de abordar ciertos problemas, sus soluciones, y la idea misma de qué constituye un problema para un “agente epistémico”. Esta actitud epistémica a ciertos problemas pone a los modelos —entendidos de una manera particular— en el centro de la empresa científica. Se podría decir que hay un aspecto común en ellos con otros aportes que intentaron “llevar más matemática” a ciertos problemas científicos, especialmente en áreas que no eran su lugar de trabajo habitual.

Ya vimos algunos de esos casos en los capítulos anteriores. Quizás uno de los casos “clásicos” más relevantes de esta forma de acercar nuevas intuiciones es el de Erwin Schrödinger, quien en una serie de conferencias que terminarían siendo publicadas bajo el título de *¿Qué es la vida?* se animaba a acercarse como físico a un problema netamente biológico como el de la heredabilidad de la información genética y este sentido reflexionaba acerca de la necesidad de que algunos científicos busquen aventurar una suerte de síntesis de hechos y teorías:

Pero la propagación, tanto en profundidad como en amplitud, de las múltiples ramas del conocimiento humano durante los últimos cien años nos ha enfrentado con un singular dilema. Por un lado, sentimos con claridad que solo ahora estamos empezando a adquirir material de confianza para lograr soldar en un todo indiviso la suma de los conocimientos actuales. Pero, por el otro, se ha hecho poco menos que imposible para un solo cerebro dominar completamente más que una pequeña parte especializada del mismo. Yo no veo otra escapatoria frente a ese dilema (si queremos que nuestro verdadero objetivo no se pierda para siempre) que la de proponer que algunos de nosotros se aventuren a emprender una tarea sintetizadora de hechos y teorías, aunque a veces tengan de ellos un conocimiento incompleto e indirecto, y aun a riesgo de engañarnos a nosotros mismos. (Schrödinger, 1943/2013, prefacio)

Es precisamente esta clase de actitud frente al conocimiento y la intrincada relación de la matemática con lo empírico que exploro a continuación, mientras que uno de los aspectos más destacables de la propuesta de Schrödinger, acerca de la forma en la que una asimetría puede funcionar como memoria, deberá esperar hasta la sección 5.2.3

4.1. Alan Turing, entre máquinas y modelos

Si nos damos prisa, podemos alcanzar a Turing en el camino que nos señaló hace tantos años.^{XXVI}

Herbert Simon

Sin duda la obra teórica más importante de Alan Turing es su trabajo de 1936, que en

retrospectiva se puede considerar como el *paper* que funda la ciencia de la computación. En dicho trabajo, Turing crea una serie de elementos teóricos para acercarse a un problema fundamental que existía desde hacía unos años en el cruce entre la matemática y la lógica, proveniente del programa de fundamentación de la matemática que había iniciado David Hilbert, conocido como el “programa formalista”. El problema que enfrenta Turing en ese *paper* es el de la decisión, conocido en los círculos matemáticos de la época por como el *Entscheidungsproblem*, su nombre original en alemán. La historia de este problema es fascinante y se remonta a los intentos de Leibniz de construir un lenguaje universal que pudiera ser manipulado mecánicamente para determinar el valor de verdad de todo enunciado matemático expresable en dicho lenguaje. El desafío del problema consiste en determinar la existencia de un algoritmo que pueda responder si un enunciado es universalmente válido o no. Turing se entera de la existencia de dicho problema en 1935 mientras tomaba un curso en Cambridge sobre lógica matemática dictado por Max Newman.¹

La respuesta negativa al problema de la decisión la dieron en paralelo –y trabajando independientemente– Alonzo Church y el mismo Turing en 1936. La respuesta de Church se elabora en base a su cálculo-lambda y la de Turing se elabora en base a lo que hoy conocemos como “Máquina de Turing” pero que Turing nunca llamó por dicho nombre (de hecho fue Church quien las bautizó así en el *review* que escribió sobre el *paper* de Turing). El resultado formal no es lo que me interesa remarcar aquí, sino más bien la forma en la que Turing encara el problema y que daría inicio en él a una forma particular de acercarse a los problemas científicos, tomando a la noción de “máquina” como recurso heurístico. Turing es bastante explícito con respecto al término “máquina” como modelo posible de una situación o problema determinados, aunque lo es menos con el término de heurística. De todas formas –y es la postura que planteo defender aquí– en su uso de la noción de máquina se puede encontrar una heurística de modelado, un criterio de búsqueda para reducir el número de soluciones a explorar para un problema dado. Uno de sus aportes fundamentales a esta noción, como veremos más adelante, es el rol crítico de las heurísticas para cualquier clase de comportamiento que pueda ser llamado “inteligente”.

¹Hay una serie de malentendidos históricos que llevaron a muchos a creer que Turing se entera del problema de la decidibilidad por John von Neumann y no por Newman. Eso le traería algo de color a la historia, puesto que von Neumann había sido uno de los grandes defensores del programa de Hilbert hasta enterarse de los resultados limitantes de Gödel, que él mismo derivó después de una breve conversación con Gödel en el famoso congreso en París de 1929, resultados que lo llevaron a alejarse por completo del trabajo en lógica formal. Pero efectivamente es en el curso de Newman que Turing se entera del problema. Parte de la confusión surge porque si bien Newman nació en Inglaterra, su apellido originalmente era “Neumann”, su padre había emigrado de la entonces prusiana ciudad de Bromberg. Además, von Neumann lo conoció a Turing ese mismo año puesto que ese verano dictó un curso en Cambridge sobre funciones casi periódicas al que Turing habría asistido. Curiosamente, un mes antes de que von Neumann llegara a Cambridge, Turing había mandado a publicar su primer *paper* que trataba sobre una pequeña mejora a un *paper* de von Neumann sobre la relación entre las funciones casi periódicas y los grupos (Hodges & Hofstadter, 2014, pp. 121-122).

4.1.1. Modelos de máquinas y máquinas de modelo

Ahora podemos construir una máquina que haga el trabajo de esta computadora.^{XXVII}

Alan Turing, 1936

Un paso necesario para dar una respuesta al *Entscheidungsproblem* consistía en dar una definición precisa de lo que se entendía por “procedimiento definido”. El *insight* fundamental de Turing fue el de concebir dicho procedimiento en términos de las operaciones realizadas por una máquina. De esta manera, la investigación de Turing, si bien estaba motivada por un problema matemático particular, excede al campo mismo de la matemática, en tanto resulta en una forma general de entender lo que puede realizar una máquina, efectivamente una pregunta por los límites de lo maquínico, la misma pregunta que ya vimos que era común hasta en la biología a comienzos del siglo XX, como fue el caso de von Uexküll. En esta forma de acercarse a los problemas ya se pueden ver algunos puntos que Turing comparte con los cibernéticos. En particular, el que pretendo destacar aquí es el de la forma de acercarse a los problemas, usando a las máquinas como una heurística para generar el *modelo* de una situación problemática, siendo el modelo el que puede ser estudiado para resolver el problema —o al menos iluminar algunas de sus facetas— en tanto que pretende ser una suerte de análogo a la situación original pero transformada de cierta manera que lo haga susceptible de una clase de análisis que en su forma original no podía llevarse a cabo. En el trabajo de 1936, la situación que Turing pretende modelar en términos maquínicos es una habilidad que hasta ese entonces era esencialmente *humana*: la de computar.

Desde la aparición del término “*computer*” en el siglo XVII, por “computadora” se entendía a una persona que realizaba cálculos matemáticos.² Estos cálculos solían ser relativamente fáciles de llevar a cabo pero podían ser extremadamente largos y tediosos, y desde muy temprano estuvieron asociados a la producción del conocimiento científico, ya sea, por ejemplo, prediciendo trayectorias de cometas como el Halley o produciendo las enormes tablas de logaritmos que eran usadas por científicos, matemáticos e ingenieros.³

²Curiosamente, la primera referencia del término se encuentra en el poema “Sobre la mortalidad del hombre” [*Of the mortalitie of man*] (y su reducción a un mero número), escrito por Richard Brathwaite en 1613 dentro de su obra *The yong mans gleaning* [*Los fragmentos de un joven*]: “¿Qué eres tú (oh hombre) y de dónde has emergido? ¿De qué materia estás hecho, que te prometes a ti mismo la duración de los días, o a tu posteridad la continuidad? He leído a la más verdadera computadora de los tiempos, y el mejor aritmético que ha existido, y reduce tus días a un corto número: Los días del hombre son sesenta y diez.” [*Hat art thou (O Man) and from whence hadst thou thy beginning? What matter art thou made of, that thou promisest to thy selfe length of daies: or to thy posterity continuance. I haue read the truest computer of Times, and the best Arithmetician that euer breathed, and he reduceth thy dayes into a short number: The daies of Man are threescore and ten.*”]

³Tablas que fueron usadas hasta hace relativamente poco tiempo. De hecho estoy seguro de que algunos todavía las usan, pese a la existencia de *smartphones* y de WolframAlpha. *When Computers Were Human* de

Así, el recurso fundamental de Turing es crear un *modelo* de la computación llevada a cabo por un agente humano, y si bien su concepción produce una máquina abstracta y matemática, su guía para el modelado es la de crear una máquina física que pueda reproducir el comportamiento de la computadora humana.

La computación se realiza normalmente escribiendo ciertos símbolos en un papel. Podemos suponer que este papel está dividido en cuadrados como el libro de aritmética de un niño. En la aritmética elemental se utiliza a veces el carácter bidimensional del papel. Pero tal uso es siempre evitable, y creo que se estará de acuerdo en que el carácter bidimensional del papel no es esencial para el cálculo. Asumo entonces que el cómputo se realiza en un papel unidimensional, es decir, en una cinta dividida en cuadrados. También supondré que el número de símbolos que pueden imprimirse es finito. [...] El comportamiento de la computadora en cualquier momento está determinado por los símbolos que está observando, y su “estado mental” en ese momento.^{XXVIII} (Cooper & van Leeuwen, 2013; A. Turing, 1936, p. 33)

La simplificación que pretende llevar a cabo Turing aquí es extrema ya que su objetivo es buscar el conjunto mínimo de operaciones que pueda ser implementando mecánicamente y que, simultáneamente, produzca para un observador externo el mismo comportamiento que el de una computadora humana. Es decir, ante las mismas entradas, debería producir el mismo *output*. De hecho hasta podemos ver aquí ya en operación —al menos conceptualmente— una versión de su famoso «Juego de imitación» que utilizará como recurso en sus discusiones más tardías acerca de la noción de inteligencia para el caso de las computadoras automáticas.⁴ Las comillas que usa Turing en el “estado mental” son importantes por varios motivos. Probablemente Turing reconoce que introducir algo así como un “estado mental” en un trabajo con aspiraciones netamente matemáticas, en un contexto en el que la discusión acerca de la naturaleza de lo científico pretendía excluir a lo mental como campo de análisis válido para tal empresa, es algo extraño. Pero, al mismo tiempo, uno puede leer el *paper* de Turing como una investigación *acerca* del problema de la naturaleza de lo mental y su relación tanto con la matemática como con el soporte físico de la mente. De esta manera, la investigación de Turing no es solo acerca de los límites de las máquinas sino también sobre los límites de una concepción naturalista —y

David Grier es una excelente fuente para el derrotero histórico de los humanos como computadoras (Grier, 2005). Sobre la fascinante historia de las tablas de computar se puede consultar Campbell-Kelly y col., 2003

⁴Es más, esta forma de entender a la computadora, teórica al comienzo y digital en la década siguiente, va a estar siempre presente en la mente de Turing. En su famoso *paper* de 1950 sobre inteligencia y máquinas computacionales en donde se hace uso explícito del juego de imitación (que será luego conocido como “el test de Turing”) las máquinas digitales son introducidas en comparación directa con las computadoras humanas: “La idea que subyace a las computadoras digitales puede explicarse diciendo que estas máquinas están destinadas a realizar cualquier operación que pueda hacer una computadora humana. Se supone que la computadora humana sigue reglas fijas; no tiene autoridad para violarlas en ningún detalle. Podemos suponer que estas reglas se suministran en un libro, que se modifica cada vez que se le asigna un nuevo trabajo. También dispone de una cantidad ilimitada de papel en el que realiza sus cálculos” (Turing, 1950, en Cooper & van Leeuwen, 2013, p. 554).^{XXIX}

quizás reduccionista— del conocimiento y de la naturaleza. En particular sobre el conocimiento *de* la naturaleza, que suele utilizar a la matemática como medio. Dentro de las simplificaciones que Turing lleva a cabo a la hora de tratar con el problema de modelar a las computadoras humanas, se encuentra la de eliminar la referencia al estado mental de las mismas, logrando una descripción meramente “física” de dichos estados mentales. Turing se imagina un escenario posible (efectivamente lleva a cabo un experimento mental) en el que la computadora humana tiene que realizar las operaciones una a una y anotar el estado de la computación para continuarla posteriormente:

Suponemos [...] que el cómputo se realiza en una cinta; *pero evitamos introducir el “estado mental” considerando una contrapartida más física y definitiva del mismo*. Siempre es posible que la computadora se separe de su trabajo, que se aleje y se olvide de él, y que más tarde vuelva y lo continúe. Si lo hace, debe dejar una nota de instrucciones (escrita en algún formato estándar) que explique cómo debe continuar el trabajo. Esta nota es la contrapartida del “estado mental”. Supongamos que la computadora trabaja de forma tan desordenada que nunca realiza más de un paso a la vez. La nota de instrucciones debe permitirle realizar un paso y escribir la siguiente nota. Así, el estado de avance del cálculo en cualquier etapa está completamente determinado por la nota de instrucciones y los símbolos en la cinta. (Cooper & van Leeuwen, 2013; A. Turing, 1936, p. 33. El énfasis es mío)

De esta manera, la cinta de papel de una dimensión de la máquina automática puede ser tal que incluya una expresión (es decir, una secuencia de símbolos) que representen el estado de la computación hasta ese momento. Este estado está *determinado* por el estado anterior y por la configuración de la máquina, y en tanto la configuración no cambia en estado de la computación, el próximo estado está determinado por el presente. Esta simplificación, que utiliza para *interpretar* la construcción matemática introducida en las secciones anteriores del *paper* y para sugerir que la computadora universal puede reemplazar cualquier estado mental de la computadora humana, por lo que, efectivamente, puede reemplazar por completo a dicha computadora si en los datos que se le introducen al comienzo del proceso se encuentran las instrucciones para tomar la configuración adecuada para resolver el problema computacional sobre el que tiene que trabajar. Son varios los puntos que considero que se pueden ver ya en esta obra temprana de Turing y que no sólo aportan trazos interesantes a seguir para estudiar la obra del mismo Turing, sino también estrategias y consideraciones importantes para comprender el estudio de los sistemas complejos, estudios de los que Turing debe considerarse un fundador.

Pensamiento computacional

Un primer punto es lo que podríamos llamar “pensamiento computacional”. Esta es una palabra que está de moda en la actualidad, con algunos usos quizás un tanto vacuos o vagos pero que sin embargo es muy sugerente para pensar un espectro de estrategias a la hora de encarar algunos problemas, y creo que el término logra capturar la estrategia

general de Turing a la hora de acercarse tanto a problemas netamente matemáticos como a los problemas científicos. También captura parte de la estrategia modelizadora de algunos cibernéticos como Ashby, según ya exploramos en el capítulo anterior. Una reciente exploración del pensamiento computacional [*computational thinking*] lo define de la siguiente manera:

El pensamiento computacional son las habilidades y prácticas mentales para

- diseñar computaciones para que las computadoras hagan trabajos por nosotros, y
- explicar e interpretar el mundo como un conjunto [*complex*] de procesos de información. (Denning & Tedre, 2019)

Los dos puntos que señalan los autores son distintos pero están ampliamente relacionados y es mi parecer que Turing estaría de acuerdo en dicha definición y en que su estrategia general se ve reflejada en dicha definición. Por un lado, se puede pensar que Turing no solo diseña una computación para realizar un trabajo sino que, además, estrictamente *define* en su trabajo de 1936 qué es una computación y cómo transformar un problema determinado en uno que pueda ser interpretado en términos de esa idea de computación. El segundo punto es menos claro en Turing, especialmente en su obra temprana, pero siguiendo la analogía que planteamos entre su aproximación a los problemas y la estrategia sugerida por la cibernética —además de la profunda relación entre la teoría de la información y la computación— se puede observar que Turing reconoce que la analogía con sus máquinas automáticas es un modelo que simplifica una situación en el mundo (en 1936 el de la computación humana) para ser descrito en términos de procesos extremadamente sencillos, pero que pueden dar lugar a un comportamiento mucho más complejo de lo que se podría esperar tras una simple exploración de la estructura del modelo. A este punto volveremos continuamente porque la estrategia computacional introducida por Turing sugiere una lectura metodológica que es fundamental a la hora de investigar sistemas complejos y es la hipótesis de que debajo de la complejidad observada *puede* existir un conjunto de operaciones o procesos más simples que, cuando trabajan en conjunto, dan lugar al fenómeno complejo que se pretende explicar.⁵

Máquinas y algoritmos

Al mismo tiempo, una de las consecuencias epistemológicas más importantes de la obra temprana de Turing es la de dar una interpretación —si es que no una *definición*— rigurosa a la idea de procedimiento efectivo o método finito en términos de los pasos que puede llevar adelante una máquina:

Turing se apoyó en la idea de que la propia naturaleza de un método definido era

⁵Además de que dichas operaciones se deben entender algorítmicamente.

que tenía que ser aplicado *mecánicamente*, y en consecuencia modeló el trabajo de realizar tal método en términos de la operación de una *máquina*. (Herken, 1988, p. 4. Énfasis en el original)

Es difícil leer el texto de Turing e imaginarse que los lenguajes de programación no existen, y que de hecho la misma idea de un lenguaje de programación como la entendemos hoy —o quizás mejor y más general, la idea de un sistema de reglas para la manipulación de datos— nace en dicho texto junto con la idea de algoritmo, idea que justamente depende de la definición precisa de dichas reglas para que la máquina pueda transformar una serie de datos que recibe como entrada en otra serie de datos de salida que se está buscando.⁶ Los pasos son tan básicos que se puedan expresar sin ambigüedad de distintas formas, como en lenguaje denominado “de programación” por permitirnos interactuar con alguna máquina. Parafraseando levemente a Knuth (1973/1997, pp. 4–6), se puede concebir a un algoritmo de la siguiente manera:

Un algoritmo es un conjunto de reglas para obtener una salida específica a partir de una entrada específica. Cada paso debe definirse con tanta precisión que pueda traducirse a lenguaje informático y ejecutarse por máquina sin producir errores.⁷—Donald Knuth (1977)

Aquí es un buen lugar para señalar brevemente una conexión entre el pensamiento de Turing y la reflexión sobre las cajas negras propiciada por la cibernética. El protocolo que se lleva a cabo al investigar una caja negra, que consiste en una descripción de las entradas que se le proporcionan y las salidas que produce la caja negra, consiste, básicamente, en una descripción algorítmica de la caja negra. Esto es, se *reemplaza* a la caja negra por un modelo de la misma que respeta la conexión entre las entradas y las salidas. Dado este primer paso, es posible llevar a cabo un reemplazo de los elementos en ese protocolo por elementos más simples que continúen respetando los valores del modelo, proceso que se puede llevar a cabo hasta encontrar una serie de pasos básicos que

⁶En sentido estricto, el primer lenguaje de programación pensado como una forma de representar algoritmos análoga a la capacidad representativa de la lógica de primer orden fue el *Plankalkül* que Konrad Zuse empezó a diseñar hacia 1939. De hecho se trataba de lo que luego se denominaría un lenguaje de programación de alto nivel, por tanto más independiente de la arquitectura propia de la computadora física, y bastante adelantado conceptualmente a los lenguajes que aparecerían a finales de la década siguiente (Giloj, April-June/1997). (Rojas y col., 2004) contiene muchos más detalles sobre el *Plankalkül* y su diseño.

⁷Es importante remarcar que el alcance de la definición de algoritmo no es un tema ajeno a discusión filosófica. A mi juicio, es en la amplitud de la definición que propone Knuth donde yace toda su fortaleza epistémica y creo que captura lo que el mismo Turing pensaba. Sobre esta amplitud en su definición y sus “enemigos”, ha comentado Knuth: “Durante muchos años he estado convencido de que la informática es principalmente el estudio de los algoritmos. No todos mis colegas están de acuerdo conmigo, pero resulta que el origen de nuestro desacuerdo es simplemente que mi definición de algoritmos es mucho más amplia que la suya: Yo tiendo a pensar que los algoritmos abarcan toda la gama de conceptos relacionados con procesos bien definidos, incluida la estructura de los datos sobre los que se actúa, así como la estructura de la secuencia de operaciones que se realizan; otras personas piensan que los algoritmos son simplemente métodos diversos para la solución de problemas concretos, análogos a los teoremas individuales en matemáticas. (Knuth, 1985, p. 170)”

no puedan ser reducidos y que se declaren como la descripción completa de la caja negra. Según mi lectura, esta es precisamente la propuesta de Turing en 1936 y que va a mantener como metodología para resolver problemas. Siguiendo con la analogía cibernética —si se me permite esa expresión—, Turing sugiere un desplazamiento en una jerarquía de modelos que le permite pasar de una descripción meramente comportamental o behaviorística de un fenómeno a uno expresable en términos más simples. Es importante notar aquí que la “simplicidad” no va a ser objetiva y, de la misma manera en la que sucedía en la cibernética, va a depender del observador. Retomo este punto en el capítulo final de este trabajo.

Problemas científicos y matemáticos

En este “juego” al que recurre Turing entre una metáfora maquina para un problema netamente matemática pero que, al mismo tiempo, es una máquina matemáticamente definida, según mi lectura se puede observar una suerte de asimilación entre los dominios de la matemática y los dominios científicos o empíricos, al menos desde el punto de vista metodológico. De ahí que Turing pueda utilizar un concepto tan “físico” como el de máquina, interpretarlo lógicamente y poder usarlo para mostrar la relación de distintos ámbitos en un mismo problema, que incluirá el de las capacidades de las máquinas, un modelo de las operaciones de lo mental, la definición rigurosa de los métodos finitos, la prueba de la existencia de números incomputables y, como una aplicación de todo esto, la respuesta negativa al *Entscheidungsproblem*. Como bien señala Hodges, es la habilidad de Turing como matemático la que le permite acercarse a un problema y encontrar el punto clave que se beneficiaría de una definición precisa:

La experiencia y el ingenio de Turing como matemático se manifestaron en su capacidad para refinar estas ideas generales en la formulación precisa del concepto de máquina de Turing, que sólo requería una gama muy limitada de posibles “comportamientos”. Pero Turing no se contentó con el *tour de force* puramente matemático que suponía mostrar cómo construir operaciones lógicas complejas a partir de un conjunto muy pequeño. Al argumentar que las máquinas que poseen un repertorio tan limitado justifican su identificación con la clase más general posible de “métodos definidos”, Turing salió de las matemáticas propiamente dichas. (Hodges, 1988, p. 4)

Pero, al mismo tiempo, es la habilidad de Turing como científico la de darse cuenta que el aspecto matemático no es el único que entra en juego y cómo estos distintos aspectos interactúan en el mismo problema. De hecho, creo que gran parte de la genialidad de este trabajo de Turing consiste precisamente en esa *confluencia de estrategias* que lo llevan a identificar ciertas similitudes en problemas de distinta índole, cuya definición adecuada puede ser dada en un ámbito abstracto reuniendo, en un mismo modelo, propiedades exploradas desde estos distintos campos, sin pretender *reducir eliminativamente* ninguno de ellos. Es decir que ninguno es “más primordial” que otro. De dicha confluencia de es-

trategias puede surgir un mejor modelo que luego puede iluminar ciertos aspectos del problema en el campo donde había sido originalmente explorado. Por otro lado, es bueno recordar que el mismo modelo de Turing es un modelo alternativo a un *fenómeno matemático*, en tanto es formalmente equivalente a otros modelos de computación, como el cálculo-lambda de Church y las funciones recursivas de Gödel-Kleene. Ahora bien, pese a ser *formalmente* equivalente, epistémicamente es un modelo mucho más fructífero porque puede relacionar distintos ámbitos de problemas, generar más modelos y es más fácil de interpretar. A su vez, el mismo Gödel sólo se convenció de que el problema del cálculo efectivo había por fin sido captado de manera adecuada tras el modelo de Turing y la prueba que Turing aportó sobre la conexión de su modelo con el propuesto por Church, quien ya había sugerido la equivalencia con las funciones recursivas primitivas del mismo Gödel:

Tarski ha enfatizado en su conferencia (y pienso que justamente) la gran importancia del concepto de recursividad general (o computabilidad de Turing). Me parece que esta importancia se debe en gran medida al hecho de que con este concepto se tiene éxito por primera vez en dar una definición absoluta de una interesante noción epistemológica, es decir, una que no dependa del formalismo elegido.⁸ (Gödel, 1946, p. 150)

En esencia, en Turing se puede observar un esfuerzo por mantener a la matemática dentro de un *área de experiencia*, con lo que me quiero referir a un ámbito empírico que se puede beneficiar de un modelado matemático, incluso con profundos niveles de abstracción, pero cuya conexión con la empiria está presente, ya sea explícita o implícitamente, como una heurística a considerar en el modelado.⁹ Quizás el último punto a notar aquí es que el modelo que propone Turing es, a fin de cuentas, una simulación. Esto se debe a que

⁸Como es de esperarse, ha habido mucha discusión acerca de qué es lo que Gödel quiere decir con “absoluto”, en especial porque si bien el modelo de Turing no depende del formalismo elegido sí depende de que sea aplicado sobre un sistema formal. De todas formas creo que es mejor decir que es un resultado “robusto” y no absoluto, cuya robustez surge precisamente de la cantidad de modelos independientes en sus supuestos que iluminan un mismo fenómeno. En la misma conferencia, (Gödel, 1946), Gödel sugiere que la confluencia de ideas de 1936 es “un milagro” dado que según él es extremadamente difícil dar una definición matemática rigurosa de los procesos de cálculo que pueden ser llevados a cabo por una máquina. No creo que sea un milagro pero para decir por qué no lo es y por qué Gödel habría creído que lo fue hace falta más ontología matemática que la que los axiomas dejan entrar en esta nota al pie. Para una historia más adecuada de la noción de computabilidad y algunos de los problemas epistemológicos detrás de dicha historia sugiero consultar la excelente tesis de D’Andrea (2019). Por mi parte, doy mi interpretación epistémica del resultado de computabilidad de Turing para el estudio de los sistemas complejos en el último capítulo

⁹El número de problemas filosóficos detrás de este punto es casi tan grande como la cantidad de aproximaciones que ha recibido por parte de científicos, matemáticos y filósofos. De hecho se puede considerar que el problema de la relación entre la matemática y el mundo es *el* problema general de la intersección entre la filosofía de la ciencia y de la matemática y, como creo en la *reducción de problemas*, uno de los tópicos centrales de la epistemología. Como señalo en una sección siguiente, von Neumann tenía una actitud parecida a la de Turing, especialmente en su trabajo más tardío en el que la matemática está mucho más motivada por las aplicaciones científicas. Otro caso que vale la pena mencionar aquí en el mar de reflexiones acerca de esta relación es la sugerencia de Einstein que mencionamos brevemente en la introducción.

además del modelo mismo, Turing es explícito acerca de los pasos necesarios para obtener valores puntuales de salida aplicando el modelo y, crucialmente, incluye lo que denomino una identificación semántica entre los estados de distintos procesos, identificación que está apoyada en la selección de un nivel de abstracción adecuado —vía el mismo modelo— para el fenómeno que se pretende estudiar.¹⁰

Diseño y niveles

Esta idea de simulación es lo que logra plantear la intersección entre dos puntos que considero fundamentales del modelado científico, y que sirven como antesala de lo que podríamos llamar el *costado ingenieril* que en particular Herbert Simon da en su interpretación de esta práctica y que presento brevemente en los capítulos siguientes, aunque ya hemos visto parte de sus raíces con la cibernética.¹¹ Para Turing, una parte inherente a modelar un fenómeno a explicar es el de producir una *máquina* que produzca el mismo comportamiento que el fenómeno. Esto se puede lograr si y solo si se identifica un *nivel adecuado de descripción* de dicho fenómeno desde el que se pretende llevar a cabo el modelo. Esto significa que el nivel de análisis que se elija va a cumplir el rol de demarcar o fijar cuáles serán los elementos mínimos con los que proceder a la explicación del comportamiento general del fenómeno. Así, se puede proceder a establecer las relaciones entre, por ejemplo, la computación llevada a cabo por un ser humano y la llevada a cabo por una máquina, sin considerar las diferencias del sustrato físico que permite, en última instancia, realizarlas —donde esto involucra tanto la implementación como la obtención de sus resultados—. Parte de este punto se ha entendido como una técnica de *abstracción*, término con amplia carga semántica pero que deseo mantener, en tanto se emplea constantemente en ciencias de la computación y disciplinas afines, en las que se recurre a una jerarquía de lenguajes (de programación y de descripción) para *diseñar* comportamientos complejos, esto es, programas que serían difíciles de escribir desde las operaciones más básicas de la computación. Volveré constantemente a este punto, especialmente en el último capítulo, pero lo que quiero destacar es cómo esta clase de estrategia de análisis —y su necesidad para llevar a cabo modelos y otras clases de diseños en distintos ámbitos de prácticas humanas que in-

¹⁰Este punto es importante no sólo para entender el concepto de simulación y el de simulación computacional, sino también para la elucidación misma de lo que es una computación; preguntas sobre las cuales se entrecruzan distintas áreas de la filosofía de la ciencia, de la matemática y de la computación, y, que como espero mostrar en algunos pasajes de esta investigación, deben ser también atendidas en la reflexión sobre el estudio de la ciencia de los sistemas complejos, en tanto una de las características que hace a dicho estudio es la confluencia de aspectos de la ciencia de la computación, la teoría de los sistemas dinámicos, la teoría de la información y la física estadística.

¹¹No estoy sugiriendo que las prácticas de modelado científico y modelado ingenieril hagan a dos categorías distintas, sino que, puesto que el tipo de resultado que se busca en cada uno de esos ámbitos suele ser distinto, muchas veces se ha pensado que las prácticas de modelado diferían de algún modo esencial y eso llevó a descuidar en el análisis del modelado científico algunos aspectos que, tradicionalmente, suelen ser considerados “más ingenieriles”. Algo similar podría decirse de la distinción entre las ciencias naturales y las ciencias de lo artificial, distinción en las que Simon también pareciera sugerir que es incluso más difusa de lo él mismo sugiere en otros momentos.

volucran conocimiento y habilidades— ya estaba presente en la obra temprana de Turing, y cómo gran parte de su fertilidad epistémica radica justamente en permitir la simulación de un comportamiento que se pretende estudiar, natural o artificial (que incluye también los aspectos matemáticos involucrados) asumiendo —o postulando— la identidad de los *outputs* de dos *procesos* sin asumir —aunque a veces se postule— la identidad o equivalencia ontológica de todas las partes que interactúan para lograr dicho proceso y manifestar sus *outputs* o salidas observables. Esto le permite a Turing integrar la fertilidad epistémica de los modelos mecánicos o maquínicos, fertilidad que provenía precisamente del tipo de entendimiento “intuitivo” que parecían poder generar en sus usuario, con la fertilidad y la libertad del modelado netamente matemático. A su vez, creo que es precisamente esta idea de simulación mediante una serie de abstracciones la que permite a Turing describir su máquina universal, en tanto estrictamente se trata de una máquina que puede simular *ser* cualquier otra máquina si es que no se observa su comportamiento interno ya que, salvo que se simule otra máquina universal igual, la estructura interna de las máquinas será diferente pero su comportamiento final —i.e. su relación total *input-output*; tomándola como si fuera una caja negra— será idéntico. Turing no habla explícitamente de *simular* una máquina con una máquina universal, sino que directamente menciona que la máquina universal tiene la capacidad de, con las instrucciones adecuadas, computar las mismas secuencias de entrada y salida (Turing, 1936, en Cooper & van Leeuwen, 2013, p. 24).

Naturalismo filosófico

Un punto más a considerar es la relación entre la confluencia de estrategias y lo que podríamos denominar *el naturalismo filosófico de Turing*, que tiene profundas consecuencias metodológicas incluso en ámbitos que normalmente no sufrían tan directamente las consecuencias de una posición filosófica. Si bien el objetivo principal de Turing en 1936 es el de dar una definición precisa y rigurosa de método finito, que es una pregunta netamente lógico-matemática, la motivación y probablemente la razón que lo lleva a introducir a las *máquinas* en la escena es la pregunta por cómo dar una descripción científica de los estados mentales y cuál es la relación que estos tienen con el sustrato físico que los “implementa” en un momento dado. Así, en este temprano trabajo de Turing se puede ver cómo la pregunta por la mecanización de la mente y, por lo tanto, la posibilidad de simular estados mentales en un medio que no sea el usual (esto es, el cerebro humano), ya estaba presente y se convertiría en uno de los objetivos de investigación de Turing por el resto de su vida:

El problema de la mente es la clave de 'Computable Numbers'. De alguna manera, parece que Turing percibió en las preguntas sobre los métodos mecánicos definidos una oportunidad para abstraer y refinar la noción de ser *determinado*, y aplicar este concepto recién refinado a la vieja cuestión de la mente. De alguna manera, percibió un vínculo entre lo que para cualquier otra persona habrían parecido las cuestiones bastante inconexas de los fundamentos de las matemáticas y la descripción física de

la mente. El vínculo era un punto de vista más científico que filosófico; a lo que llegó fue a un nuevo materialismo, un nuevo nivel de descripción basado en la idea de estados discretos, y un argumento de que este nivel (más que el de átomos y electrones, o incluso el de la fisiología del tejido cerebral) era el correcto para enmarcar la descripción de los fenómenos mentales. Es a la promoción y a la exploración de estas ideas que dedicó gran parte de su vida posterior. (Hodges, 1988, p. 6. Énfasis en el original)

Si bien no estoy de acuerdo con la separación tajante y ortodoxa que hace Hodges sobre que la conexión sea más científica que una mera mirada filosófica (puesto que considero que Turing no hubiese hecho una distinción tan tajante y que, de hecho, su propuesta se enmarca dentro de los naturalismos filosóficos que ven una continuidad entre la filosofía y la ciencia, como ya remarcamos anteriormente), Hodges bien señala lo que habilita esta conexión entre los dos ámbitos que ve Turing. De esta forma, Turing plantea una forma científica de acercarse a un problema tradicionalmente filosófico, abriendo una enorme cantidad de posibilidades metodológicas para los distintos ámbitos de investigación, dando cuenta de lo fructífero que puede ser la interacción entre los dos, especialmente cuando los problemas que se tratan son fundacionales, lo que los hace filosóficos por excelencia.

4.1.2. De simulaciones, inteligencias y otras búsquedas

Esto es sólo un anticipo de lo que está por venir, y sólo la sombra de lo que va a ser. Tenemos que tener alguna experiencia con la máquina antes de conocer realmente sus capacidades [...] no veo por qué no debería entrar en cualquiera de los campos normalmente cubiertos por el intelecto humano, y eventualmente competir en igualdad de condiciones.^{xxx}

Alan Turing (1945)
The Times, Saturday June 11

Una vez transcurridos los eventos de la Segunda Guerra Mundial, en la que Turing colaboró exitosamente en el proyecto para descifrar el código de la máquina Enigma usada por los alemanes para encriptar sus comunicaciones bélicas, la comunidad científica comenzó a “civilizar”, en la medida de lo posible, los esfuerzos intelectuales detrás de los esfuerzos bélicos. En el caso particular de Turing, la experiencia que le trajo el desarrollo de la Bombe, lo motivaron a considerar factible con la tecnología del momento la creación de una máquina física que sea una implementación de su máquina universal. Como todas las computadoras utilizadas durante la guerra, la Bombe era un dispositivo electromecánico, pero a diferencia de ellas, la Bombe no tenía el objetivo de realizar cálculo numérico sino el de simular ser otra máquina: la Enigma. De hecho las distintas versiones de la Bombe fueron mejorando sus posibilidades, al punto de poder simular muchas máquinas Enigma conectadas entre sí con el objetivo de realizar lo que hoy llamamos “in-

geniería inversa” para descodificar el mensaje encriptado. Esto significa que la máquina debía explorar un enorme espacio de configuraciones posibles (la versión de la Enigma de cuatro rotores introducida en 1941 podía ser configurada de 1.8×10^{20} maneras) hasta poder lograr encontrar un candidato viable de ser la solución buscada.

Lo que me interesa resaltar aquí es cómo se puede pensar la operación de la Bombre como un caso particular de la estrategia metodológica que Turing va a tener con los problemas científicos y que es análoga a la estrategia cibernética, como ya mencioné en la sección anterior. Si esquematizamos la operación de una Enigma ya configurada, se la puede describir como una caja negra que para un valor de entrada da un valor de salida. Cada configuración conecta uno de los 26 valores de entrada con uno de los 26 valores de salida. El problema con el que se enfrenta el analista es el de reconstruir el valor de entrada de la máquina (el mensaje) sólo conociendo la secuencia de valores de salida (es decir, el mensaje cifrado). El sentido en el que la Bombre es una simulación es doble, porque es tanto una simulación de la máquina Enigma y al mismo tiempo es una simulación de la tarea del analista que utiliza dicha simulación para encontrar las configuraciones posibles de la máquina, de hecho automatizando deducciones lógicas para encontrar las soluciones que no llevan a contradicciones, dado el conocimiento que se tiene de la operación de la máquina. Usualmente en la tarea de realizar ingeniería inversa sobre un sistema encriptado hay que apoyarse en algún error de diseño que permita encontrar algún patrón para disminuir el espacio de búsqueda de las soluciones. En el caso de la Enigma, el diseño impedía que una valor de entrada sea codificado con el mismo valor (p. ej.: el símbolo de entrada “H” podía ser reemplazado por cualquier otro símbolo que no fuera “H”). De esta forma, si una configuración del simulador llevaba a esa condición se la consideraba una contradicción y dicha solución se descartaba. En la siguiente selección de citas extraídas del manuscrito de Turing que se conocía como “el libro del profesor” –clasificado como secreto por las autoridades hasta la década de 1990 y que el mismo Turing habría llamado “Mathematical theory of Enigma machine” (A. M. Turing, 1940).– se pueden observar distintas etapas de esta estrategia de modelización en acción, que tiene por efecto encontrar un modelo general del “fenómeno de la máquina Enigma” a efectos de poder ser convertido en un problema equivalente sobre el cuál sea más fácil plantear una estrategia de búsqueda para sus soluciones posibles, incluyendo en el proceso más detalles acerca del funcionamiento de la máquina original:

Para la demostración es mejor sustituir la máquina por un modelo de papel. Sustituimos cada rueda por una tira de papel cuadriculada de 52 por 5 cuadrados. (p. 7)

La máquina en sí está representada por una hoja de papel con ranuras para alojar las “ruedas”.

Antes de intentar explicar los métodos reales utilizados en la búsqueda de las conexiones de una máquina, será conveniente mostrar el tipo de fenómenos de los que

depende la solución. (p. 20)

Supongamos que nos quedamos a solas con una Enigma durante media hora, con la tapa cerrada y sin que se pueda mover el *Umkehrwalz*,¹² ¿qué datos sería mejor anotar, y cómo utilizaríamos los datos después para averiguar las conexiones de la máquina? ¿Puede uno de esta manera encontrar todo sobre las conexiones? (p. 24)

Es de suponer que el método de solución dependerá de formular hipótesis sobre partes de las claves y extraer las conclusiones que se puedan, esperando obtener una confirmación o una contradicción. (p. 97)

Cuando miramos a la Bombe de esta manera vemos que sería natural modificarla para que esta idea encaje aún mejor. Hasta ahora no hemos permitido largas cadenas de deducciones; las posibles deducciones se detienen en cuanto se vuelve a la letra central. Sin embargo, no hay ninguna razón por la que, cuando a partir de una hipótesis sobre el valor del *Stecker*¹³ de la letra central hemos deducido que la letra central debe tener otro valor del *Stecker*, no debemos continuar y sacar más conclusiones a partir de este segundo valor del *Stecker*. A primera vista, esto parece bastante inútil, pero, como todas las deducciones son reversibles, en realidad es muy útil, pues todas las conclusiones que se puedan sacar serán entonces falsas, y las que queden se destacarán claramente como posibles hipótesis correctas. (p. 107)

En nuestra descripción original de la Bombe pensamos en ella como un método de búsqueda de características de una cuna¹⁴ que son independientes del *Stecker*, pero en la última sección pensamos en ella más como una máquina para hacer deducciones del *Stecker*. Esta última forma de verlo tiene obviamente grandes posibilidades, por lo que empezaremos de nuevo con esta idea. XXXI (A. M. Turing, 1940, p. 107)

Bajo mi lectura, esto refuerza la hipótesis de que para Turing, desde muy temprano, nuestra capacidad de conocer un sistema, natural o artificial, consiste en poder diseñar una máquina que sea capaz de replicar todas las relaciones entrada-salida del sistema que se estudia, en el nivel adecuado de descripción que se tomó para llevar a cabo el estudio, esto es, el nivel en el que se realizan las intervenciones o las observaciones; de la misma manera en que lo fue ya para su trabajo fundacional sobre los números computables y los procesos mecánicos de búsqueda en (A. Turing, 1936). En esencia, su sugerencia para obtener un modelo de un sistema es construir una *simulación maquínica* para dicho sistema, es decir un nuevo sistema cuya estructura le permita comportarse exactamente de

¹²Este es el último rotor de la máquina, también llamado “reflector” porque devuelve una señal desde el mismo frente por la que le llega la del rotor anterior.

¹³Probablemente la pieza crucial en la encriptación de la Enigma, el valor del *Stecker* en un momento determinado es la configuración de los pares cables móviles que se colocan en el frente de la máquina para intercambiar pares de letras.

¹⁴*Crib*, en inglés. Este es el término que usaban en Blechley Park para referirse a una sección de la secuencia de letras de un mensaje que se consideraba decodificable o “conocida”. Habitualmente se trataba de alguna secuencia usual de letras del mensaje original, como los de los reportes del tiempo, los saludos, o los famosos “nada que reportar”.

la misma manera, tal como lo haría *si fuera* el sistema mismo que se está estudiando. Lo ideal sería, claro, lograr el mismo resultado que le permitió automatizar el proceso de descifrado de la máquina Enigma: integrar la “máquina del fenómeno” con otra máquina que efectivamente pueda simular las clases de inferencias que haría sobre las operaciones de dicha máquina quien está estudiando el fenómeno, al menos para descartar las hipótesis que contradicen lo que ya se sabe del fenómeno o de las otras restricciones que el conocimiento del agente impone sobre lo que se debe considerar como una buena hipótesis. Algunos años más tarde comentaría sobre esta relación entre la criptografía y la física:

El campo de la criptografía será quizás el más provechoso. Existe un paralelismo notablemente estrecho entre los problemas del físico y los del criptógrafo. El sistema en el que se cifra un mensaje corresponde a las leyes del universo, los mensajes interceptados a las pruebas disponibles, las claves de un día o de un mensaje a constantes importantes que hay que determinar. La correspondencia es muy estrecha, pero el objeto de estudio de la criptografía es muy fácil de tratar con maquinaria discreta, la física no tanto. (Turing, 1948 en Cooper & van Leeuwen, 2013, p. 509)

En la mayoría de los casos, la complejidad del problema hará prohibitiva la búsqueda de la solución en el espacio completo del problema, por lo que el primer paso es reducir el espacio de búsqueda. Aquí la naturaleza del problema será la que determine qué estrategia utilizar, pero todas apuntan a lo mismo: convertir el problema original en uno que sea más fácil de resolver.¹⁵ En algunos casos la estrategia a emplear es una “metodología de descomposición” y es la de descomponer o desarmar el problema en subproblemas y “atacarlos” por separado. Muchas veces la descomposición replica la estructura causal del sistema. Es importante notar aquí que esta no es la estrategia que Turing empleó en trabajo de 1936 puesto que no implicó la descomposición del problema, sino una transformación del problema original en uno que podía ser expresado desde un conjunto mínimo de operaciones que se consideran fundamentales y que, en el nivel de descripción en el que se trabaja, se consideran que no necesitan mayor justificación. De hecho podrían denominarse como “axiomas mecánicos”. Otro punto importante a destacar es que, de la misma manera en la que ocurría con la descripción cibernética, la similaridad entre los espacios de las soluciones no presupone (aunque no excluye) la similaridad ontológica sino que alcanza con la “funcional”, en tanto se respete la relación *input-output*. De hecho, en la mayoría de los casos, en algún nivel habrá una diferencia ontológica radical, como en una simulación computacional digital de un fenómeno natural. Ahora bien, el caso de la Bombe representa en el que una máquina artificial sirve para simular otra máquina artificial, por lo que la similitud ontológica juega un rol importante en el planteo del problema. Sin embargo este rol no es esencial puesto que pueden lograrse simulaciones

¹⁵ Años más tarde, Herbert Simon llegaría a una conclusión muy similar: “Una forma de resolver un problema complejo es reducirlo a un problema previamente resuelto para mostrar qué pasos conducen de la solución anterior a la solución del nuevo problema” (H. A. Simon, 1996, p. 213). “Ver solución al caso anterior” es una de las expresiones que más se escucha en cualquier comunidad de informáticos.

exitosas sin identidad ontológica pero respetando la similitud funcional. De hecho, esto va a ser precisamente lo que caracterice a las computadoras digitales programables, que son una instancia de similaridad funcional con una máquina de Turing.

Una vez terminada la guerra, los esfuerzos de Turing se concentran, al menos oficialmente, en la creación de una computadora digital para el gobierno británico, la ACE por *Automatic Computing Engine*, nombre que denota la influencia de Babbage.¹⁶ En 1946, por parte de Charles Galton Darwin (nieto del legendario Charles Darwin) quien entonces servía como director del National Physics Laboratory (NPL), Turing se entera del proyecto de Ashby de fabricar un dispositivo que demuestre la posibilidad de simular el comportamiento adaptativo del cerebro y que pueda funcionar como un medio para estudiar los principios de dicho comportamiento. En noviembre de ese año Turing le escribe una carta a Ashby contándole sus verdaderos planes para con la ACE:

Estimado Dr. Ashby:

Sir Charles Darwin me ha mostrado su carta y estoy muy interesado en descubrir que hay alguien trabajando en estas líneas. En mi trabajo en la ACE estoy mucho más interesados en la posibilidad de producir modelos de la acción del cerebro que en las aplicaciones prácticas a la computación. Estoy muy ansioso por leer su trabajo.

La ACE será usada, como usted sugiere, en una primera instancia de manera completamente disciplinada, similar a la acción de los centros inferiores [del cerebro], aunque los reflejos serán extremadamente complicados. La acción disciplinada lleva consigo la desagradable característica, que usted mencionó, que nunca será crítica cuando ocurra un error. Necesariamente estará desprovista de cualquier cosa que pueda llamarse originalidad. No hay razón alguna, sin embargo, para que la máquina deba ser siempre usada de esa manera: nada en su construcción nos obliga a usarla de esa manera. Sería bastante posible para la máquina probar variaciones de comportamiento y aceptarlas o rechazarlas en la manera en la que usted lo describe y tengo la esperanza de hacer que la máquina haga eso. Esto es posible ya que, sin alterar el diseño de la máquina misma, se puede, al menos en teoría, usarla como un modelo de cualquier otra máquina, haciendo que recuerde un conjunto adecuado de instrucciones. La ACE es, de hecho, análoga a la “máquina universal” descrita en mi trabajo sobre números computables. Esta posibilidad teórica se obtiene en la práctica, en todos los casos razonables, en el peor de los casos pagando el costo de operar algo más lentamente que una máquina diseñada específicamente para el propósito en

¹⁶El título de la primera computadora digital eléctrica programable de la historia le corresponde a la Z3 diseñada por Konrad Zuse y presentada por primera vez en 1941. Este trabajo fue teóricamente independiente de los desarrollos que se estaban llevando a cabo en Estados Unidos y en Inglaterra. La motivación principal de Zuse para sus computadoras era la de simplificar las tareas de cálculo que su profesión de ingeniero civil le obligaba a realizar y no se propuso implementar una máquina de Turing, lo que le otro toque a la Babbage a la historia. La Z3, de todos modos, es Turing-completa, resultado que fue probado recién en 1998 (Rojas). En términos de capacidad la Z3 utilizaba 2600 relays que soportaban palabras de 22 bits a la impresionante velocidad de 4 Hz.

Capítulo 4. Turing y von Neumann: La complejidad entre la computadora y la matemática

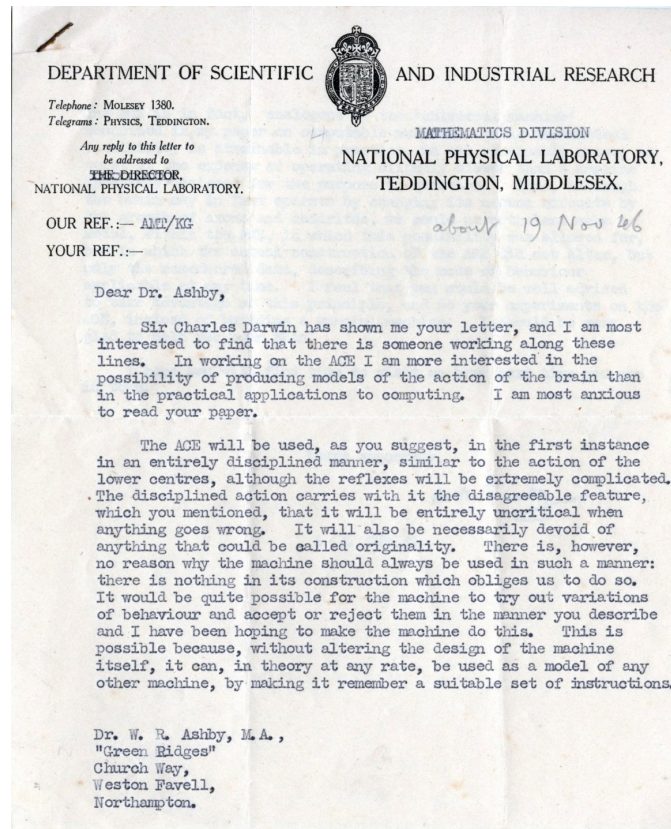


Figura 4.1: Carta de Turing a Ashby. Archivo Turing.

cuestión. Por lo tanto, pese a que el cerebro puede de hecho operar cambiando sus circuitos neuronales mediante el crecimiento de axones y dendritas, podríamos de todas formas hacer un modelo, en la ACE, en el cual se dé luz a esta posibilidad, pero que no cambie la construcción presente de la ACE, sino los datos recordados, describiendo el modo de comportamiento aplicable en cualquier momento. Me parece que sería una buena sugerencia para usted aprovechar la ventaja de este principio y que realice sus experimentos en la ACE, en lugar de construir una máquina especial. Me alegrará mucho poder ayudarlo con esto.

Espero que encuentre tiempo de visitarme la próxima vez que esté en la ciudad.

Muy atentamente,

A.M. Turing.

Lo primero que llama la atención en la carta de Turing es, además de la clara cercanía a lo que estaba pensando Ashby en ese momento, es la sugerencia de que su interés por las capacidades de la ACE radica en la posibilidad de usar la máquina para producir *modelos de la acción del cerebro*, sugiriendo la importancia que puede tener la computadora como una herramienta para la investigación de un sistema complejo como el

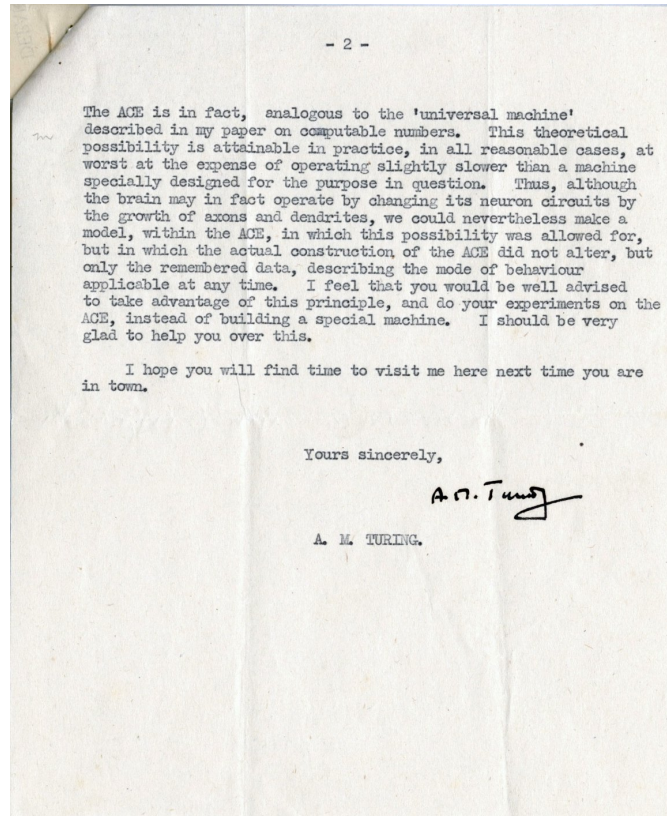


Figura 4.2: Carta de Turing a Ashby, reverso. Archivo Turing.

cerebro humano. Turing habla de modelos de la *acción* del cerebro porque lo que pretende simular no es un cerebro en sí, sino un “cerebro posible”, de la misma manera en la que el Homeostato no pretende ser el cerebro sino, en al menos un aspecto, *como* un cerebro. Esto es, una máquina que, en el nivel adecuado de descripción se comporte como si fuera un cerebro; que bajo un reemplazo adecuado mantenga la misma relación funcional entre entradas y salidas que un cerebro tendría. Hasta entonces Turing no ha identificado al cerebro como una computadora pero no tardará en hacerlo. En la *Lecture to the London Mathematical Society*, conferencia que trató sobre los avances que se estaban realizando en el diseño de la ACE, después de introducir algunos aspectos técnicos concernientes a la memoria de la futura computadora, comenta sobre la importancia del reloj en su diseño, y en el mismo lugar sugiere que el cerebro es una computadora digital, la única que según su conocimiento computa sin necesidad de un reloj central:

Podríamos decir que el reloj nos permite introducir una discretización del tiempo, de modo que, para algunos fines, el tiempo puede considerarse como una sucesión de instantes en lugar de un flujo continuo. Una máquina digital debe tratar esencialmente con objetos discretos, y en el caso de la ACE esto es posible gracias al uso de un reloj. Todas las demás máquinas de computación digital, excepto los cerebros humanos y de otros animales, hasta donde sé, hacen lo mismo. Se puede pensar en formas de evitarlo, pero son muy incómodas.^{XXXII} (Cooper & van Leeuwen, 2013,

Turing 1947, p. 489)

Otro punto importante en la cita sobre el que no elabora es su comentario sobre la posibilidad de diseñar máquinas que eviten la necesidad de un reloj central pero que dichas formas son “incómodas” o “extrañas” (Turing usa “*awkward*” en inglés).¹⁷ Nuevamente esto sugiere que para simular un cerebro no es necesario implementar la misma estructura física sino la misma estructura funcional. De hecho, por más que sea posible simular punto a punto todos los detalles del cerebro, dados las diferencias del funcionamiento básico entre los componentes de una computadora electrónica y la “computadora cerebro” lo conveniente es aprovechar esas diferencias para simplificar el proceso de crear una equivalencia funcional. Sobre este punto va a insistir en el reporte de 1948 escrito para el NPL:

Podríamos producir modelos eléctricos bastante precisos para copiar el comportamiento de los nervios, pero no parece tener mucho sentido hacerlo. Sería como dedicar mucho trabajo a los autos que caminan sobre patas en lugar de seguir usando ruedas. Los circuitos eléctricos que se utilizan en las máquinas de computación electrónica parecen tener las propiedades esenciales de los nervios. Son capaces de transmitir información de un lugar a otro, y también de almacenarla. Ciertamente, el nervio tiene muchas ventajas. Es extremadamente compacto, no se desgasta (¡probablemente durante cientos de años si se conserva en un medio adecuado!) y tiene un consumo de energía muy bajo. Frente a estas ventajas, los circuitos electrónicos sólo tienen una contrapartida, la de la velocidad. Sin embargo, esta ventaja es de tal magnitud que posiblemente supere las ventajas del nervio. (Turing, 1948 en Cooper & van Leeuwen, 2013, p. 508)

La velocidad de los circuitos electrónicos comparados con los circuitos neuronales podría permitir lograr los mismos resultados con una arquitectura diferente. Aquí Turing claramente se vuelve a enfrentar con algunos de los mismos problemas filosóficos que estaban detrás de su trabajo de 1936, especialmente el de la naturaleza de lo mental y de su posible reducción e identificación con el sustrato físico que lo soporta. Como ya anticipamos, especialmente en la sección sobre la cibernética, este problema es el problema inverso del de las propiedades emergentes, que suelen tomarse como una característica esencial de los sistemas complejos y que trataré con más detalle en el capítulo 7. Lo interesante a notar aquí es cómo dichos problemas aparecen de la mano del problema de cómo identificar la similitud existente entre dos modelos —y entre un modelo y el sistema que se pretende

¹⁷Desde los años 1950, el diseño de los denominados circuitos asincrónicos es un área de investigación activa cuyo objetivo es precisamente el de la creación de circuitos secuenciales sin reloj central o autotemporizados [*self-timed*]. Varias computadoras han sido construidas con esta arquitectura alternativa, siendo el menor consumo eléctrico por operación una de sus principales ventajas. Un aspecto muy interesante es la necesidad de un lenguaje más expresivo que el álgebra booleana para servir de modelo de dichos circuitos, puesto que se necesita más de dos valores de verdad. Quizás uno de los modelos más interesantes sean las redes de Petri, que es un lenguaje matemático para la descripción de sistemas distribuidos, lo que lo vuelve un modelo natural para la computación concurrente, entre otros fenómenos (Petri & Reisig, 2008).

estar modelando—, que es uno de los problemas filosóficos que permea a toda la discusión sobre modelos y teorías, además de la “realizabilidad múltiple” que sigue siendo uno de los temas centrales de la filosofía de la mente; uno que se puede de hecho ver como un problema subsidiario al de la reducción y la emergencia. La forma en la que Turing lidia con estos problemas sugiere un punto de análisis que considero muy importante y que está en la base del trabajo contemporáneo con sistemas complejos, no sólo en la metodología general sino también en algunas de las tesis ontológicas y epistémicas. Nuevamente es una reutilización de su tesis central sobre la universalidad y la capacidad de llevar a cabo una simulación por medio de alguna clase de máquina lo que subyace a la sugerencia de Turing y, como vimos en la sección anterior, el punto clave es el de seleccionar un nivel adecuado de descripción, desde el cual se pueda formular la equivalencia funcional entre los dos objetos de investigación. Dado que la equivalencia funcional no requiere la equivalencia estructural, el objetivo pasa a ser la búsqueda de un modelo “más sencillo” —que no significa otra cosa que “más accesible epistémicamente”— que, bajo una *interpretación adecuada*, cause el mismo comportamiento final que el modelo más complejo. Es la noción de máquina universal la que sirve como piedra de toque para cada simulación y de hecho se toma como modelo mismo para la máquina digital de computar. Curiosamente, Turing emplea el término “modelo” para hablar de la capacidad de dicha máquina de imitar cualquier otra máquina:

Volvamos ahora a la analogía de las máquinas de computar teóricas con una cinta infinita. Se puede demostrar que una sola máquina especial de ese tipo puede hacer el trabajo de todas. De hecho, podría hacerse funcionar como un *modelo* de cualquier otra máquina.^{XXXIII} (Cooper & van Leeuwen, 2013, Turing 1947, p. 490. El énfasis es mío)

También hay que notar el uso del término “analogía” para referirse a la relación existente entre la máquina física de computar y la máquina teórica universal. La analogía puede interpretarse como una modelo que se sabe que funciona pero que es imperfecto porque no puede imitar la totalidad del comportamiento de la máquina: la máquina física no puede tener memoria infinita como si lo puede tener la máquina teórica. Este punto es relevante porque pone de manifiesto la necesidad de hacer una distinción entre lo que es posible “en principio” y lo que es posible “en la práctica” o factible; distinción que se vuelve crítica cuando entran en juego aspectos temporales o locales. De hecho, es una característica propia de los sistemas que computan —y esto hace muy fértil a la analogía con los sistemas complejos— poder sufrir algún cambio mínimo en alguno de sus componentes que los vuelve capaces de realizar una tarea en un tiempo varias órdenes de magnitud menor que el tiempo original. Turing continúa inmediatamente describiendo lo sencilla que es la operación de la máquina y cómo se puede emplearla para imitar cualquier otra máquina:

La máquina especial puede llamarse máquina universal; funciona de la siguiente manera bastante sencilla. Cuando hayamos decidido qué máquina deseamos imitar, gra-

bamos una descripción de la misma en la cinta de la máquina universal. Esta descripción explica lo que la máquina haría en cada configuración en la que pudiera encontrarse. La máquina universal sólo tiene que seguir mirando esta descripción para saber qué debe hacer en cada etapa. Así, la complejidad de la máquina a imitar se concentra en la cinta y no aparece en la máquina universal propiamente dicha de ninguna manera. (Turing, 1947 en Cooper & van Leeuwen, 2013, p. 490. El énfasis es mío)

Aquí hay al menos dos puntos interesantes fuertemente relacionados que son la descripción de la máquina a ser imitada y su complejidad. Turing utiliza conceptos bastante intuitivos aquí de “simple” y de “complejo” pero lo interesante es que queda bastante claro que la máquina universal es una máquina de suyo bastante simple. De hecho la máquina de Turing, tal y como la describió en el trabajo de 1936 es *una* forma de máquina universal pero no es la única. Lo que debe quedar en claro es que cualquier otra máquina universal va a ser equivalente a la máquina de Turing no en términos de cómo está constituida —puede haber diferencias significativas— sino en términos de su capacidad de computar las mismas funciones. Esto significa que ninguna otra máquina universal puede computar funciones que la máquina de Turing no pueda computar, puesto que ésta computa todas las funciones computables. La “simpleza” de la máquina de Turing hace que la “complejidad” de cualquier comportamiento no se encuentre en la máquina en sí, sino en la manera en la que las instrucciones codifican el comportamiento de la máquina universal a efectos de que ante todos los posibles valores de entrada que la máquina puede recibir, esta se comporte como si fuera la máquina que se está imitando. Es decir, ante las mismas entradas las dos máquinas producen el mismo resultado. La única diferencia, entonces, y donde se esconde la *complejidad* que menciona Turing, yace en el espacio que debe necesariamente mediar entre las entradas tal y como le son provistas a la máquina a ser imitada y las entradas que deben ser cargadas a la “máquina imitadora”. La complejidad explícita está en la codificación, mientras que la complejidad “implícita” está en la dificultad de encontrar dicha codificación, puesto que si la naturaleza de la máquina a imitar es muy intrincada, como puede ser la del cerebro humano, la posibilidad de dar con una descripción que instruya a la máquina “lo que debe hacer en cualquier configuración en la que se encuentre” es bastante remota, especialmente si dichas instrucciones deben ser escritas en su totalidad por un ser humano. Esta idea de Turing sobre cómo la complejidad puede estar entendida “por fuera” de las operaciones básicas va a servir de base para una de las medidas y definiciones cuantitativas de la complejidad más interesantes, de las que comentaré más adelante: la complejidad de Kolmogorov o teoría algorítmica de la complejidad.

Si bien la invención de la máquina de Turing tuvo como propósito *modelar* el proceso de cálculo humano, la modelización mecánica trae aparejada la posibilidad de automatizar por completo el proceso de cálculo, liberando a la humanidad de tan repe-

titiva tarea, además de eliminar el riesgo del error humano que, por inexperticia o por cansancio, podían “contaminar” los resultados de las operaciones. La automatización de las operaciones tediosas —y la consiguiente posibilidad de realizar operaciones que antes no eran alcanzables— es una motivación constante en la historia de la humanidad para creación de nuevas máquinas, y las máquinas de cálculo no son la excepción.¹⁸ Una de las consecuencias de la automatización es que, normalmente, el proceso puede llevarse a cabo de manera mucho más rápida que cómo se estaba haciendo hasta ese entonces, por lo que, por ejemplo, una serie de problemas que hasta ese entonces se consideraba matemáticamente intratable por requerir un sinnúmero de soluciones numéricas, de pronto se vuelve computacionalmente tratable y puede generar una época de descubrimiento y progreso científico. Una de las sugerencias de Turing es que el proceso que lo llevó a generar una máquina para explorar las soluciones de la máquina Enigma puede llevarse un paso más adelante todavía, intentando mecanizar, básicamente, el mismo proceso de descubrimiento, mediante búsqueda de procesos de descubrimiento alternativos:

Si tomamos las propiedades de la máquina universal junto con el hecho de que los procesos de la máquina y los procesos de las reglas generales son sinónimos, podemos decir que la máquina universal es aquella que, cuando se le suministran las instrucciones adecuadas, puede hacer cualquier proceso de las reglas heurísticas [*any rule of thumb process*]. Esta característica tiene su paralelo en las máquinas informáticas digitales, como la ACE. De hecho, son versiones prácticas de la máquina universal. (A. M. Turing, 1947/1947, p. 490)

Opera aquí un reconocimiento que si bien el grado de certeza con el que se opera es distinto, desde el punto de vista del cálculo, una heurística es un algoritmo. Esto tiene especial importancia en problemas complejos, en donde lo que se necesita codificar no es una solución completa (lo que significaría especificar qué debe hacer la computadora en cada situación) sino, más bien, una forma de buscar soluciones posibles al problema. Así, en términos de cómo se implementa en la computadora, lo que Turing llama aquí “procesos maquínicos” y los “procesos de regla de pulgar o heurísticas” son sinónimos, pero no por ello arrojan siempre el mismo resultado. En la actualidad se suele hacer una distinción entre un algoritmo y una heurística. Bajo la interpretación usual, un algoritmo garantiza que la respuesta que se va a obtener después de su ejecución es una respuesta correcta al problema, mientras que la heurística es una técnica que *puede* encontrar una solución correcta, usualmente en menor tiempo que el algoritmo para el mismo problema, pero no ofrece garantías de que la respuesta que obtiene sea siempre una buena respuesta, mucho

¹⁸En una carta de 1822 dirigida al químico Humphry Davy —quien entonces era ya presidente de la Royal Society y había sufrido varias explosiones con Faraday—, el mismo Charles Babbage comenta sobre cómo el fastidio del cálculo lo llevó a imaginar una máquina que pudiera hacerlo por él: “El intolerable trabajo y la fatigosa monotonía de una repetición continua de cálculos aritméticos similares, despertaron primero el deseo, y después sugirieron la idea, de una máquina que, con la ayuda de la gravedad o de cualquier otro poder móvil, se convirtiera en un sustituto de una de las operaciones más elementales del intelecto humano.”^{XXXIV} (Babbage & Babbage, 2010, p. 212. Carta a Humphry Davy, 3 de julio de 1822.)

menos la solución óptima. Turing es completamente consciente de que hay problemas para los cuales no se puede encontrar una solución en principio: tal fue su respuesta negativa al problema de la decisión. También es consciente de que la complejidad de algunos problemas hace que, si bien en principio puedan ser resueltos de manera total, la cantidad de poder cálculo o de tiempo necesarios hace que, en la práctica, no tengan solución perfecta. Por esta razón, el paso necesario es automatizar el proceso de búsqueda de soluciones aproximadas o localmente óptimas.¹⁹

Desde un punto de vista netamente epistémico podríamos pensar que la imposibilidad —tanto en principio como en la práctica— de obtener respuestas podría parecer una pérdida enorme puesto que pareciera descartar la idea de un conocimiento certero o verdadero, *sub specie aeternitatis*. Sin embargo, acorde al proceso de naturalización de la filosofía que planteamos en la introducción, la pérdida de la certeza absoluta es, paradójicamente, liberadora para la epistemología, porque la piedra de toque de lo que representa buen conocimiento ya no es una verdad eterna sino una verdad mucho más próxima, local y acotada pero no por ello menos válida. A su vez, en esta nueva visión *más dinámica* del conocimiento, un elemento que antes había sido eliminado totalmente por ser precisamente lo opuesto a lo que se buscaba ahora cobra un rol fundamental: el error. Aquí se puede observar la cercanía del pensamiento de Turing con el trabajo de Ashby, quien, como vimos, estaba convencido de que la razón por la cual muchos procesos de la naturaleza no se habían podido explicar en términos netamente mecánicos era debido a que el error no podía constituir una parte intrínseca del diseño de la máquina, puesto que para la vieja concepción de máquina el error simplemente representaba un *mal* funcionamiento, una máquina que no cumplía lo que se esperaba de ella y que necesitaba ser reparada o rediseñada. Bajo la nueva interpretación de “mecánico” que tanto la cibernética como pensadores como Turing introdujeron en la década de 1940, que hacían eco de las discusiones que el mismo concepto de mecánico sufrió en biología con la irrupción de las distintas variantes del darwinismo, una máquina podía ser mucho más capaz si, paradójicamente, se *equivocaba bien*, esto es, puede *aprovechar* el error para aumentar sus capacidades. Esto es precisamente lo que puede lograrse con una máquina universal.²⁰

Turing va a proponer que hay varias formas de usar una máquina. La forma tradicional es usarla como una esclava, es decir, como un ser que debe seguir las instrucciones que recibe al pie de la letra y no llevarlas a cabo o introducir pequeñas modificaciones en la misma sin permiso constituye una equivocación o un error, en tanto la regla no ha sido

¹⁹Todos estos puntos serán de vital importancia para la naciente área de investigación conocida como Inteligencia Artificial, disciplina que tiene muchos puntos de retroalimentación con la investigación de sistemas complejos, tanto en objeto de estudio como en métodos y modelos.

²⁰Como señalo más adelante, poder reconocer el error como algo positivo requiere considerar el nivel de abstracción sobre el que se está trabajando, por lo que requiere una concepción “más computacional” de los procesos básicos. Es precisamente esta concepción la que abre el campo de estudio de la ciencia de los sistemas complejos y que Turing y von Neumann ayudaron a articular.

respetada:

Se ha dicho que las máquinas de computación sólo pueden realizar los procesos que se les ordena. Esto es sin duda cierto en el sentido de que si hacen algo distinto de lo que se les ha ordenado, entonces es que han cometido algún error. También es cierto que la intención al construir estas máquinas en primera instancia es tratarlas como esclavas, dándoles sólo trabajos que han sido pensados en detalle, trabajos tales que el usuario de la máquina entiende completamente lo que en principio está sucediendo todo el tiempo. Hasta ahora, las máquinas sólo se han utilizado de esta manera. Pero, ¿es necesario que se utilicen siempre así? (Cooper & van Leeuwen, 2013, Turing 1947, p. 496)

De esta manera introduce Turing lo que más adelante va a llamar la “objeción de Ada Lovelace” cuando en Turing (1950) revise posibles argumentos en contra de su propuesta para máquinas inteligentes, uno de sus principales objetivos y para lo que el estudio de modelos computacionales del cerebro eran un medio. La referencia al usuario que hace Turing en la cita es a quien la está programando, quien, en principio, puede saber todo lo que la máquina está haciendo, al menos en el nivel de abstracción en el que está trabajando. (La distinción entre “usuario” y “programador” llegará más tarde, cuando la computadora se vuelva un producto comercial para “no expertos”). La universalidad le permite aquí a Turing sugerir que no hay razón alguna para creer que esta forma “esclava” de trabajo es la única que se puede utilizar, aunque sea la más natural al principio, para conocer las capacidades de la máquina. Bajo esta otra nueva forma de trabajo que considera, el programa incluye instrucciones que le permiten cambiar su propia configuración (es decir, no sólo el estado sino la misma programación, las reglas de transición entre estados). Bajo una programación adecuada, una que, por ejemplo, permita obtener los *resultados* esperados pero de una manera mucho más eficiente, al menos Turing estaría dispuesto a llamar a ese comportamiento no previsto originalmente como *inteligente*. Haciendo lo que probablemente sea la primera referencia en la literatura del *machine learning o aprendizaje automatizado*,²¹ Turing sugiere que una máquina que hace esa proeza sería como un

²¹McCulloch y Pitts (1943) no introdujeron en su modelo ningún algoritmo de aprendizaje. Las primeras simulaciones computacionales sobre el modelo de McCulloch-Pitts fueron llevadas a cabo por Farley y Clark, quienes utilizaban un algoritmo que modificaba los pesos de las conexiones entre las 128 unidades computacionales o neuronas de su implementación que buscaba reconocimiento de patrones simples. Es curiosa la forma en la que definen “aprendizaje” y cómo se refieren a su implementación como un “organismo”: “En términos de nuestro modelo, podemos describir [el aprendizaje] en los siguientes términos. Se elige un número de patrones de entrada y se lo presenta al organismo en un orden y en un tiempo preestablecidos para proveer la “experiencia” requerida. Una o más de estas entradas son designadas como pruebas o tareas de rendimiento, y se construye una medida adecuada de su habilidad, como puede ser una prueba con puntaje. Este puntaje corresponde a la medida que le hemos adjuntado a la transformación general. Si la medida aumenta como resultado de la presentación de entradas “de experiencia”, y no incrementa de otra forma, se dice que el organismo aprende” (Farley & Clark, 1954, p. 77). Una implementación un tanto “más rústica” de una red neuronal inspirada por el modelo de McCulloch-Pitts fue el SNARC diseñado por Marvin Minsky en 1951 como parte de su trabajo doctoral que estuvo orientado a una exploración de ideas acerca de cómo el sistema nervioso podría aprender. Las siglas en inglés de la “máquina de Minsky” corresponden

alumno que aprende de su maestro, pero dándole un giro no esperado sobre lo aprendido, introduciendo una novedad:

Supongamos que hemos configurado una máquina con ciertas tablas de instrucciones iniciales, creadas de tal manera que estas tablas podrían en ocasiones, si surgiera una buena razón, modificar dichas tablas. Se puede imaginar que, después de que la máquina haya estado funcionando durante algún tiempo, las instrucciones se habrán alterado de forma irreconocible, pero, sin embargo, seguirían siendo tales que habría que admitir que la máquina sigue haciendo cálculos muy valiosos. Posiblemente siga obteniendo resultados del tipo deseado cuando la máquina se puso en marcha por primera vez, pero de una manera mucho más eficiente. En tal caso, habría que admitir que el progreso de la máquina no se había previsto cuando se pusieron sus instrucciones originales. Sería como un alumno que ha aprendido mucho de su maestro, pero que ha añadido mucho más con su propio trabajo. Cuando esto sucede, creo que uno está obligado a considerar que la máquina muestra inteligencia. (Cooper & van Leeuwen, 2013, Turing 1947, p. 496)

Inmediatamente Turing comienza a especular sobre qué es lo que haría falta para poder utilizar la ACE en esa dirección y, al mismo tiempo, sugiere una comparación directa con el cerebro humano y la cantidad de memoria computacional que haría falta para simularlo:

En cuanto se pueda disponer de una capacidad de memoria razonablemente grande, debería ser posible empezar a experimentar en esta línea. La capacidad de memoria del cerebro humano es probablemente del orden de diez mil millones de dígitos binarios. Pero la mayor parte de ella se utiliza probablemente para recordar impresiones visuales y otras formas comparativamente más inútiles. Se podría esperar razonablemente poder hacer algún progreso real con unos pocos millones de dígitos, especialmente si se limitan las investigaciones a algún campo bastante limitado como el juego de ajedrez. Probablemente sería bastante fácil encontrar tablas de instrucciones que permitieran al ACE ganar a un jugador medio. De hecho, Shannon, de los laboratorios de Bell Telephone, me dice que ha ganado partidas jugando por regla general: no se indica la habilidad de sus oponentes. Pero yo no consideraría una victoria así muy significativa. *Lo que queremos es una máquina que pueda aprender de la experiencia. La posibilidad de dejar que la máquina modifique sus propias instrucciones proporciona el mecanismo para ello, pero esto, por supuesto, no nos lleva muy lejos.* (Cooper & van Leeuwen, 2013, Turing 1947, p. 496. El énfasis es mío.)

a un “Calculador Estocástico Neuronal Analógico por Refuerzo” y consistía en una red de unas 40 neuronas conectadas al azar. La intensidad o peso de las conexiones se ajustaba de acuerdo al éxito que la máquina a la hora de realizar una tarea específica. El peso de las conexiones hacía uso de la memoria de la máquina que consistía, básicamente, en la posición de cada una de las perillas de las sinapsis, que fijaban la probabilidad de propagación de las señales. El refuerzo (o sesgo) era introducido por el operador a manera de recompensa cuando la máquina lograba un avance en la tarea y las últimas probabilidades se ajustaban mecánicamente para guardar dicho “aprendizaje”. Hasta donde he podido rastrearlo, el primer uso en la literatura del término “machine learning” en sentido estricto fue por Arthur Samuel —uno de los asistentes al Workshop de Dartmouth de 1956— en 1959, en su trabajo sobre máquinas que aprenden a jugar al juego de las damas mejor que sus programadores (Samuel, 1959). Ver también sec. 6.4.

Si no fuera por el vocabulario y la referencia al diálogo con Shannon, pareciera que en lugar de pronosticar el futuro de la investigación en el campo de la inteligencia artificial Turing estuviera hablando de su pasado. Como intento ilustrar de distintas maneras a lo largo de esta investigación, la relación entre el estudio de la inteligencia artificial y el estudio de los sistemas complejos es profundo, especialmente debido a la magnitud de la empresa y la articulación disciplinar que produjo en el estudio del cerebro humano, una de las máquinas más complejas en lo que conocemos del universo. Lo particularmente destacable aquí es cómo se puede ver en las especulaciones de Turing acerca de cómo simular un cerebro humano la necesidad de considerar distintas estrategias de investigación con los recursos disponibles e intentar coordinar sus resultados de alguna manera. Emular un cerebro humano a la perfección no es necesario si lo que se pretende es resolver un subproblema particular como el de crear una máquina que pueda vencer a alguien en el juego del ajedrez. (Este es un buen lugar para recordar las especulaciones de Ashby al respecto y sobre cómo una máquina podría superar a su programador, y, claro, el Homeostato).²² Ahora bien, Turing dice explícitamente que no consideraría una victoria en el ajedrez como muy significativa, dado que lo que él quiere buscar es precisamente “una máquina que pueda aprender de la experiencia”. De todas formas reconoce que lo más probable es que haya que empezar por algo más simple y que, en principio, no requiera la redundancia completa del cerebro para almacenar “impresiones visuales”. El ajedrez, sin duda, era un buen lugar para empezar y para poner a prueba cualquier máquina. Después de todo era algo bastante difícil de lograr, quizás incluso más que descifrar la máquina Enigma.²³

²²En AMT/B/34 del Archivo de Turing se encuentran los trabajos de Ashby que ahora sabemos que Turing tenía a su disposición y que fueron donados al archivo en 1996 por Michael Yates, quien fue el albacea de Robin Gandy. Estos son: “The physical origin of adaptation by trial and error” (1945); “Design for a brain” 1948; “The stability of a randomly assembled nerve-network” (1950); “A new mechanism which shows simple conditioning” (1950); y “Can a mechanical chess-player outplay its designer?” (1952). Ver <http://www.turingarchive.org/browse.php/B/34>

²³Curiosamente, los últimos avances en aprendizaje automatizado profundo, y sus aplicaciones en el juego del ajedrez, dependen de simular una estructura similar a la que está presente en la corteza visual humana.

4.1.3. Búsquedas y heurísticas ajedrezísticas

Una analogía divertida para intentar hacerse una idea de lo que estamos haciendo aquí para tratar de entender la naturaleza es imaginar que los dioses están jugando alguna gran partida como el ajedrez. Digamos un juego de ajedrez. Y tú no conoces las reglas del juego, pero se te permite mirar el tablero de vez en cuando, en un pequeño rincón, quizás. Y a partir de esas observaciones, intentas averiguar cuáles son las reglas del juego, cuáles son las reglas del movimiento de las piezas.^{XXXV}

Richard Feynman, *The Pleasure of Finding Things Out*

Intelligent Machinery (A. M. Turing, 1948) es uno de los textos más ricos en ideas de la historia de la computación. Esto es lo que Turing se plantea hacer en dicho *paper*, disecionando el abstract (Cooper & van Leeuwen, 2013; A. M. Turing, 1948, p. 501): “Discutir las maneras posibles en las que se puede hacer que las máquinas [*machinery*] muestren comportamiento inteligente”. Esto lo logrará usando la analogía con el cerebro humano como “principio guía”. Una de sus conclusiones es que el cerebro humano sólo puede llegar a mostrar comportamiento inteligente si es sometido a un proceso de educación, por lo que su investigación gira en torno “a un proceso análogo aplicado a las máquinas”. En consonancia con esta analogía desarrolla y define con precisión la idea de “máquina desorganizada”, la que va a sugerir que es muy similar a la corteza cerebral de un niño. La educación de estas sencillas máquinas, que equivale a un proceso de *organización* de su estructura es llevado a cabo “por medio de recompensas y castigos”, y sostiene que se puede llevar a cabo este proceso educativo incluso al punto de tornar a una de estas máquinas desorganizadas en una “cuya organización es similar a la de una ACE”.²⁴ Uno de los primeros puntos que tiene que tratar Turing es el sentido de la expresión “una máquina que se modifica a sí misma” porque, dada la definición de máquina que emplea, la frase pareciera no tener sentido. Turing dice:

También se puede hablar de una máquina que se modifica a sí misma, o de una máquina que cambia sus propias instrucciones. En realidad es una forma de fraseología sin sentido, pero es conveniente. Por supuesto, según nuestras convenciones la “máquina” se describe completamente por la relación entre sus posibles configuraciones en momentos consecutivos. *Es una abstracción que, por la forma de su definición, no puede cambiar en el tiempo.* Sin embargo, si consideramos que la máquina parte de una configuración determinada, podemos tener la tentación de ignorar aquellas configuraciones a las que no se puede llegar sin interferencia de la misma. Si hacemos

²⁴En (A. Ilcic & García, 2020) hemos analizado con relativa profundidad varios aspectos que Turing trata en este trabajo, por lo que en esta sección sólo pretendo comentar sobre cómo se articulan las ideas de abstracción y de modelado de Turing y cómo la necesidad de las heurísticas entran en juego, de la mano del tamaño de los espacios de las soluciones posibles, algo que más adelante Turing mismo explotará para el juego del ajedrez, que aparecía ya mencionado hacia el final de la *Lecture* de 1947.

esto, deberíamos obtener una “relación de sucesión” para las configuraciones con propiedades diferentes de la original y, por tanto, una “máquina” diferente.. (Cooper & van Leeuwen, 2013; A. M. Turing, 1948, p. 508. El énfasis es mío)

La definición de máquina que se encuentra aquí es equivalente a la definición de máquina que provee Ashby (ver 3.4.1, p. 115). Si una máquina, entonces, está programada para modificarse a sí misma, ¿se modifica a sí misma? (Cualquier similitud con la paradoja de Russell o su equivalente paradoja del barbero *no* es pura coincidencia). Cuando Turing se refiere a que la definición es una abstracción está retomando el punto de la definición de la máquina de Turing, que en cierto punto, si bien describe una posible máquina física, la máquina en sí es, por definición, una “máquina matemática”: una descripción matemática de un proceso con total independencia del substrato que eventualmente lo implemente. Si uno permanece “del lado de la definición”, evidentemente la frase no tiene sentido, puesto que uno debería tener la tabla completa de todas las transiciones de estados para de hecho cumplir con los requisitos de la definición. Ahora bien, hay algo en la frase que sí tiene sentido y que Turing desea capturar y que, en el fondo, requiere lidiar con el mismo problema que la “vieja definición” de máquina —y de interferencias— *à la* Descartes traía: la finitud. La definición a la que Turing hace referencia es a la de máquina universal, que ya soluciona uno de los problemas: la máquina puede leer las instrucciones que le permiten simular el comportamiento de otra máquina y comportarse como tal. La máquina aquí no se está modificando a sí misma porque su definición es la de poder ser cualquier máquina para la que reciba las instrucciones adecuadas. Ahora bien desde el punto de vista de un observador de su comportamiento, bien se podría hablar de una máquina que dada la historia de sus configuraciones ahora, en efecto, se comporta *como si fuera* otra máquina. Esto es: antes de recibir las instrucciones, la máquina no era capaz de realizar cierta tarea, pero ahora la “máquina cargada” sí lo es, creando así alguna clase de novedad para su usuario u observador. Aquí nos encontramos con una situación análoga a la que Ashby describía para la “amplificación” que el operario de una grúa poseía y notaba al usarla, mientras que para el diseñador de la grúa en realidad no había ninguna amplificación: no hay ninguna “fuerza mágica” operando y el costo energético de la operación sigue siendo el mismo (ver p. 3.5). La solución de Ashby implicaba notar la diferencia entre los dos niveles de descripción, el que tiene la explicación completa de los cambios de estado por un lado, y el nivel del usuario en el que la capacidad para realizar una tarea pareciera introducir una “fuerza mágica” completamente novedosa que permite llevar a cabo la tarea. La solución de Turing es exactamente la misma, aunque profundiza en la mirada computacional detrás del problema, mirada que deja entrever el verdadero problema epistémico de fondo.

En la cita, Turing nos recuerda que su definición es una *abstracción*. Este término puede interpretarse de varias maneras. En primer lugar, se refiere a una abstracción matemática en el sentido en que describe una situación que no puede ocurrir físicamente tal y cual se la describe porque no podríamos contar con una cinta de papel infinita

en principio, aunque podríamos contar con una en términos prácticos; es decir, para la computación en las escalas temporales en las que un ser humano puede habitar.²⁵ Pero es una abstracción también en otro sentido, a saber: no siempre podemos contar con la tabla completa que describe los estados y las transiciones, porque sabemos que se pueden escribir instrucciones que produzcan comportamientos en la máquina que son novedosos. Esta idea de novedad también tiene al menos dos sentidos posibles que Turing va a explotar. El primero es que la computadora es capaz de realizar ciclos o bucles (o *loops* en inglés), y eso es lo que le permite la universalidad. Es decir, gracias a los bucles es posible hacer que la computadora produzca resultados más largos, medidos en bits, en que la suma de los valores de entrada más los correspondientes a las instrucciones del programa. Esta fuente de universalidad es también la fuente de que no se pueda determinar *a priori* si un programa finalmente se detiene y produce el resultado esperado o si continúa funcionando constantemente. El segundo sentido de novedad consiste en tomar la universalidad y aprovecharla para aumentar la capacidad de la misma máquina, en el mismo sentido en que lo hacía el operador de la grúa de Ashby, con la diferencia en que aquí la operación también puede sorprender al diseñador, quien, literalmente puede diseñar una máquina para que lo sorprenda; lo que muestra las limitaciones que la misma Ada Lovelace tenía para interpretar los alcances de su idea de universalidad.

La sugerencia de Turing es apoyarse en una otra forma de abstracción que, como sostengo en el último capítulo, puede subsumir a las anteriores como casos particulares. Turing no la llama de esta forma pero en su argumento va en la misma dirección. Lo que Turing sugiere es imaginarse el infinito espacio de programas posibles. La mayoría de las configuraciones iniciales sólo puede explorar un espacio muy pequeño de ese universo; apenas un punto. Por más que un programa pueda dar resultados infinitos como un programa que compute la secuencia de Fibonacci, en el espacio de programas sigue siendo uno solo. Habrá otros programas que computen lo mismo (de hecho también son infinitos) pero lo que sugiere Turing es pensar si, básicamente, una configuración inicial produce puntos aislados en dicho espacio o puede formar trayectorias, lo que indicaría que el programa es capaz de *explorar* aunque sea una ínfima porción del espacio de configuraciones posibles. Las interferencias son una forma de lograr que una mayor parte del espacio de configuraciones posible sea explorado, por lo cual la presencia de interferencias es lo que va a distinguir a las máquinas que se modifican a sí mismas de las máquinas que no lo hacen.

²⁵ Aquí hay otro detalle interesante y que Turing menciona que es una abstracción “que no puede cambiar con el tiempo”. De hecho la máquina de Turing no tiene un tiempo propio, ni requiere de la misma idea de tiempo pero cualquier observador, que puede incluso ser otra máquina de Turing, podría usar la operación discreta de la máquina para construir un reloj y representar el flujo temporal. En cierto sentido, el “tiempo” podría describirse como una propiedad emergente de la máquina de Turing, cuando se involucra alguna clase de observador. La mención del cambio con el tiempo también podría sugerir la descripción de la máquina como un sistema dinámico particular.

Si consideramos ahora la interferencia, deberíamos decir que cada vez que se produce una interferencia la máquina probablemente se modifica. Es en este sentido que la interferencia “modifica” una máquina. El sentido en el que una máquina puede modificarse a sí misma es aún más remoto. Podemos, si queremos, dividir las operaciones de la máquina en dos clases, las normales y las que se modifican a sí mismas. Mientras sólo se realicen operaciones normales, consideramos que la máquina no se modifica. Es evidente que la idea de la “automodificación” no tendrá mucho interés, salvo cuando la división de las operaciones en las dos clases se haga con mucho cuidado. (Cooper & van Leeuwen, 2013; A. M. Turing, 1948, p. 508)

La advertencia final de Turing es fundamental puesto que la separación de las categorías, de acuerdo al nivel de abstracción en el que se esté trabajando, puede hacer vacua la distinción. Una instrucción que se le puede dar a la máquina es que, en un paso dado, comience a comportarse como si fuera *otra* máquina. De hecho esta es una operación completamente normal en la escritura de un programa, por ejemplo, cuando se especifica que si se cumple cierta condición, el programa realice tal o cual instrucción que, de no haberse cumplido la condición, no se hubiera llevado a cabo. Un diseñador con mucha capacidad de previsión para los posibles usos (i.e. posibles valores de entradas) podría especificar comportamientos adecuados de tal manera que para un usuario que no conoce cómo fue programada o diseñada la máquina a la que le está brindando entradas y evaluando las salidas, bien podría creer que la máquina modifica su programación, y quizás aprende o es inteligente, si es que no puede encontrar una situación que no hubiese sido prevista por el diseñador. Esto debería recordarnos a la objeción de Descartes acerca de la imposibilidad de brindar a una máquina todas las configuraciones necesarias para dar una respuesta correcta ante cualquier estímulo posible. La objeción cartesiana es correcta en tanto la máquina sea utilizada “como esclava”, pero quedarnos en esa forma de pensar a las máquinas significaría, según Turing y Ashby, entre otros, quedarse en una mínima región del espacio de máquinas posibles. Ahora bien, el espacio de máquinas posibles es tan grande que sin un proceso de automatización de la exploración *nuestra* capacidad de explorarlo también se vería totalmente coartada. Es necesario *aprender* a explorarlo. El punto central del planteo de Turing es la necesidad de clasificar las operaciones de la máquina en dos categorías: las operaciones normales y las de auto-modificación. Una máquina puede incluir en su funcionamiento operaciones de auto-modificación pero es necesario que posea operaciones normales dispuestas de tal forma que, de hecho, posibiliten las operaciones de auto-modificación, a efectos de lograr que la exploración del espacio de configuraciones posibles sea más eficiente.²⁶ Continuando la analogía con el cerebro de un niño, Turing

²⁶Como veremos, este *insight* se repite en el estudio de los sistemas complejos. De la misma forma en la que un sistema necesita poder “congelar” algunas estructuras pero al mismo tiempo poder cambiar otras, un sistema que pretende aprender necesita soportar el sistema de aprendizaje con un sistema que no varíe todo el tiempo y que sea capaz de fijar variaciones útiles que encuentre durante el proceso de aprendizaje para no tener que aprenderlas nuevamente en el futuro. Algo similar ocurre en el cerebro en varios niveles, incluso cuando realizamos una tarea nueva un número de veces y por habituación la tarea la podemos empezar a hacer de manera prácticamente automática. Los sistemas complejos están siempre resolviendo un *trade-off*

sugiere que replicar alguna forma de inteligencia en las máquinas requiere que exista en ellas una suerte de balance entre lo que él llama “disciplina” e “iniciativa”, de la misma manera en la que ocurre en los niños. Turing tiene muchos problemas para definir el término pero cree que es esencial y que “nuestra tarea es describir la naturaleza de este residuo tal y como se encuentra en el hombre e intentar copiarlo en las máquinas” (Cooper & van Leeuwen, 2013; A. M. Turing, 1948, p. 515). La disciplina es lo que se logra mediante las operaciones normales de la máquina universal, en tanto la máquina hace específicamente lo que se le instruye que haga. La iniciativa, por otro lado, es lo que se tiene que lograr con las operaciones de auto-modificación. Turing cree que hay dos métodos para lograrlo y que ambos deben ser investigados. El primero es el método directo que consiste en comenzar programando a la máquina para que realice cualquier tarea posible e ir brindándole cada vez más posibilidades de “tomar decisiones”, hasta el punto en el que no sea necesario realizar más interferencias. La otra posibilidad es la de comenzar con una máquina desorganizada e intentar lograr que las modificaciones que sufra a lo largo de su operación resulten en una máquina con la cantidad adecuada de disciplina e iniciativa. Más allá de estas especulaciones de Turing acerca de cómo dotar a una máquina de algo que se asemeje a la inteligencia humana, que no están tan alejadas de lo que se hace actualmente en el campo de la inteligencia artificial,²⁷ lo que me interesa rescatar para esta investigación es la sugerencia de la exploración de un espacio de posibilidades, aquí limitado al espacio de configuraciones posibles de una máquina, espacio que suele estar, a su vez, restringido a un espacio de soluciones a un problema particular. (Exploro este tema con más profundidad en el capítulo siguiente pero es importante notar aquí el elemento de *interpretación* de las configuraciones, semejante al ya mencionado con la cibernética). Turing sugiere la posible existencia de una forma general de interpretar los problemas, lo que lo lleva al mismo tiempo a postular una forma general de encontrar las soluciones a los mismos:

Un tipo de problema muy común que requiere algún tipo de iniciativa son los de la forma «Encuentre un número n tal que ...». Esta forma abarca una gran variedad de problemas. Por ejemplo, los problemas de la forma «Encuentre una forma de calcular la función que nos permita obtener los valores de los argumentos ... con precisión de ... en un tiempo ... utilizando la UPCM ...» son reducibles a esta forma, ya que el problema es claramente equivalente al de encontrar un programa para poner en la máquina en cuestión, y es fácil poner los programas en correspondencia con los enteros positivos de tal manera que dado el número o el programa se puede encontrar fácilmente el otro. *Por el momento, no nos equivocáramos mucho si suponemos que*

entre qué mantener fijo y qué variar.

²⁷Otro punto a remarcar es lo cercano que esta concepción de “iniciativa” está de un concepto de emoción. El foco de la investigación en IA, incluso en la búsqueda de una inteligencia general, siempre fue el de las capacidades cognitivas por sobre las afectivas. Es interesante ver cómo ya Turing había previsto que es una tarea que parece muy difícil de lograr si no se tiene en consideración los estados afectivos y su relación con la cognición. Tanto en IA (Minsky, 2007) como en neurociencias, las emociones están recuperando el espacio de investigación frente a las ciencias “meramente” cognitivas.

todos los problemas son reducibles a esta forma. Será el momento de volver a pensar cuando aparezca algo que obviamente no sea de esta forma. (Cooper & van Leeuwen, 2013; A. M. Turing, 1948, p. 515. El énfasis es mío.)

Así, esencialmente, si se puede encontrar una forma equivalente del problema a esta, es factible escribir un programa que busque una solución automáticamente. Aquí el problema de la interpretación (que más adelante llamo “el problema de la abstracción”) ya cobra un tinte modal, porque Turing sugiere que es un buen principio guía pensar que todos los problemas *pueden* tener una equivalencia en esta forma. Reconectando con lo que planteaba al principio acerca de los modelos, esta es la forma en la que Turing interpreta la actividad central de la práctica de modelar: encontrar un problema equivalente para resolver haciendo explícitos todos los pasos interpretativos entre el problema original y el problema para el cual se puede encontrar la solución con los métodos disponibles. Aquí es donde nuevamente debe entrar en juego la distinción entre la búsqueda en principio y en la práctica de una solución, puesto que recorrer el “espacio de todas las pruebas” en un tiempo de escala humana es imposible, por lo que la interpretación deberá incluir alguna clase de simplificación que haga que el recorrido por el espacio de búsqueda sea factible en una escala de tiempo menor pero que permita encontrar alguna buena solución, al costo de perder la garantía de encontrar la solución óptima.²⁸ Esta es una manera de describir lo que hace el cerebro cuando soluciona problemas, analogizando y descomponiendo dichos problemas hasta encontrar un punto de similitud entre problemas ya resueltos o más simples de ser resueltos. En palabras de Turing:

En lugar de buscar entre los valores de la variable original n se busca entre los valores de otra variable. En la práctica, cuando se resuelven problemas del tipo anterior, *probablemente se aplique alguna “transformación” muy compleja del problema original, que implique la búsqueda a través de distintas variables, algunas más análogas a la original, otras más parecidas a una «búsqueda a través de todas las pruebas».* La investigación futura sobre la inteligencia de las máquinas probablemente se ocupe en gran medida de las “búsquedas” de este tipo. Quizá podamos llamar a estas búsquedas “búsquedas intelectuales”. Podrían definirse muy brevemente como «búsquedas de combinaciones con propiedades particulares realizadas por los cerebros».^{XXXVI} (Cooper & van Leeuwen, 2013, Turing 1948, p. 515. El énfasis es mío.).

Como lo fue para el mismo Turing, es casi inevitable conjeturar alguna conexión entre esta clase de búsqueda y la que lleva a cabo la naturaleza en términos de la exploración de todas las configuraciones genéticas posibles.

Puede ser interesante mencionar otros dos tipos de búsqueda en este contexto. Está

²⁸La referencia a “pruebas” se da porque un ejemplo que introduce es el de una máquina que pueda encontrar automáticamente pruebas del *Principia Matemática* de Russell y Whitehead, máquina que curiosamente fue una de las primeras “inteligencias artificiales” de la mano de Herbert Simon y Allen Newell en 1956. La similitud, como toda buena similitud, es sólo superficial, sin embargo, porque se tratan de dos paradigmas muy distintos de IA.

la búsqueda genética o evolutiva por la que se busca una combinación de genes, cuyo criterio es el valor de supervivencia. El éxito extraordinario de esta búsqueda confirma en cierta medida la idea de que la actividad intelectual consiste principalmente en varios tipos de búsquedas.^{XXXVII} (Cooper & van Leeuwen, 2013, Turing 1948, p. 515.).

El valor de supervivencia o *fitness*, es lo que hace que una solución se considere buena y, por lo tanto, sea más factible de mantenerse constante. Esta analogía con la búsqueda de la selección natural es importante y la exploro con más detalle en secciones siguientes, pero aquí puede se debe notar nuevamente la conexión entre el pensamiento cibernético y el pensamiento de Turing, poniendo de manifiesto la relevancia de las “nuevas máquinas darwinianas” para una comprensión naturalista y mecánica de la naturaleza y de sus fenómenos más complejos.

La otra forma de búsqueda que quiere considerar Turing es la que puede llevar a cabo una comunidad de individuos inteligentes, y que obliga a los miembros de dicha comunidad a estudiar los resultados de las búsquedas realizadas por otros, para incorporarlas en su acervo de recursos para luego, con la iniciativa que caracteriza a los seres curiosos, a seguir buscando problemas y soluciones:

La forma restante de búsqueda es la que me gustaría llamar “búsqueda cultural”. Como he indicado, el hombre aislado no desarrolla ninguna potencia intelectual. Es necesario que esté inmerso en un entorno de otros individuos, cuyas técnicas absorbe durante los primeros veinte años de su vida. Luego, tal vez, puede hacer un poco de investigación por su cuenta y hacer unos pocos descubrimientos que se transmiten a otras personas. *Desde este punto de vista, la búsqueda de nuevas técnicas debe considerarse como realizada por la comunidad humana en su conjunto, en lugar de por individuos.*^{XXXVIII}

De esta manera, para Turing queda claro que lo que si una máquina va a generar un comportamiento inteligente como el del ser humano, debe tratársela como tal, en el sentido en que, si bien es probable que no sea la única manera de lograr dichas capacidades, una de las formas más accesibles es educarla como se educa a un ser humano, modificando (es decir, *organizando*) su estructura “cerebral” por medio de un proceso similar al que de hecho se utiliza con un ser humano. Una capacidad de un ser inteligente, para Turing, es precisamente la de poder explorar un espacio de posibilidades o de soluciones a un problema sin tener que recorrer la totalidad de dicho espacio para encontrar una solución adecuada a dicho problema y actuar en consecuencia.²⁹

Esta mirada tiene múltiples consecuencias para el estudio de los sistemas complejos. Por un lado, nos sugiere pensar que los sistemas complejos realizan algo parecido, en el sentido en que se pueden describir mediante la presencia de un mecanismo que les

²⁹ ¿Habrá estado pensando aquí Turing en lo que puede llegar a hacer aquí una comunidad de máquinas? Haya sido ese el caso o no, es una buena descripción para un sistema complejo.

permite explorar un espacio de posibilidades y encontrar una solución plausible. Dicha solución puede con el tiempo convertirse en un comportamiento fijo, en tanto no tiene que ser aprendido nuevamente ante un estímulo similar. Esto requiere de una mirada modular sobre la estructura y la dinámica de los sistemas complejos que Turing sólo alcanzó a señalar brevemente pero que fue estudiada luego, especialmente por Herbert Simon quien también se vio motivado a llegar a conclusiones similares para los sistemas complejos por el estudio de las capacidades humanas, especialmente en lo que respecta a la inteligencia y la racionalidad, como señalo en el capítulo siguiente.³⁰ Las ideas de Turing y las ideas de Simon pueden combinarse de otra manera, que bajo mi lectura sugiere una clase de *meccanicismo computacional contemporáneo* para el estudio de sistemas complejos que pone énfasis en las ideas de modelo y abstracción, y que hacen al núcleo del capítulo final de esta investigación. Por otro lado, sugiere también la necesidad de aplicar modelos heurísticos para lidiar con sistemas complejos, modelos que muchas veces deben ser aplicados computacionalmente bajo la forma de lo que hoy conocemos como inteligencia artificial, además de los métodos “clásicos” para aplicar simulaciones. Uno de los terrenos en los que Turing vio cómo entraban en juego muchos de estos puntos fue sobre cómo algo tan simple como un juego finito como el ajedrez podía crear un paisaje dinámico extremadamente escabroso de explorar, pese a la “certeza determinista” que las mismas reglas y la estructura del juego le otorgan. Esto es lo que permite una aproximación sencilla, pero que, señala Turing, de mera posibilidad en principio, mientras que en la práctica no se puede llevar a cabo dados los recursos computacionales que exige la explosión de posibilidades que pueden darse y que hacen que una estrategia de búsqueda por fuerza bruta sea infactible:

Tal regla es aplicable en la práctica en el juego del tatetí,³¹ pero en el ajedrez tiene un interés meramente académico. Incluso cuando la regla puede aplicarse, no es muy apropiada para usarla contra un oponente débil, que puede cometer errores que deberían ser explotados. (Turing, 1953; Cooper & van Leeuwen, 2013, p. 628)

El punto sobre el error es similar al que ya había expresado en su tratado sobre la máquina Enigma, en donde un error de diseño —error que no requiere necesariamente intencionalidad, normalmente se trata de “efectos secundarios” productos de intentar satisfacer otras restricciones simultáneamente³²— puede ser utilizado como si fuera un “atajo” por quien

³⁰Esto también incluye a la analogía entre lo que hace factible la búsqueda por selección natural en el mundo de lo vivo y la exploración de un espacio de posibles soluciones cuando se está frente a un problema es uno de los temas centrales en el desarrollo sobre la “Arquitectura de la complejidad” de Herbert H. Simon (1962). Simon extiende las sugerencias de búsqueda de Turing argumentando especialmente a favor de la necesidad de poder encontrar soluciones parciales que puedan usarse como medidores de progreso y, al mismo tiempo, como plataformas estables sobre las que seguir buscando soluciones en un espacio de posibilidades ahora mucho más pequeño. Allí Simon reconoce la similitud de algunas de sus ideas con ciertas sugerencias de Ashby (ver H. A. Simon, 1996, p. 194).

³¹Espero que se me perdone el argentinismo en esta traducción.

³²El lector hará bien en pensar en “propiedades emergentes”. También puede hacerlo en *bugs* o errores

pretende generar una máquina equivalente pero inversa y puede aplicar al caso conocimientos que hacen de dicho atajo uno digno de explorar.

Para sugerir una alternativa que no implique una revisión completa de los árboles de posibilidad que se abren en un partido tras cada jugada, Turing, introduce una versión informal de lo que hoy conocemos como la tesis de Church-Turing, producto de su modelización de una computadora humana como comenté al comienzo de este capítulo:

Si se puede explicar de forma inequívoca en inglés, con la ayuda de los símbolos matemáticos necesarios, cómo debe hacerse un cálculo, siempre es posible programar cualquier computadora digital para que lo haga, siempre que la capacidad de almacenamiento sea adecuada.^{XXXIX} (Turing, 1953; Cooper & van Leeuwen, 2013, p. 628)

Aceptando la validez de esta tesis, es que Turing procede a dar una descripción de reglas posibles (esto es, de un programa de computadora) en este lenguaje regimentado por los símbolos matemáticos que luego puede describir de manera algorítmica para su posterior implementación. Estas reglas surgirán del intento de Turing de hacer explícito el tipo de análisis que un jugador (en este caso, él mismo) realiza sobre el tablero a medida que explora las posibilidades de un juego y servirán precisamente para disminuir el espacio de búsqueda, de la misma manera en la que lo hace para el jugador humano y, en el proceso, generan un *modelo* posible del estado del juego en ese momento con una indicación de cómo desplazarse en el escenario o paisaje del juego antes de que cambie nuevamente. Esta heurística o regla de pulgar que introduce Turing consiste en una serie de reglas condicionales muy simples (de la forma *si, entonces*) y, fundamentalmente, en una función de evaluación que permite darle un valor específico a lo que podríamos llamar el grado de *fitness* o de adecuación de esa jugada, de acuerdo a lo que se sabe que hace a un buen juego, *sin necesidad de calcular la distancia a un juego óptimo* de manera constante (lo que requería explorar el espacio de posibilidades o haber generado otra heurística que pueda lograr encontrar los máximos locales sin la búsqueda, como si fuera de hecho un mejor jugador). Claro que aquí también Turing ve la posibilidad de que la máquina aprenda qué es lo que hace a un buen juego sin necesidad de obligarla a usar una heurística determinada, haciendo uso del azar y aprovechando lo que bajo la perspectiva cartesiana o clásica de cómo entender los alcances de las máquinas sería un error, ya sea de funcionamiento o de diseño; de hecho podría usarse esta nueva clase de máquinas precisamente para generar heurísticas “clásicas” y quizás hasta utilizarlas en otros dominios que compartan ciertas similitudes bajo alguna interpretación adecuada:

En relación con la pregunta acerca de la capacidad de una máquina de ajedrez para aprovecharse de la experiencia, se puede ver que sería muy posible programar la máquina para que pruebe variaciones en su método de juego (por ejemplo, variaciones en el valor de las piezas) y adopte la que dé los resultados más satisfactorios.

de computación, en la ardua tarea de eliminarlos, y en las ventajas de la programación funcional.

Esto podría describirse como “aprendizaje”, aunque no es del todo representativo del aprendizaje tal y como lo conocemos. También sería posible programar la máquina para que busque nuevos tipos de combinaciones en el ajedrez. Si este proyecto produjera resultados bastante nuevos, y también interesantes para el programador, ¿quién debería llevarse el crédito? (Turing, 1953; Cooper & van Leeuwen, 2013, p. 632)

Así, bajo mi lectura, Turing está dando dos respuestas posibles a cómo una extensión de los programas de investigación mecanicistas clásicos pueden responder al desafío de dar cuenta de fenómenos extremadamente complejos como la vida y la inteligencia y al mismo tiempo brindar heurísticas para precisamente indagar sobre la naturaleza de dichos fenómenos, no viéndose obligado a aceptar ninguna clase de entidad o proceso metafísico que trascienda lo que es susceptible de ser investigado científicamente a través de esta clase de procesos computacionales. De hecho no va ser sólo de esta manera que Turing responde a esta dificultad, sino que motivado por la misma pregunta de cómo poder dar cuenta de la presencia de ciertos patrones complejos en la naturaleza a través de procesos elementales mucho más simples, Turing sugirió modelos matemáticos (no computacionales en el sentido de hacer uso explícito de la tesis de Church-Turing) para explicar, por caso, cómo estados inicialmente homogéneos de sustancias podían afectarse mutuamente para dar origen a formas muy sofisticadas. Estos modelos de morfogénesis dieron lugar a toda una familia de modelos *à la* Turing que constituyen un recurso importante en la actualidad para el estudio de formación de patrones e incluso para el diseño de estructuras artificiales (ver sección 6.2).

4.1.4. ¿La ciencia como un juego de imitación?

Antes de concluir esta sección, pretendo brevemente introducir un experimento mental que puede ser una forma ilustrativa de entender esta lectura de Turing y que no es sino es una pequeña variación sobre su juego de imitación, que podríamos considerar como un “Test de Turing para los modelos”. Supongamos que, en lugar de identificar quién es la computadora y quién es el ser humano, el rol del investigador es distinguir entre un fenómeno o una situación experimental y un modelo de dicho fenómeno o experimento. La interfaz del interrogador está cargada con una serie de operaciones que se pueden realizar físicamente sobre el fenómeno, que son efectivamente llevadas a cabo en la cámara en la que se encuentra alojada la situación experimental o directamente en el mundo. El interrogador no puede llevar a cabo él mismo las intervenciones, sólo puede ordenarlas y especificar qué es lo que se debe medir, resultado que le aparece en su interfaz cuando el mismo está disponible. Cualquier intervención que ordena para alguna de las dos “habitaciones” es replicada en la otra, y los resultados sólo se muestran cuando están disponibles para el modelo como para la contraparte física. Es necesario distinguir entre dos clases de operaciones que se pueden realizar. Un conjunto de operaciones lo constituyen las “operaciones normales” que se podrían prever dado el conocimiento de fondo disponible sobre

las intervenciones que normalmente se realizan sobre una situación semejante. Es decir, todas aquellas que están dentro de lo previsible para esa clase de sistema. La otra categoría la constituyen las operaciones “extraordinarias”, que son todas aquellas operaciones que son físicamente factibles de llevarse a cabo sobre la situación experimental. Si luego de realizar un conjunto de operaciones de testeo seleccionadas de las operaciones normales sobre las dos “habitaciones”, el interrogador no puede identificar cuál es la situación física y cuál es el modelo, puede afirmar que está bajo un buen modelo *para el uso pretendido* de dicho modelo. Ahora bien, al realizar intervenciones que no son usuales pero son posibles, el test ya no es de las capacidades del modelo de reemplazar al fenómeno en las situaciones normales, sino que en esa instancia se pone a prueba la capacidad del modelo de servir como herramienta o *proxy* de descubrimiento sobre las propiedades del fenómeno.

4.2. Las máquinas limpias y las máquinas sucias de John von Neumann

El presente informe ofrece una descripción bastante completa del calculador propuesto. No obstante, se recomienda su lectura junto con el “Informe sobre la EDVAC” de J. von Neumann.^{XL}

Alan Turing (1945)
Proposed Electronic Calculator

Son varias las razones por las que John von Neumann merece un lugar especial en cualquier reflexión acerca de los orígenes del estudio de la complejidad y su naturaleza misma. Es más, no creo que sea una exageración decir que el surgimiento del campo de estudio de los sistemas complejos se dio como una respuesta, si es que no una continuación, a la última parte de su obra, que en comparación con su obra más temprana, es mucho más “impura”, en el sentido de que no se trata de matemática abstracta sino más bien matemática aplicada a problemas particulares de otras disciplinas científicas (con todos los problemas que de suyo tiene hacer tal división entre disciplinas —y entre partes de la misma matemática—). De todas formas, von Neumann siempre defendió la necesidad de que la matemática no pierda el vínculo con la realidad y con las ciencias naturales que la hicieron nacer, de forma de evitar que se vuelva algo completamente cerrada sobre sí misma (von Neumann, 1947). Esto deja entrever cierto parecido a las ideas de Turing, que permiten incorporar en el trabajo matemático aspectos “más mundanos”, sin por eso perder el rigor que caracteriza a gran parte del pensamiento matemático. Ahora bien, esa conexión con aspectos más mundanos no hace ni obliga a que la matemática se deba concentrar en casos particulares; al contrario, la búsqueda de la generalidad estaría siempre entre sus objetivos. Pero el acercamiento matemático a algunos problemas netamente complejos y alejados de los dominios usuales, le sugerirían incluso una transformación de la matemática-

tica misma y, *a fortiori*, de la ciencia misma.

En esta sección pretendo concentrarme sobre los aspectos principales que hacen de von Neumann una pieza fundamental en el rompecabezas de la complejidad tal y como se entiende en esta investigación: su participación en la creación de la computadora moderna, la forma en la que el estudio de los autómatas artificiales podían iluminar el estudio de los autómatas naturales, y especialmente su demostración matemática de que es posible diseñar una máquina que produzca copias de sí misma. Claro que sus contribuciones al estudio de la complejidad no se reducen a ellas; habría que destacar especialmente las relacionadas a la creación de la Teoría de Juegos para su aplicación en economía —y que hoy no sólo se usa en dicha disciplina sino que representa un campo muy fértil en sistemas complejos—. Ahora bien, quizás una de sus contribuciones más importantes se encuentra en los aspectos netamente metodológicos, ya que permiten ver el beneficio epistémico que puede representar el “traslado” de modelos y técnicas de un campo a otro.³³ Quizás el avance más significativo logrado mediante esta metodología es la de probar la equivalencia entre las formulaciones de la mecánica cuántica en términos de matrices y en términos de funciones de onda como casos particulares de una misma estructura matemática más general. Varios comentadores de su obra y personas que lo conocieron personalmente han reconocido esta habilidad como una de sus características fundamentales a la hora de hacer ciencia, incluso al punto de poder convertir mentalmente un problema científico en un problema lógico, y luego volver a traducirlo al lenguaje del dominio original, o trasladarlo a un nuevo dominio. En palabras de Freeman Dyson:

El don único de Johnny como matemático era transformar los problemas de todas las áreas de las matemáticas en problemas de lógica. Era capaz de ver intuitivamente la esencia lógica de los problemas y luego utilizar las sencillas reglas de la lógica para resolverlos

(Dyson, 2013, p. 254). Es importante notar que esto es un método de trabajo. Así, incluso en los casos en los que se esté trabajando sobre un problema exclusivamente matemático, no se sugiere una reducción de la matemática a la lógica. Al contrario, la lógica no es más que una de las tantas partes de la matemática y lo que señala Dyson acerca de la capacidad de von Neumann de identificar “la esencia lógica de los problemas” consiste en una metodología de trabajo que probablemente haya obtenido tras su estrecho vínculo con David Hilbert y su programa formalista para la fundamentación de la matemática. No es aquí el lugar para recuperar dicha discusión, ni el profundo impacto que la llamada crisis de fundamentos en matemática tuvo en von Neumann —que incluyó su abandono total de la lógica matemática como campo de trabajo tras los resultados de incompletitud

³³Recuerdo aquí al lector de la importancia que la cibernética y la TGS le había dado a ver cómo tanto distintos modelos de un mismo fenómeno como de distintos fenómenos estaban relacionados entre sí. Como elaboro tanto en este capítulo como los que le siguen, creo que esta es una de las contribuciones epistémicas fundamentales de las ciencias de la complejidad.

de Gödel—; sin embargo sí deseo rescatar algo del rol que los axiomas tenían para Hilbert ya que consisten en una de las posibles fuentes de la forma de trabajo que caracterizaría a von Neumann, tanto cuando su resultado era una clara deducción rigurosa de una serie de axiomas postulados como cuando dicho método funcionaba como una heurística para guiar la investigación en un campo nuevo.³⁴ Hilbert siempre soñó con una forma muy organizada del conocimiento, según la cual todos los conceptos básicos de una disciplina podrían tener su lugar fundamental y el resto de los conceptos deberían ser deducidos de ellos de manera rigurosa. La totalidad de esas conexiones representarían la teoría de un campo de conocimiento, su estructura conceptual:

Cuando recopilamos los hechos de un determinado campo de conocimiento más o menos amplio, pronto nos damos cuenta de que estos hechos son susceptibles de un orden. Este orden se realiza siempre con la ayuda de un determinado marco conceptual [*Fachwerk von Begriffen*], de manera que un concepto de este marco corresponde al objeto individual del campo de conocimiento y una relación lógica entre los conceptos corresponde a cada hecho dentro del campo de conocimiento. El marco conceptual no es otra cosa que la teoría del campo del conocimiento.^{XLI} (Hilbert, 1917, p. 405)

De Hilbert, von Neumann heredó la visión de la matematización de un campo como el verdadero signo de madurez de dicha ciencia, aunque contrario a su visión de juventud en el que la pureza formal era un requisito fundamental como lo era para Hilbert, la manera en la que dicha matematización podría llevarse a cabo pasaría mucho más por la posibilidad de formar modelos matemáticos de fenómenos que pudieran ser la forma de transportar conocimiento de una disciplina a la otra, y así tener un rol más bien heurístico en tanto puedan ser utilizados como una herramienta de descubrimiento sin necesidad de ser en esa instancia rigurosos con el procedimiento lógico de justificación.³⁵ De esta manera, podemos comparar a Hilbert siendo mucho más cauteloso con el momento en el que una disciplina se vuelve parte de la matemática, incluso de manera indirecta, con la sugerencia de von Neumann de interpretar a la ciencia como productora de modelos. Compárense estas dos muy distintas concepciones del rol de la matemática en la ciencia con respecto a su rol en la epistemología:

³⁴Como se podrá apreciar más adelante, incluso en esta misma sección, esta es otra de las caras que ha tenido la discusión acerca de la reducción y la emergencia, que es uno de los problemas filosóficos que la complejidad puso de nuevo en el escenario central, en particular sobre cómo afecta a una metodología de investigación en este campo.

³⁵Lo mismo sucedería *dentro* de la matemática misma, especialmente de la mano de la posibilidad de obtener soluciones numéricas que se podrían usar como una heurística para encontrar propiedades generales de conjuntos de soluciones: “muchas ramas de las matemáticas puras y aplicadas tienen gran necesidad de instrumentos computacionales para romper el actual estancamiento creado por el fracaso del enfoque puramente analítico de los problemas no lineales. Los dispositivos de computación de alta velocidad realmente eficientes pueden, en el campo de las ecuaciones diferenciales parciales no lineales, así como en muchos otros campos, a los que ahora es difícil o se les niega por completo el acceso, proporcionarnos esas pistas heurísticas que se necesitan en todas las partes de las matemáticas para un verdadero progreso (Goldstine & von Neumann, 1945/1963, p. 320)”.

Creo que todo lo que puede ser objeto del pensamiento científico, en cuanto está maduro para la formación de una teoría, es presa del método axiomático y, por tanto, indirectamente de las matemáticas. Al avanzar hacia capas cada vez más profundas de axiomas en el sentido descrito anteriormente también obtenemos una visión cada vez más profunda de la esencia del propio pensamiento científico y somos cada vez más conscientes de la unidad de nuestro conocimiento. A la señal del método axiomático, las matemáticas parecen ser llamadas a desempeñar un papel protagónico en la ciencia en general.^{XLII}. (Hilbert, 1917, p. 415)

Para empezar, hay que insistir en una afirmación que seguro que ya han oído antes, pero que hay que repetir una y otra vez. Se trata de que las ciencias no tratan de explicar, apenas tratan de interpretar, sino que principalmente hacen modelos. Por modelo se entiende una construcción matemática que, con el añadido de ciertas interpretaciones verbales,³⁶ describe los fenómenos observados. La justificación de tal construcción matemática es única y precisamente que se espera que funcione, es decir, que describa correctamente los fenómenos de un ámbito razonablemente amplio. Además, debe satisfacer ciertos criterios estéticos, es decir, en relación con lo que describe, debe ser bastante simple.^{XLIII} (von Neumann, 1955, p. 158)

Ya en la década de 1940, en los contextos científicos se podía notar la tensión entre una concepción “pura”, y en última instancia justificacionista, del conocimiento como la que se proponía en muchos círculos filosóficos, y una concepción más bien “sucía” en la que la matemática puede cumplir un rol heurístico, uno de soporte de descubrimiento, que funciona en paralelo al proyecto integrador que busca mostrar la relación entre distintos fenómenos por medio de un modelo “más general” que pueda integrar dichos fenómenos como casos límites o instancias particulares.³⁷ De hecho, es precisamente esto lo que logró con su formulación de la mecánica cuántica en términos de espacios de Hilbert, que mostró la equivalencia de la formulación matricial de Heisenberg con la ondulatoria de Schrödinger. Algo similar ocurriría con la teoría de los juegos, que podría aplicarse a distintas clases de juegos. Es interesante notar aquí otra posible fuerte influencia que von Neumann podría haber recibido de Zermelo, quien en los años 1920 se encontraba cercano al grupo de Hilbert, y que involucra al ajedrez. Zermelo fue uno de los primeros en mostrar como un área bastante abstracta de la matemática podía ser utilizada para explorar elementos comunes en juegos completamente finitos y deterministas, dejando de lado nociones subjetivas o psicológicas que normalmente hubieran sido requeridas cuando algo de tan complejidad se analizaba, en tanto siempre se pensó que dependían de alguna propiedad mental que no podía ser analizada matemáticamente —y mucho menos podrían serlo por medio de una máquina—.

³⁶Conocidas en algunos círculos filosóficos como «reglas de correspondencia»

³⁷Esta forma de interpretar a los modelos, en particular, y al conocimiento científico, en general, es característica de lo que se podría denominar la “filosofía de la ciencia centrada en modelos” que comenzó a tomar impulso hacia mediados de la década de 1980, de la mano del giro a las prácticas científicas (Gelfert, 2016).

Las siguientes consideraciones son independientes de las reglas especiales del ajedrez y se aplican, en principio, a todos los juegos de razón similares en los que dos oponentes se enfrentan excluyendo el azar; sin embargo, en aras de la claridad, el ajedrez se ejemplificará aquí como el más conocido de todos estos juegos. Tampoco se trata de ningún método de juego práctico, sino simplemente de responder a la pregunta: ¿se puede determinar o al menos definir matemáticamente-objetivamente el valor de cualquier posición posible durante la partida para una de las partes que juegan, así como la mejor jugada posible, sin tener que hacer referencia a otras más subjetivas-psicológicas como la del “jugador perfecto” y similares? [...] Pero si tal evaluación de la posición es al menos teóricamente concebible y tiene algún sentido en otros casos, en los que la ejecución exacta del análisis encuentra un obstáculo prácticamente insuperable en la inmensa complicación de las posibles continuaciones, me parece que merece la pena investigar [...] El método utilizado en lo que sigue para resolver el problema está tomado de la “teoría de conjuntos” y del “cálculo lógico” y demuestra la fecundidad de estas disciplinas matemáticas en un caso en el que se trata casi exclusivamente de agregados finitos.^{XLIV} (Zermelo, 1913, p. 501)

Como veremos, este punto sobre “evaluar una posición” incluso en aquellos casos en los que las posibles continuaciones del juego hagan a la tarea prácticamente imposible, será una hilo constante en el estudio de sistemas complejos, en tanto se enfrenta con la necesidad de hacer constantes evaluaciones locales con conocimiento limitado acerca del estado global del sistema.³⁸ Cuando von Neumann, en colaboración con Oskar Morgenstern, decidió extender sus resultados originales sobre teoría de juegos para explicar el comportamiento económico de los individuos, estaba muy consciente de los límites que podía tener una teoría sobre un fenómeno tan complejo como la economía, pero nunca dudó el aporte que la matematización del campo podría llegar a aportar a nuestro conocimiento de los fenómenos económicos. Ahora bien, el primer punto es reconocer la complejidad de la tarea y los límites que ello impone a la teorización:

En primer lugar, debemos ser conscientes de que actualmente no existe ningún sistema universal de teoría económica y que, si alguna vez se desarrolla uno, muy probablemente no será durante nuestra vida. La razón de esto es simplemente que la economía es una ciencia demasiado difícil para permitir su construcción rápidamente, especialmente en vista del conocimiento muy limitado y la descripción imperfecta de los hechos con los que los economistas están tratando. Sólo aquellos que no aprecian esta condición pueden intentar la construcción de sistemas universales. Incluso en ciencias mucho más avanzadas que la economía, como la física, no existe actualmente ningún sistema universal. (von Neumann & Morgenstern, 1944, p. 2)

Para llevar a cabo la tarea una serie de pasos serían fundamentales: (1) reconocer los

³⁸Y, como ya vimos, es la manera en la que Turing comenzó a reflexionar sobre una de las formas posibles para divisar un algoritmo para poder automatizar el juego del ajedrez, a manera de una heurística cuyo rol se puede interpretar como el de proveer una *abstracción* del estado del juego en un momento y recomendar una acción rápida (recordemos la expresión en inglés *a rule of thumb* para proceder hacia una mejor posición en el juego).

elementos y problemas fundamentales del comportamiento económico, (2) desarrollar los métodos matemáticos necesarios, y (3) la obtención de datos empíricos. (1) es condición de posibilidad ya que según creen los autores “no tiene sentido utilizar métodos exactos donde no hay claridad en los conceptos y cuestiones a los que se aplicarán. En consecuencia la tarea inicial es la de clarificar el conocimiento del tema por medio de un trabajo descriptivo más profundo” (von Neumann & Morgenstern, 1944, p. 4). Esto está en clara consonancia con el método axiomático de Hilbert y que continuaría siendo una heurística para el abordaje de los problemas científicos para von Neumann. De esta manera, la eliminación de los aspectos subjetivos, y por lo tanto de la crítica de que la matemática no podría aplicarse a ciencias sociales dada la imposibilidad de predecir cómo se comportaría un ser humano, es una de las formas en la que el método funcionará, tomando al comportamiento como un axioma, cuyos orígenes no deberán ser descriptos sino, más bien, considerados como hechos fundamentales del fenómeno.³⁹ Con respecto a (2), von Neumann y Morgenstern consideran que si bien es posible que los métodos matemáticos que caracterizan a la física y a otras ciencias “más avanzada” (es decir, más matematizadas) puedan ser aplicados al menos en algunos contextos particulares en los que las similitudes del comportamiento de estos fenómenos lo permitan, es de esperar que un verdadero avance sólo pueda lograrse mediante el desarrollo de nuevas técnicas y por lo tanto de la creación de nuevas áreas de investigación de la matemática misma. La analogía con la invención del cálculo y su inseparabilidad con el avance de la mecánica es paradigmática.

La importancia de los fenómenos sociales, la riqueza y la multiplicidad de sus manifestaciones, y la complejidad de su estructura, son por lo menos iguales a las de la física. Por lo tanto, cabe esperar o temer que sean necesarios descubrimientos matemáticos de una talla comparable a la del cálculo para obtener un éxito decisivo en este campo. [...] *A fortiori* es poco probable que una mera repetición de los trucos que tan bien nos han servido en la física sirva también para los fenómenos sociales. La probabilidad es muy pequeña, ya que se demostrará que en nuestras discusiones nos encontramos con algunos problemas matemáticos que son muy diferentes de los que se dan en la ciencia física. (von Neumann & Morgenstern, 1944, p. 4)

Uno de los requisitos será que la idealización a la que se recurra para simplificar el abordaje del problema no elimine la complejidad del mismo. Así, las capacidades que los agentes deben tener en una situación en la que hay sólo un agente involucrado no son las mismas que en una situación de dos o más participantes. Además, las interacciones que estos puedan tener determinarán el nivel de complejidad que la descripción de un agente deberá

³⁹En el lenguaje del capítulo final, diremos que los fenómenos se entienden abstracta y funcionalmente, sin importar el substrato. La teorización siguiente consistirá en seguir subiendo en los *niveles de abstracción*, reflejando la conexión entre los nuevos elementos básicos y los anteriores. Es importante notar aquí que la aplicación de este método axiomático de investigación no implica que la teoría vaya a ser formulada en términos axiomáticos, ni que los mismos correspondan, si bien pueden hacerlo. Como veremos más adelante, esta metodología de trabajo corresponde a una suerte de descomposición mecánica (pero ahora realizada sobre una entidad abstracta).

tener para que los resultados puedan ser generalizados. Apoyándose nuevamente en la analogía con la física, von Neumann y Morgenstern recuerdan la gran facilidad que los métodos probabilísticos y estadísticos tienen en física, en donde un gas con un increíble número de partículas, todas sujetas a las leyes clásicas de la mecánica, pueden tratarse gracias a esos métodos de una manera altamente precisa y simple de calcular pero un sistema mecánico con más de dos elementos es realmente difícil de tratar, dadas las influencias recíprocas. (Recordemos aquí el problema de los 3 cuerpos y las reflexiones de Weaver acerca del espacio intermedio de la complejidad organizada). Ahora bien, el cálculo puede ser extremadamente difícil pero es precisamente el conocimiento de todas las condiciones que afectan a ese pequeño número de cuerpos interactuando lo que posibilita la aplicación de los métodos estadísticos, pero aquí es donde la analogía enfrenta sus límites:

Esta analogía, sin embargo, está lejos de ser perfecta para nuestro problema. La teoría de la mecánica para 2, 3, 4, ... cuerpos es bien conocida, y en su forma teórica general (a diferencia de su forma especial y computacional) es el fundamento de la teoría estadística para los números más grandes. Para la economía de los intercambios sociales, es decir, para los “juegos de estrategia” equivalentes, faltaba hasta ahora la teoría de los 2, 3, 4, ... participantes. Es esta necesidad la que se pretendía establecer en nuestras discusiones anteriores y que nuestras investigaciones posteriores se empeñarán en atender. En otras palabras, sólo después de haber desarrollado satisfactoriamente la teoría para un número moderado de participantes será posible decidir si un número extremadamente grande de participantes simplifica la situación. Repitémoslo: Compartimos la esperanza —sobre todo por la analogía mencionada en otros campos— de que tales simplificaciones se produzcan efectivamente. (von Neumann & Morgenstern, 1944, p. 14)

A esta altura de la investigación, la analogía les permite tener confianza en que la aplicación de los métodos estadísticos podría ser suficiente si es que esos métodos están soportados según una teoría que describa bien el fenómeno a medida que se aumenta el número de elementos que se considera. Sin entrar en los detalles de los alcances de la teoría de juegos para una teoría del comportamiento a macro nivel de los fenómenos económicos, que es algo que los autores están muy conscientes de que sería extremadamente prematuro hacer, a esta altura de la investigación todavía no identifican la diferencia que el fenómeno conlleva a medida que aumenta la escala en la que se consideran las interacciones. Es decir, si las interacciones fueran sencillas —tal y como se presupone en la teoría en tanto se fuerza a que así sea mediante las idealizaciones que introducen, de la misma manera en la que en física estadística se simplifican las colisiones entre las partículas como perfectamente elásticas— el fenómeno económico a macro escala podría aplicarse desde esta teoría. El problema es que a medida que se introducen más elementos, la complejidad del modelo no escala de la misma manera en que lo hace el fenómeno, por lo que la interpretación del modelo deja de ser fehaciente.⁴⁰ Ahora bien, ellos sí son conscientes de que la diferen-

⁴⁰Este va a ser el problema fundamental de las explicaciones *mecánicas* o *mecanicistas* de sistemas com-

cia que existe entre los fenómenos que se pretenden estudiar en ciencias sociales como la economía y los que estudia la física obliga a pensar más en términos más cercanos a la teoría de conjuntos y la combinatoria, es decir en donde los componentes individuales se pueden desagregar más fácilmente y cuyas interacciones se pueden describir en términos probabilísticos.

Todas estas consideraciones ilustran una vez más la complejidad de formas teóricas que cabe esperar en la teoría social. Sólo nuestro análisis estático exigió la creación de un mecanismo conceptual y formal muy diferente de los utilizados, por ejemplo, en la física matemática. Así, la visión convencional de una solución como un número o un agregado de números definido de forma única se consideró demasiado limitada para nuestros fines, a pesar de sus éxitos en otros campos. El énfasis parece desplazarse más hacia la combinatoria y la teoría de conjuntos, y alejarse del algoritmo de ecuaciones diferenciales que domina la física matemática. (von Neumann & Morgenstern, 1944, p. 45)

Aquí es interesante notar el uso del término “mecanismo conceptual y formal” y la insistencia en que la teoría que proponen es más bien estática, por más que incluya elementos dinámicos. Bajo esta mirada, una teoría es estática si su objetivo es dar cuenta de los estados de equilibrio de un sistema y no dar precisiones sobre cómo el sistema llegó a ese estado, y mucho menos puede dar cuenta de la manera en la que un sistema puede permanecer en “equilibrios dinámicos” o fuera de equilibrio. Si bien consideran que una teoría dinámica representa el ideal, el primer paso es obtener una teoría estática que sirva de fundamentos para aquella. Aunque sean conscientes de la complejidad del fenómeno que están estudiando y de la dificultad que su estudio conlleva, así como de la posibilidad de tener que generar nuevas áreas de investigación matemática para poder lidiar con estas dificultades teóricas, no creen que dicha dificultad traiga aparejado el señalamiento de un límite en la forma clásica de entender a las teorías de dicho campo como una serie de proposiciones que se siguen lógicamente de un grupo de axiomas. Sí creo que se ven obligados a introducir un elemento abstracto en la teoría, del que se podría decir que funciona como un objetivo particular sobre el que versarán los axiomas y que es el juego de dos individuos; individuos que también están modelados de manera tal que puedan dar cuenta del comportamiento económico sin apelar a su constitución subjetiva.⁴¹ Otra forma de ver a este “mecanismo conceptual y formal” en acción, y que constituye el aporte crucial de la teoría de los juegos es la posibilidad de utilizar la misma descripción del juego básico

plejos, especialmente a medida que se agregan partes que pueden interactuar causalmente con muchos de los otros componentes.

⁴¹Aquí es interesante notar una tensión entre esta forma clásica de ver a las teorías y la necesidad de introducir elementos en ella que en lugar de respetar la “forma lógica” deban atender más a los elementos que se están modelando, y no tanto a la rigurosidad deductiva. Insistiré en este punto en los capítulos siguientes, en donde la problemática epistemológica alrededor del modelado es central y nuevamente se puede observar la tensión entre la similitud de los modelos con el fenómeno y la necesidad de ajuste teórico más bien abstracto por otro lado.

para los juegos cada vez más grandes (i.e. con mayor cantidad de jugadores):

El juego en cuestión se consideró originalmente como un hecho aislado, pero luego se sacó de este aislamiento y se incorporó, sin modificaciones, en todas las formas posibles a un juego mayor. Este orden de ideas no es ajeno a las ciencias naturales, en particular a la mecánica. El primer punto de vista corresponde al análisis de los llamados sistemas cerrados, el segundo a su incrustación, sin interacción, en todos los posibles sistemas cerrados mayores. La importancia metodológica de este procedimiento ha sido destacada en varias ocasiones en la literatura moderna de la física teórica, en particular en el análisis de la estructura de la Mecánica Cuántica. Es notable que se haya podido utilizar tan esencialmente en nuestra presente investigación. (von Neumann & Morgenstern, 1944, pp. 400-401)

Este procedimiento no es otra cosa que un reduccionismo mecánico, según el cual se identifican las propiedades de una entidad, incluyendo su comportamiento al interactuar con otra unidad, y así sucesivamente reduciendo *agregativamente* los casos en los que hay un mayor número de entidades al caso más simple. La razón por la que en el caso idealizado que analizan en la teoría de juegos esto es posible es porque la entidad básica de la que parten los autores es lo suficientemente sofisticada para incorporar elementos que funcionan para hacer posible la reducción futura. En este caso, la complejidad dinámica que presenta la situación bajo análisis es subsumida a un problema de comportamiento racional sobre el cual se elaborará una estructura organizacional que depende de las reglas de interacción que comparten los agentes involucrados—reglas que, por lo tanto, *crean* la misma estructura organizacional. Si bien dicha estructura es dinámica, la dinámica está subsumida o interpretada como cambios en las reglas que devienen en la necesidad de que los agentes tengan estados informacionales que son acerca de la estructura organizacional. En última instancia, pues, lo que permite el reduccionismo en esta teoría estática es el supuesto de racionalidad basada en estados informacionales que codifican estructuralmente las interacciones del sistema. Aunque von Neumann no lo indica explícitamente, la propuesta de la teoría de juegos consiste en simplificar la situación del comportamiento económico a tal punto en el que sea factible describir la solución (es decir, la estrategia) de la misma manera en la que se especificaría la codificación de una máquina de Turing cuyos valores de entrada representan el estado del mundo y cuya salidas son nuevos estados del mundo en el que el objetivo del agente que “toma decisiones” se cumple. El objetivo, normalmente, es el de maximizar la utilidad, y si bien en contextos económicos la cantidad de dinero disponible para el agente suele ser la utilidad a maximizar, esta idea de maximizar el valor de una función especificada en términos de un objetivo particular para un agente en una situación determinada será una de las piedras de toque del desarrollo de la inteligencia artificial. Como ya mencioné antes, Turing también llegó a esta conclusión desde el caso del ajedrez. Así, la eliminación de todo aspecto subjetivo en los agentes o jugadores viene acompañado de la posibilidad de cambiar el foco del análisis y preguntarse por cómo programar a una máquina para que juegue el juego de manera

óptima. Pero cuando la computación llegó a la vida de von Neumann de una manera más concreta que sus anteriores incursiones teóricas, los juegos pasarían a un segundo plano, porque la computadora parecía permitir un mejor tratamiento de cuestiones que no eran tan susceptibles de un tratamiento matemático más bien directo como lo habían sido los juegos de habilidad y, quizás, los juegos de azar. Curiosamente la dirección contraria a la de Babbage, quien pensó en los juegos algo más tarde en su vida como una posibilidad de aplicar “el poder de los principios a los que había llegado” mediante un elemento que, al menos a *prima facie*, no fueran tan matemáticos:

Después de muchas consideraciones, elegí para mi prueba la invención de una máquina que fuera capaz de jugar con éxito un juego de habilidad puramente intelectual; como el tatetí, las damas, el ajedrez, etc. Intenté averiguar la opinión de personas de todas las clases de vida y edades, si pensaban que se requería la razón humana para jugar a juegos de habilidad. La respuesta fue casi siempre afirmativa. Algunos apoyaron este punto de vista observando que si fuera de otra manera, entonces un autómata podría jugar tales juegos. Algunos de los que tenían un conocimiento considerable de la ciencia matemática admitían la posibilidad de que una maquinaria fuera capaz de realizar tal trabajo, pero negaban rotundamente la posibilidad de crear tal maquinaria a causa de las innumerables combinaciones que incluían incluso los juegos más simples. En la primera parte de mi investigación llegué pronto a la demostración de que todo juego de habilidad es susceptible de ser jugado por un autómata.^{XLV}

En cuanto exista un motor analítico, éste guiará necesariamente el curso futuro de la ciencia. Cada vez que se busque un resultado con su ayuda, se planteará la pregunta: ¿con qué método de cálculo puede llegar la máquina a esos resultados en el menor tiempo posible?^{XLVI} (Babbage, 1864, p. 137)

4.2.1. ¿Una computadora para la computadora?

Sin duda una de las influencias más grandes para von Neumann en términos de la importancia teórica de la computación son los resultados de Turing, los que ya hacia 1938 conocía perfectamente. Apreciaba mucho la capacidad de Turing e incluso le ofreció un puesto como asistente en el Instituto de Estudios Avanzados en Princeton a dónde Turing se había dirigido para realizar su doctorado junto a Alonso Church. (Turing rechazó la oferta para volver al puesto de investigación asociado a su beca en Cambridge, aunque la guerra lo llevaría finalmente hacia otro camino). Aunque otra influencia no menor es la de Rudolf Ortway, quien fuera no sólo amigo de la familia sino un importante físico en la historia de la ciencia en la Hungría natal de von Neumann, con quien mantuvo una interesante correspondencia. Es en una de estas cartas que Ortway introduce la posibilidad de estudiar al cerebro humano de una manera similar a la que se usa para diseñar computadoras “de válvulas electrónicas” ya que pese a la diferencia entre los dos, se podría asumir que el comportamiento del cerebro es producido por entidades con propiedades básicas relativamente sencillas, al punto que podrían ser utilizadas para proponer una teoría sim-

ple sobre su funcionamiento, algo con lo que von Neumann acuerda completamente (cf. Aspray, 1990). En marzo de 1939, von Neumann responde a una carta de Ortway en la que se había introducido el tema de la conexión entre los fenómenos mentales y el cerebro. En dicha carta demuestra su interés por la anatomía del cerebro y al remarcar sobre la conexión entre su estudio y la mecánica cuántica, introduce sus impresiones acerca de las consecuencias que la complejidad de la naturaleza misma de los problemas de la vida podrían traer para nuestra posibilidad de teorizar acerca de ellos, tal y como pretender conocer la posición y la velocidad con precisiones absolutas es una imposibilidad de la naturaleza de dichas partículas:

Lo que usted escribe sobre la biología y la teoría cuántica me interesa mucho y simpatizo mucho con ello. Sus observaciones sobre la anatomía del cerebro son especialmente interesantes. También creo que hay que tomar en serio esta posibilidad: que los procesos esencialmente relacionados con la vida no pueden geometrizar, no pueden describirse espacialmente. Que la posición espacial de nuestros cuerpos físicos, y dentro de ella, la localización geométrica de todos los procesos, es posible sólo de forma aproximada. Y si empujamos esta localización más allá de un cierto punto (que a su vez se define sólo con cierta vaguedad, como se muestra en el ejemplo siguiente) entonces aparecen dificultades, pseudoproblemas y contradicciones, al igual que en la relatividad especial cuando se observa la simultaneidad de eventos distantes, o en la mecánica cuántica cuando se intenta medir p y q al mismo tiempo. (Von Neumann a Ortway, 29 de marzo de 1939; (J. V. Neumann, 2005, p. 201)

Si bien von Neumann aquí no afirma —ni niega— que fenómenos propiamente cuánticos puedan estar involucrados en los procesos de la vida, su afirmación parece ir más por el lado de las netas dificultades que su estudio presenta, siendo al menos en parte similares a los de la mecánica cuántica, por lo que se podría considerar una suerte de límite o cota máxima para nuestra capacidad de conocerlos, al menos bajo la usual lectura de conocimiento a la que un demonio laplaciano nos habría acostumbrado. Aquí, por lo tanto, se puede hacer la equiparación entre “explicaciones espaciales” con explicaciones causales, es decir, aquellas que pueden mapear todos los elementos y sus intersecciones involucradas en la aparición de un fenómeno particular. Von Neumann continúa la carta con una *nota bene* expresando sus dudas sobre el recurso a un observador en la mecánica cuántica, en tanto se trataría de un recurso explicativo que no proviene de la misma teoría:

N.B. Desde el año pasado he estado pensando mucho en la naturaleza del “observador” en la mecánica cuántica, que es una especie de concepto auxiliar, casi psicológico. Creo que sé cómo describirlo de manera abstracta, despojado de sus complicaciones pseudopsicológicas, y esta descripción da algunas ideas bastante convenientes sobre cómo sería posible describir los procesos intelectuales (por tanto, los que están esencialmente relacionados con la vida) de manera no geométrica (sin localizarlos espacialmente). (Von Neumann a Ortway, 29 de marzo de 1939 (J. V. Neumann, 2005, p. 201)

Considerando el momento en el que von Neumann escribe estas líneas es probable que la referencia a la descripción de “procesos intelectuales” sin hacer uso de nociones “pseudopsicológicas” vayan de la mano con la operacionalización de las complicaciones introducidas por la subjetividad de los agentes económicos por medio del concepto de racionalidad en la Teoría de los Juegos, tal y como describí muy brevemente en la subsección anterior. De todas formas también es posible rastrear una conexión entre estas ideas de descripciones no-psicologistas para los procesos intelectuales con su sugerencia de la posibilidad de automatizar el descubrimiento científico, aunque en su teoría de autómatas, von Neumann estará mucho más enfocado en su capacidad para servir como una herramienta teórica para el trabajo con sistemas complejos como el cerebro humano que en el objetivo de crear una Inteligencia Artificial, como fue más la preocupación de Turing. De todas maneras, su interés en el funcionamiento del cerebro estaba doblemente motivado. Por un lado por ser un caso prototípico de las dificultades para proveer explicaciones de los procesos biológicos, y por otro porque podrían servir para eliminar la necesidad de introducir una “consciencia” para resolver algunos problemas en la interpretación de la mecánica cuántica. En su carta a Ortvay, von Neumann continúa pidiéndole alguna referencia bibliográfica sobre la anatomía del cerebro y al mismo tiempo especula sobre la necesidad de incorporar un punto de vista teleológico en las explicaciones biológicas, de la misma manera en la que pronto la cibernética las sugeriría e intentaría nuevamente darles un rol científico:

Estaría muy interesado en sus posteriores reflexiones sobre el paralelismo psicofísico. Por cierto, ¿hay alguna literatura anatómica cerebral útil desde este punto de vista? ¿No parece que el funcionamiento de los músculos, o particularmente la tendencia del cuerpo a reparar lesiones o intervenciones quirúrgicas, apunten a algo así? que es difícil describir espacialmente lo que ocurre en realidad, pero que tal vez sea más fácil hacerlo sobre la base de algo más, de algún postulado teleológico, por ejemplo? Sin embargo, creo que un enfoque teleológico también es apenas una mala aproximación. Como muestra el ejemplo de la teoría de la transformación [en] mecánica cuántica, también existen otros esquemas no espaciales. (Von Neumann a Ortvay, 29 de marzo de 1939 (J. V. Neumann, 2005, p. 202)

En cartas subsiguientes, Ortvay es mucho más explícito en conectar la estrategia de modelización de la teoría de los juegos, tal y como se la había concebido antes de la publicación del libro junto a Morgenstern, para atacar matemáticamente el problema de la comunicación entre las neuronas y eventualmente poder describir el comportamiento del cerebro desde este punto básico:

Una vez más he leído su trabajo sobre los juegos y sería interesante que sus nuevos resultados sean publicados, preferentemente de una manera popular. Me gustó mucho su trabajo en el momento, y me dio esperanza de que tal vez Ud. pueda tener éxito en formular el problema del intercambio [*switching*] de las células nerviosas. [...] Este modelo podría ser parecido a un conmutador telefónico automático; hay, sin

embargo, un cambio en las conexiones después de cada comunicación. (Ortvay a von Neumann, 29 de enero de 1941)

Es interesante notar cómo, ya casi en una manera cibernética, el problema es analogado a un problema de comunicación y cómo efectivamente utilizar las conexiones entre elementos para poder crear estructuras más complejas, que tengan capacidades de realizar procesos que de alguna manera “superen” las limitaciones de sus partes físicas trabajando en conjunto. En otra carta escrita dos semanas después, Ortvay menciona a von Neumann directamente la importancia de notar los puntos en común que hacen que se pueda hablar de una “organización” similar en procesos que tienen elementos cuya naturaleza física es distinta, y las posibles ventajas de una teoría que describa formas posibles de organizaciones:

Estos días todos están hablando acerca de organización y totalidad. Las máquinas de computar de hoy, los conmutadores telefónicos automáticos, el equipamiento de alto voltaje tal como los transformadores en cascada, los equipos transmisores y receptores de radio, e incluso las plantas industriales o las oficinas son ejemplos técnicos de tales organizaciones. Me parece que hay un elemento común a todas estas organizaciones que puede ser la base para un axioma [...]. Creo que una vez que sea posible identificar claramente los elementos esenciales de una organización como éstas, nos permitiría una visión general de las formas posibles de organización. (Ortvay a von Neumann, 16 de febrero de 1941)

Dos cosas sucederían para que von Neumann finalmente se dedique al problema señalado por Ortvay ya en 1939. Su involucramiento en el proyecto Manhattan y la solución de parte del problema de las conexiones del cerebro de la mano de Warren McCulloch y Walter Pitts, dos cosas que sucederían en 1943.

4.2.2. Las primeras redes neuronales artificiales

Estoy pensando en algo mucho más importante que las bombas.
¡Estoy pensando en las computadoras!

John von Neumann

El proyecto Manhattan y su resultado más importante —la bomba atómica— cambiaron el mundo radicalmente, pero más allá de las consecuencias económicas y culturales que trajo el inicio de la era atómica, las principales consecuencias fueron sobre y gracias a la ciencia, por lo que representa un objeto de estudio sin precedentes para la comprensión del interjuego entre los múltiples aspectos presentes en toda empresa científica, especialmente cuando se realiza a gran escala. El comienzo de lo que se conoce como *Big Science*, proyectos que involucran grandes cantidades de personas en distintos roles y especialmente la intervención de los gobiernos tanto estratégica como económicamente para fi-

nanciar y controlar esta empresa, se pueden rastrear al proyecto Manhattan y a una de sus condiciones de posibilidad, los distintos ciclotrones que aparecieron en particular de la mano de Ernest Lawrence durante la década de 1930 y no sólo serían usados para obtener el uranio fisible sino que permitirían el descubrimiento del plutonio en 1940. De hecho el Radiation Laboratory que dirigió Lawrence desde 1931 —y actualmente lleva su nombre, como el Lawrence Berkeley National Laboratory, operado por la Universidad de California— podría considerarse como el primer laboratorio científico netamente interdisciplinar, al comienzo incluyendo físicos, químicos e ingenieros pero pronto también incluiría estudios de biología y medicina, algo que no era nada común hasta entonces en tanto la división disciplinar se replicaba en la departamentalización de la ciencia. De esta manera, el cruce entre distintas disciplinas es lo que irá permitiendo gradualmente la exploración de nuevos problemas gracias a la aplicación de métodos y modelos que provienen de otros dominios de conocimiento al problema que se intenta resolver o representa un nuevo aspecto del mismo que hasta entonces no se había considerado; esto es lo que eventualmente permitirá la creación de nuevas disciplinas que se conformarán como espacio institucional para la investigación de esos fenómenos. La creación de la bomba atómica demandó un poder de cálculo mucho mayor al utilizado entonces en cualquier proyecto científico-ingenieril, especialmente por la necesidad de hacer cálculos para resolver numéricamente las ecuaciones que describían las ondas de choque de las implosiones y explosiones de los distintos modelos de bombas que se proponían. Hasta 1943 estas operaciones eran llevadas a cabo por computadoras humanas, las mismas que Turing había “simulado” con su máquina idealizada en 1936, normalmente ayudadas por calculadoras de escritorio mecánicas. La necesidad de incluso mayor poder de cálculo hizo que en 1943 se comenzaran a emplear calculadores mecánicos provistos por IBM, que no eran otra cosa que sofisticaciones sobre el método de procesamiento de datos que Hollerith inventó para compilar los resultados del censo de estados unidos en 1888, aunque ya capaces de realizar multiplicaciones. Con pequeñas modificaciones esos dispositivos fueron muy utilizados para llevar a cabo computación científica (Eckert, 1940). Von Neumann fue el primero en unir el mundo de las calculadoras mecánicas con las electromecánicas en el marco de la Segunda Guerra Mundial cuando se enteró de la existencia de la Automatic Sequence Controlled Calculator (ASCC) construida por IBM y diseñada originalmente por Howard Aiken en 1937, quien estuvo motivado por la necesidad de resolver ecuaciones numéricamente durante su doctorado en física en la Universidad de Harvard, a donde fue ubicada y operada la ASCC, rebautizada por sus operarios como la «Harvard Mark 1». El diseño original estaba basado en la máquina diferencial de Babbage, aunque luego incorporó elementos del motor analítico. Originalmente no podía realizar saltos condicionales, por lo que la primera implementación no era Turing-completa. Von Neumann utilizó esta computadora a principios de 1944 para llevar a cabo cálculos que servirían para comprobar la factibilidad del modelo de implosión de la bomba atómica y, a su vez, para verificar los resultados de los mismos cálculos que se estaban llevando a cabo en Los Alamos con

las calculadoras mecánicas. Esto introdujo a von Neumann al mundo de la computación y a interesarse por los aspectos ingenieriles necesarios, a los que no tardaría en volver matemáticos.

En paralelo a la construcción de la Mark 1, en Estados Unidos Herman Goldstine logró convencer al Ejército (del que era miembro) de financiar la construcción de la ENIAC, la primera computadora de propósito general completamente electrónica diseñada por John Mauchly y Presper Eckert en la Universidad de Pennsylvania, y si bien la computadora era Turing completa y programable, convirtiéndose en la primera implementación digital de la máquina universal, la programación debía hacerse manualmente cambiando la configuración del tablero de conexiones y las tablas de funciones portátiles que conectaban a los distintos módulos aritméticos que hacían a la máquina. Inaugurada recién en 1945, no sería utilizada para el proyecto Manhattan pero sí tuvo un rol importante en el posterior diseño de la bomba de hidrógeno. En 1944, Eckert y Mauchly comenzaron con el diseño del sucesor de la ENIAC que sería capaz de contener en la memoria el programa además de los datos. La Electronic Discrete Variable Automatic Computer recién comenzaría a ser fabricada en 1946 (y terminada en 1949) y conocida como EDVAC y quizás la razón por la que es más conocida es por ser la primera computadora en implementar lo que hoy conocemos como la arquitectura de von Neumann. Von Neumann se unió como consultor dado su rol en el ejército, que nuevamente financiaría la construcción de la EDVAC, y en 1945 escribió a modo de borrador un reporte sobre su diseño que se convertiría en el documento fundacional de la computación de la década de 1940, no sólo debido a lo que representaba sino también por la velocidad con la que las copias del manuscrito que distribuyó Goldstine circularon en la comunidad de aquellos afectados por la computación. Este borrador no sólo es importante por haber planteado una arquitectura posible para la computadora digital sino porque para hacerlo von Neumann introduce una descripción abstracta del diseño de una computadora que analiza los procesos físicos involucrados, al menos en un nivel de abstracción, sobre todo proceso computacional, abriendo la puerta a una nueva descripción de fenómenos naturales en términos de propiedades computacionales, y proveyendo simultáneamente una representación distinta —pero equivalente— a la de Turing, en tanto en última instancia se trata de una implementación de dicho modelo bajo otra descripción abstracta en la que se utilizan componentes que se comunican entre sí. Esto es lo que permitirá ver a muchos procesos naturales como “procesos computacionales” y poder realizar modelos en base a esa equivalencia.

Todo dispositivo de computación digital contiene ciertos elementos similares a un relé, con equilibrios discretos. Un elemento de este tipo tiene dos o más estados distintos en los que puede existir indefinidamente. Puede tratarse de equilibrios perfectos, en cada uno de los cuales el elemento permanecerá sin soporte exterior, mientras que los estímulos exteriores apropiados lo llevarán de un equilibrio a otro. O, alternativamente, puede haber dos estados, uno de los cuales es un equilibrio que existe cuando no hay soporte exterior, mientras que el otro depende para su existencia de la presencia

de un estímulo exterior. La acción de relé se manifiesta en la emisión de estímulos por parte del elemento siempre que él mismo haya recibido un estímulo del tipo indicado anteriormente. Los estímulos emitidos deben ser del mismo tipo que el recibido, es decir, deben ser capaces de estimular a otros elementos. *Sin embargo, no debe haber relación energética entre los estímulos recibidos y los emitidos, es decir, un elemento que ha recibido un estímulo, debe ser capaz de emitir varios de la misma intensidad. En otras palabras: Al ser un relé, el elemento debe recibir su suministro de energía de otra fuente que el estímulo entrante.* (von Neumann, 1993, S.4.1. El énfasis es mío)

Pongo el énfasis en la última parte porque esa es una de las funciones que una noción de información tiene en uno de los niveles más básicos de la computación, y que de hecho está de fondo en la descripción de muchos sistemas complejos como “procesadores de información”. Así, el fenómeno básico de la computación, y que permitirá la aparición de comportamientos complejos, es el de poder cambiar de un estado de equilibrio a otro tras recibir una señal (el estímulo), cambio que puede producir, con distintos mecanismos, señales para que otros elementos también cambien de estado. En este primer modelo de computación, se trabaja con dos estados y el resultado más importante es el de la arquitectura general, que plantea precisamente cómo organizar estos elementos de manera tal que se puedan usar señales para desencadenar comportamientos adecuados cuyos estados globales finales puedan ser interpretados como equivalentes a los estados finales de una máquina de Turing, pudiendo así también ser interpretados como resultados numéricos. Aquí también empieza a jugar un rol la analogía de las máquinas con el cerebro humano, en tanto “las neuronas de los animales superiores son definitivamente elementos en el sentido anterior. Tienen el carácter de todo o nada, es decir, dos estados: quiescente y excitado” (von Neumann, 1993, S.4.1.). Esta visión altamente idealizada de las neuronas proviene de la segunda influencia que recibe von Neumann en 1943, y se trata de uno de los artículos más importantes, a mi juicio, para el estudio de los sistemas complejos, en tanto provee de manera directa una representación del resultado de Turing en términos de componentes abstractos que, conectados en red, pueden probarse equivalentes a cualquier máquina de Turing: el modelo de neuronas de Warren McCulloch y Walter Pitts (McCulloch & Pitts, 1943).⁴² Los elementos que entran en juego —las neuronas— son componentes altamente idealizados de las neuronas de un cerebro natural, que descartan una serie de detalles que incluso en esa época se conocía acerca del funcionamiento de estas “unidades cerebrales”. Von Neumann acepta el mismo proceso de idealización y remarca sobre lo fácil que puede imitarse dicho funcionamiento idealizado con componentes muy sencillos:

Siguiendo a W.S. McCulloch y W. Pitts [(McCulloch & Pitts, 1943)] ignoramos los aspectos más complicados del funcionamiento de las neuronas: Los umbrales, la su-

⁴²Aunque se suele considerar este trabajo como la primera propuesta de redes neuronales artificiales, dicho título debería corresponder a otro trabajo de 1936 que influyó en ellos tanto como el de Turing: «Mathematical biophysics and psychology» de Rashevsky (1936). De la historia e influencias detrás del modelo de McCulloch y Pitts, ver (Abraham, 2002; Piccinini, 2004). Diré algo más sobre el programa de Rashevsky en la sección 6.2.

ma temporal, la inhibición relativa, los cambios del umbral por efectos posteriores a la estimulación más allá del retraso sináptico [*synaptic delay*], etc. Sin embargo, es conveniente considerar ocasionalmente neuronas con umbrales fijos 2 y 3, es decir, neuronas que sólo pueden ser excitadas por estímulos (simultáneos) en 2 o 3 sinapsis excitatorias (y ninguno en una sinapsis inhibitoria). Es fácil ver que estas funciones neuronales simplificadas pueden ser imitadas por relés telegráficos o por tubos de vacío. Aunque el sistema nervioso es presumiblemente asíncrono (para los retrasos sinápticos), se pueden obtener retrasos sinápticos precisos utilizando configuraciones sincrónicas. (von Neumann, 1993, S.4.1.)

Nuevamente, es una *imitación funcional* lo que permite la implementación y, a fin de cuentas, de que el funcionamiento de uno pueda servir como el *modelo* de otro. También es interesante notar aquí que von Neumann hace la misma aclaración que Turing sobre el sistema nervioso funcionando de manera asíncrona (o deberíamos decir con más precisión auto-sincrónica), mientras que el diseño computacional va a producir el mismo efecto mediante el mecanismo de un reloj general.⁴³ Esta identificación funcional también opera entre los modelos abstractos, y de hecho juega un rol crucial en la misma definición de abstracción y de similaridad, como planteo en el capítulo final.

“A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity” (McCulloch & Pitts, 1943) es un texto fundacional en la historia del estudio de la complejidad, y se puede considerar como la primera publicación sobre neurociencia computacional, abriendo un nuevo capítulo en el estudio del cerebro como sistema complejo, además de en la misma emergente ciencia de la computación y sus aplicaciones, tanto en la matemática como

⁴³Quizás este sea un buen lugar para notar cómo la equiparación entre las computadoras y el cerebro humano continuó siendo una de las analogías más fructíferas para decir tanto que las operaciones mentales se pueden describir mecánicamente, y por tanto “reducirlas” a las operaciones básicas de una computadora, o como simplemente no es posible realizar tal identificación. En el capítulo 7 digo algo más acerca de cómo este debate sufre de no contemplar correctamente el nivel de abstracción en el que se plantea el problema. Ya vimos cómo parte de ese argumento se apoya en la lectura cartesiana de las capacidades de la máquina, pero otro punto de apoyo, más naturalista, acerca de la imposibilidad de identificar pensamientos en el cerebro es el que presenta Leibniz en su *Monadología*: “Por otra parte, hay que confesar que la Percepción y lo que de ella depende es inexplicable por razones mecánicas, es decir, por medio de las figuras y de los movimientos. Y si se imagina que existe una Máquina, cuya estructura haga pensar, sentir, tener percepción, se le podrá concebir agrandada, conservando las mismas proporciones, de tal manera que se pueda entrar en ella como si fuera un molino. Supuesto esto, se hallarán, visitándola por dentro, más que piezas que se impulsan las unas a las otras, y nunca nada con qué explicar una percepción. Por tanto, es en la substancia simple, y no en la compuesta o en la máquina, donde es necesario buscarla. Por tanto, en la substancia simple no puede hallarse más que eso, es decir, las percepciones y sus cambios. Y también sólo en esto es en lo que pueden consistir todas las acciones internas de las substancias simples.” Quizás esos “por tanto” sean uno de los más impresionantes *non-sequiturs* de la historia de la filosofía, aunque quizás Leibniz deba llevarse el crédito de haber hecho una buena descripción teórica en base al conocimiento que le estaba disponible. Curiosamente, el punto central del argumento sigue siendo recurrente en la filosofía, como lo demuestra el auge que posiciones panpsiquistas están teniendo en algunas comunidades, que pretenden “resolver” el problema de la conciencia de la misma manera en la que Leibniz solucionaba el problema de la vida: postularla como propiedad intrínseca de aquello que se considere como entidad fundamental. Jugando con un giro idiomático más propio del inglés: “It’s consciousness/life all the way down”.

áreas afines. Esta obra, y los trabajos de von Neumann que le siguieron, ayudaron a cimentar el campo de teoría de redes, que nacería propiamente en la década siguiente (ver sección 5.x). No solo el reporte de la EDVCAC recién mencionado, sino prácticamente toda la obra teórica de von Neumann que le siguió se puede ver como la exploración del espacio conceptual que abrió la equivalencia entre las máquinas de Turing y las redes de neuronas de McCulloch-Pitts, que depende de la posibilidad de describir propiedades de un sistema que no dependan de las características particulares de sus componentes, sino de sus funciones abstractamente definidas, incluyendo sus interacciones con otros componentes, que hacen a su arquitectura u organización. Así es como von Neumann finalmente ataca el problema de la organización del cerebro que le había planteado Ortway, y no sólo extrae del trabajo de McCulloch y Pitts el resultado, sino gran parte de la metodología, que refinará a lo largo de sus propias investigaciones; metodología que sigue respondiendo a una forma de entender un método axiomático, pero atento ahora a la necesidad de definir con mayor cuidado el nivel en el que se está describiendo el fenómeno, la relación de las propiedades de los nuevos elementos que distinguen a ese nivel y a los problemas epistémicos que surgen del método, en tanto se diferencia de un ataque más bien clásico y netamente mecanicista de *mera* reducción. McCulloch y Pitts expresan explícitamente que la importancia de su modelo radica en la abstracción que permite realizar sobre los detalles de la “implementación” particular que están formalizando —remarco “implementación” por las conexiones con la idea de diseño que ya señalé en la discusión sobre Turing y Ashby, ideas que cobrarán un rol cada vez más notorio en la discusión sobre sistemas complejos—:

Pero hay que dejar claro un punto: ninguno de nosotros concibe la equivalencia formal como una explicación de hecho. ¡Al contrario! Consideramos que la facilitación y la extinción dependen de cambios continuos en el umbral relacionados con variables eléctricas y químicas, como los pospotenciales y las concentraciones iónicas, y que el aprendizaje es un cambio duradero que puede sobrevivir al sueño, la anestesia, las convulsiones y el coma. *La importancia de la equivalencia formal radica en que las alteraciones que realmente subyacen a la facilitación, la extinción y el aprendizaje no afectan en absoluto a las conclusiones que se derivan del tratamiento formal de la actividad de las redes nerviosas, y las relaciones de las proposiciones correspondientes siguen siendo las de la lógica de las proposiciones.*^{XLVII} (McCulloch & Pitts, 1943, 117. El énfasis es mío.)

De esta manera, es la abstracción que se obtiene al idealizar las neuronas del cerebro lo que permite el modelo y el resultado —la afirmación sobre las propiedades lógicas del modelo y su Turing-equivalencia— por lo que se sugiere que se trata de una propiedad sistémica, en tanto si, sin importar el substrato en el que estén implementadas, la abstracción permite describir a los componentes en términos de su función como módulos conectados dentro de una organización, y el funcionamiento del sistema en general será determinado por la arquitectura particular que tenga esa organización; y la descripción

deberá contemplar también los estados iniciales de cada uno de los módulos, además de sus posibilidades dinámicas. Será una tarea posterior determinar si un fenómeno particular, que se sabe que es producido por el sistema al que se le está aplicando la abstracción, puede también ser capaz de producir el mismo fenómeno. En ese caso, se podría atribuir el fenómeno a las propiedades sistémicas —o “de alto nivel”—, e incluso se podría obtener un resultado más robusto si se emplean modelos que encuentren el mismo fenómeno como una consecuencia de un modelo que determina propiedades sistémicas pero que recurre a otra idealización sobre el sustrato que soportaría el fenómeno originalmente. La propuesta es similar a la que identificamos en los cibernéticos, en el desplazamiento sugerido entre modelos “simples” y “complejos o concretos”, y se va a tornar un tema recurrente en cualquier discusión epistemológica sobre sistemas complejos, y en general cualquier ciencia que haga uso de modelos.

El siguiente es uno de los pasajes que encuentro más importantes para una lectura epistemológica de (McCulloch & Pitts, 1943), en tanto se pretende conectar cómo la abstracción que permite la comprensión de un fenómeno al mismo tiempo produce una ruptura en la noción clásica de causalidad y determinismo, e incluso sugiere que la forma tradicional de entender una ley natural para describir un fenómeno pierde fuerza cuando el sistema que se pretende explicar no es simple, lo que obliga a una nueva dimensión de análisis.

La causalidad, que requiere la descripción de los estados y una ley de conexión necesaria que los relacione, ha aparecido en diversas formas en varias ciencias, pero nunca, excepto en la estadística, ha sido tan irreciproca como en esta teoría. La especificación para cualquier momento de la estimulación aferente y de la actividad de todas las neuronas constituyentes, cada una de ellas un asunto de “todo o nada”, determina el estado. La especificación de la red nerviosa proporciona la ley de la conexión necesaria por la que se puede calcular a partir de la descripción de cualquier estado la del estado siguiente, pero la inclusión de relaciones disyuntivas impide la determinación completa del anterior. Además, la actividad regenerativa de los círculos constitutivos hace que la referencia sea indefinida en cuanto al tiempo pasado. Así, nuestro conocimiento del mundo, incluidos nosotros mismos, es incompleto en cuanto al espacio e indefinido en cuanto al tiempo. Esta ignorancia, implícita en todos nuestros cerebros, es la contrapartida de la abstracción que hace útil a nuestro conocimiento. El papel de los cerebros en la determinación de las relaciones epistémicas de nuestras teorías con nuestras observaciones y de éstas con los hechos es muy claro, ya que es evidente que toda idea y toda sensación se realiza por la actividad dentro de esa red, y por ninguna actividad de este tipo se determinan plenamente los aferentes reales.^{XLVIII} (McCulloch & Pitts, 1943, pp. 129-131)

Aquí vemos a los autores lidiar con lo que no es otra cosa que un intento de reconciliar dos visiones del mundo muy distintas; visiones que, como intenté ilustrar especialmente en el capítulo 2, han sido fuente de innumerables disputas en la interpretación de la naturaleza

y en particular sobre cómo se la puede —o debe— estudiar y, por tanto, en qué consiste una buena explicación científica de un fenómeno. La profundidad conceptual de este tema es prácticamente infinita, y aquí sólo pretendo señalarlo como el problema epistémico de fondo, y sugerir que la mirada desde el estudio de los sistemas complejos deja entrever que no se trata necesariamente de dos visiones opuestas sino de un continuo, a trazar todavía, en el que la visión clásica o simple no es más que un caso límite de esta nueva mirada más bien compleja. Describiré esto con algo más de detalle en el capítulo 7, pero aquí ya es posible apreciar el peso y el núcleo del problema. Para McCulloch y Pitts, la teoría que proponen es no-causal, en tanto la especificación de una condición antecedente y las “leyes” que describen la dinámica alcanzan a determinar la condición siguiente pero el proceso no puede darse a la inversa, en tanto se introducen “relaciones disjuntivas”. Esto significa que el detalle de una situación en un tiempo particular deja “indeterminada” la situación anterior para quien desea conocerla. Es por esto que la causalidad se volvería para esta nueva ciencia tan “irrecíproca” como para la estadística. Por un lado aquí se puede ver un guiño a las numerosas disputas en torno al concepto de ley que las descripciones probabilistas de la mecánica estadística hicieron surgir en el siglo XIX y que de hecho la noción de información volvió a poner en el escenario principal cuando ésta se describió en términos probabilísticos semejantes. La mecánica cuántica también obligaría a una descripción probabilista de la naturaleza, igual que lo haría el fenómeno de caos en contextos no cuánticos.⁴⁴ Hasta aquí, no hay nada nuevo; sólo otra forma de plantear el problema de si se puede o no dar una descripción mecánica, sujeta a una causalidad simple, de un fenómeno complejo como puede ser el crecimiento de un organismo, el problema en el que von Uexküll veía esa ruptura del orden causal, según la cual parecía estar actuando alguna ley en otro orden temporal, algo *del futuro* con respecto al tiempo en el que se describía un fenómeno.⁴⁵ La cibernética “resolvió” este dilema con la noción de “ciclo de realimentación”, que curiosamente estaba inspirada en otra parte de la obra de von Uexküll, como ilustré en el capítulo 2. Esta es una manera de complejizar la descripción causal de los estados de un sistema, incluyendo dependencias a los estados futuros de alguno de los elementos que entran en juego en la descripción (i.e. modelo) del sistema bajo consideración.

Hacia finales de 1944, von Neumann, Howard Aiken y Norbert Wiener concluyeron que el interés en el área de “procesamiento de información” era el suficiente como

⁴⁴En ambos casos, cuánticos y caóticos, la descripción es probabilista, aunque por razones distintas. La interpretación más ortodoxa sugiere que los fenómenos cuánticos son *ópticamente* probabilistas, mientras que en el caso del caos determinista, deberíamos decir que son *epistémicamente* probabilistas (ver A. A. Ilcic, 2015). De todas maneras, el jurado está deliberando todavía —y lo estará por mucho tiempo— sobre si los fenómenos cuántico son, en el fondo, deterministas o no.

⁴⁵Incidentalmente, la sugerencia de Darwin de la selección natural como el mecanismo de la evolución natural fue una de las primeras instancias en las que se aceptó como buena una explicación que no podía predecir el estado futuro de dicho proceso evolutivo, ni tampoco determinar con precisión los estadios anteriores. Esto también puede verse desde la propuesta de niveles de abstracción que introduzco en el capítulo 7.

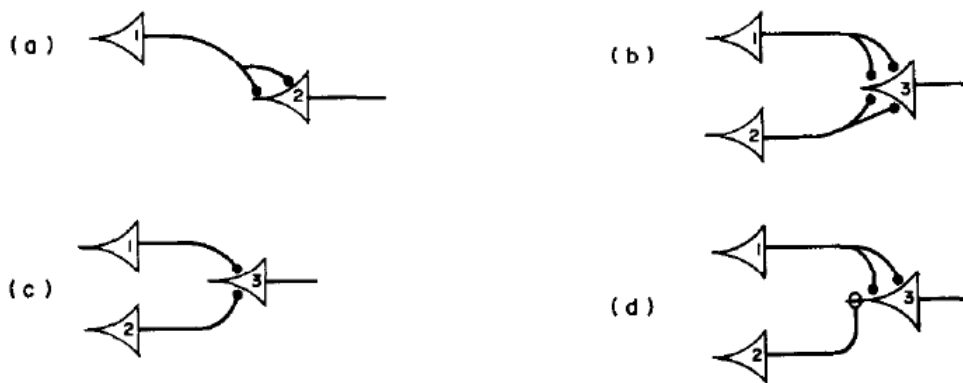


Figura 4.3: Algunos esquemas de conexiones neuronales introducidos por McCulloch y Pitts (1943, p. 105) para “representar” expresiones lógicas. Por ejemplo, usando N_i para las neuronas y t para el tiempo en la que se “evalúa” el valor binario de N_n , el diagrama superior izquierdo representa una expresión $N_2(t) \iff N_1(t - 1)$ (lo que sería un predecesor temporal). Debajo (c) tenemos una conjunción: $N_3(t) \iff N_1(t - 1) \wedge N_1(t - 1)$. (b) Arriba a la derecha, una disyunción: $N_3(t) \iff N_1(t - 1) \vee N_2(t - 1)$. (d) es una conjunción con una inhibición (negación): $N_3(t) \iff N_1(t - 1) \wedge \neg N_2(t - 1)$

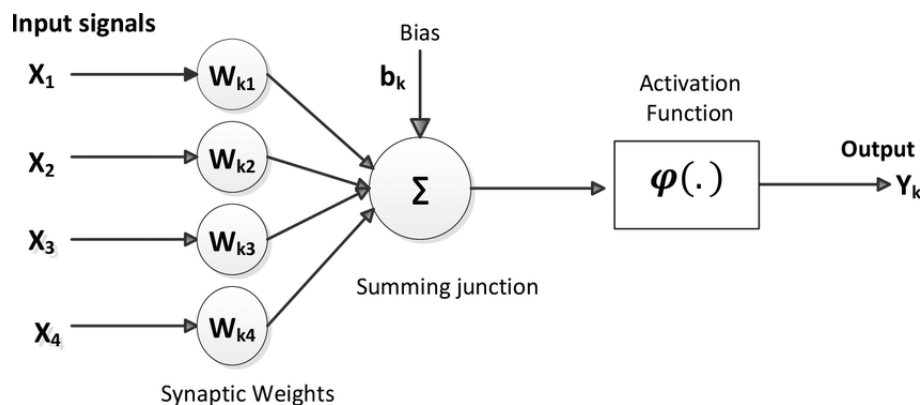


Figura 4.4: Diagrama típico de las implementaciones contemporáneas de una neurona “tipo McCulloch-Pitts”, donde las conexiones entre neuronas pueden tener distintos pesos w_i (usualmente $i \in [0, 1] \subset$ y cada neurona puede tener un sesgo o *bias* que la torne más o menos sensible a ser activada, esto es, que altere el número de conexiones que necesita para llegar al umbral que hace que la neurona se comporte de acuerdo a la función matemática que la defina.

para convocar a una reunión de trabajo a quienes estuvieran interesados en “la ingeniería de comunicaciones, de las máquinas de computar, de los dispositivos de control, en la matemática de series temporales en estadística, y en los aspectos de comunicación y control del sistema nervioso” para definir el avance del campo que estaba empezando a tomar forma y algo de impulso (Aspray, 1990, p. 183). La invitación no pudo ser abierta, dado que gran parte del avance hasta el momento estaba afectado (o directamente motivado)

por el esfuerzo bélico y, por lo tanto, clasificado; entre los invitados sí estaban Walter Pitts y Warren McCulloch. Originalmente el campo de investigación no tenía nombre, aunque la sugerencia de Wiener fue que se llamara “Sociedad Teleológica” [*Teleological Society*]. En una carta a H. Goldstine, el grupo le explica que “la teleología es el estudio del propósito de la conducta, y pareciera que una gran parte de nuestros intereses están dirigidos por un lado a estudiar cómo el propósito se produce [*is realized*] en la conducta humana y animal, y por otro lado, cómo el propósito puede ser imitado por medios mecánicos o eléctricos” (von Neumann, Aiken, & Wiener a Goldstine, citado en Aspray, 1990, p. 183). Precisamente serán los puntos en común entre estas disciplinas los que serían señalados por Wiener años más tarde como el campo de acción de la cibernética. Ya vimos en el capítulo anterior como los trabajos tempranos de Wiener estuvieron orientados a volver científica esta idea de *propósito* como recurso explicativo válido para sistemas complejos, ayudado por la idea de modelo. Ahora quizás se pueda apreciar con más claridad también la conexión entre las clases de abstracción e idealización introducidas en las redes neuronales de McCulloch-Pitts y la propuesta de Rosenblueth y Wiener (1945) sobre modelos, abstracción y “cajas negras” (ver también sección 7.2).

La pequeña reunión finalmente tuvo lugar entre el 6 y el 7 de enero de 1945 en Princeton, con conferencias de von Neumann sobre computación y de Wiener sobre ingeniería en comunicación el primer día; McCulloch y Lorente de No hablaron el segundo día sobre la organización del cerebro. En retrospectiva, esta reunión puede catalogarse como el primer encuentro destinado al estudio de los sistemas complejos como tales, dado que el eje de la temática giraba en torno a cómo las similitudes de capacidades que se podían observar en dos sistemas cuya constitución física es muy diferente, señalaban tanto a la posibilidad de acercarse a ellos desde una misma perspectiva teórica y, al mismo tiempo, utilizar el conocimiento existente en el dominio tradicional de cada uno para avanzar la investigación en el otro. El resultado principal de la reunión fue la creación de distintos grupos de estudio (problemas de filtrado y predicción, aplicaciones de soluciones computacionales a problemas estadísticos y a ecuaciones diferenciales en distintos campos, como la astronomía, la hidrodinámica y la neurología. Entre los planes también figuraba la creación de un revista sobre el campo y el bosquejo de los pasos a seguir para crear un centro de investigación para nuclear los esfuerzos de los distintos grupos. Sin embargo, nada de esto sucedió finalmente y ninguna segunda reunión tuvo lugar (cf. Aspray, 1990, p. 184).

La creación de un lugar de discusión sobre estos temas ocurriría al año siguiente, de la mano de Frank Fremont-Smith, quien era el director médico y ejecutivo de la Fundación Macy, organización filantrópica fundada en 1930 y “dedicada a mejorar la salud de la población avanzando la educación y el entrenamiento de los profesionales de la salud”. En la década de 1930, Fremont-Smith había generado una pequeña red informal de discusión sobre algunos conceptos emergentes en la comunidad médica, especialmente sobre la idea de homeostasis introducida por Walter Cannon; idea que, como mostré en

el capítulo anterior, fue central para el pensamiento cibernético y las primeras miradas de la complejidad como un tema en sí mismo. En 1942, Fremont-Smith logró crear una primera reunión, muy pequeña, con el título de “Inhibición cerebral” que principalmente giraría alrededor del hipnotismo y el reflejo condicionado. Entre los invitados estuvieron Warren McCulloch y Arturo Rosenblueth, así como Margareth Mead, Gregory Bateson y Lawrence Kubie. La presentación de Rosenblueth fue sobre su trabajo en ese entonces junto con Norbert Wiener y Julian Bigelow sobre las similitudes que se podían observar entre máquinas y organismos si se los describía en términos de propósito o función, sin necesidad de introducir entidades ontológicamente cuestionables como entelequias o causas finales, sino que el comportamiento teleológico era explicado en términos de “causalidad circular” y mecanismos de retroalimentación.⁴⁶ Probablemente haya sido esta primera reunión la que posibilitó la creación de las más conocidas “Conferencias Macy”, que serían coordinadas por el mismo McCulloch a pedido de Fremont-Smith. La primera conferencia tuvo lugar en New York, los días 8 y 9 de marzo de 1946, con el título de “Feedback Mechanisms and Circular Causal Systems in Biological and Social Systems” [“Mecanismos de retroalimentación y sistemas causales circulares en sistemas biológicos y sociales”], donde es interesante notar el énfasis en “sistemas” y la idea de “causalidad circular”. Las presentaciones de la conferencia no fueron muy distintas a las de la reunión de Princeton de 1945: von Neumann inauguró con una presentación del estado del arte sobre computación, Lorente de Nó hizo lo propio con el estado de la neurofisiología, Wiener sobre los mecanismos de retroalimentación en sistemas automáticos, acompañado por Rosenblueth sobre el rol de las explicaciones teleológicas. McCulloch, por su parte, expuso nuevamente los principios básicos de la conexión entre su modelo de neuronas artificiales y la lógica proposicional. El objetivo principal de estas conferencias —que serían 10 en total, entre 1946 y 1953— no yacía tanto en las presentaciones formales sino en las discusiones que se podían gestar cuando especialistas de distintas disciplinas se acercaban a un problema en común; la idea original de Fremont-Smith (Dupuy, 2009, p. 81). Von Neumann y Wiener sugieren en la primera conferencia que los modelos que proponen podrían incluso ser usados en economía y otras ciencias sociales. Es Gregory Bateson quien en su presentación introduce la necesidad de una teoría sólida que pueda servir como un punto de apoyo para las investigaciones en ciencias sociales —en la antropología, en particular— e introduce la importancia del concepto de aprendizaje, de hecho sugiriendo una distinción entre aprendizaje de algo en particular y “aprender a aprender”, prácticamente desafiando a los asistentes sobre si una máquina podía decirse capaz de aprender en alguno de esos sentidos.⁴⁷ Von Neumann se concentró sobre esta pregunta por el aprendizaje de una ma-

⁴⁶ Además de notar la influencia del trabajo de Rosenblueth y col. (1943) en McCulloch y Pitts (1943), aquí se puede ver claramente el reemplazo de un problema filosófico por otro, a saber, el de las entelequias por una causalidad circular, pero que sin duda es un progreso puesto que se dan los primeros pasos para explicar dicha imagen de una causalidad más compleja y, que desde una visión más simple y lineal, puede parecer cuestionable, o actuando “desde el futuro”, y, quizás, hasta “emergente”.

⁴⁷ Todo esto son más razones que conectan a la cibernética temprana con el estudio de los sistemas com-

nera particular, no tanto en la dirección de Turing, para quien la respuesta a esa pregunta estaba motivada por recrear la inteligencia humana en un medio que no fuera el cerebro, sino en una dirección más general; una a que a fin de cuentas pudiera servir como una piedra de toque para comprender el funcionamiento de muchos sistemas distintos y que incluso pueda cambiar los pilares conceptuales base de la concepción del mundo, que hasta entonces seguían apoyados en la tierra sólida de los éxitos de la física y sus métodos. La nueva postura sí asimilaría los detalles *à la* Turing de la imagen más computacional del mundo que había emergido a finales de la década de 1930 —y cuyas consecuencias todavía estamos intentando comprender—, pero no se podrían detener ahí si el objetivo es buscar la descripción correcta de un fenómeno particular.

En una carta a Norbert Wiener del 29 de noviembre de 1946, comienza expresando que la preocupación de ellos (Wiener, Pitts y von Neumann) es la de encontrar los principios generales que gobiernan a los autómatas, y que el énfasis en el estudio del cerebro humano no los iba a poder llevar muy lejos dado que la complejidad del objeto seleccionado era todavía insuperable, pese a los avances que se habían logrado hacer gracias a los resultados de Turing y McCulloch-Pitts. Ahora bien, von Neumann rápidamente pasa a comentar lo que ve como un verdadero problema para continuar esa vía de investigación para comprender el cerebro humano y cualquier objeto que presente una “complejidad tan excepcional” como la de un sistema nervioso:

Lo que me parece digno de destacar es, sin embargo, que después de asimilar la gran contribución positiva de Turing-cum-Pitts-y-McCulloch, la situación está más bien peor que antes. En efecto, estos autores han demostrado con absoluta y desesperante generalidad, que cualquier cosa y todo lo brouweriano puede ser hecho por un mecanismo apropiado, y específicamente por un mecanismo neural, y que incluso un mecanismo definido puede ser “universal”. *Invirtiendo el argumento: Nada de lo que podamos saber o aprender sobre el funcionamiento del organismo puede dar, sin un trabajo “microscópico”, citológico, ninguna pista sobre los detalles ulteriores del mecanismo neural.* [...] Creo que sentirás conmigo el tipo de frustración que estoy tratando de expresar.^{XLIX} (Von Neumann a Wiener, 29 de noviembre de 1946 (J. V. Neumann, 2005, 278. El énfasis es mío.))

Bajo mi lectura, este punto es equivalente al que McCulloch y Pitts (1943) introducían acerca de cómo la misma abstracción que hace posible el conocimiento de un sistema complejo

plejos, y cómo el surgimiento de las ciencias cognitivas estuvo relacionado en varios frentes con esta nueva forma de aproximarse a la naturaleza. Es más, como una instancia particular del estudio de sistemas complejos, quizás uno de las que más nuevas fronteras epistémicas abrió, la tendencia en ciencias cognitivas de oscilar entre explicaciones reduccionistas (especialmente en términos de mecanismos) y holistas (o integrativas), un punto de debate contemporáneo en la filosofía de las ciencias cognitivas y afines. A su vez, esto deja ver otro punto en común con el campo de la inteligencia artificial, que puede verse también como una instancia dentro de la ciencia de los sistemas complejos, más allá de su rol dentro de las ciencias cognitivas. Esto también deja entrever desde el comienzo la naturaleza interdisciplinaria de los estudios sobre la complejidad.

introduce límites insuperables sobre el conocimiento que se puede tener del mismo. Este punto se ha expresado de distintas maneras en varias disciplinas. Dos que quiero mencionar aquí, porque estarán conectadas con la discusión sobre emergencia, son lo que en filosofía de las ciencias se ha denominado, en su versión más extendida, el problema de la subdeterminación de la teoría por la evidencia y lo que en estudios de la complejidad Stephen Wolfram (2002, pp. 5, 716-717) ha llamado el “principio de equivalencia computacional”.

Si bien este punto es mejor tratado más adelante en esta investigación, aquí es un buen lugar para señalar cómo algunos de los temas tratados hasta aquí se relacionan y cómo impactan directamente en nuestra posibilidad de conocer el funcionamiento de sistemas complejos, y, me atrevo a decir, de conocer en general. De hecho, el problema filosófico subyacente estuvo ligado a una forma del escepticismo moderno; y que en versión moderada ya encontramos al mencionar la forma en la que Descartes entendía las máquinas. Pienso que fue este filósofo francés avanzó por primera vez la forma actual del problema de la subdeterminación, considerando la posibilidad de que un demonio o genio maligno engañe sus sentidos, produciendo por otros medios los efectos sobre el sistema sensorial que un fenómeno particular produciría si se estuviera en su presencia. Es decir que, ante la detección de un estímulo (un estado de cosas), siempre es posible tener al menos dos condiciones antecedentes que hubieran producido dicho estímulo (el estado de cosas anterior, propiamente dicho; o el genio maligno). La conocida solución cartesiana al problema es radical, y consiste en descartar a los sentidos como una fuente confiable de conocimiento. Descartes estaba cegado por la búsqueda de una clase de certeza que hoy la mayoría de los filósofos considera inalcanzable, quizás incluso en algunos contextos matemáticos. La forma contemporánea más conocida de este argumento es el del cerebro en un balde o cubeta (*a brain in a vat*), usualmente avanzados en contextos en los que se quiere rebatir alguna forma de realismo metafísico, ya que podría fácilmente representar un caso en que un agente está justificado en mantener un conjunto de creencias pero que, “en realidad”, son falsas. Hay dos puntos para extraer aquí en el contexto de esta investigación. Una es acerca de la clase de certeza que se puede obtener acerca de un sistema complejo, que en un determinado nivel de análisis, siempre estará limitada por lo que podríamos llamar una *indeterminación epistémica* en tanto siempre puede haber modelos alternativos que den cuenta de una misma propiedad. Esto se suma (y no reemplaza, ni explica) a la indeterminación que se pueda tener por la poca precisión en la medición de los estados y trayectorias que divergen muy rápidamente, entre otras muchas fuentes de incertidumbres. El otro punto a considerar es el de las capacidades que el demonio debería cumplir, si es que no se lo considera como un ser mágico y, por lo tanto, está sujeto a las mismas leyes que gobiernan el universo. Descartes no habría podido pensarlo de esta manera, ya que su demonio nunca podría haber sido reemplazado por una máquina: dicha máquina debería haber sido capaz de razonar para tener una fuente de “creatividad” sufi-

ciente como para poder simular la totalidad de estímulos que el ambiente podría realizar sobre el sujeto al que se está engañando, por lo que también debería tener una forma de establecer el resultado en el ambiente que podría surgir de cualquier intervención posible por parte del agente. Así, en resumen, si el “universo simulado” fuera a ser idéntico al “universo real”, el nuevo demonio maquínico debería poder *simular* correctamente el mundo real, no sólo en principio, sino que debe poder llevar a cabo la simulación en el mismo orden temporal que como sucede en el mundo real; si no fuera así, habría una manera de distinguir entre la simulación y el universo real. Este nuevo experimento mental no es otra cosa que una extensión detrás del argumento del “test de Turing para modelos” que presenté anteriormente (en 4.1.4, página 176); simplemente ahora con el requerimiento de no sólo brindar un resultado particular solamente, sino el de poder simular todas las condiciones físicas de la situación.

Bajo mi punto de vista, es precisamente la “capacidad teórica o en principio” de este simulador lo que se analiza cuando se estudia si un modelo particular puede dar cuenta o no de un fenómeno. Son muchos los aspectos filosóficos que se entrecruzan en este planteo. Exploro algunos de ellos en los capítulos siguientes; aquí solamente me limitaré a la consecuencia principal para el estudio de sistemas complejos y que considero que el primer planteo de esta propiedad de dichos sistemas se encuentra en las reflexiones a las que llegó von Neumann luego de analizar el “límite epistémico” que las formulaciones de Turing y McCulloch-Pitts pusieron sobre el tablero, pero también sus ventajas. Así, dado este límite, la sugerencia *metodológica* de von Neumann es la de estudiar a los sistemas complejos por medio de un procedimiento que debe incorporar dos procesos en simultáneo que denomina analítico y sintético —para el de Turing y para el de McCulloch-Pitts, respectivamente (ver sección siguiente)— y que pueden verse como análogos al desplazamiento en la jerarquía de modelos que proponen Rosenblueth y Wiener (1945). Para conectar estos dos puntos, podemos decir lo siguiente: si en un nivel determinado de la jerarquía, es posible describir una máquina de Turing cuyo resultado para una serie dada de entradas es equivalente a las mediciones realizadas sobre un fenómeno luego de una intervención equivalente a los valores de entrada, se puede decir que el programa que ejecuta la máquina es una *instancia de un buen modelo* para dicho fenómeno. El modelo en sí debería pensarse más como la especificación del programa, aquello que se espera que el programa haga *funcionalmente*, pero sin precisar de qué manera lo va a hacer finalmente. Por este motivo, es necesario descomponer el sistema para encontrar los detalles de su organización física para poder determinar cómo es que *implementa* lo que se hipotetiza como sus especificaciones. Vistos de esta manera, la verdadera dificultad para estudiar sistemas complejos está en que la capacidad computacional (*en principio*, esto es, desde el observador) de muchas de sus partes puede ser equivalente a las del sistema mismo visto como un todo (en términos de las funciones que en principio puede decirse que computa, no las que efectivamente hace; allí hay una diferencia radical entre las capacidades de los

componentes y del sistema). El sistema es más capaz que sus partes porque sus partes *externalizan* procesos computacionales a otros componentes —o incluso a otros *sistemas*—. Así, para un observador en un lugar particular de la jerarquía de descomposición elegida, si el sistema que está estudiando es complejo, al menos una de las “cajas negras” que forman parte de él podrá decirse capaz de computación universal.⁴⁸

En la misma carta a Wiener, luego de comparar la capacidad de estudio disponible para los neurofisiólogos de la época con alguien que pretende estudiar a la ENIAC con una manguera contra incendios como única herramienta, von Neumann sugiere que es necesario encontrar algún mecanismo más sencillo para tomar como punto inicial para la axiomatización, considerando que una célula es un objeto ya demasiado complejo:

Creo que debemos recurrir a sistemas más simples. Es una falacia, si se argumenta que, porque la neurona es una célula (de hecho, parte de su envoltura aislante individual es multicelular), debemos considerar sólo los organismos multicelulares. Es evidente que la célula es un excelente “componente estándar”, muy flexible y apto para la diferenciación en la forma y en la función, y los organismos superiores la utilizan libremente. Pero su autorreproductividad indica que tiene en sí misma algunos de los atributos decisivos de los organismos integrados, y algunas células (por ejemplo, los leucocitos) son seres autónomos y completos. *Esto en sí mismo debería hacernos sospechar al seleccionar las células como los conceptos básicos “indefinidos” de un axiomatismo.*^L (Von Neumann a Wiener, 29 de noviembre de 1946 (J. V. Neumann, 2005, p. 279. El énfasis es mío.))

Ahora, por “más simple” von Neumann no se refiere a limitarse a estudiar un componente del sistema que se pretende analizar, sino uno que sea *funcionalmente equivalente*, pero cuyo estudio sí sea más simple, ya sea porque físicamente es más accesible o porque es más factible de ser matematizado con las herramientas teóricas disponibles. Es decir, uno que pueda servir como un *modelo* del sistema de interés, para las intenciones particulares de quien usa el modelo.⁴⁹ Aquí introduce una interesante analogía entre el desarrollo de un organismo y el desarrollo de una tecnología, en la que componentes integrados pueden cumplir funciones de manera muy eficiente, pero que para quien no conoce los detalles de su funcionamiento interno, la tarea de *comprender* los principios básicos que le dan esa funcionalidad puede ser mucho más dificultosa:

⁴⁸creo que esta es la intuición que está detrás del Principio de equivalencia computacional descrito por Wolfram (2002), según el cual la mayoría de los sistemas no evidentemente simples deberían considerarse como complejos porque son capaces de la misma sofisticación computacional. Si bien comparto la intuición de Wolfram, considero que es de vital importancia tener en cuenta tanto los aspectos físicos de la implementación como las consideraciones sobre la eficiencia y la confiabilidad o robustez de dichos procesos. En esta dirección, pienso que la aproximación de Wolfram debe ser complementada partiendo desde los trabajos que vinculan propiedades físicas de sistemas de muchos componentes en interacción con la teorización de la complejidad computacional.

⁴⁹No concuerdo con los filósofos que sostienen que un modelo es *necesariamente* una simplificación de un situación particular del mundo o de un fenómeno. Un modelo de X puede ser más sencillo que otra descripción de X, pero dicha sencillez es opcional y depende de los objetivos del modelador.

Consideremos, en cualquier campo de la tecnología, el estado de cosas que se caracteriza por el desarrollo de “componentes estandarizados” altamente complejos, que son al mismo tiempo individualizados, muy adecuados para la producción en masa, y (a pesar de su carácter “estándar”) muy adecuados para la diferenciación de propósitos. Se trata, evidentemente, de un estilo tardío y muy desarrollado, y no es el ideal para un primer acercamiento de una persona ajena al tema, para un esfuerzo hacia la comprensión. *Para comprender el tema, es mucho mejor estudiar una fase anterior de su evolución, anterior al desarrollo de esta alta estandarización - con diferenciación. Es decir, estudiar una fase en la que todavía no aparezcan estos componentes “elegantes”.* Esto es especialmente cierto, si hay razones para sospechar que ya en esa etapa arcaica [hay] mecanismos (u organismos) que exhiben los rasgos más específicos de los representantes más simples de la mencionada etapa “tardía”.^{LI} (Von Neumann a Wiener, 29 de noviembre de 1946 (J. V. Neumann, 2005, pp. 280–281. El énfasis es mío.))

Es interesante considerar esta analogía con la tecnología para comprender la forma en la que en muchas disciplinas se trabaja con ciertas técnicas y modelos, de los cuales se conoce su funcionalidad (i.e. lo que se espera que hagan bajo distintas circunstancias) pero no siempre se conoce con precisión *cómo* lo hace. Esto es bastante común en ciencias computacionales, en donde muchas veces se utilizan paquetes de software diseñados por otros para obtener ciertos resultados, y tanto el código como el proceso de verificación y validación es desconocido.⁵⁰ Así, si uno está interesado en comprender el funcionamiento de un sistema complejo, una posibilidad es encontrar un sistema en un momento anterior de evolución, en el que la función a comprender se lleva a cabo por un mayor número de componentes que se pueden distinguir fácilmente entre sí para estudiar su estructura y su dinámica. Claro que otra posibilidad es estudiar un sistema artificial que cumpla los requisitos, como es el caso del Homeostato, pero aquí nuevamente se corre el riesgo de duplicar la propiedad o la función, pero no el “mecanismo correcto”, es decir, la implementación particular de la función tal y como ocurre en el sistema que se pretende estudiar. Von Neumann sugiere que una “verdadera comprensión” de estos organismos puede ser el paso necesario para poder iniciar un buen estudio de las capacidades de sistemas más complejos como el cerebro humano, y al explicitar lo que entiende por una “verdadera comprensión”, da una interpretación *mecánica* de ella:

Por lo tanto, una “verdadera” comprensión de estos organismos puede ser el primer paso relevante hacia adelante y posiblemente el mayor paso que pueda ser necesario. Sin embargo, yo pondría en la comprensión “verdadera” la interpretación más estricta posible: Es decir, *comprender el organismo en el sentido exacto en el que uno puede querer entender un dibujo detallado de una máquina —es decir, averiguar dónde se encuentra cada tuerca y tornillo, etc.*^{LII} (Von Neumann a Wiener, 29 de noviembre de 1946 (J. V. Neumann, 2005, pp. 280–281. El énfasis es mío.))

⁵⁰Este es otro caso de abstracción, según el esquema del último capítulo, pero uno en el que se pierde información.

De esta manera, von Neumann empieza a considerar que el estudio de estos sistemas puede, en un último estadio de la investigación, ser proclive de una descripción geométrica, contrario a lo que había especulado al respecto unos años antes en la carta a Ortway. De todas maneras, es de esperarse que las explicaciones sean por mucho tiempo *abstractas* y no “mecánicas”, en el sentido recién introducido. Aquí es un buen lugar para sugerir una diferencia entre un “modelo mecánico” y un modelo “maquínico”, una distinción que no siempre se hace en la literatura actual —la que se taxonomiza bajo el rótulo de “nuevo mecanicismo”—, y que presta lugar a confusión. Por modelo mecánico, debemos comprender un modelo en el cual la relación estructural y dinámica de las partes que lo componen está definida en términos de especificaciones. Por otro lado, un modelo maquínico es un caso límite del anterior, en el cual las especificaciones son reemplazadas por instancias particulares de cuyo funcionamiento no hay dudas y puede ser replicado completamente por medios interventivos. Esto significa que brinda todos los detalles paso a paso de cómo cada uno de sus componentes puede ser fabricado y el sistema total ensamblado. La mayoría de las explicaciones que disponemos en la actualidad para sistemas complejos son del tipo de modelos mecánicos, incluso si alguno de sus componentes está descrito por medio de un modelo maquínico. Dar un modelo maquínico de un sistema complejo físico es extremadamente difícil, pero sí suele ser más factible —y considero que es la práctica más común— brindar un modelo maquínico *matemático*, en el que los componentes se simplifican de tal manera de poder ser descritos totalmente desde una serie de componentes básicos que se toman como axiomas. Nuevamente, aquí la conexión con el fenómeno real —o “en el mundo”— probablemente pueda ser sólo en términos de similaridad funcional; esto es, un modelo posible, que podría ser confirmado como un buen modelo si se acceden a los detalles constitutivos del elemento en el mundo, o puede funcionar como una guía heurística para la búsqueda de nuevos modelos.⁵¹

Esta carta a Wiener es muy interesante porque es uno de los pocos lugares en los que von Neumann es explícito acerca de la clase de organismos “más simples” que lo llevaron a pensar muchos de los elementos que finalmente estarían presentes en su teoría de autómatas. Así, en la carta menciona la idea de pensar no en términos de lo que puede una célula compleja, sino dos elementos más simples que se acoplan para lograr una funcionalidad que antes no le estaba permitida. El ejemplo es el de bacteriófagos, virus que para ese entonces habían despertado el interés de la comunidad científica, principalmente alrededor del grupo de Max Delbrück y que pueden considerarse como el catalizador de la aparición del campo de la biología molecular. Lo que von Neumann parece estar pensando aquí es que si una célula es un sistema complejo y una de sus propiedades más significa-

⁵¹Simon también sugiere que hay muchos modelos posibles para lograr lo que hace un sistema complejo, tanto natural como artificial, y lo plantea precisamente en términos de similaridad funcional: “El sistema interno es una *organización de fenómenos naturales* capaz de alcanzar los objetivos en un cierto rango de ambientes, pero, por lo general, habrá muchos sistemas naturales funcionalmente equivalentes capaces de lograr hacer esto” (H. A. Simon, 1996, p. 11. El énfasis es mío). (Ver capítulo siguiente, especialmente 5.2.9.)

tivas es, por ejemplo la de poder reproducirse a sí misma en su totalidad, esto es producir una copia de sí misma, una forma de estudiar este fenómeno es considerar sistemas más simples que cuando pueden interactuar entre sí logran obtener la misma funcionalidad. En este caso, una bacteria es capaz de auto-reproducirse, mientras que el virus no lo puede hacer, pero al interactuar con una bacteria sí puede hacer que la bacteria comience a hacer copias del virus en lugar de copias de sí misma, por lo que el virus debe tener la capacidad de *informar* a la bacteria sobre cómo llevar a cabo este procedimiento. En términos cibernéticos, decimos que el acoplamiento entre el sistema A (el virus) y el sistema B, la bacteria, *forman un nuevo sistema* en el que A se torna regulador de las actividades de B, de hecho formando un nuevo sistema, ya que en el acoplamiento A y B pierden su identidad original. (Esto es lo que hace que dicho acoplamiento no sea una simple *agregación o suma* de funcionalidad, sino la creación de una nueva entidad, característica distintiva de un sistema complejo. Para un observador que sólo tiene acceso a A, la aparición de copias de A es una propiedad emergente de A. Mientras que para alguien que tiene acceso al acoplamiento de A con B, la aparición de las copias de A se puede explicar como el resultado de las nuevas funcionalidades que ahora tiene la entidad resultante del acoplamiento. Cuando B no era más que parte del ambiente de A, para el observador que hace el corte entre A y su ambiente, las copias de A pueden estrictamente depender de tan solo un parámetro que codifique la presencia o no de B en el ambiente.) Von Neumann también especula sobre el comportamiento de las membranas, que siendo capas de Langmuir “ejercen su función de manera muy mecánica” (p. 280), y sobre la necesidad de alguna clase de mecanismo para “empujar a los iones” a través de la membrana y poder lograr así una diferencia de potencial. De esta manera, sostiene que

se puede hablar realmente de “elementos mecánicos”, cada uno de los cuales puede comprender 10 átomos o más. Así pues, el organismo en cuestión está formado por seis millones de átomos, pero probablemente sólo por unos cientos de miles de “elementos mecánicos”. Supongo (sin haberlo hecho) que si se contara rigurosamente el número de “elementos” de una locomotora, también se podría llegar a los diez mil. En consecuencia, se trata de un grado de complejidad que no está necesariamente por encima de la capacidad humana.⁵² (Von Neumann a Wiener, 29 de noviembre de 1946

⁵²Lo que von Neumann describe aquí es lo que hoy conocemos como “canales de iones”. La membrana celular es impermeable a iones, esto le permite tener una carga diferente a la del ambiente en el que está. Para que una neurona pueda cambiar de estado y efectivamente generar suficiente corriente para enviar una señal a lo largo del axón y así “comunicar” su activación a las neuronas con las que hace sinapsis, debe poder intercambiar iones con el medio. Aunque no convenció a todos, los primeros experimentos en proveer más evidencia a favor de la hipótesis de que las sinapsis entre neuronas era química en lugar de eléctrica —como se creía principalmente hasta entonces— fueron los publicados por Otto Loewi en 1921, en los que tomó una sustancia del corazón de un sapo y logró cambiar el ritmo de un segundo corazón incorporando la sustancia extraída del primero. La sustancia le era desconocida en ese entonces y luego se determinó que era acetilcolina, un neurotransmisor que había sido descrito farmacológicamente por Henry Dale hacia 1914. El mismo Dale demostró que dicha sustancia actuaba como neurotransmisor incluso en las sinapsis neuromotoras. (Dale y Loewi compartieron el Nobel de medicina en 1936). John Eccles fue uno de los pioneros en utilizar instrumental eléctrico para estudiar a las sinapsis, convencido de que la causa era eléctrica y

(J. V. Neumann, 2005, p. 280))^{LIII}

Si bien la complejidad del fenómeno puede no estar más allá de la capacidad humana de comprenderlo, sí puede estar más allá de la capacidad observacional e interventiva, lo que pone una cota epistémica máxima para la clase de conocimiento que se puede tener de dicho sistema. Así, bajo mi lectura, von Neumann cree que es posible que existan sistemas que estén *en principio* más allá de nuestra capacidad de comprensión detallada (i.e. de poder *reducir* su funcionamiento a los elementos más básicos) y, a su vez, sistemas que estén más allá de nuestra capacidad *actual* de intervenir y observar los resultados de dicha intervención. La mera observación no puede servir para discriminar entre modelos alternativos que supongan mecanismos diferentes para dar cuenta de *todos* los observables en un nivel de abstracción dado.⁵³ Como es de esperarse, este problema es un punto neurálgico común a una serie de profundos problemas filosóficos que giran en torno a nuestra capacidad de describir la naturaleza, y que continúa siendo material de álgidos debates, tanto en las comunidades científicas como filosóficas. Ya describí algunas facetas de este problema, como el problema de la subdeterminación de la evidencia por la teoría y, en particular, como el problema del modelado en términos de “cajas negras” por parte

no química. Un alumno suyo, Bernard Katz, pudo estudiar las uniones neuromusculares con electrodos intracelulares y determinar que el cambio en la polaridad de la neurona se producía como respuesta a la estimulación química producida por el neurotransmisor, por lo que la neurona necesitaba intercambiar iones con el medio por algún mecanismo. Katz demostró la existencia de dichos canales indirectamente hacia comienzos de la década de 1970 (Colquhoun & Sakmann, 1998). La técnicas de las pinzas de voltaje recién se volvieron lo suficientemente sofisticadas como para medir el flujo de iones a través de un único canal en la membrana celular hacia finales de la década de esa década y principios de la siguiente, especialmente gracias a los trabajos de Erwin Naher y Bert Sakmann, quienes también compartieron el Nobel de medicina en 1991. La historia de estas técnicas —y de la bioelectricidad— se remontan a los experimentos originales de Luigi Galvani en el siglo XVIII que fue uno de los golpes más duros que recibió la perspectiva más aceptada hasta entonces, que suponía cambios en la presión de algún fluido, en tanto los nervios se pensaban vacíos y por los que podía circular distintas clases de “espíritus animales”, como sugirió incluso Descartes, siguiendo las ideas originales de Galeno. (Verkhratsky & Parpura, 2014) es una excelente presentación de la historia de las técnicas de pinzas eléctricas en fisiología. La estructura de completa de un canal iónico recién se logró caracterizar a finales de la década de 1990 (Doyle y col., 1998). Estos trabajos le valieron en 2003 el Nobel de medicina a Peter Agre y Roderick MacKinnon. En cuanto al estimado de von Neumann sobre la cantidad de átomos necesarios, un canal de potasio típico tiene aproximadamente 4500 átomos y 3 cadenas proteicas distintas, por lo que el “elemento mecánico” resultó ser mucho más complejo. Para dimensionar la escala y la complejidad del asunto: una célula humana típica tiene alrededor de 10^{14} átomos.

⁵³Las descripciones matemáticas pueden verse, entonces, como una *compresión*, una descripción más corta de lo que sucede “ahí abajo”, aunque la jerarquía no necesariamente sea ontológica. Richard Feynman dijo alguna vez: “Siempre me ha molestado que, según las leyes tal y como las entendemos hoy en día, una computadora necesite un número infinito de operaciones lógicas para averiguar lo que ocurre en una región del espacio, por muy pequeña que sea, y en una región del tiempo, por muy pequeña que sea. ¿Cómo puede ocurrir todo eso en ese espacio tan pequeño? ¿Por qué se necesita una cantidad infinita de lógica para averiguar lo que va a hacer un pequeño trozo de espacio/tiempo? Así que a menudo he formulado la hipótesis de que, en última instancia, la física no requerirá un enunciado matemático, que al final se revelará la maquinaria, y las leyes resultarán ser simples, como el tablero de damas con todas sus aparentes complejidades” (Feynman, 1967, pp. 57–58).^{LIV} La *compresibilidad* matemática de las descripciones es una forma de caracterizar los fenómenos reducibles y, por contrapartida, de delimitar aquellos que son emergentes, como exploro en los próximos capítulos.

de los cibernéticos. Una forma análoga de ver el problema es hacerlo desde el punto de vista de la posibilidad de predecir el comportamiento futuro de un sistema, del que se tiene un número dado de observaciones sobre cómo se comportó en el pasado. (Es un caso análogo a una inferencia inductiva —y por lo tanto al problema de la inducción— cuando se introduce una dimensión temporal). Para una secuencia de observaciones de una variable en un nivel fijo de observables del sistema, hay una infinita cantidad de funciones matemáticas que pueden dar cuenta de la relación entre los valores que el sistema tuvo en el pasado y, por lo tanto, entre el valor que sigue en la secuencia temporal, que es el que se está intentando predecir. Mientras mayor sea la capacidad predictiva del modelo, se lo puede considerar un mejor modelo que otro. El punto que remarcaba ya Ashby acerca de la *realidad* del modelo, esto es, su *semejanza* con el sistema real, está fuera de nuestro alcance, mientras que la tarea debería ser plantear la relación *entre* modelos pensados para dar cuenta del mismo fenómeno. Así, mientras no exista un acceso más detallado de la composición interna de la caja negra —de su *estructura profunda*—, las restricciones a los modelos posibles deben surgir de otro conocimiento que se tenga sobre lo que se está intentado predecir. Estas restricciones para los modelos posibles, partiendo desde un modelo que da cuenta de los observables en un nivel fijo, podrían considerarse como los “elementos teóricos” que rigen la *descripción* del fenómeno, dada las “capacidades” que poseen los elementos que lo componen. Remarco este punto sobre las capacidades de un elemento, porque van en la dirección de lo que von Neumann piensa sobre complejidad, y están en el fondo del *modelo posible* que introduce para pensar una de las características esenciales de los organismos, que podría a su vez pensarse como lo que posibilita su evolución: la capacidad de auto-reproducirse.

4.2.3. Máquinas para modelar máquinas

Una discusión completa de los autómatas sólo puede obtenerse adoptando una visión más amplia de estas cosas y considerando los autómatas que pueden tener como resultados de salida algo parecido a sí mismos.

John von Neuman, *Theory of Self-reproducing automata*
(J. Neumann & Burks, 1966, p. 75)

Hacia el final de la carta a Wiener, von Neumann cuenta que ha estado pensando bastante acerca de “mecanismos auto-reproductivos” y que puede formular el problema en términos análogos a una máquina de Turing:

He pensado mucho en los mecanismos autorreproductivos. Puedo formular el problema de forma rigurosa, más o menos en el estilo en que Turing lo hizo para sus mecanismos. Puedo demostrar que existen en este sistema de conceptos. Creo que comprendo algunos de los principios centrales que están implicados. (Von Neumann

a Wiener, 29 de noviembre de 1946 (J. V. Neumann, 2005, p. 281–282))

Tras sugerir que piensa dedicarse a escribir con más detalle las descripciones de esos mecanismos en los próximos meses, comenta que son varios los fenómenos que pueden verse bajo ese esquema general y que pueden estudiarse de manera combinatoria. Ahora bien, el esquema que sugiere y que va a guiar gran parte de su investigación siguiente se puede entender en términos de la descomposición de un fenómeno en los distintos elementos que hacen a su estructura:

Algunos rasgos de la relación gen-enzima, del comportamiento de algunos mutantes, así como algunos otros fenómenos, parecen enfatizar algunas variantes de auto-reproductividad, que uno se vería llevado a investigar también por motivos puramente combinatorios. Por ejemplo: La auto-reproductividad puede ser simbolizada por el esquema $A \rightarrow A$. ¿Qué pasa con los esquemas $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$, o $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow C$, o $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow C$, etc.? (Von Neumann a Wiener, 29 de noviembre de 1946 (J. V. Neumann, 2005, p. 282))

En principio, las propiedades *del lenguaje* no tienen por qué corresponderse con las propiedades de lo que se describe en términos de él. Más allá de la utilidad de la lógica matemática para pensar los autómatas, especialmente dados los trabajos de McCulloch y Pitts, von Neumann consideraba que las bases de una teoría de esta clase de sistemas no podía apoyarse en una lógica tan sencilla. (En muchos casos el uso del término “lógica” es bastante laxo por von Neumann, dado que en realidad está hablando más de un lenguaje matemático adecuado y no necesariamente atado a un sistema deductivo con las propiedades que se suelen esperar de una lógica en sentido propio; quizás también hayan entrado en juego las limitaciones de la misma para plantear una “teoría” y de expresar relaciones causales dentro de ella). Por esta razón, sostiene Burks, que von Neumann

pensaba que la lógica matemática en su forma actual, aunque útil para tratar los autómatas, no es adecuada para servir como “la” lógica de los autómatas. En su lugar, creía que surgiría una nueva lógica de los autómatas que se asemejaría e interconectaría fuertemente con la teoría de la probabilidad, la termodinámica y la teoría de la información. De todo esto se desprende que la teoría de los autómatas de von Neumann será, al menos al principio, muy interdisciplinaria. (Burks, en von Neumann, 1966, p. 19)

En todos los textos que von Neumann escribió en este período acerca de la naturaleza de los autómatas, hay alguna referencia a cómo la matemática y la lógica, en sus concepciones tradicionales, no pueden usarse para dar una buena descripción teórica del funcionamiento de dichos autómatas y deberán transformarse y desarrollar nuevas herramientas para poder abordarlos. Curiosamente, von Neumann en ningún lugar da una definición precisa de qué es lo que entiende por “autómata”, en su lugar siempre usa ejemplos como la computadora digital y elementos del sistema nervioso, especialmente el cerebro. Aspray

sugiere que se trataría de sistemas que procesan información como parte de un mecanismo de auto-regulación:

Von Neumann no definió explícitamente el término “autómata”, pero de su uso podemos deducir su aplicación a cualquier sistema que procese información como parte de un mecanismo de autorregulación. Sus principales ejemplos fueron el sistema nervioso central humano y la computadora, pero sus observaciones sugieren que consideraba otros sistemas homeostáticos dentro de los organismos biológicos, así como los sistemas de radar y los sistemas de telefonía y otros sistemas de comunicación, como ejemplos de autómatas. Lo que tenía en mente es algo parecido a lo que hoy se conoce como sistema de control. (Aspray, 1990, pp. 189–190)

Sin duda esta es una lectura posible, aunque voy a sugerir a continuación que seguir esa interpretación limitaría el alcance de lo que estaba pensando von Neumann, que incluye a los sistemas de control como un caso particular. De hecho, en capítulos anteriores ya sugerí que el área de la ingeniería dedicada al estudio de los sistemas de control puede verse como el resultado de la influencia mutua que tuvieron quienes proponían una “teoría general de los sistemas” sobre los cibernéticos, y viceversa. Una definición estándar de sistema de control, se apoya en la misma noción de sistema que sugería ya incluso Bertalanffy. Por ejemplo:

Sistema de control: controlar significa regular, dirigir, comandar. Por lo tanto, un sistema de control es un arreglo [*arrangement*] de elementos físicos diferentes conectados de tal manera para que pueda regular, dirigir o comandarse a sí mismo o a algún otro sistema. (Bakshi, 2020, p. 2)

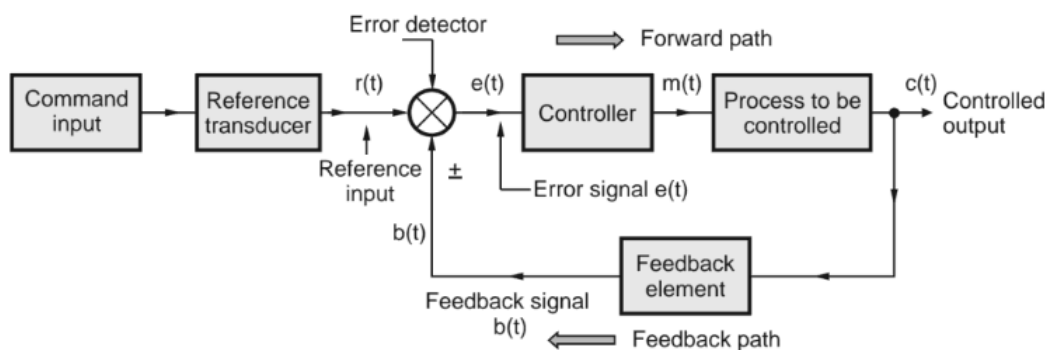


Figura 4.5: Diagrama prototípico de un ciclo de retroalimentación cerrado [*closed feedback loop*]. Todas las funciones dependen del tiempo: r es el valor de entrada de referencia, e es una señal de error, m es la señal “manipulada” por el controlador, c es el resultado del proceso, esto es, la salida controlada, y b es la señal de retroalimentación para la comparación entre el resultado esperado y el obtenido en base a la configuración en t del controlador (lo que Ashby denominaba “Regulador”). Tomada de (Bakshi, 2020, p. 13)].

Un sistema con *feedback*, como en la figura 4.5, es un caso prototípico, tal como

lo es para la cibernética. En literatura de corte ingenieril, es más común encontrar preocupaciones por lo que significa crear un *modelo* de un sistema físico, especialmente un modelo matemático. Así, se pueden encontrar pasajes como el siguiente:

Un problema crucial en el diseño y en el análisis en ingeniería es la determinación de un modelo matemático de un sistema físico dado. Este modelo debe relacionar de manera cuantitativa la entrada [*input*] y la salida [*output*] que pueden ser considerados como la “causa” y el “efecto”. Un modelo se puede definir como “una representación de los aspectos esenciales del sistema que presenta conocimiento del sistema de manera utilizable”. Para ser útil, el modelo no debe ser tan complicado como para que no se pueda entender y, por lo tanto, no ser adecuado para el análisis; al mismo tiempo, no debe ser simplificado en exceso y trivial al punto de que las predicciones del sistema basadas en este modelo sean gravemente imprecisas (Sinha, 2008, p. 6).

Una de las simplificaciones estándares consiste en linealizar la relación entre entradas y salidas, al menos localmente, a efectos de caracterizar a un sistema por medio de una sola función característica para ese sistema que exprese la relación entre las entradas y las salidas. Esto depende de que el sistema cumpla con dos propiedades que lo vuelven un *sistema lineal independiente del tiempo*. La linealidad, que significa que la relación entre entradas y salidas se puede expresar mediante una función (o un mapa, en el caso discreto) lineal: si una entrada $x_1(t)$ produce la salida $y_1(t)$ y otra $x_2(t)$ produce la salida $y_2(t)$, una entrada de la forma $a_1x_1(t) + a_2x_2(t)$ producen una respuesta $a_1y_1(t) + a_2y_2(t)$; lo cual puede extenderse a un número arbitrario de términos. La otra propiedad es la invariabilidad con respecto al tiempo, que significa que los parámetros que definen al sistema no van cambiando con respecto al tiempo; es decir que la respuesta del sistema una entrada $x_1(t_1)$ es equivalente a la que daría con la misma entrada en otro tiempo $x_1(t_2)$. La función que describe la respuesta de un sistema dinámico a una perturbación externa se conoce como función de respuesta a impulso o respuesta a impulso. El valor de salida podrá verse entonces como una combinación particular (efectivamente una convolución) entre el valor de entrada y la función de respuesta del sistema.⁵⁴ En esencia, este es el procedimiento de abstracción que sugerían ya Rosenblueth y Wiener (1945) para conocer una “caja negra”. La manera de abordar sistemas más complejos es equivalente a la apertura de la caja negra: distinguir distintos elementos que hacen al sistema como un todo, describirlos por medio de una función y luego caracterizar la manera en la que están acopladas. Esto es lo que genera una «representación en diagramas de bloques», porque *en un nivel determinado de análisis*, cada elemento es visto como un bloque aislado del resto de los elementos (otros bloques), siendo su valor de salida la entrada para otro bloque.

⁵⁴Especialmente a efectos de simplificar los cálculos, en ingeniería se suele aplicar una transformación de Laplace y caracterizar al sistema por medio de la función de transferencia, que es la equivalencia en dominio de frecuencias de la función de respuesta en el dominio temporal. Esto, por ejemplo, permite tratar a la función de convolución como una multiplicación. Una típica función de impulso es la función delta de Dirac en dominios continuos y su equivalente en dominios discretos, la función delta de Kronecker.

Si un sistema es complicado, es muy difícil analizarlo como un todo. Ayudados por la descripción mediante funciones de transferencia, podemos encontrar la función de transferencia para cada uno de los elementos del sistema complicado. Y mostrando la conexión entre los elementos, el sistema completo puede ser dividido en diferentes bloques y puede ser analizado convenientemente. Este es el concepto básico de la representación por diagramas de bloques. (Bakshi, 2020, cap 5, p. 1)

De esta manera, la operación básica para modelar un sistema de estas características requiere describir o identificar *bloques funcionales*, no sólo porque cumplen una función determinada sino también porque expresan una operación matemática que el elemento realiza —sin especificar la naturaleza del elemento— sobre las entradas para producir las salidas. En la figura se pueden apreciar cómo los bloques están definidos en base a una función. Cada bloque suele caracterizarse en términos de la cantidad de entradas y salidas que tiene, siendo el ideal la *reducción* a elementos totalmente simples que para cada entrada tengan solo una salida. Así, un sistema SIMO [por *Single Input, Multiple Outputs*] puede ser visto él mismo como un sistema de varios SISOs [*Single Input, Single Output*], lo mismo sucede con un sistema más complicado que tenga múltiples entradas y múltiples salidas [MIMO]. En ingeniería se suelen usar en simultáneo otras categorías para analizar los sistemas, como aquellos que tienen memoria y los que no, dependiendo de si el valor de salida depende o no de estados anteriores en los que se haya encontrado el sistema. Ahora bien, incluso la “memoria” de un sistema puede modelarse en base a sistemas más simples, especialmente si es que se trata de un sistema determinista. Lo “contrario” a un sistema determinista, es un sistema estocástico, en los que un mismo valor de entrada puede producir distintos valores de salida en momentos distintos de la operación.⁵⁵ Es interesante que esta literatura también hace una distinción entre sistemas causales y no causales (o anticipatorios), encontrando la diferencia en si el estado del sistema depende o no de *entradas futuras*, y suelen agregar que los sistemas no causales son *físicamente imposibles*, aunque desde una perspectiva de diseño son importantes porque pueden señalar cómo sería un sistema óptimo para un determinado proceso. Ahora bien, detrás de esta perspectiva de ver a los sistemas no causales o anticipatorios como *físicamente imposibles* yace un supuesto ontológico, y una fuerte consecuencia epistemológica, que trae consigo la creencia en un reduccionismo fuerte, según el cual la explicación de un fenómeno se logra al poder identificar todos los componentes básicos intervinientes y sus relaciones. Nuevamente, esta concepción está en la base del nuevo mecanicismo, que considera que

los mecanismos son entidades y actividades organizadas de tal manera que producen cambios regulares desde las condiciones de inicio o puesta en marcha hasta las de finalización o terminación (Machamer y col., 2000, p. 3).

Una de las exposiciones más claras para el caso de sistemas complejos fue expuesta años antes por Stuart Glennan, quien estipula que los mecanismos son sistemas complejos:

⁵⁵En efecto, un sistema determinista no es más que un caso límite de un sistema estocástico.

Un mecanismo para un comportamiento es un sistema complejo que produce ese comportamiento por la interacción de un número de partes, donde la interacción entre las partes puede ser caracterizada por generalizaciones directas, invariantes y relativas al cambio.^{LV} (Glennan, 2002, p. 334)

Aunque los neomecanicistas han expresado en varias ocasiones que el marco conceptual o *framework* del nuevo mecanicismo es compatible tanto con posturas reduccionistas como anti-reduccionistas, esto se debe a que están considerando reduccionismo en términos de la reducción de teorías, principalmente de la manera en la que fue discutida originalmente por Ernst Nagel (1961). Cuando se contrasta esta manera de entender al reduccionismo con las que surgen de la discusión filosófica en torno a la emergencia —que será el tema principal de la sección 7.1— queda más en claro que la clase de reducción a la que se comprometen los miembros del nuevo mecanicismo es a la postulación de un conjunto básico y último de entidades, de cuyas actividades y organización pueda explicarse todo lo que ocurre en los niveles superiores.⁵⁶ Es con este punto que no estoy de acuerdo, al tiempo que simpatizo con algunos de los otros objetivos de esta literatura. Unas páginas más atrás introduce una distinción entre modelos *mecánicos* y *maquínicos*, dependiendo de si las partes últimas del sistema se identificaban mediante las especificaciones o efectivamente se determinaban *todas* las características dinámicas y estructurales de las entidades básicas, incluyendo su “interactividad” con las otras entidades. A efectos de esta investigación, una de las conclusiones a extraer de la forma en la que von Neumann ve a la relación entre complejidad y autómatas, es que no todo sistema complejo puede reducirse a un sistema de control, por lo que la descripción cibernética, en última instancia, no puede llevarse a cabo de manera satisfactoria para todos los sistemas complejos, al menos si se espera un nivel de detalle adecuado. Los sistemas anticipatorios o no causales son “físicamente imposibles” sólo si se considera que la descripción *matemática* debe coincidir *punto a punto* con la naturaleza física de lo que se está describiendo. Si esto fuera cierto, los sistemas complejos como los organismos vivos, simplemente no serían físicamente posibles. El problema filosófico que yace aquí es infinitamente profundo, y se trata de una faceta nueva del problema que ya vimos y al que se enfrentaron, entre otros, Kant, Reinke, y von Üexkull: cómo hacer para describir en términos mecánicos un sistema que parecía depender de estados futuros. La cibernética, como vimos, hizo un gran esfuerzo en extender nuestra visión de lo que era posible en términos mecánicos y dentro de este nuevo paradigma dar cuenta de como las explicaciones teleológicas no introducían necesariamente “ordenes causales extraños”, aceptado incluso el peso completo de los límites epistémicos que las

⁵⁶Por ejemplo, la forma en la que Glennan interpreta las interacciones es términos causales: “La ‘interacción’ es una noción causal que debe entenderse en términos de la verdad de ciertos contrafácticos. La estipulación de que estas interacciones pueden ser caracterizadas por generalizaciones invariables y relacionadas con el cambio tiene como objetivo capturar las afirmaciones de verdad contrafácticas relevantes” (Glennan, 2002, p. 334). Si bien esta posición es interesante y digna de estudiar en profundidad, más recientemente Glennan ha pretendido explicar la misma noción de causalidad en términos de mecanismos (Glennan, 2017). Ver también sección 7.2 y (A. A. Ilcic, 2018)

nuevas “máquinas darwiniana” traían consigo, al meter de lleno un mundo estocástico en donde antes reinaba el determinismo.

Es interesante aquí notar la analogía con la misma clase de *indeterminación* que la descripción al estilo Turing-McCulloch-Pitts permite, en tanto no fijan de manera única las condiciones antecedentes de un estado del sistema. Para quien pretende estudiar un sistema, ya sea algo que era considerado un sistema o que fue *sistematizado* a efectos de *modelarlo* como tal —como es la estrategia cibernética—, esto es un problema, porque, como ya vimos, presenta una cota máxima en la capacidad que un observador puede tener sobre el comportamiento del sistema. En efecto, son muy pocos los sistemas, tanto naturales como artificiales, que pueden conocerse por completo, especialmente si por “conocer” se pretende algo como establecer todas las condiciones que pueden dar lugar a cierto fenómeno, como se suele pretender en algún contextos ingenieriles. Ahora bien, como ya pudimos observar en apartados anteriores, los contextos ingenieriles traen consigo preguntas que pueden iluminar varios aspectos de nuestra capacidad de conocer algunos procesos naturales, especialmente aquellos que, al menos *prima facie*, no pueden ser explicados “desde primeros principios” porque implican la exploración de un espacio de posibilidades, por el cual muchas trayectorias pueden llevar a un estado futuro determinado. En línea con la exploración conceptual que propone esta investigación, mi lectura de los trabajos de von Neumann y Turing sugiere que fueron los primeros en pensar que la analogía que puede resultar más iluminadora es la de pensar no únicamente en términos únicamente ingenieriles, sino en términos *computacionales*, clase que agrega a las aproximaciones de corte ingenieril pero no se reduce a ellas (lo mismo que ocurre con la *integración* de estrategias *bottom-up* y *top-down*). Así, por ejemplo, se puede pensar la misma abstracción que mencionan McCulloch y Pitts como posibilidad para conocer lo que está haciendo un sistema, pese a introducir un aspecto de irreducibilidad frente al “mecanismo real”, dada su dependencia del tiempo es análoga a esta exploración de un espacio de posibilidades. Para quien pretende averiguar *cómo* un sistema llegó al estado en el que se encuentra, sin previamente conocer los detalles de su historia y su composición, sólo puede limitarse a rastrear posibles caminos que llevaron al sistema al estado actual, lo que obligará a una concepción probabilista sobre el pasado de dichos sistemas, y probablemente de su futuro. Para sistemas complejos, esta opacidad epistémica es prácticamente simétrica con respecto al tiempo. Continuando con la analogía computacional, esta indeterminación puede ser pensada en términos de la incapacidad de reconstruir una descripción estática de un programa computacional partiendo desde su “forma” interpretada o compilada; i.e. una vez que su descripción original fue convertida en instrucciones para un hardware o sistema físico computacional particular.

Von Neumann no exploró con mayor profundidad los aspectos conceptuales que surgen de esta forma de entender a ciertos sistemas, pero sí se esforzó en buscar modelos alternativos posibles para comprender a los sistemas complejos que —y así extender los

lenguajes usados para describirlos— parecían escaparse a las formulaciones clásicas. Lo que finalmente intentó articular, según mi lectura, es que para entender y explicar sistemas en los que hay una relación intrínseca (y a la vez difusa) entre aspectos estructurales y dinámicos —como lo hay entre el *hardware* y el *software*—, dicha explicación debe ser *algorítmica* en su naturaleza.⁵⁷

4.2.4. Máquinas armadas con modelos

Como señala bien Arthur Burks, von Neumann se concentró en dos problemas fundamentales en la teoría de autómatas: el de la auto-reproducibilidad y el de la robustez [*reliability*] (J. Neumann & Burks, 1966, p. xvi).⁵⁸ Estos dos problemas son prácticamente naturales si se los considera motivados por explorar las posibles conexiones entre sistemas artificiales complicados y organismos a efectos de determinar si pueden ambos considerarse como instancias de una clase particular de sistemas, entendidos de modo general, más allá del material en el que se vean finalmente instanciados. Esto es lo que finalmente podría justificar la transferencia de conocimiento entre los dos dominios de estudio tradicionales de estos sistemas. En particular, esto podría resaltar los aspectos ingenieriles que intervienen en el *diseño* de modelos. Aquí von Neumann estaría recuperando, entonces, gran parte de los objetivos que se habían planteado en la Teoría general de los sistemas y en la cibernética; mas desde una mirada que reemplaza el sistema último de comparación por uno todavía más complejo. Y aquí el elemento crucial que le permite realizar la comparación es el apoyo en la abstracción que yace en su uso de las neuronas de McCulloch-Pitts como puerta de enlace o interfaz entre el dominio de la computadora digital y el sistema nervioso (Aspray, 1990, p. 173); algo que, al mismo tiempo, permite repensar el rol que estas descripciones algorítmicas tienen en la misma matemática:

Los autómatas han desempeñado un papel cada vez más importante en las ciencias naturales. Durante la última parte de este período, los autómatas han comenzado a invadir también ciertas partes de la matemática, en particular, pero no exclusivamente, la física matemática o la matemática aplicada. *Su papel en las matemáticas presenta una interesante contrapartida a ciertos aspectos funcionales de la organización en la na-*

⁵⁷ Aquí ya se puede ver cómo las reflexiones sobre la complejidad parecen indicarnos, como tantos otros casos de las ciencias, que con respecto a la pregunta *ontológica* por la naturaleza de lo complejo, es conveniente pensar en términos de una metafísica de procesos, los que subyacen a lo que experimentamos *como* entidades, que en lugar de ser substanciales son, simplemente, procesos muy estables, estabilidad que es una propiedad emergente de los procesos subyacentes y que, al mismo tiempo, le permite a esos “objetos” ser parte de otros procesos. Si bien no es el objetivo de esta investigación ahondar en las consecuencias metafísicas del estudio de la complejidad, sí hago algunas breves reflexiones al respecto en algunos pasajes en esta investigación, en tanto el estudio de la complejidad “se presta” a una metafísica procesual.

⁵⁸ Si bien en usos más coloquiales el término “*reliability*” se suele traducir como “confiabilidad”, traduzco por “robustez”, dado que lo encuentro más cercano a la idea que bajo mi lectura von Neumann pretendía transmitir. De todas maneras, se podría sostener que en términos de lo que espera un agente, mientras más robusto sea un sistema, más confiable será, en tanto su capacidad para seguir funcionando como se cree que debe funcionar es mayor (i.e. frente a un mayor número de escenarios posibles).

turaleza. Los organismos naturales son, por regla general, mucho más complicados y sutiles, y por tanto mucho menos conocidos en detalle, que los autómatas artificiales. Sin embargo, *algunas regularidades que observamos en la organización de los primeros pueden ser bastante instructivas en nuestro pensamiento y planificación de los segundos; y a la inversa, una buena parte de nuestras experiencias y dificultades con nuestros autómatas artificiales pueden proyectarse hasta cierto punto en nuestras interpretaciones de los organismos naturales.* (von Neumann, 1987a, 391–392. El énfasis es mío)

El primer modelo que von Neumann consideró para los autómatas que se auto-reproducen fue lo que luego Burks denominó “modelo cinematográfico”, y de hecho se basó en la estrategia global descrita anteriormente, que intenta replicar en términos ingenieriles una estrategia de construcción matemática: determinar los elementos básicos que operan y sus capacidades, y luego proceder a listar combinaciones posibles de estos elementos y explicar cómo estas determinan las condiciones para que ocurran ciertos comportamientos:

es de nuevo primordial dar una definición rigurosa de lo que constituye un autómata a efectos de la investigación. En primer lugar, hay que elaborar una lista completa de las partes elementales que se van a utilizar. *Esta lista debe contener no sólo una enumeración completa, sino también una definición operativa completa de cada parte elemental.* Es relativamente fácil elaborar una lista de este tipo, es decir, escribir un catálogo de “componentes de la máquina” [*machine parts*] que sea lo suficientemente inclusivo como para permitir la construcción de la amplia variedad de mecanismos que se requieren aquí, y que tenga el rigor axiomático que se necesita para este tipo de consideración. (von Neumann, 1987a, p. 418)

El “dejo matemático” de este *approach* o manera de acercarse al problema queda aún más claro cuando von Neumann sugiere que hay cierta arbitrariedad a la hora de identificar los componentes fundamentales:

Tampoco es necesario que la lista sea muy larga. Por supuesto, puede hacerse arbitrariamente larga o arbitrariamente corta. Puede alargarse incluyendo en ella, como partes elementales, cosas que podrían conseguirse mediante combinaciones de otras. Puede hacerse corta -de hecho, puede hacerse que consista en una sola unidad- dotando a cada parte elemental de una multiplicidad de atributos y funciones. *Por lo tanto, cualquier afirmación sobre el número de partes elementales requeridas representará un consenso de sentido común, en el que no se espera nada demasiado complicado de ninguna parte elemental, y no se hace que ninguna parte elemental realice varias funciones, obviamente distintas.* En este sentido, puede demostrarse que alcanza con una docena de piezas elementales. (von Neumann, 1987a, p. 418. El énfasis es mío)

De la misma manera en la que ocurre con la abstracción para entender los modelos que proponían los cibernéticos, aquí von Neumann es consciente del constante *trade-off* que ocurre entre una descripción macroscópica o “de alto nivel”, en la que todo el funcionamiento del sistema está encapsulado en un componente cuya descripción interna es opaca (i.e. una caja negra), que facilita algunas explicaciones y comparaciones con otros siste-

mas, y la descripción microscópica que si bien puede volverse un recurso fundamental para la intervención sobre el sistema y el diseño de otros similares, fuerza a dar una explicación de cómo los distintos componentes están dinámica y estructuralmente orquestados para ser funcionalmente equivalentes al sistema descrito macroscópicamente o “como un todo”. El objetivo, entonces, de una teoría general de autómatas (o, me atrevo a decir, en términos contemporáneos: una teoría de la complejidad) es precisamente la de llenar el vacío de lo que ocurre en la transición de los estados microscópicos y el comportamiento global del sistema, partiendo de la premisa de que hay principios organizativos que pueden ser estudiados y que se encuentran en operación cuando las interacciones entre las partes no son triviales (como serían los meros choques mecánicos que transfieren energía pero poca información y que se pueden explicar perfectamente con las herramientas de la mecánica estadística tradicional). Con este objetivo en mente es que von Neumann se aproxima al problema de la auto-reproducción y la evolución como un posible *fenómeno organizacional* que puede implementarse en distintos substratos a efectos de lograr variabilidad y un aumento en la complejidad gracias a la capacidad de explorar espacios de posibilidades cada vez mayores:

El problema de la auto-reproducción se puede plantear de esta forma: ¿Se puede construir un agregado a partir de tales elementos de tal manera que si se introduce en un depósito, en el que flotan todos estos elementos en gran número, comience a construir otros agregados, cada uno de los cuales resultará al final ser otro autómata exactamente igual al original? Esto es factible, y el principio en el que se puede basar está estrechamente relacionado con el principio de Turing. (von Neumann, 1987a, p. 418)

El principio de Turing no es sólo la máquina universal de Turing —sin duda la base para el “constructor universal” que introducirá von Neumann—, sino al mismo tiempo el procedimiento que Turing llevó a cabo para diseñar su máquina universal. Así, para este primer modelo, Von Neumann supone un autómata A cuya función es la de recibir como entrada una serie de instrucciones I que corresponderán a las de otro autómata, aquel que A debe construir. Las instrucciones que A puede “leer” son análogas a las que se encuentran en la cinta en una máquina de Turing, que en este caso no será descrita como una cinta sino recurriendo a una combinación de elementos estructurales que tengan las mismas propiedades notacionales.⁵⁹ Otro autómata B tendrá la función de producir una copia de las instrucciones I , sin importar su tamaño o su complejidad. El paso crucial requiere de otro autómata C que funciona como un mecanismo de control que cuando a A se le agregue una instrucción I pueda causar que A comience a construir una entidad nueva de acuerdo a las instrucciones. C luego debe hacer que B cree una copia de las instrucciones. La otra tarea de C es anexar a A la nueva copia de I , desconectar la nueva construcción de A y liberarla al ambiente. El agregado $A + B + C$ forman un autómata D al que se le debe poder

⁵⁹En efecto, esta es la forma principal en la que un sistema complejo *procesa información*. Esto es, puede *actuar* —i.e. cambiar de estado— de acuerdo a señales que recibe del medio o de algún componente dentro del sistema.

anexar una descripción I_D de sí mismo.⁶⁰ D junto con I_D forman una nueva entidad E que puede reproducirse a sí misma. La razón por la que no hay ninguna contradicción es similar a la razón por la vimos que una máquina de Turing puede decirse que se modifica a sí misma: la instrucción I_D es *independiente de D* por más que sea *sobre D* ; de la misma manera en la que *durante el proceso de ejecución* la máquina que se modifica a sí misma, para un observador en el nivel adecuado, es *dos máquinas al mismo tiempo*, introduciendo una “mutación” en una de sus “copias”, para luego destruir la “copia” original. En la *operación* —i.e. en la dinámica— del autómata, se genera un bucle de retroalimentación entre lo que *estructuralmente* son dos entidades distintas que se apoyan mutuamente para dar lugar al *proceso* de replicación. Aquí, de hecho, puede observarse que la intención de von Neumann no es sólo la de demostrar la auto-replicabilidad sino también el requisito para que una máquina pueda *evolucionar*, que es precisamente la de incluir una descripción de sí misma —un modelo— que pueda cumplir dos roles en momentos independientes: el de funcionar pasivamente como memoria y guardar las instrucciones (que pueden sufrir modificaciones) y el “rol activo” de dirigir la construcción del nuevo autómata.⁶¹ Von Neumann es muy consciente de los supuestos y de los límites que están detrás del método que está utilizando. La complejidad del sistema que se está estudiando obliga a dividir el problema en subproblemas y ver al sistema *como si* “estuviera compuesto de partes que hasta cierto punto son partes independientes y elementales” (von Neumann, 1987a, p. 392). De esta manera, ahora desde un punto de vista epistémico, el mismo problema original queda dividido en dos partes, la primera que consiste en el estudio de la estructura y el funcionamiento de cada una de las partes por separado, y luego una segunda que consiste en “entender cómo estos elementos están organizados en un todo, y cómo el funcionamiento del todo está expresado en términos de estos elementos” (von Neumann, 1987a, p. 392).⁶² La primera parte es, al menos en principio, un problema de la fisiología. Así, lo que el “método axiomático” permite hacer es *abstraer* el problema de la primera parte y concentrarse en cómo hacer que operen entre ellos para obtener un comportamiento

⁶⁰Es importante aclarar desde ya que este agregado no es una “mera suma”, ya que estarán *funcionalmente acoplados*. Precisamente, esta es una de las formas en las que aparecen fenómenos emergentes, en tanto las partes se acoplan y se refuerzan en bucles de retroalimentación de manera tal que producen efectos no lineales. Wimsatt (1998, 2000, 2007) toma a esta “no-agregatividad” como la característica de lo emergente. (Ver también secciones 5.2.9 y 7.1.)

⁶¹Aquí se puede notar ya la analogía que existe entre esta propuesta y el diagnóstico que hacía Ashby sobre la importancia de la regulación de un sistema basada en un modelo de sus operaciones y del resultado de las intervenciones. Efectivamente otra analogía posible, y que cobrará cada vez más importancia a la luz de los trabajos de von Neumann, es el de la codificación de dicho modelo y de las mismas instrucciones de regulación en una configuración física que puede ser explorada de manera similar a cómo funciona la memoria en una computadora; esto es parte de lo que vuelve a la teoría de la computación uno de los pilares fundamentales de cualquier teoría de la complejidad. Ilustrar esa conexión es parte del objetivo de este capítulo. Efectivamente, muchos espacios complejos solo son explorables con sistemas que tienen alguna clase de memoria, por lo que son no ergódicos y no markovianos.

⁶²La posibilidad de “componer causas” es uno de los elementos claves en las formas tradicionales de idealización en ciencias, como lo sugirió ya McMullin (1985) y como expando en el capítulo 6 de la mano del concepto de abstracción.

deseado: efectivamente, cada componente se ve como una caja negra de la que se conoce cómo reacciona a cada estímulo que puede recibir, pero no cómo es que lo hacen, esto es, sin tener detalles de su funcionamiento interno.⁶³ Lograr esto para un sistema complejo es particularmente difícil, especialmente porque la descripción del funcionamiento de cada unidad debe hacerse considerando el contexto en el que se encuentra cada una para el fenómeno que se pretende estudiar. Por ejemplo, para la clase de idealización detrás de las neuronas artificiales de McCulloch-Pitts, surge la pregunta por si considerarlas como un sistema esencialmente digital es una buena aproximación o no. Las consideraciones de estas idealizaciones no deben hacerse de manera general, sino atendiendo a la clase de problema que se intenta iluminar con dicha idealización, lo que introduce elementos a considerar que podrían bien considerarse indeseables si lo que se pretende es un “conocimiento perfecto”:

Por lo tanto, el hecho importante no es si un órgano tiene necesariamente y bajo todas las condiciones el carácter de todo o nada —probablemente nunca sea el caso—, sino más bien si *en su contexto adecuado* funciona principalmente, y parece estar destinado a funcionar principalmente, como un órgano de todo o nada. Me doy cuenta de que esta definición introduce criterios bastante indeseables de “propiedad” del contexto, de “apariencia” e “intención”. No veo, sin embargo, cómo podemos evitar utilizarlos, y cómo podemos renunciar a contar con el empleo del sentido común en su aplicación. (von Neumann, 1987a, p. 401. El énfasis es mío)

La reserva de von Neumann ante la introducción de estos términos parece estar motivada por los problemas que estas nociones traen para una descripción del fenómeno que pudiera ser completamente objetiva, sin que intervenga un agente externo para determinar esta clase de criterios. Las ramificaciones filosóficas de este punto son hartamente extensas, y de hecho algunas ya han sido mencionadas, e ineludibles en cualquier reflexión en torno a modelos. Aquí pretendo sólo concentrarme en la transformación del ideal de conocimiento y la forma de obtenerlo que finalmente von Neumann parece estar sugiriendo a la hora de enfrentarse a esta clase de sistemas complejos; propuesta que puede finalmente describirse como una complejización de la mirada cibernética descrita en el capítulo anterior, y que introduce un límite al conocimiento que se pueda tener.⁶⁴ En esencia, consistirá en cambiar constantemente entre dos formas o modos de representación de los *elementos funcionales* que se hayan identificado a un nivel de descomposición particular; este cambio es lo que permite lograr obtener un “equilibrio dinámico” entre estas dos representaciones, generando, al mismo tiempo, una nueva representación más compleja que integra las dos,

⁶³Esto es, se entiende como *especificaciones*: “Externamente, un autómata es una ‘caja negra’ con un número finito de entradas y un número finito de salidas. Cada entrada y cada salida son capaces de alcanzar exactamente dos estados, que se designan como estado ‘estimulado’ y estado ‘no estimulado’, respectivamente. El funcionamiento interno de una ‘caja negra’ de este tipo equivale a una prescripción que especifica qué salidas se estimularán en respuesta a la estimulación de cualquier combinación de las entradas, y también el tiempo de estimulación de estas salidas” (von Neumann, 1956/1987b, p. 554).

⁶⁴Límite que da lugar a una forma particular de entender la emergencia de fenómenos y propiedades.

para luego repetir el proceso. Usando la terminología actual, los dos modos pueden ser denominados *bottom-up* y *top-down*, aunque von Neumann usa los términos “sintético” e “integral”, asociándolos, respectivamente, al método empleado por McCulloch y Pitts, por un lado, y Turing, por el otro:

Voy a describir tanto el trabajo de McCulloch y Pitts como el de Turing, porque reflejan dos formas muy importantes de abordar el tema: la forma sintética y la forma integral. McCulloch y Pitts describieron estructuras que se construyen a partir de elementos muy simples, de modo que lo único que hay que definir axiomáticamente son los elementos, y luego su combinación puede ser extremadamente compleja. Turing comenzó describiendo axiomáticamente lo que se supone que es el autómata completo, sin decir cuáles son sus elementos, sólo describiendo cómo se supone que funciona.^{LVI} (von Neumann, 1966, p. 43)

Bajo mi lectura, que se apoya en la visión cibernética de los modelos presentada anteriormente, la apuesta *metodológica* –con importantes consecuencias epistémicas– de von Neumann para el estudio de los sistemas complejos debe interpretarse de la siguiente manera. Una vez identificado el sistema que se pretende estudiar, se lo separa del ambiente, en el sentido cibernético de crear una línea de división entre aquello que se pretende explicar y lo que se va a tomar como su “ambiente”; separación que es arbitraria aunque en muchos casos suele estar motivada por alguna de las tantas formas de separar niveles y entidades.⁶⁵ El primer paso es construir un modelo completamente *top-down*, que dé cuenta de las interacciones que el sistema (efectivamente una “caja negra”) tiene con el ambiente, siguiendo la aproximación de Turing. Bajo esta mirada la complejidad del sistema estará definida por la capacidad computacional en términos de la capacidad de alterar los estados del ambiente, sin preocuparse por los cambios que *de hecho* ocurren dentro del sistema propiamente dicho. De un sistema lo suficientemente complejo, se podría esperar que efectivamente se comporte como una máquina de Turing completa, en tanto para dicha máquina, “el mundo externo es la cinta” (J. Neumann & Burks, 1966, p. 50). Esto significa que de la misma manera en la que la sofisticación de una máquina de Turing se puede “compensar” mediante una complejización en las instrucciones que recibe, la capacidad computacional del sistema dependerá efectivamente del ambiente en el que se encuentre; de manera análoga a la forma en la que, como señalé antes, un virus aislado no puede auto-reproducirse, mientras que sí lo puede hacer si está en un ambiente adecuado con el que puede interactuar.⁶⁶ Ahora, quien desea estudiar un sistema comple-

⁶⁵En esta aparentemente simple oración se esconde una miríada de problemas filosóficos, algunos tan viejos como la filosofía misma, entre los que se destacan el problema de la individuación y la identidad, el de las clases naturales y el de qué se entiende por nivel. En el capítulo 7 sugiero una manera de enfrentar el problema de los niveles y alguno de sus derivados (sección 7.2)

⁶⁶Esta es una de las tantas formas en las que se puede extender la tesis del funcionalismo, posición que en su formulación original ligada a la filosofía de la mente sostiene que lo que hace de un estado de cosas particular un estado mental de un tipo particular no depende de su constitución interna sino de las funciones o roles que tiene en el sistema del que es parte, sin depender (al menos en un sentido fuerte) de la forma en

jo debe mantener en vista dos estrategias distintas de cómo se podría *diseñar* un sistema semejante, ya que la mera descripción *à la* Turing de las capacidades del sistema no da cuenta de los detalles internos de su funcionamiento. Así, el próximo paso es generar un modelo *bottom-up*, que parta de definir una serie de elementos constitutivos mínimos cuya interacción total pueda decirse que implementa la misma computación que está presente en la descripción *top-down*. El primer *insight*, entonces, que se puede observar ya en von Neumann es que para estudiar esta clase de fenómenos se requiere no sólo plantear dos estrategias de descripción distintas, sino al mismo tiempo articularlas de manera tal que la descripción global que las integra funcione como una guía para las restricciones de la descripción local.⁶⁷ Bajo mi lectura, esto significa la introducción de una *jerarquía epistémica dinámica*, en tanto distingue dos formas de generar modelos para un sistema que deben probarse equivalentes y funcionar luego para generar un nuevo modelo que pueda él mismo describirse en términos de la jerarquía epistémica que dio lugar a los modelos originales y que, al mismo tiempo, incorpore más restricciones en lo que respecta a los componentes físicos que en última instancia se sabe que hacen al sistema bajo estudio (o que se pretende usar, cuando se está *diseñando* un sistema). Claro que los componentes también serán descritos en términos de un modelo, por lo que la sugerencia es que el análisis epistémico debe ser capaz de dar cuenta de la articulación entre todos estos modelos y la forma en la que dicha articulación cambia a medida que los mismos modelos van avanzando; lo que significa, a su vez, que se debe poder dar cuenta del nivel de descripción que cada modelo considera y, especialmente, de la relación entre dichos niveles.⁶⁸ La ventaja epistémica radica precisamente en la capacidad de *articular* dichas descripciones a medida que la complejidad de lo estudiado requiera ir alternando entre ellas. Von Neumann ve un ejemplo claro de esto al intentar estudiar los principios lógicos detrás de una red al estilo de McCulloch-Pitts:

la que dicha función este instanciada en tal estado. Esta versión contemporánea de la tesis fue presentada por Putnam (1960, 1967). Aunque luego Putnam la abandonó (como era su costumbre), su introducción respondía a una necesidad de extender –y en el proceso volver más susceptible de una formulación de psicología científica– las tesis sobre la naturaleza de lo mental que surgían de una mirada behavioista o conductual, lo que está en perfecta sintonía con la propuesta de Rosenblueth y col. (1943). En (Shagrir, 2005) se puede encontrar una presentación de las idas y vueltas de Putnam con respecto al funcionalismo. Como se podrá ver, la caracterización que propongo tiene muchos tintes funcionalistas, en direcciones similares a las del mismo Shagrir (p. ej. Harbecke & Shagrir, 2019).

⁶⁷Aspray (1990) sugiere que von Neumann parecía estar favoreciendo la descripción *bottom-up* para los sistemas más simples, mientras que prefería la descripción integral o *top-down* al estilo de Turing para los autómatas más complejos. Creo que la diferencia no está en cuál preferir para entender un autómata, sino más bien por cuál empezar (cf. Aspray, 1990, p. 195).

⁶⁸Para adelantar algunos puntos que emergerán con más claridad más adelante: un sistema complejo debe ser capaz de crear una semántica por sus propios medios y quien estudia el sistema debe estar consciente de los límites de sus propias capacidades computacionales en todo intento de dar cuenta del funcionamiento del sistema y de su semántica “intrínseca”; la que podríamos decir que es semejante al modelo que el sistema tiene de sí y de su propio ambiente. Lo *emergente* es aquello que ocurre (i.e. cambios de estados) por fuera de la capacidad descriptiva al nivel de *un* modelo y de las capacidades computacionales “en tiempo real” (o de resultados previos) del agente que usa ese modelo.

Hay una equivalencia entre los principios lógicos y su materialización [*embodiment*] en una red neural, y mientras que en los casos más sencillos los principios pueden proveer una expresión simplificada de la red, es muy posible que en los casos de complejidad extrema, la conversa sea verdadera. (von Neumann, 1987a, p. 414)

Una consecuencia de este análisis es la posibilidad de articular una noción de complejidad que esté asociada a las capacidades computacionales de cada parte o subsistema —y en última instancia, deberíamos decir, *depende* de ellas, en tanto es una propiedad que el sistema obtiene en base a la organización de sus partes—; así es como un agente epistémico puede entender la “capacidad funcional” del sistema que estudia con respecto a una serie de tareas o requisitos —que hacen al contexto de aplicabilidad o dominio de un modelo—. A su vez, la complejidad así entendida trae aparejada la autonomía y la robustez que el sistema como un todo puede presentar frente a una serie de escenarios; noción de “sistema” que, claro, estará condicionada por la misma manera en la que un agente epistémico lo analice. Estos conceptos y su interrelación serán examinados con mayor detalle en los capítulos que siguen; desde ya, sin embargo, se puede observar cómo el mismo von Neumann estaba convencido de que todos estos análisis no eran otra cosa que una serie de pasos rudimentarios hacia una teoría general de los autómatas que, a su vez, representaría la misma clase de pasos hacia un entendimiento más riguroso de la noción misma de complejidad y sus consecuencias para el entendimiento de la clase de sistemas que para su funcionamiento dependen de una organización no trivial de los elementos que lo componen, donde por “componer” debe entenderse no una mera composición física o material, sino, más bien, una composición distribuida tanto espacial como temporalmente; efectivamente, de múltiples factores que están detrás de un fenómeno que se pretende modelar. El término que usa von Neumann para referirse a esta complejidad es “complicación” e íntimamente ligada a la posibilidad de una teoría de autómatas rigurosa:

todos estos son pasos muy toscos en la dirección de una teoría sistemática de los autómatas. Representan, además, sólo una dirección particular. *Esta es, como ya he indicado, la dirección hacia la formación de un concepto riguroso de lo que constituye la “complicación”*. Ilustran que la “complicación” en sus niveles inferiores es probablemente degenerativa, es decir, que todo autómata que pueda producir otros autómatas sólo podrá producir otros menos complicados. Sin embargo, hay un cierto nivel mínimo en el que esta característica degenerativa deja de ser universal. En este punto se hacen posibles los autómatas que pueden reproducirse a sí mismos, o incluso construir entidades superiores. *Este hecho, que la complicación, así como la organización, por debajo de un cierto nivel mínimo es degenerativa, y más allá de ese nivel puede llegar a ser autosuficiente e incluso creciente, jugará claramente un papel importante en cualquier teoría futura del tema.*^{LVII} (von Neumann, 1987a, p. 421. Los énfasis son míos)

De esta manera, se puede pensar una jerarquía de autómatas en base a su complicación; en donde la capacidad de autoreproducirse es un signo de que se está frente a un fenómeno

de mayor complejidad, pero no se trataría de la más compleja posible, mucho menos de un rasgo necesario para ser un autómatas. Al contrario, es una condición mínima que deben cumplir los sistemas que necesitan ser capaces de un proceso similar a la evolución darwiniana para explorar un mayor número de configuraciones posibles.⁶⁹ Algunas de estas configuraciones posibles son estables y la combinación del sistema en ciertas configuraciones junto con los estados del ambiente que le sean accesibles, pueden describirse como capaces de computación universal; capacidad que es netamente emergente, en tanto el “salto” a la universalidad puede verse como una transición de fase, efectivamente abriendo la posibilidad a la existencia de procesos que bajo otras configuraciones de las mismas partes de un sistema –o estados de su ambiente– no podían darse. (Estos dos procesos están íntimamente relacionados: en cierto sentido, la emergencia no es otra cosa que la evolución de la complejidad; efectivamente generando la necesidad de nuevas descripciones para dar cuenta de las nuevas capacidades.) Así pareciera entonces sugerirse una jerarquía de complejidad, análoga a la jerarquía de Chomsky para lenguajes formales, de acuerdo a la capacidad funcional que tiene el autómatas; que, *in abstracto*, puede describirse en base a su capacidad para “manejar información” (interpretando así computacionalmente su capacidad de comportamiento):

Hay un concepto que será bastante útil aquí, del que tenemos una cierta idea intuitiva, pero que es vaga, poco científica e imperfecta. Este concepto pertenece claramente al tema de la información, y las consideraciones cuasi-termodinámicas son relevantes para éste. *No conozco ningún nombre adecuado para ello, pero se describe mejor llamándolo “complicación”. Es la efectividad en la complicación, o la potencialidad de hacer cosas. No estoy pensando en lo complicado que es el objeto, sino en lo complicado que son sus acciones intencionadas [purposive].* En este sentido, un objeto es del más alto grado de complejidad si puede hacer cosas muy difíciles y complicadas [*involved*].^{LVIII} (von Neumann, 1966, p. 78. El énfasis es mío)

En una dirección que nos recuerda a varias sugerencias de la cibernética, y especialmente su esfuerzo por volver a colocar el comportamiento teleológico bajo el escrutinio científico, aquí von Neumann sugiere que una forma de entender la complejidad de una entidad –i.e. de una caja negra– es la de observar la complejidad de las acciones *significativas* de las que es capaz de realizar; tarea que inevitablemente requerirá estudiar la relación del sistema con aquello que se definió como su ambiente al determinar al proceso a investigar como un *sistema*, estudio que deberá llevarse a cabo recursivamente, analizando las distintas partes de un sistema como ambiente para las otras partes del sistema. Aquí se puede ver también otra conexión con la propuesta de Ashby, en tanto los cambios en el ambiente llevan al sistema a explorar sus posibilidades de cambiar él mismo de estado para lograr

⁶⁹Es importante notar que la evolución darwiniana no es la única forma en la que los sistemas complejos pueden evolucionar y adaptarse a un ambiente que, al mismo tiempo, también se adapta. Digo más acerca de esta capacidad de los sistemas complejos en el capítulo siguiente, aunque el núcleo está en que distintos procesos adaptativos (como la evolución, la auto-organización, etc.) pueden todos ser considerados como instancias de ciertos procesos computacionales análogos.

llegar a algún punto de equilibrio (probablemente dinámico) o intentar alterar el ambiente para que el estado en el que estaba se pueda seguir manteniendo. Así, un sistema complejo debe poder *regular* las perturbaciones, tanto internas como externas, a efectos de lograr lo que describimos como sus “objetivos”. En efecto, esto requiere dar cuenta de la relación entre las múltiples formas de describir un sistema complejo, desde sus componentes y sus relaciones hasta sus propiedades “como un todo” o sistémicas. El punto crucial que se desprende de los análisis que hemos visto hasta ahora es que dicha relación no es uno a uno. De hecho hasta creo que se podría argumentar que, quizás con excepción de los sistemas complejos “más sencillos”, se trata de una característica esencial de los sistemas complejos: para cada comportamiento global existen múltiples formas de lograrlo en base a configuraciones dinámicas y estructurales de los subsistemas que hacen al sistema. Es esta clase de indeterminación la que caracteriza a un proceso emergente, efectivamente un fenómeno que habilita un nuevo espacio de posibilidad, que debe ser estudiado en sus propios términos.⁷⁰ Acerca de estos “nuevos principios”, comentaba Burks sobre von Neumann:

Pensaba que hay principios cualitativamente nuevos en los sistemas de gran complejidad y buscó estos principios en el fenómeno de la auto-reproducción, que depende claramente de la complejidad. También es de esperar que, debido a la estrecha relación de la auto-reproducción con la auto-reparación, los resultados sobre la auto-reproducción ayuden a resolver el problema de la robustez [*reliability*].^{LIX} (Burks, en J. Neumann & Burks, 1966, p. 20)

Es precisamente la búsqueda y la caracterización de esos esos nuevos principios lo que hace al objetivo de la ciencia de los sistemas complejos; y es, también, el objetivo del capítulo siguiente.

4.3. Resumen y conexiones

La discusión en torno a las formas en las que los nuevos mecanicistas han enfocado la explicación científica es mucho más profunda de lo que aquí mencionado y correspondería hacer un análisis pormenorizado de sus propuestas. Para el caso de ellas en las ciencias cognitivas, con particular énfasis en las neurociencias, se puede consultar el excelente trabajo doctoral de Itatí Branca (2021)

⁷⁰Se puede decir, incluso, que los sistemas complejos más difíciles de modelar son precisamente aquellos que son su propio ambiente.

Capítulo 5

Una (posible) caracterización filosófica de los sistemas complejos

En este capítulo me propongo llevar a cabo un repaso de las características “esenciales” de los sistemas complejos, aunque con especial énfasis en los desafíos netamente filosóficos que presentan tanto su naturaleza como su estudio. A su vez, presto especial atención a distintas formas en las que la idea de patrón ha surgido como un concepto crucial para las reflexiones acerca del conocimiento de la naturaleza y, al mismo tiempo, la naturaleza del conocimiento, haciendo así ecos a la discusión sobre información y organización que formó parte de los capítulos anteriores. Como si esto fuera poco, también comienzo a explorar más sistemáticamente reflexiones acerca de la complejidad de la mano de economistas, siendo la economía un claro ejemplo de una “ciencia de interfaz” o de lugar de encuentro de niveles, modelos y fenómenos. En esto, por tanto, comienzo también una exploración algo más sistemática de la reflexiones en torno a la complejidad de Herbert Simon, quien ha sido uno de los grandes pioneros en realizar y destacar la importancia del “intercambio de *insights*” entre contextos, disciplinas, individuos, formas de vida o, más generalizablemente, entre representaciones.¹

5.1. Características de un sistema complejo

No hay acuerdo en la literatura acerca de una definición precisa que se pueda usar para determinar que se está frente a un sistema complejo. De todas formas, estas características son las que se suelen asociar a dichos sistemas.

- Número de elementos, y relaciones: la numerosidad de los elementos no está tan

¹Si se me obligara a dar un título alternativo para este capítulo una primera segunda opción sería «La naturaleza de la complejidad y la complejidad de la naturaleza».

asociada a la cantidad *per se* de elementos que hacen al sistema, sino más bien a al número y clases de interacciones que tienen entre ellos. Así, las relaciones entre los elementos deben ser unidades mínimas de análisis ellas mismas, en tanto serían lo que hacen que no se trate de un “mero agregado” (como sería el caso de la complejidad estadística o desorganizada, según la clasificación de Weaver).

- Variedad o diversidad: además de la cantidad, la mayoría de los sistemas complejos presentan una variedad de componentes que interactúan entre sí. En muchos casos esos mismos componentes pueden describirse como sistemas, incluso complejos —fijando en un nuevo análisis al sistema complejo original como ambiente del componente que ahora se ve como un sistema él mismo, siendo así un subsistema dentro del primero—.
- Retroalimentación (*feedback*): la interacción entre los elementos, ya sea en términos de materia, energía o información, suele ser recíproca entre ellos, de manera tal que están efectivamente acoplados. Esta retroalimentación es “modular”, en el sentido de que ensambles más grandes de partes dan origen a subsistemas, entre los cuales puede existir retroalimentación entendida así al nivel global entre los subsistemas simultáneamente (en paralelo a las retroalimentaciones “internas” que cada subsistema presente). Esto significa que la retroalimentación de hecho también ocurre entre el sistema y su ambiente, y puede ocurrir en múltiples escalas temporales.
- Potenciado: ciertas configuraciones de retroalimentación pueden lograr que un sistema sea efectivamente potenciado (*driven* es el término usual en inglés), esto significa que existe un influjo de elementos (materia, energía, información) del medio que son convertidos y aprovechados dentro del sistema como medio para mantener su organización interna y, durante su funcionamiento, evitar el aumento interno de la entropía. De esta forma, el sistema se mantiene dinámicamente lejos del equilibrio termodinámico, en el que su entropía sería máxima; encontrándose así en un equilibrio dinámico.² Al existir también un flujo de salida, el sistema se dice que es disipativo.

Las dos metateorías históricas principales que hemos revisado en el capítulo 3 diferían, especialmente, con respecto a cuál de estas dos últimas características mencionadas es considerada como esencial, incluso sugiriendo la posibilidad de derivar una de la otra. Al menos las primeras cibernéticas consideraban a la retroalimentación como esencial,

²En algunos contextos esta clase de dinámica en la que un cambio constante debe darse para evitar la degradación del sistema suele denominarse «dinámica de la Reina Roja». Leigh Van Valen (1973) introdujo la «hipótesis de la Reina Roja», nombre que hace alusión al personaje de Alicia en el País de las Maravillas en cuyo reino hay que correr simplemente para mantenerse donde uno está. La hipótesis propiamente dicha sostiene que la ganancia en adaptabilidad o *fitness* en una unidad de selección se compensa por la pérdida que sufren las otras unidades del ambiente (ver también Liow y col., 2011). Más sobre la evolución y la adaptabilidad como características de los sistemas complejos en 5.2.6 y 6.1.

mientras que en la Teoría General de los Sistemas se puede encontrar la sugerencia de la retroalimentación es una consecuencia de la naturaleza abierta de los sistemas, algo que también pensaba Ilya Prigogine.³ Para quien estudia un sistema complejo debe tener en cuenta que la fuente de energía que sostiene al sistema en potencia puede estar muy lejos del mismo, ni ser solamente una.

5.2. Fenomenología de los sistemas complejos

Las siguientes características podrían verse como aspectos mínimos en los sistemas complejos y que dan origen a su intrincada fenomenología, lo que los hace tanto interesantes como difíciles de estudiar, controlar y crear. No debería, sin embargo, tomarse ninguna de estas características como condiciones necesarias ni mucho menos suficientes para hablar de la presencia de un sistema complejo; esto es algo que dependerá finalmente de la metateoría desde la cual se proceda a su interpretación como tal.

5.2.1. No-linealidad

Si bien en sentido estricto la no-linealidad no es una condición necesaria para obtener un sistema complejo, sí es una característica muy común. Las condiciones matemáticas de este concepto son fáciles de esclarecer, no tanto así sus usos filosóficos, que muchas veces suelen simplemente igualar linealidad a determinismo. Desde mi perspectiva, al hablar de sistemas complejos debe reservarse el término para describir una gran diferencia entre el grado de cambio o respuesta que se produce en un sistema ante una pequeña alteración en alguna de sus condiciones inmediatamente anteriores; siendo así una respuesta *desproporcionada*, lo que puede también verse en la formulación matemática. Esto se aplica, por caso, tanto a un sistema que *reacciona* ante una señal —información— que recibe como a un sistema que cambia de régimen abruptamente ante el mínimo cambio en, por ejemplo, el valor de un parámetro en el modelo que lo describe.⁴ En términos más bien matemáticos, decimos que una función que describe la relación entre dos valores es lineal si para una variable x y constante k se cumple que $F(kx) = kF(x)$. Cuando las interacciones entre los elementos son *lineales*, el comportamiento del sistema se puede describir mediante ecuaciones lineales, cuya característica es que cualquier combinación de sus soluciones también será una solución. Este último sentido de la no-aditividad de

³Si bien como ya mencioné se pueden tomar a los sistemas abiertos de la TGS como equivalentes a las estructuras disipativas de la “escuela de Bruselas”, la relación entre las dos comunidades es, cuanto menos compleja y digno de un estudio pormenorizado, especialmente en lo que respecta al lenguaje matemático que cada una emplea. Sobre este punto, es muy iluminador la reseña de Rosen (1978) del libro de Nicolis y Prigogine (1977).

⁴Aquí es importante notar que no estoy todavía introduciendo una distinción entre el estado óptico propio del sistema y el estado epistémico que estaría representado en un valor particular del modelo del sistema. Elaboro sobre esta distinción y sus consecuencias filosóficas con más detalle más adelante, y especialmente en el capítulo final.

las soluciones es lo que no se cumple con las ecuaciones no lineales que deben ser usadas para describir cuando las consecuencias de las interacciones entre los elementos no son proporcionales a su “intensidad”.⁵.

5.2.2. Comportamiento “intrincado” y no-agregatividad

Una de las características más comúnmente asociadas a un sistema complejo está asociada a la incapacidad que tiene un agente epistémico de describir el comportamiento del sistema como un todo, especialmente cuando intenta hacerlo a través de referirse al comportamiento de las partes individuales o a simples descripciones estadísticas. Así, las múltiples interacciones presentes entre las partes que componen al sistema y las mismas interacciones del sistema con el ambiente hacen que sea extremadamente difícil predecir su comportamiento, incluso sin intervenciones exógenas o cambios en su ambiente. Como comento más adelante en la sección sobre emergencia, la discusión filosófica oscila entre posiciones que hacen de la emergencia —y la asociada incapacidad de proveer explicaciones en base a lo que se sabe de las partes— una mera cuestión epistémica, mientras que otras posiciones postulan alguna clase de etiqueta ontológica, con las claras consecuencias epistémicas relacionadas. Nos enfrentaremos más de lleno con este problema en 7.1.

5.2.3. Patrones y (ruptura de) simetría

Un matemático, como un pintor o un poeta, es un creador de patrones

G. H. Hardy (1940/2019, s10)

El comportamiento intrincado que suele caracterizar a los sistemas complejos no tiene por qué ser el resultado de interacciones ni de partes ellas mismas complejas. Si bien es cierto que muchas veces los sistemas complejos tienen como subelementos a otros sistemas complejos, quizás uno de los resultados más interesantes de los estudios de la complejidad ha sido mostrar que es posible que sistemas muy simples se tornen complejos espontáneamente, literalmente creando un *proceso* complejo allí donde no lo había antes, sin necesidad de una fuerza o agente externo que deba dotar al proceso de diseño u organización “desde afuera”, o servir como una suerte de primer motor inmóvil. En inglés se suele usar el término “*bootstrap*” para describir a dichos procesos que se inician automáticamente o logran auto-sostenerse. Tanto la estructura como el comportamiento de un sistema complejo pueden darse de manera espontánea, dado el gran número de elementos y la posibilidad de interactuar entre ellos. De hecho, prácticamente todo sistema “simple” de materia condensada (e incluso los gases) se puede decir que presenta cierto grado de orden y organización, pese a lo azarosas que puedan ser sus interacciones. Claro que estas

⁵Lo cual puede tomarse como una característica del caos (ver más adelante y A. A. Ilcic, 2015)

interacciones son más bien sencillas, lo que hace que puedan ser descritos por técnicas estadísticas que logran dotarnos de capacidad explicativa y predictiva frente a dichos fenómenos (como ocurre especialmente en el caso de los gases). Esto es lo que Weaver llamó “complejidad desorganizada” y mencionamos en la página 82. Precisamente uno de los logros del estudio de la complejidad fue el de hacer posible la explicación de fenómenos en los que la interacción entre los elementos no se asume tan simple. Claro que esta historia propiedad exclusiva de lo que hoy conocemos como estudios de la complejidad, sino que hace al corazón histórico y metodológico de la física y la química contemporáneas. Hoy en día, la mayor parte de los físicos estudian fenómenos de materia condensada, aquellos que surgen de las interacciones fuertes (principalmente electromagnéticas) entre los átomos que los constituyen. En cierta manera se puede decir que se trata del estudio de las propiedades micro y macroscópicas de la materia, especialmente en sólidos y líquidos, y cómo —si es que— las segundas se pueden explicar y entender en términos de las primeras. Así, esta es una instancia en física de la pregunta filosófica general por la posibilidad de *reducir* —óptica, epistémica o metodológicamente— un campo de fenómenos a otro, tema de la sección 7.1.

Uno de los conceptos centrales en muchas disciplinas científicas —especialmente las más matematizadas— es el de simetría. Este concepto es tan rico y profundo como difícil de comprender, sin duda más todavía en su materialización contemporánea y como ocurre con otros conceptos íntimamente relacionados como lo son el de orden y el de ruptura de simetría. Contrario a lo que se podría esperar de los usos habituales de los términos, y casi paradójicamente, en sentido estricto el orden de algo que se pretende describir no depende de la simetría sino de su *asimetría*; aunque en todos los casos implica una comparación en base a la cual se puede establecer una relación de similitud.⁶ Hoy en día el término se matematizó, y debe comprenderse con respecto a la invariancia bajo un grupo particular de transformaciones u operaciones. Las operaciones matemáticas usuales son las rotaciones, reflexiones y traslaciones; y es por medio de ellas que se definen de manera precisa la idea de proporción y simetría que tiene, por ejemplo, una figura geométrica (especialmente las complejas que fueron usadas desde tiempos platónicos para explicar propiedades en la naturaleza). El caso de las figuras geométricas es uno entre tantos de aquello que permanece estable (visto como un todo) frente a una serie de cambios que se pueden notar o realizar sobre sus partes.⁷

⁶El origen griego del término [συμμετρία] ya indica bastante, en tanto [συν] (*sum*) hace a la proposición “con”, mientras que [μέτρον] (*metron*) significa “medida” o, forzando un tanto los términos, “estándar”. Así, simetría podría entenderse como “en acuerdo con respecto a sus dimensiones”. El griego *symmetros*, en tanto, se puede decir de aquello “que tiene una medida en común”.

⁷Para ser algo más precisos, en el caso de las figuras geométricas, deberíamos decir que un objeto es simétrico con respecto a un grupo de transformaciones que mueven partes individuales del objeto (como un vértice o punto) de manera tal que la forma del objeto como un todo no se ve afectada. Esto está relacionado con lo que luego denomino la robustez de las descripciones, a partir de una generalización de la idea misma de simetría.

Ahora bien, en muchos casos de sistemas complejos, es la *pérdida* de alguna simetría lo que los hace posibles, por lo que la búsqueda de principios explicativos de orden más general debe prestar atención a esta propiedad. Esto los vuelve muy difíciles de modelar y explicar, ya que nuestras mejores herramientas teóricas dependen de la capacidad de encontrar generalidades que se refieren, fundamentalmente, a propiedades de conservación. Pero, como quizás es de esperarse, es esto lo que les permite volverse complejos, ya que muchas de sus propiedades precisamente dependen de que algunas cantidades no se conserven, lo que puede inducir cambios estructurales y funcionales gracias a la asimetría, en tanto así se ganan grados de libertad, lo que implica que describir un proceso en ese nuevo espacio de posibilidades es hartamente más complicado.

Uno de los textos que sirvió en muchas comunidades como una “llamada de atención” al problema de la emergencia y a la importancia de explicaciones no reduccionistas (entendiendo por las *reduccionistas*, al menos de manera temporaria, las que apelan a explicar el comportamiento de agregados de materia en base a las simetrías de las leyes que rigen a sus componentes) fue el artículo «More is different» que Philip W. Anderson (1972), uno de los responsables de cambiar el nombre del campo de la «física del estado sólido» a «física de la materia condensada», publicó en la revista *Science*. Su argumento allí para sostener que “más es diferente” es que los agregados de materia suelen tener menos simetrías que las partes que los componen, lo que puede dar lugar a nuevas y distintas simetrías solo presentes al nivel colectivo; novedad que le permitirá luego anclar el concepto de emergencia:

El estado de un sistema realmente grande no tiene por qué tener la simetría de las leyes que lo rigen; de hecho, suele tener menos simetría. El ejemplo más destacado es el cristal: construido a partir de un sustrato de átomos y espacio según leyes que expresan la perfecta homogeneidad del espacio, el cristal muestra repentinamente e imprevisiblemente *una simetría totalmente nueva y muy bella*. Sin embargo, la regla general, incluso en el caso del cristal, es que *el gran sistema es menos simétrico de lo que sugiere la estructura subyacente*: Por muy simétrico que sea, un cristal es menos simétrico que la homogeneidad perfecta.^{LX} (Anderson, 1972, p. 395. Los énfasis son míos)

Aquí también es interesante notar la mención de los cristales, ya que el desarrollo teórico contemporáneo de la noción de simetría estuvo ligada a la aparición de la cristalografía como una disciplina en sí misma. Esta área de interfaz entre la química y la física se vio catalizada a comienzos del siglo XX por la posibilidad de inferir la estructura interna de moléculas complejas cristalizadas, a base del patrón que ellas generaban por la difracción de los rayos X con los que eran bombardeados (técnica que les valió el Premio Nobel de Física a von Laue en 1914 y los Braggs al siguiente).⁸ Más cerca ya de una posible explica-

⁸Quizás tampoco sea una exageración decir que el comienzo de la cristalografía es lo que llevó al surgimiento de la mineralogía como una rama distinta de la geología, y la interfaz con la química. Ya Kepler

ción de las estructuras complejas y organizadas que se ven en la naturaleza (y en muchos sistemas artificiales), encontramos la “apuesta teórica” de Erwin Schrödinger al sugerir que el portador físico del material genético podía tratarse de un cristal *aperiódico*; apuesta que de manera similar a la de von Neumann, precede al descubrimiento de la estructura del ADN. Esta asimetría, especulaba Schrödinger, podría estar atada a la distinción que permite a átomos iguales jugar roles distintos en una misma molécula, y de alguna forma volverse individuos frente a los otros átomos:

Una molécula pequeña podría ser denominada el germen de un sólido. Partiendo de uno de esos pequeños gérmenes sólidos parecen existir dos caminos diferentes para construir asociaciones cada vez mayores. Uno de ellos, bastante rudimentario en comparación, consiste en repetir una y otra vez la misma estructura en tres direcciones. Es el elegido en el caso de un cristal en crecimiento. Una vez establecida la periodicidad, no se presenta un límite definido para el tamaño del agregado. El otro camino consiste en ir construyendo un agregado cada vez más extenso sin el torpe recurso de la repetición. Éste es el caso de las moléculas orgánicas, cada vez más complicadas, en las cuales *cada átomo, y cada grupo de átomos, desempeña un papel individual, no enteramente equivalente al de muchos otros (como en el caso de la estructura periódica)*. Con pleno fundamento, podríamos llamarlo un cristal o sólido aperiódico y expresar nuestra hipótesis diciendo: creemos que un gen (o tal vez toda la fibra del cromosoma) es un sólido aperiódico. (Schrödinger, 1943/2013, sec. 5.6. El énfasis es mío.)

Estas pequeñas diferencias en el patrón que “sigue” la formación de una molécula posibilitan, la existencia de mayor complejidad dado que, de pronto, existen muchos más grados de libertad de la forma en la que pueden organizarse los elementos componentes y, crucialmente, de una manera tal que desde el punto de vista del patrón esperado sobre la base de la periodicidad, puede verse como un *error*.⁹ Sin embargo, aquello que desde el nivel de una regularidad puede verse como un error —por “romper el patrón”, para decirlo de modo sencillo— es lo que posibilita que, para quien pueda interactuar con esa nueva forma de complejidad, el error no se vea como tal sino, más bien, como un *soporte* de información, noción que depende esencialmente de la noción de diferencia y, por tanto, de la de error.¹⁰

había argumentado que la simetría de un copo de nieve podría explicarse en base al amontonamiento regular de pequeñas partículas de agua. Más hacia finales del siglo XVII, Nicolás Steno sugirió que los ángulos que forman las caras de un cristal son iguales en distintos ejemplares de un mismo espécimen, aunque fue recién a finales del siglo XVIII que René Haüy descubrió que la simetría de los cristales podía deberse a la mera repetición bajo un patrón sencillo de bloques de la misma forma y tamaño (ver especialmente Schuh, 2007, pp. 197-238). Para la historia de la cristalografía en el siglo XX, ver (Schwarzenbach, 2012)

⁹En una lectura más general, podemos ir más lejos aún y afirmar que incluso la identidad de un individuo, de hecho, es una consecuencia de la ruptura de simetría con su ambiente, lo que hace posible que sea *parte* de ese ambiente estando inmerso en —e interactuando con— él, sin perder toda su identidad como individuo; identidad que puede verse modificada, claro, por ahora ser parte de un ambiente determinado. Esta abstracción por la que se forma un individuo y se genera una interfaz es clave para hablar de cualquier “sistema” propiamente dicho.

¹⁰Este punto será importante en nuestra caracterización de la complejidad más adelante.

Una forma posible de caracterizar a la complejidad, entonces, es en base a la cantidad de *roles distintos* que puede jugar un individuo (o una clase de individuos), notando que la noción de rol es claramente relacional y contextual. Solo para mencionar el caso de lo que efectivamente podríamos llamar la escala de las complejidades que se estudian en física de materia condensada, en esta disciplina se suele hablar del número de átomos inequivalentes por celda unitaria o primitiva de un cristal, que es el grupo más pequeño de elementos que hacen al patrón repetitivo y que define tanto a la estructura como a la simetría de toda la red.¹¹ Si asumimos la existencia de unos 100 compuestos estables, el número de compuestos binarios posibles sin imponer otras restricciones es de 10000 (100^2 o 10^4). Si seguimos subiendo en esta escala y aceptando un mayor número de átomos inequivalentes por unidad mínima de análisis, estamos frente a 10^6 compuestos ternarios, 10^8 cuaternarios, etc. Solo esta complejidad espacial-estructural *mínima* ya es impactante, especialmente si consideramos que solo un pequeño fragmento de estas configuraciones ha sido estudiado de manera empírica y que las moléculas biológicas más simples tienen alrededor de 20 átomos inequivalentes. Sin duda es de esperarse que frente a cada uno de estos pequeños cambios de escala, nuevos fenómenos puedan aparecer que desde la inmediatamente inferior no puedan ser considerados posibles o, cuanto menos, poco plausibles.

Pero esto es solo una parte de la “responsabilidad” de la complejidad, el otro factor clave es la dinámica, la manera en la que las configuraciones del sistema y del ambiente cambian con respecto al tiempo. Muchos sistemas no son solo complejos en virtud de su numerosidad y variedad estructurales, sino por lo intrincado de su dinámica; es decir, cómo varían con respecto a lo que un observador puede fijar o parametrizar *como* tiempo —una noción que depende también de la posibilidad de una asimetría— y en base al cual pretende *modelar* el sistema. Dentro del gran campo de la teoría de los sistemas dinámicos (parte de cuya gran conexión con la Cibernética y las primeras reflexiones sobre la complejidad ya presentamos en el capítulo anterior de la mano de Ashby), la llamada teoría del caos ha sido el área que nucleó los estudios de lo que podríamos denominar los *patrones temporales* posibles de sistemas no lineales y las dificultades para lidiar con dichos sistemas (A. A. Ilcic, 2015).¹²

Los patrones fundamentales (o, quizás mejor dicho, los que son más fáciles de pensar) son en el espacio y en el tiempo (ciclos que marcan ritmos), pero también podemos hablar de patrones en escalas y en contextos. De hecho, como sostengo particularmente en los capítulos siguientes, es el *reconocimiento* de un patrón lo que permite hablar de un cambio en el nivel de observación y descripción, cambio que en última instancia permite poder decir que distintas instancias (en niveles “inferiores”) mantienen o no alguna

¹¹Si queremos ser todavía más precisos, decimos que se trata de un punto en una red o retículo que tiene simetría translacional.

¹²Esos sistemas que, como le gustaba decir a von Neumann, son más fáciles de controlar que de predecir.

propiedad. Así, una forma de simetría interesante para describir una clase de sistemas es aquello que se conserva cuando la transformación que ocurrió es un cambio de escala o del nivel de organización. Creo, además, que se puede sostener una versión generalizada de patrón sobre la que se pueden replantear varios problemas filosóficos, especialmente aquellos ligados al problema de la representación matemática o formal de fenómenos del mundo natural.¹³

5.2.4. Orden y organización espontáneos

Otra característica usual de muchos sistemas complejos es que las interacciones entre los elementos pueden generar organización de manera espontánea. En ciencias como la física y la biología se suele hablar de auto-organización, mientras que en disciplinas como la economía y la sociología normalmente se habla de orden espontáneo, aunque esencialmente los dos hacen referencia al hecho de que se pueden encontrar estructuras o comportamientos organizados sin que ese *diseño* haya sido incorporado o forzado desde fuera del sistema.¹⁴ Quizás parte de la razón por que en economía no se hable en este caso de organización es porque el término suele referirse a las organizaciones humanas (como los gobiernos y las compañías) que tienden a crearse con (o terminar haciendo uso de) una estructura jerárquica, particularmente en términos del rango de control o super-

¹³Estrictamente, deberíamos decir que se puede —y quizás se *debe*— hablar de patrones en cualquier clase de espacio matemático, en donde este término hace referencia a un conjunto sobre el cual se establece una estructura. Cómo se fijen ese conjunto base y esa estructura, determinarán la clase de patrones que se puedan establecer en dicho espacio, puesto que cada uno soportará distintas simetrías. La generalidad de esta noción de espacio y la consecuente posibilidad de buscar patrones en ellos —junto a sus múltiples grados de abstracción posibles—, son algunas de las razones por las que la matemática ha sido a veces caracterizada como la ciencia de los patrones (especialmente por Resnik, 1981, 1982, 1997), aunque otra cosa que hace a la matemática ganadora de tal título es precisamente que el reconocimiento de algunas similitudes entre ideas que están en áreas quizás muy distintas de la matemática permite que resultados y técnicas de demostración puedan ser “trasladadas” a otro campo, y así mostrar que no sólo hay un patrón en común sino lo que efectivamente es un “metapatrón” o “patrón de patrones”. Curiosamente hasta técnicas geométricas se pueden aplicar a objetos poco geométricos, como es el caso de la llamada geometría algebraica. Introduzco aquí brevemente este punto porque es otra forma de ver el núcleo de la tesis epistémica que sostiene esta investigación, ya que creo que de la misma manera en la que los modelos hablan de modelos y eso hace que el cambio de representación sea lo verdaderamente fructífero para un área de investigación y habilite la resolución y el planteamiento de nuevos problemas, el progreso en la práctica matemática puede también entenderse en los mismos términos de creación de modelos. Precisamente la idea de una estructura formal —uno de los objetos de reflexión y, quizás, alguna que otra pesadilla entre los Bourbaki— es un posible punto de inicio o base para la matemática, pero cualquier definición de estructura matemática que se pretenda dar sufre del destino de muchas teorías: su indemostrabilidad en términos matemáticos. Así, podemos decir que se trata de una tesis empírica, que formaliza la noción intuitiva de estructura matemática, de la misma manera en la que decimos que la tesis de Church-Turing es una tesis empírica sobre la “formalizabilidad” de la noción intuitiva de método mecánico o algorítmico en término de máquinas de Turing o de cálculo Lambda (entre otras muchas descripciones alternativas equivalentes). Si existen múltiples universos, hay al menos alguno en el que esta tesis fue escrita con esto como punto de partida en lugar de punto de llegada. (Ver sección 7.2.)

¹⁴En la literatura específica también se suele encontrar el término “auto-ensamblado” [*Self assembly*] (p. ej. Whitesides & Grzybowski, 2002).

visión mayor que tienen los subcomponentes superiores y la direccionalidad de algunas clases de órdenes (o de las consecuencias de la toma de decisiones). Una de las imágenes clásicas asociadas a esta idea en economía es la de una “mano invisible” que Adam Smith caracterizaba como la responsable de que los individuos (incluidas las naciones) pudieran generar un orden social que beneficiara a todos, pese a que eso no estaba previsto en las motivaciones que llevan a actuar a los individuos, que están sólo preocupados por su propio interés y bienestar.

Al preferir dedicarse a la actividad nacional más que a la extranjera [el individuo] sólo persigue su propia seguridad; y al orientar esa actividad de manera de producir un valor máximo él busca sólo su propio beneficio, pero en este caso como en otros una mano invisible lo conduce a promover un objetivo que no entraba en sus propósitos. El que sea así no es necesariamente malo para la sociedad. Al perseguir su propio interés frecuentemente fomentará el de la sociedad mucho más eficazmente que si de hecho intentase fomentarlo. (A. Smith, 1776/1994, p. 554)

Sin entrar en detalles sobre las muchas formas en que se han interpretado y argumentado —a favor y en contra— las manos invisibles que estarían actuando en los mercados,¹⁵ es importante notar que son precisamente las múltiples dimensiones de *intercambios* (de bienes, de servicios, de mensajes, etc.) en las que se ven involucrados los agentes en un mercado que, junto con las distintas razones que dichos agentes tienen para actuar, lo que vuelve al mercado como un todo en un sistema complejo; compuesto él mismo de otros sistemas complejos como consumidores, organizaciones, productores, agencias de regulación que otorgan al sistema de una dinámica increíblemente rica y compleja. La consecuente dificultad para estudiar estos procesos ha llevado a la economía a construir modelos altamente idealizados de todos los componentes involucrados —lo que incluye la capacidad racional de los individuos—, con vistas a intentar poder utilizar herramientas explicativas lo más cercanas posibles a las de otras ciencias que lidian con fenómenos de complejidad desorganizada, especialmente concentrándose en sistemas análogos en equilibrio. Dada la existencia de manos invisibles que parecen en última instancia *regular* los intercambios desde adentro —y es importante aquí notar el dejo cibernético de esta regulación— algunas escuelas económicas han llegado a sugerir que cualquier clase de intervención o regulación externa sobre las actividades netamente económicas de los agentes puede generar más problemas que soluciones. Esta posición fue especialmente defendida por la escuela austriaca, de cuya línea tardía sus expositores más influyentes hayan sido Ludwig von Mises y Friedrich von Hayek. Hayek desde muy temprano estuvo preocupado por el rol que el conocimiento que se podía obtener de un sistema económico social jugaba para la toma de decisiones que implicaban modificaciones globales a dicho sistema, esperando

¹⁵Para detalles, (Samuels, 2011) es un buen lugar para empezar. En lo que interpreto como una buena sugerencia al valor heurístico del concepto de mano invisible, el autor sostiene que “La idea de un proceso de mano invisible es valiosa por su identificación de la interacción y la agregación como procesos básicos” (Samuels, 2011, p. 206).

obtener luego de la intervención un mejor sistema para todos los agentes involucrados. Esto lo llevo a poner en duda las formulaciones clásicas que consideraban las dinámicas de un sistema económico en equilibrio:

Hace tiempo que pienso que el propio concepto de equilibrio y los métodos que empleamos en el análisis puro, sólo tienen un significado claro cuando se limitan al análisis de la acción de una sola persona, y que realmente estamos pasando a una esfera diferente e introduciendo silenciosamente un nuevo elemento de carácter totalmente distinto cuando lo aplicamos a la explicación de las interacciones de una serie de individuos diferentes.^{LXI} (von Hayek, 1937, p. 35)

Una propuesta que bien resuena con la que von Neumann va a realizar unos años después tanto respecto del estudio de la economía y de los autómatas, como de la necesidad de respetar la conexión de la matemática con lo empírico como una restricción sobre los modelos posibles y la eventual reconversión de las herramientas matemáticas. Continúa Hayek comentando acerca de cómo el modelado matemático en economía todavía no se ha vuelto lo suficientemente adecuado y ajustado para el análisis de los fenómenos que le competen (lo que, a su vez, requiere pensar en qué el lo que habilita la transferencia de técnicas y modelos entre distintas áreas del conocimiento):

Estoy seguro de que hay muchos que ven con impaciencia y desconfianza toda la tendencia, inherente a todo el análisis de equilibrio moderno, a convertir la economía en una rama de la lógica pura, un conjunto de proposiciones evidentes que, como las matemáticas o la geometría, no están sujetas a otra prueba que la consistencia interna. Pero parece que si este proceso se lleva lo suficientemente lejos, lleva consigo su propio remedio. Al destilar de nuestro razonamiento sobre los hechos de la vida económica aquellas partes que son verdaderamente *a priori*, no sólo aislamos un elemento de nuestro razonamiento como una especie de lógica pura de la elección en toda su pureza, sino que también aislamos, y destacamos la importancia de otro elemento que ha sido demasiado descuidado. Mi crítica a las recientes tendencias a hacer la teoría económica cada vez más formal no es que hayan ido demasiado lejos, sino que todavía no se han llevado lo suficientemente lejos como para completar el aislamiento de esta rama de la lógica y devolverle el lugar que le corresponde a la investigación de los procesos causales, utilizando la teoría económica formal como una herramienta del mismo modo que las matemáticas.^{LXII} (von Hayek, 1937, p. 35)

De esta manera, la interpretación de un fenómeno en términos matemáticos no conlleva que el ideal último sea la reconstrucción lógica de una teoría, sino, más bien, el uso heurístico que puede tener la matemática como una herramienta o técnica para encontrar explicaciones que no se reduzcan a una de tipo lógico, en el sentido de una deducción “sencilla” (aquí se puede notar también la oposición con el empirismo lógico reinante en la concepción de la ciencia en esa época). Esto no le quita lugar a la teoría, todo lo contrario. Pone el énfasis en que la imposibilidad de encontrar reglas sencillas requiere otra clase de descripciones, que aunque no provengan de primeros principios, no sean por eso

menos válidas. Aquí, como ya vimos en el caso de la biología, se puede notar cómo en la economía también se pretendía encontrar una suerte de legitimación propia como un campo científico, con credenciales suficientes para brindar buenas explicaciones. De hecho, la economía va a estar mucho más cerca de la biología que de la física, en tanto las explicaciones evolutivas van a tener un rol preponderante, y se pueden ver desde temprano ecos de la discusión que aparecerá más adelante en torno a la reflexión filosófica sobre cuáles son las unidades de selección y si los cambios evolutivos son graduales y casi continuos o presentan grandes “saltos”.

Es desde este punto de vista netamente epistemológico que Hayek piensa su posición con respecto al orden espontáneo que se puede lograr bajo el intercambio de bienes, que *comunican* gran parte de su complejidad de fondo mediante el lenguaje de los precios. Aquí es importante notar que además de este proceso mediante el cual los objetos comunican mediante un solo parámetro muchas propiedades, hay un desplazamiento de la importancia del valor del objeto —ya que deja de ser intrínseco— sino que depende ahora de un *proceso de valuación*, en el cual necesariamente entra en juego que elementos muy distintos entre sí, pese a su diferencia, puedan verse, bajo cierta perspectiva o toma de postura, como equivalentes; i.e., como que *significan* lo mismo: “Es un orden en el que las cosas se comportan de la misma manera porque significan lo mismo para una persona” (von Hayek, 1952/1979, p. 40).^{LXIII}

La imposibilidad de obtener conocimiento de todos los factores involucrados en los procesos económicos también lo llevan a sugerir que hay que rechazar la idea de que se puedan obtener leyes que describan el comportamiento de los fenómenos psicológicos y sociales, y que no deben pensarse como análogos a los fenómenos físicos o mecánicos más simples. Así, no habría principios racionales bajos los cuales reorganizar la sociedad, mucho menos desde un poder central, ya que nunca se podrían predecir las consecuencias específicas de las intervenciones que se lleven a cabo. Siguiendo una idea alguna vez sugerida por von Mises, Hayek sostiene que la clase de orden espontáneo que se genera en los mercados debería hacernos pensar más en términos de una *catalaxia* que de una economía, en tanto si bien es el resultado de acciones individuales, la economía en sí vista como un todo no debe pensarse como un diseño, ya que no tiene un propósito particular, es un subproducto de las acciones individuales; acciones que pueden dar lugar a una serie de estructuras que van más allá de lo que cualquier agente pueda anticipar o predecir:

Todos los paradigmas de las instituciones culturalmente evolucionadas, la moral, el intercambio y el dinero se refieren a tales prácticas cuyos beneficios trascienden a los individuos que las practican en los casos particulares. El resultado es que grupos enteros pueden verse ayudados por ellos a expandirse en lo que llamaré órdenes extendidos, a través de los efectos de prácticas de las que los individuos no son conscientes. Tales prácticas pueden conducir a la formación de estructuras de orden que exceden con mucho la percepción de aquellos cuyas acciones las producen. Hacen

posible la adaptación de tales acciones a circunstancias desconocidas y conducen a la formación de un orden indefinidamente expansible que sólo puede desarrollarse mediante la selección de grupos, es decir, una selección de grupos por los atributos comunes que poseen.^{LXIV} (F. A. v. (A. Hayek, 1984, p. 319)

Si bien es cierto que hay profundas diferencias con las aproximaciones contemporáneas que piensan a la economía como un sistema complejo, especialmente en las conclusiones que extraía Hayek para no intervenir sobre un sistema semejante mientras que los modelos actuales sugieren la posibilidad de beneficiar al sistema mediante acciones colectivas (Kilpatrick, 2001), es interesante notar cómo gran parte de sus conclusiones estaban motivadas por la comprensión de los fenómenos económicos y sociales como complejos y, por tanto, requiriendo otra clase de aproximación científica que la inspirada en la física de los sistemas simples o mecánicos. Esto lo llevó a profundizar investigaciones tanto alrededor de la psicología de los individuos como de la naturaleza misma del conocimiento acerca de sistemas complejos, lo que lo llevó precisamente a formular el problema en términos de la capacidad de un agente de reconocer patrones, poniendo el énfasis en la diferencia que tendrían los seres humanos para reconocer patrones que ocurren en el mundo natural y, por tanto, hayan sido objeto de cierta presión de selección natural, y aquellos que por su naturaleza abstracta no hemos sido *entrenados* por la evolución para poder descubrirlos. Fundamentalmente sobre este punto su sugerencia es que mediante una teoría se *proyecta* una estructura a un fenómeno de manera tal que pueda generar un patrón que, gracias a la teoría, sabremos cómo detectar, haciendo eco de la clara carga teórica que dicha observación tendrá:

Sin embargo, cuando tenemos que tratar con patrones para cuyo desarrollo no ha habido ninguna razón biológica, primero tendremos que inventar el patrón antes de que podamos descubrir su presencia en los fenómenos —o antes de que podamos probar su aplicabilidad a lo que observamos—. Una teoría siempre definirá sólo un tipo (o clase) de patrones, y la manifestación particular del patrón que se espera dependerá de las circunstancias particulares (las “condiciones iniciales y marginales” [...] a las que nos referiremos como “datos”). La capacidad de predicción dependerá de la cantidad de datos que podamos determinar.^{LXV,16} (F. A. Hayek, 1964/1994, p. 56)

Es precisamente sobre esta concepción de patrón en la que Hayek se apoya para dar una

¹⁶Esto me recuerda a la objeción que Einstein le planteó a Heisenberg después de escucharlo dar una conferencia en Berlín en 1926 sobre su reciente formulación de la mecánica cuántica, en la que había comentado acerca de la necesidad de tomar a las observaciones como los elementos de trabajo más básicos. En discusiones posteriores, Einstein le pidió que le contara más acerca de qué significaba trabajar solo en base a cantidades observables en esa “muy extraña teoría”. Cuando Heisenberg le recordó que fue esa la misma estrategia que Einstein usó en su formulación de la teoría de la relatividad general, Einstein no dudó en decirle que que la haya usado no quiere decir que esté bien. Al contrario, le dijo que no se puede usar un observable como fulcro de una teoría, ya que lo que se pueda observar depende de la teoría misma: “El hecho de que se pueda observar una cosa o no depende de la teoría que se utilice. Es la teoría la que decide lo que se puede observar” (Salam y col., 1990, pp. 98-101)

definición de complejidad, que aunque no está exenta de problemas se puede ver como antesala a definiciones de complejidad más contemporáneas. La determina con respecto a un número mínimo de elementos que hay que detectar para aceptar una instancia de un patrón:

La distinción entre simplicidad y complejidad plantea considerables dificultades filosóficas cuando se aplica a los enunciados. Sin embargo, parece que existe una forma bastante fácil y adecuada de medir el grado de complejidad de los distintos tipos de patrones abstractos. El número mínimo de elementos de los que debe constar una instancia del patrón para mostrar todos los atributos característicos de la clase de patrones en cuestión parece proporcionar un criterio inequívoco.^{LXVI} (F. A. Hayek, 1964/1994, p. 56)

Aquí me parece relevante la necesidad de pensar en términos de clases de patrones y sus posibles instancias, instancias que pueden ellas mismas ser otros patrones, algo que puede iluminar la forma en la que se piensa la relación modelo-modelo que surgió en el capítulo anterior como uno de los elementos claves para comprender, casi paradójicamente, la relación modelo-mundo. Según Hayek, al aumentar el número de elementos que están involucrados en las relaciones posibles se vuelve factible notar el surgimiento de nuevos patrones que dependen ya no de los elementos particulares, sino de la forma en la que sus relaciones están definidas, siendo así, en cierto sentido, independientes de los *relata*:

La “emergencia” de “nuevos” patrones como resultado del aumento del número de elementos entre los que existen relaciones simples significa que esta estructura más grande como un todo poseerá ciertos rasgos generales o abstractos que se repetirán independientemente de los valores particulares de los datos individuales, siempre y cuando la estructura general [...] se conserve. Tales “todos” [*wholes*], definidos en términos de ciertas propiedades generales de su estructura, constituirán objetos distintivos de explicación para una teoría, aunque dicha teoría pueda ser meramente una forma particular de ajustar [*fitting*] declaraciones sobre las relaciones entre los elementos individuales.^{LXVII} (F. A. Hayek, 1964/1994, p. 57)

Son estos patrones, que ya podemos llamar “patrones de alto nivel” o “metapatrones”, los que caracterizan a los procesos que dan origen a ciertas estabilidades que pueden entenderse como un todo que puede estudiarse y compararse con otros con estructuras similares: “El hecho es que en los estudios de fenómenos complejos los patrones generales son todo lo que es característico de esos conjuntos persistentes que son el objeto principal de nuestro interés, porque un número de estructuras duraderas tienen este patrón general en común y nada más” (F. A. Hayek, 1964, p. 63).^{LXVIII} Esta cita bien puede compararse con esta presentación del orden *emergente* en sistemas complejos que hace Stuart Kauffman:

Se está descubriendo un orden profundo en sistemas grandes, complejos y aparentemente aleatorios. Creo que este orden emergente subyace no sólo al origen de la propia vida, sino a gran parte del orden que se observa en los organismos actua-

les. Así lo creen también muchos de mis colegas, que están empezando a encontrar pruebas coincidentes [*overlapping*] de ese orden emergente en todo tipo de sistemas complejos.^{LXIX} (S. Kauffman, 1996, p. 12)

Lo mismo podríamos hacer con algunas reflexiones de Michael Polanyi, contemporáneas —si es que no anteriores— a las de Hayek, en las que sugiere que algo similar a lo que sucede en los mercados estaría detrás de la riqueza creativa que hay en la producción científica:

Aquí tenemos en resumen la forma en que una serie de iniciativas independientes se organizan para un logro conjunto ajustándose mutuamente en cada etapa sucesiva a la situación creada por todos los demás que actúan de la misma manera. Esta auto-coordinación de iniciativas independientes conduce a un resultado conjunto que no ha sido premeditado por ninguno de los que las han llevado a cabo. Su coordinación es guiada como por “una mano invisible” hacia el descubrimiento conjunto de un sistema de cosas oculto.^{LXX} (Polanyi, 1962/2000, p. 2)

Tanto el mercado como la empresa científica son para Polanyi sistemas complejos, casos especiales de lo que él denomina “coordinación por ajuste mutuo”, pero que bien podríamos subsumir como una forma de auto-organización que emerge cuando hay conexiones entre individuos y alguna clase de fuerza que los lleva a interactuar y que sirve como una restricción para lo que se considera aceptable.¹⁷ Dicho sea de paso, Polanyi parece haberle dado más importancia que Hayek a la riqueza de la dinámica de innovación propia del mismo sistema, atento a que la creatividad es un elemento clave para que el sistema como un todo siga explorando espacios de posibilidades; innovaciones todas que deben poder aprender a vivir en el espacio o nicho de todas las que ya han sido estabilizadas. Esta tensión entre innovación y estabilidad —que se cristalizó en filosofía de la ciencia como un arquetipo kuhniano— es una característica general de muchos sistemas complejos en tanto que evolutivos, especialmente los económicos, un punto especialmente señalado por Joseph Schumpeter —otro austriaco, aunque no de la misma escuela—, quien popularizó el término “destrucción creativa” para señalar esta característica inherente y esencial para el capitalismo.¹⁸

¹⁷En una veta similar, Simon comenta que “La racionalidad juega en las ciencias del comportamiento humano un papel análogo al de la selección natural en la biología evolutiva. Si de una organización empresarial sabemos tan sólo que es un sistema de maximización de beneficios, podremos predecir cómo cambiará su comportamiento al cambiar el entorno —cómo, por ejemplo, alterará los precios si un nuevo impuesto sobre las ventas grava sus productos—. A menudo podemos predecir —y así lo hacen los economistas una y otra vez— hipótesis detalladas sobre el mecanismo de adaptación, esto es, el aparato de toma de decisiones que constituye el ambiente interno de la compañía” (H. A. Simon, 1996/2006, pp. 8-9).^{LXXI}

¹⁸Algo que ya había señalado Marx, probablemente una de las razones por las que Hayek no haya apreciado del todo la importancia de este punto. El título que dio Hayek a la conferencia que brindó tras recibir el premio Nobel de Economía en 1974 destaca la naturaleza netamente epistémica del problema: “The pretence of knowledge”, en cuyo final afirmaba: “El ser humano no debe hacer más daño que bien en sus esfuerzos por mejorar el orden social, tendrá que aprender que en esto, *como en todos los demás campos en los que prevalece una complejidad esencial de tipo organizado*, no puede adquirir el conocimiento completo que haría posible

La apertura de nuevos mercados, extranjeros o nacionales, y el desarrollo organizativo desde el taller artesanal hasta empresas como U.S. Steel ilustran el mismo proceso de mutación industrial —si se me permite usar ese término biológico— que revoluciona incesantemente la estructura económica desde dentro, destruyendo incesantemente la antigua, creando incesantemente una nueva. Este proceso de Destrucción Creativa es el hecho esencial del capitalismo.^{LXXIII} (Schumpeter, 1942/2014, p. 82)

Creo que es través de la noción de patrón —y cómo ellos dependen de una abstracción— que se puede dar cuenta de la próxima característica de muchos sistemas complejos (y, argumentaré hacia el final de esta investigación, nuestra capacidad de conocerlos).¹⁹

5.2.5. Irreversibilidad, memoria e historia

Hay muchas formas en las que se puede decir de un sistema que tiene alguna clase de memoria sobre su historia, entendiendo por historia en primera instancia algo tan simple como las transformaciones con respecto a un parámetro que se toma como referencia (usualmente el tiempo). Pero, lo común a las muchas formas de hablar de memoria es que corresponden a alguna pérdida de simetría que sufrió el sistema durante sus transformaciones, hayan sido estas espontáneas o forzadas. Considerando la característica anterior acerca de los patrones que se pueden observar, podemos caracterizar a la memoria de un sistema apelando a patrones estructurales-espaciales que *pueden* mantenerse en el tiempo, aunque no es necesario que lo hagan. Es más, el sistema puede hacer uso de las modificaciones en dicho patrón para lograr, por ejemplo, un nuevo comportamiento; incluso si las

el dominio de los acontecimientos. Por lo tanto, tendrá que utilizar los conocimientos que pueda alcanzar, no para dar forma a los resultados como el artesano da forma a su obra, sino más bien para cultivar un crecimiento *proporcionando el entorno adecuado*, de la manera en que el jardinero lo hace para sus plantas. . . . El reconocimiento de los límites insuperables de su conocimiento debería enseñar al estudiante de la sociedad una lección de humildad que debería evitar que se convirtiera en un cómplice del esfuerzo fatal de los seres humanos por controlar la sociedad, un esfuerzo que lo convierte no sólo en un tirano sobre sus semejantes, sino que bien puede convertirlo en el destructor de una civilización *que ningún cerebro ha diseñado, sino que ha crecido a partir de los esfuerzos libres de millones de individuos*” (F. A. v. (A. Hayek, 1974, Los énfasis son míos énfasis es mío).^{LXXII} La pregunta, entonces, es si es posible un conocimiento del tipo de ambiente que se necesita crear para que el accionar *local* de los individuos, aunque impredecible de suyo, pueda al menos ser orientado a una serie de estados particulares con mayor probabilidad que otros. Este énfasis en la adaptabilidad a un ambiente sin duda tiene un dejo darwiniano, aunque no quisiera dejar pasar esta nota sin recordar la importancia que la noción de ambiente tuvo para Bernard como un espacio de coordinación en el que los componentes de un cuerpo interactuaban y encontraban su orden y lugar para el equilibrio del cuerpo; lo mismo podría decirse de la acción del protoplasma como espacio de acción de lo “no mecánico” en la comprensión vitalista de la célula que proponía von Uexküll.

¹⁹Aunque el lector ya se habrá dado cuenta de que en esta subsección ya se dijo suficiente para inferir algo del patrón completo por esta pequeña muestra de uno de sus subpatrones. Quizás sea esta nota una oportunidad para remarcar que no veo ninguna diferencia de tipo entre estructura y dinámica, ambas son instancias de *patrones dinámicos* que se diferencian fundamentalmente por la escala temporal en la que suceden, según la cual las estructuras *parecerán* más estables que las dinámicas. De esto también se desprenden algunas simetrías entre tiempo y espacio, que por razones de tiempo y espacio no exploro aquí con la profundidad que se merecen, más allá de algunos pinceladas ocasionales que se hayan escapado o estén por hacerlo.

condiciones que antes habían llevado a otro comportamiento se repiten de manera precisa, de tal forma que el sistema y el ambiente son idénticos a cómo eran en un momento de tiempo anterior, salvo el nuevo patrón que puede ahora contener una mínima diferencia con respecto al anterior. Una característica de muchos sistemas complejos es precisamente la de poder realizar fenómenos muy distintos a los que era capaz de realizar antes de la transformación, que pueden ser tan pequeña como recibir una simple señal del medio en el que se encuentra que lo lleva a cambiar de estado, incluso radicalmente; lo que debería recordarnos lo ya mencionado sobre no linealidad y emergencia.

Más allá del eternamente cambiante río de Heráclito y sus salpicaduras, la noción de que un proceso no pueda volver a un estado absolutamente idéntico a un momento anterior por alguna diferencia introducida en el sistema o en su medio entró en la imagen científica de la mano del surgir del estudio teórico de las máquinas impulsadas por calor —o en términos más contemporáneos y algo más precisos, forzados por un potencial termodinámico en la interfaz del sistema—. Quizás la primera formulación específica de este fenómeno fue la que dio Rudolf Clausius al notar cierta tensión entre los principios que había postulado Sadi Carnot unos años antes sobre las capacidades de las máquinas térmicas y el principio de conservación de la energía (Clausius, 1850). Estos serían los primeros pasos hacia la postulación más rigurosa del concepto de entropía para dar cuenta de la relación entre los cambios de calor y de temperatura. Antes de recurrir al griego para introducir el término “entropía”, Clausius se refería a dicho concepto en alemán como “*Verwandlungsinhalt*”, lo que puede traducirse como “contenido de transformación”, y remarca el hecho de que es algo que pretende describir el cambio de estado de un sistema luego de ser expuesto a alguna clase de potencial termodinámico que fuerza una transformación en el sistema o, en última instancia, en su ambiente. Es con este concepto en mano que Clausius puede formular la 2da ley de la termodinámica, de la que se desprende la posible existencia de procesos irreversibles, en tanto la reducción de grados de libertad del sistema tras la transformación vuelve imposible recuperar el estado anterior manteniendo el resto del sistema y el ambiente sin cambios.

Comenzado su fama de traer problemas conceptuales, la segunda ley parecía entrar en conflicto con la simetría que se puede notar en las ecuaciones que se usan para describir el movimiento de los cuerpos, en tanto, básicamente las soluciones permanecen válidas si simplemente se cambia la dirección del tiempo t por $-t$. Este conflicto surgía especialmente a la hora de dar una explicación microscópica de la irreversibilidad que se observaba, asumiendo que uno estaba dispuesto a aceptar la existencia de los átomos para dar dicha explicación. El resultado de estas discusiones entre Maxwell, Boltzmann, Loschmidt y Thompson, entre otros, fue una gradual aceptación de un nuevo rol de la probabilidad para la descripción de la imagen científica del mundo físico y, al mismo tiempo, de su complejidad y cómo poder lidiar con ella. A medida que la entropía de un sistema aumenta, el número de configuraciones en los que sus elementos pueden encontrarse

también aumenta, por lo que una vez que se ha producido una transformación en esa dirección, la probabilidad de que el sistema se mantenga en una de las configuraciones anteriores es mucho menor. Esto también dificulta las operaciones microscópicas que se pueden hacer *sobre* el sistema en caso de que se lo quiera forzar a, por ejemplo, mantener una configuración específica frente a un cambio inducido por un potencial termodinámico.

Esto nos lleva a otra forma en la que se puede decir que un sistema tiene memoria, directamente relacionada con la anterior, que es la de almacenar órdenes significativos. Erwin Schrödinger fue uno de los primeros en señalar que lo que caracteriza a los seres vivos es una tendencia a resistir la degradación a causa del aumento de entropía. Esto se logra gracias al metabolismo, lo que les permite introducir “entropía negativa” (estrictamente energía libre) al sistema. Simplificando un poco y tomando un punto de vista todavía más abstracto, podemos decir que una de las características de un sistema complejo es la de dar lugar a un proceso por el cual puede aprovechar sus fuentes energéticas para introducir, transformar y devolver “órdenes” de y a su ambiente. Este proceso, claro, es acoplable, por lo que subsistemas pueden “alimentarse” de distintas partes del orden que se acepta del ambiente o de “subórdenes” que producen otros subsistemas a los que están conectados. Como en el caso de los patrones, estos órdenes pueden deberse a configuraciones espaciales o temporales, aunque en cierto sentido se podría decir que un ciclo temporal depende de cambios secuenciales en configuraciones espaciales que pueden ser reconocidos como un ciclo, i.e. reconocidos como *significativos* para aquellos subsistemas que pueden recibir esa clase de señales.²⁰

Esta es una de las razones por las que tiene sentido hablar de procesamiento de información en sistemas complejos, ya que una de sus características es precisamente la de poder transformar configuraciones en otras y “almacenar” algunas de esas configuraciones para cambiar su funcionalidad cuando lo requiere, al punto incluso de alterar su funcionalidad con respecto a la capacidad de memoria misma. La similitud de esto con los distintos tipos de memorias que existen en las arquitecturas tradicionales de computadoras no es accidental, como ya hemos podido observar gracias a las reflexiones de Turing y von Neumann. Así, la memoria *encapsula* una serie de transformaciones que una estructura sufrió en el pasado, mientras que cada cambio alteró el espacio de configuraciones accesibles al sistema que depende de esa memoria para explorar el espacio de posibilidades que tiene por delante —aquello que S. A. Kauffman (2000) llama el “posible adyacente”²¹—. Una memoria de computadora no es más que una instancia muy particular de un patrón

²⁰*Pace* Kant, el tiempo también es, en última instancia, un emergente.

²¹Idea que, curiosamente, introdujo pensando sobre la evolución de la economía y no de los seres vivos. Importante para pensar acerca de la emergencia es la clase de no linealidad que puede presentar el posible adyacente de algunos sistemas, en tanto un nuevo elemento que se suma al conjunto de elementos combinables puede cambiar el adyacente posible de uno prácticamente constante a uno que crece súper exponencialmente.

acoplado con un proceso de lectura que puede reconstruir otro patrón (una secuencia de 0s y 1s) en base al patrón físico subyacente, pero abstracto, en el sentido de que se puede hablar de él sin apelar a la configuración física original —de la misma manera en la que von Neumann hacía uso de la abstracción que McCulloch y Pitts habían introducido para las neuronas artificiales—.

La memoria, entonces, puede verse como el uso de una estructura física para crear un comportamiento potencial en base a la creación de un “potencial informacional” cuando dicha memoria se compare con otro estado (quizás, incluso, otra memoria) a fin de establecer la diferencia entre el estado de la memoria y el estado nuevo, lo que ante la “programación” adecuada puede desencadenar una serie de procesos que dejarán al sistema en otro estado. Si bien hay un uso de energía, lo importante está no tanto en el cambio de energía ni en el de materia, sino en la información codificada en esa materia. Con la maquinaria correcta para realizar el trabajo de la transformación del estado actual en base a la diferencia detectada con el estado almacenado, puede esto verse de manera análoga a cómo una diferencia de potencial en un campo eléctrico o gravitatorio genera una fuerza que afecta y condiciona el desplazamiento de una partícula que puede “sentir” los efectos del campo.²² Esto nos lleva a la próxima característica de los sistemas complejos, que requiere de alguna forma de memoria: su capacidad de adaptarse a nuevos ambientes.

5.2.6. Adaptabilidad, aprendizaje, evolución

Con las descripciones anteriores, no debería sorprendernos ahora el hecho de que la mayoría de los sistemas complejos son sistemas que evolucionan, esto es, cambian con el tiempo. Claro que esta afirmación puede decirse de muchas cosas y de muchas maneras; pero creo que particularmente el estudio de los sistemas complejos nos ha revelado mucho acerca de cómo pensar sobre aquello que comparten distintos procesos que reconozcan como evolucionarios, más allá de la instancia particular que tomen. A su vez, ponen de manifiesto algunos de los límites que existen en la manera en que la misma idea de “cambio” se entendió través de las teorías clásicas de sistemas dinámicos, especialmente sobre sistemas que manifiestan alguna clase de transformación radical en un momento determinado, incluso si todos sus cambios anteriores a ese punto fueron extremadamente pequeños o suaves con respecto al estado previo —lo que normalmente se llama una transición de fase, dado el contexto termodinámico en el que surge su estudio—. Así, y siguiendo un tanto los

²²Quizás sea también interesante notar aquí que otra forma en la que algunos sistemas pueden tener historia es la de la histeresis, una propiedad que se manifiesta especialmente en sistemas magnéticos. Hay materiales que responden a la presencia de un campo magnético externo, lo que cambia su configuración interna, alineando su momento magnético. Cuando el campo magnético deja de influenciar al sistema, éste puede quedar magnetizado, lo que significa que ante el cambio el sistema no volvió a su configuración original. Además el estado al que se llegue finalmente dependerá del “camino” (es decir, la trayectoria) en el espacio de configuraciones que recorrió el sistema durante la transformación. La memoria magnética (como en cinta o en discos duros) es una memoria digital construida sobre la histeresis del material magnético).

lineamentos de esta investigación, lo que caracteriza al estudio de la evolución desde el punto de vista de la complejidad podría verse como el estudio mediante modelos de algunas características de *otros* modelos, lo que enfatiza el punto mencionado anteriormente (y sobre el que insisto en el capítulo final) acerca de la relación modelo-modelo.

En líneas generales, entonces, se puede decir que lo que caracteriza a un proceso evolucionario es la capacidad de presentar “novedades radicales”, esto es, ante un mínimo cambio gestado desde el interior de un sistema o por un elemento que se suma desde afuera, el espacio de configuraciones del sistema puede llegar a cambiar drásticamente. Aunque una de las consecuencias suele ser la aparición de una nueva entidad (p. ej. una nueva especie) o la desaparición de una entidad, el énfasis no debe ponerse tanto en las nuevas entidades sino en el cambio del escenario —o paisaje— en el que se desenvuelve el sistema mismo. Es este proceso de desenvolvimiento el que está conformado por las entidades y, fundamentalmente, por sus interacciones. Se suele hablar de “entidades y su ambiente”, pero siempre hay que tener en cuenta que para una entidad particular, la totalidad de entidades y sus posibilidades constituyen *su* ambiente, lo que también debe incluir las posibilidades de la misma entidad; un todo o totalidad que bien hace en recordarnos la noción de *Umwelt* o mundo circundante que introdujo von Uexküll, aunque no precisamente para hablar de evolución en el sentido planteado aquí, ya que para que esto ocurra debe incorporarse alguna clase de mecanismo darwiniano como el de la selección natural, lo que debería recordarnos la reinterpretación de lo mecánico en términos cibernéticos antes revisados.

Dos son los puntos claves en un proceso evolucionario, que deben verse como dos extremos de un ciclo de retroalimentación. Por un lado, lo que podría llamarse una dinámica de diversidad, que crea entidades. En el otro extremo, hay un complejo proceso de selección sobre esas entidades, que reconfigura el espacio de acuerdo a la clase de interacciones que la nueva entidad trae consigo. Esto puede llevar tanto a la desaparición de entidades como a la recombinación de algunas para formar nuevas entidades, generando un bucle de retroalimentación que fundamentalmente debe caracterizarse por el cambio que genera en las restricciones que entidades e interacciones, tanto presentes como futuras, deben “respetar”. Por lo tanto, la dinámica del sistema visto como un todo es tal que en su misma evolución cambia incluso las mismas “reglas” de la evolución. La existencia de estas reglas es lo que abre todo un espacio “cuasinomológico”, que hace uso de las leyes naturales como otras restricciones, pero son más débiles que aquellas en el sentido de que pueden cambiar a medida que el sistema evoluciona, pero que pueden determinar tanto lo que puede ser como lo que no puede ser en un momento determinado. Es decir, se da efectivamente un *espacio de diseño*, en el que recombinando entidades y procesos existentes se pueden generar nuevos espacios de posibilidades. Desde una lectura más bien modal, podríamos decir que se abre un espacio de exploración de lo posible, de lo contingente, en comparación con la radical necesidad de las leyes naturales. Esta simultánea

dependencia del ambiente y maleabilidad por el mismo que llevó a Simon a sugerir la posibilidad de una «ciencia de lo artificial»; siendo muy consciente de que muchos de los objetos de estudio de dicha ciencia podrían parecer bastante naturales, como los seres vivos.²³ Esto tiene importantes consecuencias para las clases de modelos que se vuelven admisibles a la hora de estudiar sistemas que son esencialmente evolucionarios, como no solo son los organismos y sus ecosistemas, sino los mismos sistemas económicos y otros similares —especialmente la ciencia misma, como sugeríamos antes de la mano de Hayek y Polanyi—.

del hecho de que un sistema económico esté evolucionando no se puede concluir que haya alcanzado o vaya a alcanzar una posición que guarde alguna similitud con los equilibrios de la teoría de la competencia perfecta. Cada especie en el ecosistema se adapta a un ambiente de otras especies que evolucionan simultáneamente con él. La evolución y el futuro de tales sistemas sólo pueden entenderse desde el conocimiento de sus historias.^{LXXIV} (H. A. Simon, 1996/2006, p. 57)

Quizás Simon sea incluso demasiado optimista acerca de la capacidad de comprender el futuro de los sistemas evolutivos en base al conocimiento de sus historias, en todos los sentidos de historia y memoria introducidos antes, ya que podríamos estar frente a un sistema que, por ejemplo, en toda su evolución anterior no haya presentado cambios bruscos (e.g. una bifurcación o una singularidad) y, sin embargo, esté a punto de hacerlo, especialmente si sigue en contacto con un ambiente que esté también cambiando. La similitud de este punto con los múltiples problemas de la inducción no es para nada menor, y de hecho está en el núcleo de lo que puede aportar el estudio de los sistemas complejos a la epistemología general, y viceversa. Dar descripciones de sistemas que evolucionan con el tiempo de esta manera exige un marco conceptual general para dar cuenta tanto de situaciones que involucran *desconocimiento* de la totalidad de variables en juego; esto es, se tratan de escenarios de información incompleta sobre el resto de las partes involucradas, de manera similar a lo que ocurría en un sistema económico. Esto conduce, a su vez, a tener que tener en cuenta dos factores más a la hora de dar una descripción adecuada de esta clase de fenómenos, ya sea para definir un plan de acción que traiga cambios al escenario (i.e. intervenirlo o controlarlo de alguna manera) o bien incluso para simplemente conocerlo. Por un lado, deberá tenerse en cuenta que es probable que el hecho mínimo de interactuar con el sistema a fin de intentar recabar su estado (lo que equivaldría estrictamente a obtener un valor empírico de al menos una de las variables con la que se lo describe, a tono con la lectura cibernética antes comentada), podría cambiar radicalmente

²³Para ir todavía más lejos, quizás podríamos (o deberíamos) decir que incluso las leyes naturales son relativas a un contexto de distinto orden. Quizás esta pueda ser una forma de dar cuenta del gran espacio de posibilidades —de nuevo, paisajes—, del orden de 10^{500} , que algunos cosmólogos y físicos teóricos sugieren. Quizás sea una manera también algo menos metafísicamente comprometida de hablar de “muchos mundos”. El tema es fascinante, pero es otra tesis, y ya en las notas al pie he introducido muchas notas, tesis y mundos posibles.

el sistema que se está estudiando.²⁴

El segundo punto se sigue del anterior y está relacionado con la historia del sistema que se puede conocer, como insistía Simon, e implicará la necesidad de contemplar las capacidades y los límites de un agente epistémico que intenta describir el sistema (o actuar en él), quien deberá hacer uso de una estrategia similar a la que usa el sistema que está intentando conocer. Desde mi perspectiva, esto significa que debe darse cuenta de cómo dicho agente puede *aprender* acerca del sistema y, como otra consecuencia cibernética del análisis aquí planteado, cómo *el sistema mismo* aprende de sí y del ambiente en el que se encuentra. Desde una mirada macroscópica, el aprendizaje puede verse precisamente como lo que posibilita que un sistema con una complejidad mínima —como un sistema auto-organizado— que tenga alguna forma de memoria pueda adaptarse a un ambiente (o crear uno nuevo). En su caracterización del sentido de aprendizaje, Simón lo estipulaba precisamente en términos de “todo cambio en un sistema que produce un cambio más o menos permanente en su capacidad para adaptarse a su entorno” (H. A. Simon, 1996/2006, p. 119).^{LXXV} Nos encontramos aquí en otro ciclo de retroalimentación, en el que la evolución genera aprendizajes —en múltiples dimensiones—, a la vez que el aprendizaje posibilita tanto la adaptación a nuevos ambientes como la posibilidad de crear combinaciones nuevas que resulten en nuevas entidades y nuevos ambientes, lo que llevará a la extinción de combinaciones o entidades anteriores que ya no pueden lidiar con el nuevo escenario —la destrucción creativa que mencionamos anteriormente de la mano de Schumpeter—. Los procesos evolutivos, dicho sea de paso, también son históricos en el sentido de que la forma de dar cuenta de ellos es por medio de una *narrativa* o una historia sobre cómo se desarrollaron en el pasado frente a un escenario particular. Tanto la historia misma como el estudio de la historia son procesos evolucionarios, aunque el espacio de acción —y de elección entre caminos posibles— de sus agentes, con sus respectivas clases de restricciones, es de una dimensión distinta a la del espacio de configuraciones de los elementos que *soportan* a dichos agentes, aunque bajo ciertos niveles de abstracción, se

²⁴Nótese que esto es al margen de la sensibilidad a las condiciones iniciales que pueda tener la trayectoria de instancias particulares de la descripción del sistema. Así, incluso si la medición del valor pudiera llevarse a cabo con precisión infinita, la comunicación que implica la medición entre el observador y el sistema podrían generar en el sistema un futuro totalmente distinto al que hubiese tenido de otro modo. De muchos sistemas complejos se pueden decir que están en un estado de “predisposición” —en inglés, *a poised state*— a cambiar su dinámica frente a una mínima intervención, interna o exógena de acuerdo a dónde se haya trazado la línea de separación entre ambiente y sistema.

Como ya casi es previsible —si no inevitable— en estas notas al pie, podría llamar la atención a la conexión de este punto con lo que sucede en el mundo cuántico, el ámbito en el que la alteración que produce una medición implica la pérdida de la coherencia interna del sistema. S. A. Kauffman (2008) ha explorado la posibilidad de describir algunos fenómenos que suelen ser descritos como emergentes, como en su caso la consciencia, como debidos a estar en un constante estado de transición entre fases —un estado crítico—, que en el límite entre lo cuántico y lo clásico significaría una suerte de estado intermedio entre la coherencia y la de-coherencia. lo que genera una predisposición particular del sistema para explorar nuevos estados. Más allá de la especulación al mundo cuántico, algo acerca de estos estados críticos y una lectura computacional de ellos hago más adelante en la sección ??.

puedan ver dinámicas similares y hasta equivalentes a lo largo de estas dimensiones.

Si bien es cierto que, en última instancia, la variabilidad y la diversidad en sistemas complejos están *sostenidos* por el azar, el origen de dicho azar puede ser determinista. La aparente contradicción se resuelve, creo, llevando la reflexión hacia la capacidad que tiene un agente de dar cuenta de su ambiente y de su propio funcionamiento y, en particular, de cómo las constituciones de estos “determinan” las acciones posibles de los agentes involucrados. A diferencia de las causas próximas y mecánicas que rigen en los sistemas simples, en los sistemas complejos lo que se genera es un nuevo espacio de posibilidades, hecho posible por el entramado de relaciones que dan origen o que soportan dicho espacio posible y que pueden dar lugar a profundos e intrincados ciclos de retroalimentación sobre los que puede operar alguna clase de proceso selectivo, que como consecuencia exploran y pueden ampliar el espacio mismo de posibilidades anteriores. Ahora bien, si el proceso que da origen al azar no es parte del sistema ni de su modelo del ambiente en el que se encuentra y del que incorpora tanto azar como orden; desde el punto de vista del sistema, no importa si el azar es, en el fondo, determinista o no; puede servir de cualquier manera como un punto de apoyo para una heurística de exploración del espacio de lo posible. Así, la evolución de un ecosistema creado por elementos lo suficientemente variados y de una complejidad mínima implica cambios que, *en promedio*, llevan a un aumento de la complejidad de algunos nuevos organismos presentes en un momento determinado, aunque algunos de esos nuevos organismos pueden tener menor complejidad —es decir, se trata de una disminución *local* de la complejidad, frente al aumento general—.

La evolución en sí puede verse como un proceso de difusión, iniciado por una ruptura de simetría original que crea el potencial para ese proceso, mantenido por las fuerzas de variación y selección. La selección es clave, porque representa lo *significativo* que un organismo puede ser para un ambiente y, a la vez, lo significativo que el ambiente es para un organismo. A gran escala, el efecto del azar para la exploración del espacio de posibilidades está constreñido así por las configuraciones del momento —que hacen de condiciones iniciales, por así decirlo— y por aquellas nuevas posibilidades que tienen sentido para el ambiente local en el que la novedad se manifiesta —que podríamos también pensar como condiciones de contorno—. Esto debería recordarnos aquella formulación de Turing de las distintas clases de búsquedas que puede hacer un sistema (ver secc. 4.1.3, especialmente p. 173), y lo que más adelante (sección 6.2) se comenta sobre la manera en la que Turing modeló los procesos de difusión, también motivado por la factibilidad de explicaciones sobre la aparición de patrones complejos en el mundo físico; patrones que permitan, curiosamente, hablar de *diseños* sin necesidad de tener *diseñadores*.

Como veremos con mayor profundidad, esta nueva simetría que puede observarse a medida que se cambia el nivel de abstracción es lo que permitirá estudiar fenómenos evolutivos mediante modelos de otros sistemas evolutivos, atados por una función

de interpretación particular; función que mapea las clases de equivalencia generadas por la abstracción sobre la que depende la simetría encontrada. Así, por ejemplo, se pueden estudiar propiedades de un sistema conceptual o del lenguaje natural mediante una “representación” en una estructura evolucionista —como el de una red neuronal artificial—, sabiendo que el soporte físico propiamente dicho de dicho sistema no está, en sentido estricto determinado por el nivel de análisis, en el cerebro humano (que podría ser llamado también una red neuronal natural). Dicho sea de paso, precisamente esta dinámica evolutiva compartida por algunos sistemas es lo que permite modelar uno en términos del otro, nuevamente sin necesidad de replicar punto a punto la estructura física del sistema bajo estudio. Será, claro, el contexto de la investigación lo que determinará los límites de las inferencias que se puedan hacer sobre ese modelo y las clases de idealizaciones que se admitan para tales efectos.

La evolución considerada desde este nivel de abstracción puede verse como un doble proceso de cambios en el espacio de soluciones posibles introducido por cambios en el ambiente, lo que necesariamente incluye a las otras entidades que evolucionan ellas mismas frente al cambio de su ambiente; espacio que pueden explorar mediante un mecanismo de prueba y error que está presente antes de la selección propiamente dicha. Sewall Wright, quien junto con J.B.S. Haldane y R. S. Fisher sentaron las bases para lo que Julian Huxley bautizó como “la síntesis moderna” en un marco común para la teoría de la selección darwiniana y la teoría hereditaria de Mendel, introdujo una forma de visualizar el espacio de configuraciones posibles para los organismos a fin de comprender la dinámica que podría ser responsable de los efectos que se observaban. El “lenguaje” que introdujo no es otra cosa que un modelo para el espacio de soluciones al problema de adecuación para una especie en particular, lo que él llamó “campos” y que luego se generalizaron como los “paisajes” que mencioné anteriormente. La pregunta que se hace es precisamente por la naturaleza del campo de todas las posibles combinaciones de genes *evaluadas* con respecto a grado de adaptación que provee a un organismo bajo un conjunto de condiciones establecidas. Esto rápidamente lleva a un espacio multidimensional, pero la idea básica puede verse gráficamente incluso en dos dimensiones que, aunque inadecuada como representación del problema en sí, es una buena representación de la representación del problema para quien pretende trabajar con ella —otro caso de relación modelo-modelo—. ²⁵ Bajo esta mirada más abstracta, Wright ve al problema de la evolución como el de encontrar un mecanismo a escala global que permita a las especies “desplazarse” hacia los puntos del campo que están más altos, es decir, aquellos picos de adaptabilidad o *fitness*,

²⁵ Aprovecho nuevamente para remarcar la importancia de este punto. Incluso la “evolución epistémica” —muchas veces bajo el nombre de progreso— puede verse como respondiendo a la necesidad de encontrar representaciones quizás muy distintas entre sí tanto de un problema como del espacio de soluciones, para luego investigar las clases de equivalencias posibles entre dichos espacios, tanto en paisajes ‘estáticos’ (en los que sólo cambian las soluciones) como en paisajes altamente dinámicos, en los que soluciones, problemas, conocimiento de fondo, comunidades, incentivos, etc., evolucionan cada uno con respecto al otro.

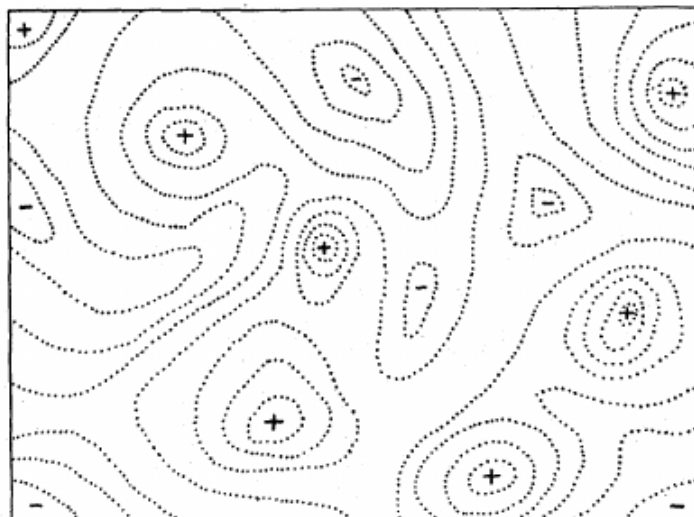


Figura 5.1: Figura 2. de (Wright, 1932, p. 358). Estos mapas de contorno para en espacio abstracto son similares a los mapas topográficos en los que se utiliza la distancia de las líneas de contorno para representar en un plano alguna propiedad como la altura del terreno, que no es otra cosa que una función cuya entrada bidimensional es la posición y cuyo resultado es la altura. A las curvas que conectan los puntos en los que la función tiene el mismo valor se las llama “isolíneas”.

conducidas por una exploración del terreno cercano al que se encuentran en un momento determinado. Así, para evolucionar, “las especies no deben estar bajo el control estricto de la selección natural” (Wright, 1932, p. 359), sino estar movidos por un “mecanismo” de ensayo y error que permita incluso la existencia de cambios sin adaptación, cambios que pueden luego volverse adaptativos por cambios en el terreno (Wright, 1932, p. 359). Esta “preadaptación”, que hasta el mismo Darwin vio junto con la aparente teleología de fondo, sería rebautizada como “exaptación” y explorada en profundidad por Gould y Vrba (1982). Si bien tanto la adaptación como la exaptación pueden tener causas próximas identificables, “todas las exaptaciones se *originan* por azar con respecto a sus efectos” (Gould & Vrba, 1982, p. 12).²⁶ Una consecuencia epistémica es que los sistemas complejos no-biológicos pueden —y quizás deban— ser estudiados *como si* fueran sistemas biológicos. Otro punto que hace de la ciencia de los sistemas complejos una *interfaz* y punto de encuentro —la *zona de intercambio* descrita en la sección siguiente— entre las explicaciones, métodos, teorías y modelos provistos originalmente por distintas disciplinas científicas.

²⁶Ya que estamos, quizás esta nota sea la indicada para notar que Wright también sugirió un equilibrio puntuado para la evolución, esto es, saltos cualitativamente importantes en lugar de un gradualismo lento pero constante, como argumentarían luego particularmente Gould y col. (1979), forzando a todos a correr al diccionario o a un arquitecto para ver qué era una enjuta [*spandrel*, en inglés]. Nótese aquí también la similitud con el argumento de Ashby para la emergencia: en retrospectiva, o con una teoría más completa, no hay nada fundamentalmente nuevo, pero el fenómeno no podría haberse descrito ni previsto como algo posible antes de haberlo encontrado; pero para entonces, el sistema mismo bajo estudio ya es otro. (Ver p. ??.)

Por esta razón, no es tanto la naturaleza ontológica de lo que se estudia lo que determina en primera medida la forma en la que se investigarán los fenómenos asociados a dicha naturaleza, sino la clase de acceso epistémico que otorguen las metodologías aceptables para las clases de comportamientos de un sistema que una comunidad de investigación considere relevantes.

Todo esto nos deja muy cerca de la siguientes características de los sistemas complejos, especialmente la razón por la que muchos sean modulares.

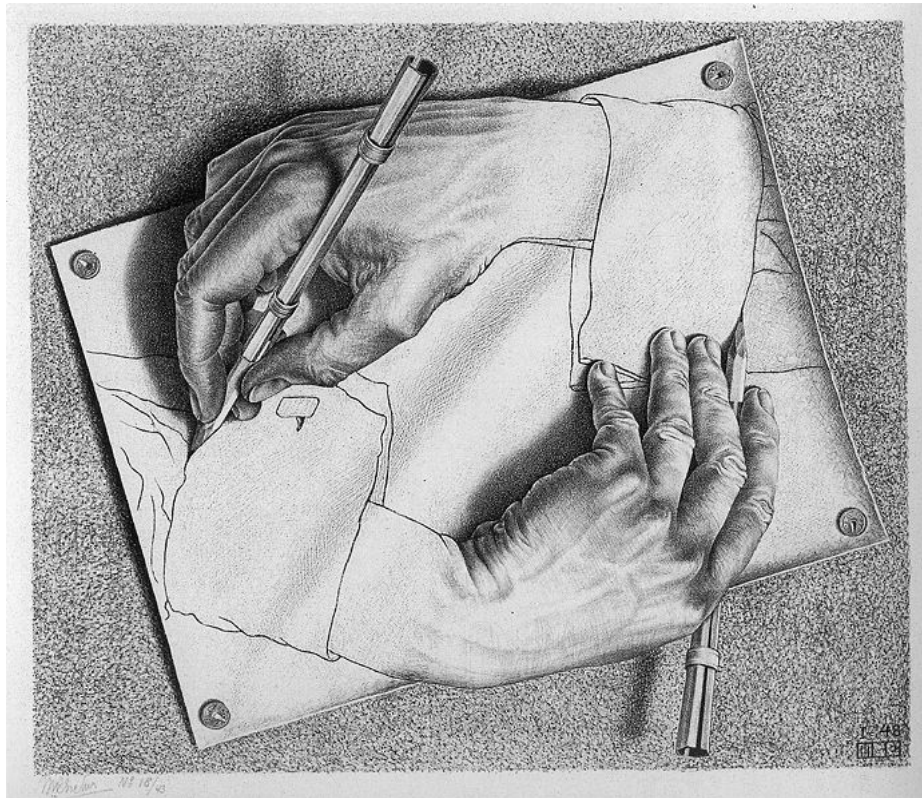


Figura 5.2: Quizás una de las mejores representaciones de proceso evolucionario creando las condiciones para su misma existencia, y sosteniéndola así. En el último capítulo exploro brevemente el “núcleo gödeliano” que puede verse aquí metafóricamente representado también en este extraño y característico bucle. Litografía de M.C. Escher Escher (1948).

5.2.7. Jerarquía y modularidad (y recursividad, otra vez)

Una cosa *diseñada*, entonces, es un ser vivo o una parte de un ser vivo, o el artefacto de un ser vivo, organizado en cualquier caso en ayuda de esta batalla contra el desorden.^{LXXVI}

Daniel Dennett (1996, p. 69)

En su clásico “The Architecture of Complexity”,²⁷ Simon presenta argumentos a favor de por qué los sistemas complejos tienden a aparecer con una estructura modular y jerárquica, donde por este último término entiende que puede ser descompuesto o analizado en términos de subsistemas; esto es, no se refiere a la clase de jerarquía que suele encontrarse en las organizaciones humanas, en las que hay un flujo direccionado de órdenes desde un “control central” que tiene el rango máximo en el sentido de poder influir directamente a todos los subsistemas a su alcance. Precisamente esto no es lo que tiende a observarse en los sistemas complejos que no tienen necesariamente un núcleo o *locus* de control central que tenga que trabajar de manera activa para mantener la estructura de la organización como un todo y tomar decisiones. La modularidad en un sistema complejo sirve para crear diferencias internas, lo que puede llevar consigo la generación de potenciales para generar distintas clases de flujos dentro del sistema, creando así posibilidades estructurales y funcionales. Precisamente que existan estas diferencias internas creando subdivisiones permite que muchas partes del sistema actúen de manera autónoma, lo que no sólo proveerá al sistema de cierta robustez y redundancia, sino que permite que la interacción entre las partes pueda ser entendida en términos informacionales o comunicacionales, al punto de que la función de una de esas partes pueda ser reemplazada por otra sin necesariamente afectar la capacidad del sistema como un todo. Esto tiene una importante consecuencia para nuestra capacidad de estudiar fenómenos complejos:

Así, la primera ventaja que se obtiene de deslindar el ambiente exterior del interior, al estudiar un sistema adaptativo o artificial, es que a menudo podemos predecir su comportamiento a partir del conocimiento de los objetivos del sistema y de su ambiente externo, con unos supuestos mínimos acerca de su ambiente interno. Corolario inmediato de todo ello es que a veces encontramos ambientes internos bastante diferentes entre sí que cumplen fines idénticos o parecidos en ambientes externos idénticos o parecidos—aviones y pájaros, delfines y atunes, relojes de pesas y relojes de batería, relés (relevadores) eléctricos y transistores.^{LXXVII} (H. A. Simon, 1996/2006, p. 9)

De esta manera, conocer en detalle el “ambiente interior” de un componente puede no ser necesario si para el propósito de un investigador alcanza con conocer la clase de comportamientos que dicho componente tiene para los ambientes “exteriores” en los que se suele encontrar o en aquellos en los que se lo está estudiando. La principal ventaja de esto es que

²⁷(H. Simon, 1962) se volvería luego el último capítulo de *The Sciences of the Artificial* (H. A. Simon, 1996), cuya tercera edición se encuentra traducida al español (H. A. Simon, 1996/2006).

deja a criterio del investigador en qué momento detener la descomposición y determinar que ese nivel es el adecuado para dar cuenta del fenómeno investigado. Simon continúa argumentando que de hecho la separabilidad en módulos es una propiedad que uno debería esperar encontrar en prácticamente todo sistema complejo y que es precisamente por eso que la naturaleza en sí se organiza en distintos niveles:

Una generalización del argumento de la separación entre ambiente «interno» y «externo» aquí expuesto implica que deberíamos buscar tal separabilidad, en mayor o menor grado, en todos los sistemas complejos de gran escala, ya sean naturales o artificiales. En su forma generalizada, el argumento sostiene que toda la naturaleza se organiza en «niveles».^{LXXVIII} (H. A. Simon, 1996/2006, p. 7)

No creo que sea una exageración decir que se trata del mismo argumento que ya vimos de la mano de Rosenblueth y Wiener, aunque Simon parece no ver ningún problema con que sigan existiendo cajas negras “en el fondo”. Por mi parte, sí creo que esto es un problema, y que deja escapar la posibilidad de que sean incluso las cajas negras en el modelo del ambiente del sistema que se está estudiando lo que esté efectivamente completando —o en términos más *à la* Turing, *compensando*— la descripción axiomática del sistema. Así, pareciera que bajo la mirada de Simon se requeriría un conocimiento perfecto del ambiente del sistema, especialmente si se pretende luego generalizar los resultados a otros ambientes y sistemas. Si bien es cierto que “muy a menudo, la complejidad suele adoptar una forma jerárquica y que, independientemente de cuál sea su contenido específico, todos los sistemas jerárquicos poseen ciertas propiedades en común”^{LXXIX} (H. A. Simon, 1996/2006, p. 219) y que en muchos casos es la separación en niveles lo que permite su estudio, debe siempre tenerse en cuenta que el rol del ambiente puede ser mucho mayor al esperado. Además, la clase de acoplamiento entre algunas partes es lo que puede *crear* las funciones mismas, al punto incluso de crear las mismas condiciones para la evolución del sistema. En otras palabras, el punto de corte en la descomposición no es para nada trivial —ni “natural”— y precisamente todo punto de corte deberá incorporar una descripción de los otros niveles desde el punto de vista del nivel que se está analizando, especialmente si luego esas descripciones deben ser *articuladas* en una descripción general del sistema como un todo. Simon caracteriza a su posición como un “holismo pragmático”, según el cual en los sistemas complejos

el todo siempre es más que la suma de las partes —en el sentido en cierto modo débil pero importante en términos pragmáticos de la expresión— puesto que, dadas las propiedades de sus distintas partes, así como sus leyes de interacción, *no resulta una tarea nada sencilla poder inferir las propiedades del conjunto*.^{LXXX} (H. A. Simon, 1996/2006, p. 218. El énfasis es mío)

Esta dificultad en la práctica hace que al menos pueda todavía concebirse al reduccionismo

como una metodología de investigación.²⁸ Considero que esta mirada debe contrastarse con la que vimos en el capítulo anterior de la mano de von Neumann, y la diferencia que evocaba con respecto a la posición cibernética. Según veíamos, esta clase de estrategia debe complementarse con la que intenta reconstruir la funcionalidad del sistema desde los elementos que se saben que lo componen, y luego intentar establecer los vínculos entre los dos modelos, lo que obligará a repetir el ciclo. Así, para sistemas que superen cierto umbral de complejidad, el tipo de conocimiento que se pueda obtener de ellos será necesariamente limitado; especialmente si no se consideran las descripciones desde distintos niveles de abstracción.

Ahora bien, cualquiera sea la estrategia de integración que se proponga, la mera existencia de niveles sugiere que la integración podrá ser, al final de cuentas, sólo parcial, debiendo integrarse nuevamente en otra descripción que aunque podrá ser más integrada y quizás más completa que la primera, bajo la nueva perspectiva global que permite, será parcial. Este límite epistémico, que requiere considerar una descripción *epistémica* de los niveles, siendo estos proyectados sobre el fenómeno que se pretende estudiar. Por lo tanto, dicha separación en niveles por parte de un agente es independiente de —y, por tanto, no forzada por— una concepción propiamente ontológica de la existencia de niveles en la naturaleza; aunque muchas veces se suele argumentar en base a la distinción “natural” que surge de la composicionalidad estructural de la materia, que hay un nivel cuasi substancial u ontológicamente primigenio del cual se podrían derivar en principio las propiedades de las entidades luego compuestas por agregados de las entidades más simples (en tanto, *ex hypothesi* se las asume más simple). La propuesta metodológica que puede seguirse de dichas hipótesis puede ser fructífera en el estudio de ciertos fenómenos, pero considero que no es válida especialmente para el caso de todos los sistemas complejos.

Simon entiende que la independencia relativa de los subsistemas es una condición necesaria tanto para la evolución como para nuestra capacidad de conocerlos, mas creo que se equivoca en entender que es una condición necesaria, si bien muchas veces se da.

El supuesto del que se parte es que el potencial necesario para que se produzca una evolución rápida se halla presente en cualquier sistema complejo formado por un conjunto de subsistemas estables cada uno de los cuales funciona de modo casi independiente con respecto a los procesos concretos que tienen lugar en los otros subsistemas

²⁸La insistencia en los aspectos pragmáticos de la expresión de Simon siempre me han parecido curiosos. Por un lado, parece estar convencido de que en algún momento futuro de la investigación se podrá llegar a una descripción correcta de la realidad, en base a la cual las dificultades en la práctica podrían sortearse. Simon sí es algo más explícito en cuanto está en contra de tesis como las de Elsasser (1958), quien puede verse como sosteniendo la irreductibilidad en principio de ciertas leyes biológicas a leyes físicas, por lo que requieren principios explicativos propios y autónomos, como lo son sus «leyes biotónicas». Estos aspectos, cuyas presentaciones ya formuladas hasta aquí dejan entrever el patrón conceptual que les subyace, serán parte del núcleo conceptual del capítulo 7, especialmente de la sección 7.1.

y, por consiguiente, están influidos sobre todo por los *inputs* y *outputs* netos de los otros subsistemas. Si se cumple la condición de cuasi-descomponibilidad, la eficiencia de un componente determinado (y por tanto su aportación a la aptitud del organismo) no depende de la estructura concreta de otros componentes implicados.^{LXXXI} (H. A. Simon, 1996/2006, p. 230)

El primer punto es correcto, pero hay que considerar que la cuasi-descomponibilidad se postula; es decir, se toma como un supuesto epistémico desde el cual se procede a la investigación del sistema complejo. Además, la misma modularidad de la que un sistema se puede servir para acelerar el proceso de su evolución, en tanto genera la posibilidad de evolución, se vuelve ella misma un emergente, abriendo así un universo de lo posible, en donde la función de cada elemento se torna todavía más dependiente del contexto o ambiente en el que se encuentra, puesto que incluso la recombinación de estructuras puede llevar a la creación de nuevas funciones (lo que también abre la posibilidad a ser exaptado). El hecho de que un subsistema pueda evolucionar y cambiar hasta incluso radicalmente su estructura sin cambiar la función que realiza cuando es visto como un todo por el resto del sistema, no pareciera implicar que el cambio no pueda implicar funciones nuevas si es que el ambiente lo permite. Esto puede, luego, cambiar el paisaje de lo posible para todo el sistema.

La cuasi-descomponibilidad, entonces, tiene dos aspectos que deben ser distinguidos. Por un lado, es algo que tiende a verse en sistemas que evolucionan ya que les permite esa evolución de manera mucho más acelerada (algo que puede apreciarse en la metáfora de Simon de *Tempus y Tempora* (H. A. Simon, 1996/2006, pp. 224-226), sobre la dificultad de crear sistemas complejos que no tengan ensamblados parciales estables). Por otro lado, es una condición que se *proyecta* en los sistemas para poder reducir la complejidad de sus descripciones y, por lo tanto, poder generar esas mismas descripciones con mayor facilidad. Por lo tanto, es una forma de idealización que hay que justificar; algo que dependerá del contexto de investigación que fijará el recorte que se haga a lo largo de todos los niveles que se pretendan integrar en la explicación de un fenómeno.

Esta disminución en la complejidad de la descripción de un fenómeno implica, de hecho, una transformación en la manera en la que ciertos fenómenos se representan. Es bajo estas nuevas representaciones que se puede observar similitudes entre sistemas que bajo las descripciones anteriores no se habían observado; algo que ya había empezado a tomar forma en la metateorización de la mano de los proponentes de una Teoría General de los Sistemas, como vimos en el capítulo 3. Importante para el estudio de los sistemas complejos atendiendo e íntimamente ligado al planteo de la interacción entre las partes, es la posibilidad de una descripción general de estas jerarquías en términos más abstractos, como por ejemplo la que introduce Simon precisamente para ver bajo una misma perspectiva a las jerarquías sociales y a las físico-biológicas:

Existe una diferencia importante entre las jerarquías físicas y biológicas, por un lado, y las jerarquías sociales, por otro. La mayoría de jerarquías físicas y biológicas se describen en términos espaciales. Detectamos los orgánulos de una célula de la misma manera que detectamos las pasas en un bizcocho —son subestructuras claramente diferenciadas que se ubican en una estructura mayor—. Por otro lado, para identificar las jerarquías sociales proponemos que no nos fijemos en quién vive cerca de quién sino que más bien observemos quién interactúa con quién. Estos dos puntos de vista se pueden reconciliar definiendo la jerarquía en términos de la intensidad de la interacción pero teniendo en cuenta que en la mayor parte de los sistemas biológicos y físicos la presencia de una interacción relativamente intensa suele ir acompañada de una relativa cercanía espacial.^{LXXXII} (H. A. Simon, 1996/2006, pp. 222-223)

De esto se sigue que en sistemas complejos, la interacción no implica contigüidad espacial, sino que la conexión o el acoplamiento puede ser *informacional*; no hace falta que el acoplamiento entre sistemas o subsistemas sea en términos de materia o energía, sino que puede ser, simplemente, una señal. En muchos sistemas, alguna clase de ciclo que afecte al sistema como un todo podrá ser visto como un canal de comunicación que sirve para generar un patrón de acción común —hasta podríamos decir que se trata de un reloj— en los múltiples subsistemas.²⁹

Aquí Simon introduce, pues, una abstracción en la representación de una jerarquía, que le permite dar cuenta de elementos comunes en las distintas clases de sistemas, permitiendo así la asimilación bajo una clase de abstracción de sistemas que aun siendo estructuralmente muy distintos pueden analizarse bajo un punto de vista común. Se trata de la misma estrategia que habían empleado McCulloch y Pitts en la formulación de su modelo simplificado para describir un sistema análogo al cerebro humano (módulo su abstracción) *como si fuera capaz de computación universal*; la misma abstracción que empleó von Neumann para *diseñar* una arquitectura de computación sin importar el substrato físico sobre el que se implemente y que en el mismo proceso le permitiera *abstraer* bajo una misma representación lo que hasta entonces se había concebido como elementos

²⁹Un ejemplo interesantísimo es el cuerpo humano. El espacio interno mediante el que interactúan y por el que se sincronizan múltiples subsistemas, casi de manera análoga a la pared de los relojes de Huygens, es el ciclo diario de la temperatura del cuerpo. Los cronobiólogos, de hecho, hablan en la actualidad del ciclo de la temperatura como el reloj maestro del cuerpo y han señalado la importancia de esta regulación para el correcto funcionamiento de algunos sistemas y la expresión de ciertos genes (Coiffard y col., 2021). Esta sincronización es independiente pero complementaria de las distintas formas en las que las células pueden comunicarse entre sí. La biología computacional y especialmente la biología de sistemas han avanzado mucho la comprensión de los sistemas de transducción de señales mediante los cuales las células pueden responder a las distintas clases de *inputs* que reciben de su ambiente, estudio que básicamente originó cuando Claude Bernard notó la respuesta fisiológica a sustancias —que hoy llamamos hormonas— que eran excretadas por glándulas como la tiroides y las suprarrenales. La forma en la que la comunicación célula-célula puede darse es variada, en tanto puede ser por medio de mensajeros químicos, proteínas en la superficie celular, señales eléctrica y las uniones *gap* o uniones comunicantes, mediante las cuales las células pueden compartir iones y moléculas pequeñas (Krauss, 2014) (las sinapsis propiamente eléctricas entre neuronas —a diferencia de aquellas mediadas por neurotransmisores— son un caso particular de esta clase de unión).

muy distintos: datos e instrucciones en un proceso computacional. Como argumento en el capítulo final, este proceso de abstracción por *representación de representaciones* (lo que en otros momentos aquí he llamado la relación modelo-modelo), es clave para comprender la dinámica de creación y justificación de conocimiento y de progreso científico.

Los sistemas jerárquicos, tal como ya hemos visto, son muy a menudo sistemas cuasi-descomponibles. Por ello, en las descripciones de las interacciones de sus partes intervienen solamente propiedades agregadas de esas partes. Se podría formular una generalización del concepto de cuasi-descomponibilidad en términos de la «hipótesis del mundo vacío» —la mayoría de las cosas están sólo conectadas débilmente con las demás cosas—; para una descripción aceptable de la realidad hay que tomar en cuenta solamente una pequeña fracción de todas las posibles interacciones.^{LXXXIII} (H. A. Simon, 1996/2006, p. 250)

Simón está aquí en lo cierto, aunque considero que la posibilidad de una cuasi-descomponibilidad debe entenderse en términos de una suerte de “clausura funcional” postulada, que dependerá, según lo discutido anteriormente, sobre las clases de idealizaciones que se admitan; algo que, a su vez, dependerá de la integración que pueda realizarse entre los modelos que se hayan propuesto para el mismo fenómeno, para otros que se hayan podido encontrar como equivalentes bajo ciertas descripciones y, sobre todo, sobre la clase de abstracción que se esté empleando, en tanto es esta la que en última instancia permite la integración o articulación de las múltiples descripciones. Es decir, en sistemas complejos hay que tener mucho cuidado con la clase de idealizaciones que se admiten. Que la conexión entre dos partes de un conjunto sea débil de ninguna manera garantiza que pueda ser una variable que se elimine sin precauciones. Asumir un mundo vacío puede ser muy útil en algunos contextos, especialmente porque disminuye el número de interacciones a estudiar. De hecho es parte del *dictum* que se suele enseñar como “controlar el ambiente” a la hora de realizar un estudio experimental: aislar tanto como pueda ser factible hasta obtener un conjunto mínimo que reproduzca el efecto buscado y limitarse a explorar las causas solo en ese conjunto.³⁰ Esto deja entrever otro “sabor” artificial de una situación experimental, un problema con el que hasta el mismo Galileo tuvo que enfrentarse a la hora de defender las idealizaciones que proponía para conocer la naturaleza, tanto en experimentos mentales como materiales. Un análogo al elemento clave en la propuesta de Galileo puede verse en la sugerencia de Simon: lo que se conoce como el método de composición de causas.

³⁰Si pensáramos en términos de una matriz que describa la interrelación o la conectividad entre variables, diríamos de esa matriz que es rala o hueca, porque la mayoría de sus elementos son cero. Algo análogo se hace en algunos sistemas de inteligencia artificial formulados en términos lógicos, en donde el valor de verdad de todos los enunciados que no se sepan verdaderos son tildados como falsos, para, simplificando un tanto las cosas, evitar que interfieran en las inferencias posibles y sólo se vuelvan verdaderos si hay suficientes razones para hacerlo (por una derivación o por un cambio en el mundo, por ejemplo). La analogía que se puede atisbar aquí entre estas representaciones clásicas para sistemas inteligentes y la clase de justificaciones detrás de ciertas metodologías científicas es muy tentadora de ser explorada, pero *ex hypothesis* el mundo fuera de esta nota al pie está vacío.

Para muchos sistemas que se pretende estudiar, es cierto que muchas causas pueden tratarse *como si* fueran independientes a lo largo de una investigación y luego “sumarlas” a todas. De esta integración (nótese la analogía aquí entre los sentidos comunes y matemáticos de “sumar” e “integrar”) surgiría una descripción total del sistema, provisto que se cumplan tanto la independencia como la aditividad de los componentes. Bien puede que sea el caso, pero no es algo que se pueda asumir sin problemas. Esto va a implicar que para conocer un sistema complejo, normalmente va a ser necesario perturbar al sistema y realizar inferencias sobre la base de los efectos que puedan observarse, pero las múltiples clases de sensibilidades que puede tener un sistema —especialmente en las cercanías de un punto crítico o de una transición de fase— hace que las posibilidad de estudiar con detalle muchos sistemas complejos sean bastante reducidas. Así, estos sistemas tendrían una suerte de “no localidad”, que es la próxima característica a describir.

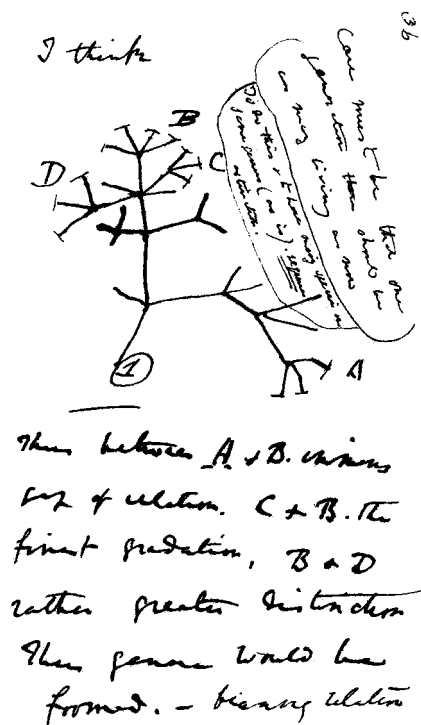


Figura 5.3: Primer diagrama de Darwin de un árbol de la vida en el que hace explícita la idea de la cantidad de especies deben haberse extinguido para haber dado lugar a la variedad que se puede observar en un momento determinado. Del *Primer cuaderno sobre la transmutación de las especies* (1837). Al lado del árbol, escribe Darwin: “El caso debe ser que una generación de entonces debe ser igual a muchas que viven en la actualidad. Para hacer esto y tener muchas especies en el mismo género (tal como es) se requiere la extinción.^{LXXXV}”

5.2.8. “No-localidad” y dependencia del contexto

Uno de los desafíos asociados al estudio y al diseño (lo que incluye a las intervenciones o modificaciones) de los sistemas complejos es que pueden estar distribuidos, tanto espacial como temporalmente. Es decir que algunos de sus componentes clave para su funcionamiento pueden no estar presentes en el “ámbito local” en donde *se observa* que está actuando la mayor parte del sistema. Además, esta dificultad se puede presentar en múltiples escalas, lo que se sigue de adoptar la mirada epistémica sobre la jerarquía comentada en el punto anterior, afectando tanto al sistema como a su ambiente. Todo esto no es otra cosa que una consecuencia del recorte que impone el modelado y los límites epistémicos a lo que se tiene que enfrentar un observador de esta clase de sistema. Al *proyectar* un sistema y, por tanto, separar una parte del fenómeno para ser analizado en contraste con un posible ambiente, siempre existe la posibilidad de que en el aislamiento algún efecto no conocido (y, por lo tanto, no asumido como filtrado por la “barrera” que hace de interfaz entre el sistema y el ambiente o entre el observador y el ambiente) pueda afectar al sistema, por lo que estaría imponiendo una dificultad para poder dar debida cuenta de su comportamiento. Esto es más grave si, como mencionamos anteriormente, el sistema se puede encontrar en un estado cercano a un punto crítico, en donde una mínima señal puede provocar cambios drásticos en el estado que se observa luego de que la señal ha sido recibida por el sistema. Esto es, el sistema puede reconfigurarse incluso al punto extremo de que el modelo original ya deja de ser útil. La consecuencia fundamental es que, en última instancia, lo que se defina cómo complejo va a depender de la capacidad que tenga el observador-modelador de inferir estados e interdependencias entre el sistema, el ambiente y el mismo observador-modelador. Por lo tanto, inherente a cualquier análisis epistémico de nuestra capacidad para lidiar con sistemas complejos requiere un análisis de las capacidades mismas del agente epistémico que está intentando conocer el sistema. En otras palabras, podríamos decir que requiere un *modelo del modelador*: alguna forma de dar cuenta del proceso por el cual el agente, en última instancia, está justificado en hacer afirmaciones sobre lo que se sabe acerca del fenómeno que estudia.

Esta “sensibilidad informacional a condiciones iniciales” también está presente *dentro* del sistema mismo, consecuencia que se puede apreciar del análisis anterior sobre la jerarquía.³¹ Así, puede ser el caso de que múltiples componentes del sistema puedan recibir señales y causar efectos que de otra manera no hubieran sucedido. Y esto, a su

³¹Per Bak propuso algo similar estudiando criticalidad en modelos evolutivos que presentan equilibrio puntuado —lo que el llama “catastrofismo” en contraste con el gradualismo—, en donde esta clase de sensibilidad en la que una pequeña acción puede afectar a todo el sistema sería el verdadero efecto mariposa: “Nuestro modelo de evolución ilustra el efecto mariposa para un sistema complejo. Cualquier pequeño cambio de cualquier evento afectará tarde o temprano a todo el sistema. Si el acontecimiento inicial provocó una gran avalancha, el efecto se producirá más temprano que tarde. Creemos que el efecto que hemos descrito es el verdadero efecto mariposa, en contraste con el que se encuentra en sistemas caóticos simples que no tienen relevancia para la evolución o cualquier otro sistema complejo” (Bak, 1996, p. 159).^{LXXXVI}

vez, puede depender de la historia o el camino por la cual el sistema haya llegado a aquel en donde comienza una investigación que se pretende llevar a cabo. Esas señales, por lo tanto, pueden ser históricas en el sentido de que hayan provenido de una conexión del sistema con un ambiente distinto del que se encuentra en el presente. Esto obliga también a tener en cuenta la transición de los ambientes en los cuales se puede encontrar el sistema; ambientes que pueden ser ellos mismos sistemas bastante complejos. Esta es una de las razones por las que en esta clase de sistemas se encuentran operando múltiples escalas espacio-temporales en simultáneo, algo que el modelador puede explotar para conocerlo ya que quizás el sistema presente alguna clase de invariancia frente a los cambios de escala de observación. Si bien se suele asociar la idea de cambio de escala al cambio en la distancia desde la que se observa, estrictamente hay que decir que el cambio de escala no es otra cosa que una transformación de dilación (o dilatación) que surge, en el cálculo, multiplicando la variable que representa una cantidad a observar por cierto factor. De acuerdo al rango de esta constante (de hecho volviéndola un parámetro) en el que la cantidad *observada* de hecho no cambia, se dice que en ese rango al menos la cantidad es invariante de escala, lo que ya mencionamos de la mano de los fractales o estructuras auto-similares. En muchos casos, cuando un sistema de muchos componentes está cerca de un punto crítico, es posible observar que el sistema se vuelve invariante frente a los cambios de escala de longitud. Esto significa que sin importar la distancia entre los elementos, se puede considerar que dichos elementos interactúan entre sí. Dicho en otros términos, en estados semejantes cualquier cambio puede propagarse rápidamente por todo el sistema, por lo que un cambio local puede producir efectos globales. Esto tiene contrapartida muy la hora de interactuar con sistemas semejantes, en tanto efectos globales se pueden lograr mediante pequeñas intervenciones locales. Aunque, al mismo tiempo, los vuelve muy impredecibles porque son altamente sensibles a las perturbaciones; lo que también hace que sean difíciles de conocer si para ello se requiere una clase de perturbación.³² La contrapartida, claro, es la flexibilidad característica de un sistema complejo; aquella que le permite evolucionar y aprender, bajo el concepto ampliado de aprendizaje ligado al cambio funcional producido por cambios estructurales que comentamos anteriormente.

Una forma de pensar lo que le sucede a un sistema en un punto crítico es que sus grados de libertad o de parámetros —que desde un punto de vista estadístico significa la cantidad de factores que pueden variar cuando se calcula un estadístico— crecen de manera abrupta. De hecho, una clase de transiciones de fase que se conocen en física como transiciones de primer orden son precisamente “discontinuas” y la trayectoria que describe la relación entre las variables características del sistema en el espacio de fase presenta un salto que indica que los grados de libertad son infinitos. La clasificación original de los grados de las transiciones de fase fue propuesta por Paul Ehrenfest, alumno de Ludwig

³²Si bien no siempre en el sentido físico del término, sí creo que toda forma de conocimiento robusto es producto de un largo proceso de perturbaciones de sistemas, de ambientes, de sus representaciones.

Boltzman. La clasificación se basa en el grado menor de la derivada de la energía libre que es discontinua con respecto a las otras variables termodinámicas. Este es el caso, por ejemplo, de los cambios de fase o de estado habituales en la materia, como cuando el agua líquida se convierte en vapor. En otras circunstancias, como por ejemplo en el cambio de la magnetización del hierro, es recién la segunda derivada con respecto al parámetro de control – la llamada susceptibilidad magnética– la que se vuelve discontinua, por lo que se trata de una transición de fase de segundo orden o continua. En las décadas siguientes a la clasificación introducida por Ehrenfest, el trabajo en física de materia condensada sobre la reorganización de la materia durante las transiciones de fase llevaría a describirlas en términos de las propiedades de universalidad y de invariancia de escala. Los trabajos de Leo Kadanoff –y en particular su artículo sobre los modelos de Ising (Kadanoff, 1966)– ayudaron a mostrar la aplicabilidad en física estadística de las técnicas de renormalización que se habían introducido en física de partículas durante la década de 1950, y abrir así el terreno para las múltiples aplicaciones que estos conceptos y técnicas asociadas traerían en varias disciplinas, efectivamente cimentando la aparición del estudio mismo de los sistemas complejos en tanto caracterizados más por el comportamiento intrincado que surge de la interacción entre sus elementos que por la naturaleza misma de los elementos.

Los sistemas complejos, entonces, pueden verse *como si* tuvieran transiciones de fase en virtud de sus numerosas interacciones, en donde a efectos de la representación se las puede tomar como infinitas. El acoplamiento de las partes –representado por el acoplamiento de las variables– y especialmente el cambio en la intensidad de la interacción pueden llevar al sistema, incluso de manera endógena, a un comportamiento en el que al menos pareciera que todo el sistema está conectado entre sí. Muchas de las transiciones que se observan en sistemas complejos son de segundo grado, es decir que no hay una discontinuidad en un punto específico de la trayectoria sino que, más bien, se dice que hay un rango de valores en el que se puede observar la transición. Parametrizar este rango en una serie de modelos es una de las formas usuales de dar al menos una descripción fenomenológica del comportamiento del fenómeno bajo estudio. Y claramente también puede servir como un buen punto de apoyo para dar cuenta de qué significa que un sistema complejo tenga propiedades emergentes (vuelvo a este punto más adelante, especialmente en la sección 7.1). Si recuperamos la discusión acerca de la regulación introducida de la mano de Ashby, podemos notar aquí que una propiedad que puede tener un sistema es la de ser un regulador de sí mismo. Esto es, nuevamente, que un sistema puede auto-organizarse o auto-estructurarse para mantenerse en cierto régimen de comportamiento y, al mismo tiempo, usar ese régimen de comportamiento para auto-estructurarse; el mismo extraño ciclo de retroalimentación mencionado anteriormente.

Un caso particular de esta clase de auto-regulación es la llamada criticalidad auto-organizada. El término fue introducido por Bak y col. (1987) para referirse a la acción del mecanismo que postularon como una explicación del fenómeno de una clase de ruido

que suele observarse y que si bien parece azaroso resulta tener cierta estructura subyacente, algo similar a lo que ocurre con el caos determinista. Si la densidad espectral de líneas temporales que se pueden observar en fenómenos muy distintos —tanto naturales como artificiales— se pueden caracterizar con la siguiente relación $D_e(f) = \text{constante}/f^a$, en donde f es la frecuencia en un segmento aislado tanto de cero como infinito, se dice de esas fluctuaciones que son características del ruido $1/f$ o ruido rosa. Esta clase de ruido puede considerarse como un punto medio entre otras clases de ruido algo más entendidas como el ruido blanco (totalmente azaroso) y el ruido marrón, donde el nombre proviene de acortar en inglés el nombre original que hace referencia a que es consecuencia de un movimiento Browniano o de una caminata al azar. El ruido puede aparecer con valores del exponente $0 < a \leq 3$ y aparece precisamente en sistemas que parecen tener alguna clase de correlación o dependencia de largo alcance, otra forma de interpretar la “no-localidad” aquí comentada. Bak y sus colaboradores propusieron un modelo para dar cuenta de la ubicuidad de este fenómeno según el cual se podría observar su presencia en sistemas disipativos forzados con muchos grados de libertad y es lo que les permite mantenerse en un estado de estabilidad mínima (en un equilibrio dinámico lejos del equilibrio termodinámico gracias al gradiente introducido por el forzamiento) y, fundamentalmente, que lo hace sin que el forzamiento cause lo que podría verse como un ajuste fino en el parámetro de orden del sistema. Una simple función permite pasar del ámbito de la densidad espectral del ruido a la densidad de probabilidad, que también es una función de potencia sobre el tamaño s de un evento: $D_p(s) = ks^a$. El tipo de ruido, sostienen Bak y col. (1987), puede observarse en el modelo que proponen porque la vida media t de un evento en dicho modelo está relacionada con el tamaño del evento según t^{1+b} , donde b es el ritmo de propagación o la velocidad con la que afecta el evento originalmente local al resto del sistema. Lo que me interesa destacar aquí es la forma en la que presentan su argumento:

La criticalidad en nuestra teoría es fundamentalmente diferente del punto crítico en las transiciones de fase en la mecánica estadística de equilibrio, que sólo puede alcanzarse mediante la sintonización de un parámetro, por ejemplo la temperatura. El punto crítico en los sistemas dinámicos estudiados aquí es un atractor que se alcanza al empezar lejos del equilibrio: Las propiedades de escala del atractor son insensibles a los parámetros del modelo. Esta robustez es esencial para explicar que no es necesario un ajuste fino para generar ruido $1/f$ (y estructuras fractales) en la naturaleza.^{LXXXVII} (Bak y col., 1987, p. 381)

Más allá de las críticas posibles a este modelo en particular, esta clase de argumentos *desde y sobre* la robustez de un sistema o de un modelo en donde se puede observar un invariante frente a perturbaciones son ubicuas en el trabajo con sistemas complejos y, como argumento en el último capítulo, hacen a toda una clase de argumentos epistemológicos acerca de nuestra capacidad de obtener conocimiento del mundo, no sólo sobre sistemas complejos.

Per Bak creía, como muchos también creen ahora, que la criticidad auto-organizada era un buen candidato a lo que, con un poco de retrospectiva, podríamos llamar una “teoría unificada” de la complejidad en la naturaleza. El argumento central está puesto en que las explicaciones de eventos contingentes pueden darse de manera estadística, incluso si los eventos particulares no pueden nunca ser previstos, porque si bien contingentes cada uno de ellos, vistos como un todo su aparición respeta un patrón que puede describirse de manera estadística:

Argumentaremos que la criticidad autoorganizada (CAO) subyace a la aparición generalizada de la contingencia y la complejidad en la naturaleza. En concreto, la estadística del comportamiento a gran escala obedece a leyes fundamentales de la naturaleza, aunque los propios acontecimientos individuales sean únicos. Estas leyes fundamentales son “universales” y describen muchos tipos diferentes de sistemas.^{LXXXVIII} (Bak & Paczuski, 1995, p. 6689)

El énfasis está puesto en que lo que se puede explicar, entonces, son las propiedades estadísticas de muchos sistemas diferentes que al menos en ciertos regímenes de comportamiento pueden verse como semejantes, donde este término hace referencia a que pueden ser *fenomenológicamente* explicados por una misma teoría. Como mencioné anteriormente, cuando un sistema se acerca a un punto crítico en donde sufriría alguna transición de fase, si el comportamiento se vuelve cada vez más independiente de los detalles —en términos del modelo diríamos que el parámetro de orden es cada vez menos sensible a los valores de las variables a medida que se acerca al punto crítico— y en el límite se vuelve totalmente independiente. Dado que ese comportamiento no depende de la escala en tanto se observa a cualquier escala, se dice que es libre de escala y, por tanto, se podría esperar que la familia de modelos que dan cuenta del fenómeno tengan la misma propiedad, esto es, que presenten dicha simetría. Esta insensibilidad a los detalles es lo que permite que muchas configuraciones microscópicas puedan verse como semejantes desde el punto de vista del comportamiento en las cercanías del punto crítico. Este punto es clave en el análisis de sistemas complejos y de hecho hace a un punto de encuentro entre técnicas y modelos de la física estadística y las teorías contemporáneas de campos, ya que en muchos modelos de ambas disciplinas se procede a integrar —léase matemáticamente, esto es, como una suma continua— sobre las múltiples configuraciones posibles de un sistema. Sobre la centralidad del concepto de universalidad y su relación con la robustez entendida como esta insensibilidad a detalles, comentaba Bak:

Sin el concepto de universalidad estaríamos en una mala situación. No habría leyes fundamentales “emergentes” de la naturaleza que descubrir, sino un gran lío. Obviamente, tenemos que demostrar que nuestros modelos son robustos, o insensibles a los cambios, para justificar nuestra intuición original. Si, por desgracia, resulta que no lo son, volvemos a la desordenada situación en la que los modelos detallados de tipo ingenieril de los fenómenos altamente complejos es el único enfoque posible —el enfoque del meteorólogo—.^{LXXXIX} (Bak, 1996, p. 45)

La última frase, creo, deja entrever el sesgo reduccionista que tiene la posición de Bak pese a él mismo ser explícito sobre su posición como anti-reduccionista y que es consciente de que es la relación entre los elementos lo que hace que *funcionalmente* puedan verse como un todo. Así, aunque esté explícitamente en contra de un reduccionismo atomista, ya que asume la imposibilidad de predecir las propiedades y comportamientos de los agregados de materia desde el conocimiento que se pueda tener de los componentes, asume una suerte de reduccionismo epistémico-metodológico en el que un mecanismo que se encuentra como capaz de reproducir cierto comportamiento estadístico se asume como la mejor explicación de dicho comportamiento *tout court*. La suficiencia del modelo —y su estrategia de construcción *top-down*— para otros sistemas complejos viene de la mano de reconocer que incluso los sistemas que se adaptan pueden verse *como si* estuvieran en un punto crítico:

¿Por qué el concepto de equilibrio puntuado es tan importante para nuestra comprensión de la naturaleza? Quizá el fenómeno ilustra mejor que cualquier otro la criticalidad de un sistema complejo. Los sistemas con equilibrios puntuados combinan las características de los sistemas congelados y ordenados con las de los sistemas caóticos y desordenados. Los sistemas pueden recordar el pasado debido a los largos periodos de inmovilidad que les permiten conservar lo que han aprendido a lo largo de la historia, imitando el comportamiento de los sistemas congelados; pueden evolucionar debido a las ráfagas intermitentes de actividad.^{XC} (Bak, 1996, p. 143)

Aquí, creo, Bak tiene razón pero por las razones equivocadas. Que, como en este caso, un ecosistema pueda verse por momentos en un estado crítico y puedan observarse estos períodos prolongados de estasis y cambios repentinos, e incluso se pueda ver el mismo patrón dinámico a distintas escalas de observación, no hace que esa sea la razón por la que el sistema tenga memoria. Al contrario, creo que es porque tiene memoria y, al mismo tiempo, alta sensibilidad al ambiente en el que se encuentra que, en promedio, puede verse el patrón dinámico de la criticalidad. Pero bajo mi punto de vista no se puede exportar el “mecanismo” que en un modelo generó el comportamiento crítico como parte fundamental del modelo de un sistema diferente. Si bien tiene ciertas diferencias, el sesgo de Bak es parecido al sesgo de Simon: los dos toman una sola estrategia en la construcción del modelo en lugar de plantear explícitamente que una debe servir como restricción del diseño de la otra. Si aceptamos esto, Bak estaría algo más horrorizado, tal vez, en tener que aceptar que la forma de avanzar en el conocimiento de los sistemas complejos está en un balance entre la de un ingeniero que llena de detalles un modelo para “hacerlo andar” en una situación particular y la de las vacas esféricas idealizadas del físico que busca una teoría que pueda aplicarse a cualquier situación que pueda ser vista como similar bajo la idealización propuesta. Las dos estrategias tienen su fruto, pero deben ser complementadas.

Ya sugerí anteriormente cómo estas dos estrategias se pueden ver en tanto complementarias y cómo posiciones estándares en las filosofías de las ciencias particulares

(como lo son el funcionalismo y el nuevo mecanicismo) podían verse como instancias de estas estrategias. El funcionalismo dividiendo ambiente de un sistema y sosteniendo que la tarea del sistema es dar la correcta relación entre lo que puede verse como valores de entrada al sistema o argumentos de una función y lo que la función devuelve o lo que el sistema hace sobre el ambiente. El mecanicismo intenta “bajar el nivel”, abrir la caja negra y dar una descripción de una instancia particular que podría llevar a cabo esa función, aunque no parece poder dejar de lado completamente la misma idea de función, encapsulada ahora en un mecanismo algo más transparente que la caja negra funcional original.³³ En este sentido, la teoría de la criticalidad auto-organizada es un buen ejemplar de las clases de modelos que se pueden generar para ciertos fenómenos sin recurrir al reduccionismo clásico o atómico, especialmente porque pretende dejar de lado la reconstrucción de las jerarquías. El problema está en reconocer que es un modelo de modelos, tanto en el sentido de dar cuenta de propiedades que aparecen en otros modelos como en el de ser una suerte de modelo paradigmático, no en tanto de cómo logra algo, sino de qué es lo que está haciendo para mejorar el entendimiento que se tiene de la complejidad de la naturaleza.³⁴

Curiosamente, la forma en la que los agentes se suelen relacionar con otros agentes en su medio también puede dar lugar a una ley de potencia. Quizás la forma más clásica de explicar cómo surge una estadística con esa forma es la de notar que, en muchos sistemas, la probabilidad de que un agente se relacione con otros dependerá en proporción a la cantidad de veces que agentes similares se hayan ya conectado en el pasado. Estos

³³Un movimiento similar puede verse en otros rincones de la literatura epistemológica, de la mano del surgimiento de una posición naturalista y evolucionista y de corte más descriptivo frente a la epistemología positivista clásica, que tenía un profundo corte normativo a cerca de cómo hacer ciencia. Curiosamente, el mismo Kuhn se refugió en una posición más cercana a la epistemología clásica cuando se le mencionó la posible analogía biológica, que al parecer lo dejaba incluso demasiado cerca de una posición de tipo “ensayo y error”, al estilo de las conjeturas y refutaciones popperianas.

³⁴Creo que este diagnóstico es similar al que hacía Anderson —alguien quien sin duda sabía mucho más acerca de física de la materia condensada de lo que puedo saber yo— cuando decía precisamente sobre la teoría de la criticalidad auto-organizada lo siguiente: “La idea de la criticalidad autoorganizada me parece, no la solución correcta y única a estos y otros problemas similares, sino que tiene un valor paradigmático, como el tipo de generalización que caracterizará la próxima etapa de la física. La física del siglo XX resolvió los problemas de construcción de niveles jerárquicos que obedecían a generalizaciones claras en su interior: teoría atómica y molecular, física nuclear, cromodinámica cuántica, teoría electro-débil, teoría cuántica de muchos cuerpos, hidrodinámica clásica, biología molecular, [etc.]. En el siglo XXI, una revolución que puede tener lugar es la construcción de generalizaciones que salten y desbaraten las jerarquías, o generalizaciones que permitan fenómenos sin escala o que trasciendan la escala. El paradigma para lo primero es la ruptura de simetría, para lo segundo la criticalidad autoorganizada. Otro paradigma es la teoría de las distribuciones de los vuelos de Levy, aplicada a la economía por Solomon et al.^{XCI} (Anderson, 2011, p. 112)” Los vuelos de Lévy que Anderson menciona al final son una instancia de procesos markovianos, una caminata al azar en un espacio continuo en la que en lugar de tener un tamaño de paso fijo, el tamaño se fija relativo a una distribución probabilidad que sigue una ley de potencia. Hacen a una forma de generar fractales al azar, y el nombre se los dio el mismísimo Benoit Mandelbrot en honor a Paul Lévy, uno de los varios buenos alumnos que tuvo Hadamard, y quien ayudó a darle forma al estudio matemático de los procesos azarosos en la primera mitad del siglo XX.

procesos se llaman *preferenciales* y han surgido como explicaciones para ciertas estadísticas que se observan en muchas disciplinas distintas, como el hecho de que en economía los ricos se vuelven más ricos, algo que notó Vilfredo Pareto y por eso la distribución se asocia a su nombre, junto con la regla de que el 20 % de las causas produce el 80 % de los efectos observados. Undy Yule notó una distribución similar en sus trabajos estadísticos sobre la relación entre géneros y especies (Yule, 1925), distribución que fue luego estudiada por Simon, quien notó que muy diversos fenómenos empíricos presentaban la misma clase de distribución que había estudiado Yule: población de ciudades, ingresos económicos por tamaño, artículos científicos publicados y hasta la frecuencia de las palabras en los textos (H. A. Simon, 1955). Esto último suele hoy asociarse a la llamada ley de Zipf, que produce una distribución similar a la de Yule-Simon, aunque no es estrictamente idéntica. El “tamaño” de las páginas de Internet, medido en términos de la cantidad de enlaces que conducen a ellas, también sigue una distribución similar, libre de escala. Lo más importante a notar aquí es que hay muchas formas en las que un sistema complejo puede producir una distribución semejante, y es precisamente gracias a la similitud de tales distribuciones junto con el argumento sobre la universalidad que tanto técnicas como modelos pueden pasar de una disciplina a otra.

Esta es una de las razones por las que, como sugiero más adelante, el estudio de los sistemas complejos no da tanto lugar a una teoría particular de la complejidad, sino a un punto de encuentro o zona de intercambio entre muchas disciplinas; una interfaz que muestra que el estudio de la complejidad de los mundos naturales y artificiales requiere de otro sistema muy complejo para llevarlo a cabo, como lo es la empresa científica. Como también sugirió el mismo Simon, es gracias a los *artefactos* sociales y a la jerarquía que introducen en el ámbito humano que pueden surgir comunidades altamente especializadas, cuyos miembros interactúan fuertemente entre sí, pero que por enlaces quizás más débiles pueden comunicarse con y afectar a el resto de la sociedad a la que están conectados:

La especie humana ha incrementado enormemente sus capacidades para la especialización y la división del trabajo con el uso combinado de mercados y jerarquías administrativas. Sería demasiado atribuir el enorme crecimiento y expansión de las poblaciones humanas a tales mecanismos por sí solos —la medicina y la tecnología modernas tienen también que ver con ello— pero la dominación (quizás temporal) de nuestra especie en el globo atestigua un desarrollo de la razón humana —aplicada a asuntos *locales, no globales*— que ha sido posible en virtud de estos artefactos sociales.^{XCII} (H. A. Simon, 1996/2006, p.51. El énfasis es mío)

Claro que, aunque a distintas escalas temporales —considerando la rapidez con la que se pueden observar los cambios que se introducen y la reacción a ellos—, tanto las reglas locales como globales se co-determinan y evolucionan simultáneamente.

5.2.9. Robustez, estabilidad e integridad

Nuestros modelos atribuyen toda morfogénesis a un conflicto, a una lucha entre dos o varios atractores.

René Thom (1975, p. 323)

Una de las características centrales de los sistemas complejos, y que en parte puede verse como una consecuencia de algunas de las que fueron tratadas anteriormente, es que dichos sistemas pueden decirse que son *robustos* en cuanto bajo una diversidad de condiciones, tanto internas como externas, pueden seguir operando normalmente. Esto lo logran gracias a la posibilidad de generar cambios tanto en su estructura interna como en su ambiente ambiente para seguir operando con cierta “normalidad”; desde un punto de vista funcional podemos decir que, pese a los cambios, los observadores o el resto de sistemas que interactúan con el sistema bajo análisis continua comportándose como lo hacía antes de los cambios. Ahora bien, cuando se habla de “robustez” hay que tener especial cuidado en distinguir si el término se está usando para describir una propiedad del sistema mismo o una característica de la forma que toma nuestro conocimiento acerca del sistema, o incluso de su misma posibilidad. Usos y distinciones que, claramente, están relacionados, pero cuya relación también debe aclararse y que implican toda una toma de posición con respecto a cómo se comprende el conocimiento de los sistemas complejos. Es en esa dirección que la discusión que sigue está orientada, ya que considero que parte de la confusión entre los dos puntos tiene que ver con el hecho de que la robustez de un sistema puede verse en muchas consecuencias como una consecuencia epistémica, que en algunos casos tiene una razón muy peculiar: el conocimiento que el sistema tiene de sí mismo. Así, lo que sigue prepara el terreno para una posible “descripción algorítmica” de los sistemas complejos que sugiero en el capítulo final y en la que la noción de “corrección de errores” juega un papel fundamental.

Estabilidad por inestabilidad (e inestabilidad por estabilidad)

Muchas clases de sistemas complejos pueden verse como si presentaran un balance o equilibrio entre una multiplicidad de factores, tanto internos como externos; factores que pueden ser descritos como si fueran cada uno de ellos *agentes* individuales, al menos bajo el punto de vista de lo que se pretende describir del sistema para un propósito particular.³⁵ Una de sus propiedades más llamativas quizás sea el hecho de que dichos factores

³⁵La “metáfora agencial” que empleo en repetidas ocasiones es una abstracción, en los términos descritos en la sección 7.2. En la sección 6.3 describo una de las formas en las que esta abstracción se emplea en el modelado de los sistemas complejos mediante los modelos de autómatas celulares, una subclase dentro de las denominadas «simulaciones basadas en agentes». La abstracción es heredera de la descripción teleológica sugerida por la cibernética y es común encontrarla en algunas aproximaciones a la inteligencia artificial, como el programa general de investigación de Marvin Minsky (1988, 2006). Muchas de las sugerencias de Minsky funcionan como un influjo o forzamiento constante a lo largo de toda esta tesis.

pueden entrar en conflicto entre sí; al punto de sugerir la imagen de una “guerra interna”, una paradójica constante inestabilidad. Dadas las restricciones bajo las que opera, que son al mismo tiempo condiciones de posibilidad, dicha inestabilidad da origen a una serie de ciclos u oscilaciones que pueden verse como patrones, especialmente en tiempo y espacio, que hace que inestabilidades *locales* puedan verse como una instancia más en el patrón *global* del comportamiento del sistema, que así visto podemos denominar como *metaestable*. Esto mismo puede verse como cambios entre distintos regímenes de comportamiento, provocados tanto endógena como exógenamente por el tipo de acoplamiento [*coupling*] que existe entre los componentes. Como mencionamos anteriormente, el acoplamiento entre partes o componentes suele ser responsable del origen de la complejidad y de la consecuente dificultad de describir sistemas altamente acoplados, ya que quizás dicha interconexión no pueda ser linearizada para su análisis, ni siquiera localmente.

Las ecuaciones de Lotka-Volterra son un ejemplo clásico de cómo un ciclo de esta clase puede surgir cuando el comportamiento de una parte del sistema está acoplado al comportamiento de otra parte, lo que en las ecuaciones está representado por la no linealidad que introduce el término xy :

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= ax - bxy \\ \frac{dy}{dt} &= dxy - cx\end{aligned}$$

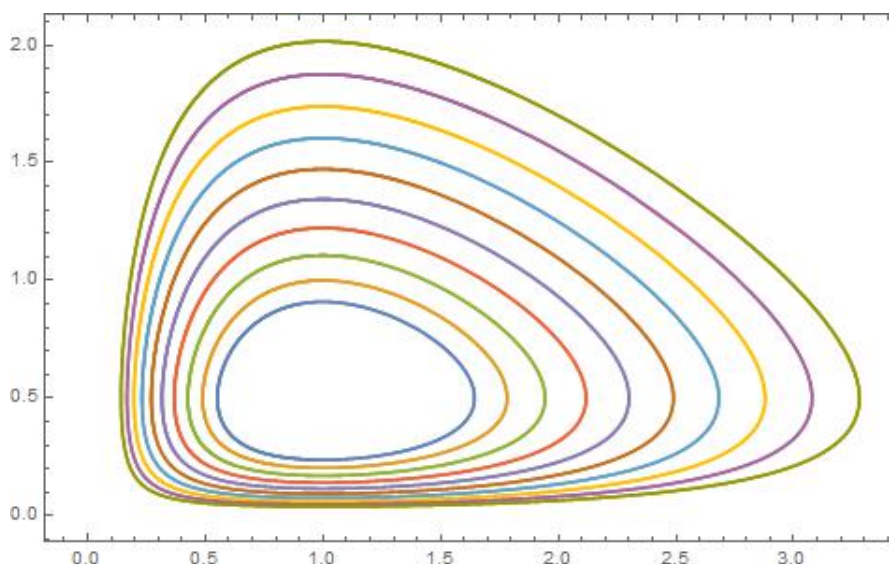


Figura 5.4: Soluciones a las ecuaciones de Lotka-Volterra para distintos valores de condiciones iniciales (población para t_0)"

Si el sistema que se pretende describir contiene tres variables, haciendo que su

espacio de fase sea de tres dimensiones, es posible observar ciclos extremadamente más intrincados, como los característicos del caos determinista mencionado previamente (p. 232, ver también (A. A. Ilcic, 2015; Strogatz, 1994)). Es precisamente el intrincado acoplamiento en las variables lo que hace que el sistema quede constreñido en términos del volumen que puede abarcar en el espacio de fase total que surge de las variables con las que se lo está modelando; lo que se puede interpretar como el resultado de las restricciones impuestas por dicha interconexión. Ahora bien, y casi paradójicamente, son esas mismas restricciones las condiciones de posibilidad del tipo de comportamiento del que es capaz el sistema; otro profundo y extraño bucle de retroalimentación. Uno que, en última instancia, lleva al sistema a crear las mismas restricciones que debe respetar; que nos permite conocer y diseñar sistemas complejos. Bajo el lenguaje de diseño mencionado anteriormente, hasta podríamos decir que hay sistemas complejos que se *diseñan* ellos mismos, muchas veces incluso sin saber que lo están haciendo. Así, en muchos ambientes sobre los que el sistema puede “trabajar” el sistema puede verse en la posibilidad de crear las condiciones para su propio funcionamiento óptimo (ambientes que, en términos cibernéticos, podríamos decir que son aquellos escenarios en los que una parte del sistema puede actuar como regulador, de lo denominado ambiente en este caso). La auto-regulación, bajo este esquema, no es otra cosa que un sistema que, hablando metafóricamente, “se mira a sí mismo”, i.e., se toma como el ambiente sobre el que puede actuar. Cuanto más complejo un sistema, más oportunidades de tomar otras partes de él mismo como “objetos de acción”, como aquello que puede modificar o intervenir para crear un nuevo ambiente en el que llevar a cabo sus funciones.

Desde la perspectiva de quien observa el sistema, y por lo tanto de quien toma a lo que observa *como* un sistema —postulando alguna clase de separación entre el sistema propiamente dicho y el ambiente inducido por la separación, sin importar los detalles de cómo sucede—, se está frente a un proceso que puede describirse como complejo en virtud de su capacidad de cambiar al menos parte de su configuración interna —su medio interior, para usar el término de Bernard— para mantener su estructura y su función frente a nuevos escenarios, tanto internos como externos; de la misma manera en la que sucedía con el Homeostato de Ashby y las máquinas desorganizadas de Turing. Importante es que la mayor parte de las barreras que separan interiores de exteriores a lo largo de todas las partes del sistema son barreras semi-permeables, en tanto no deben aislar al sistema de manera absoluta, ya que debe permanecer abierto a “comunicaciones”, para recibir energía, materia e información del medio. Una vez convertidas y usadas esas entradas por los procesos metabólicos, podrá retornarlos al ambiente para efectivamente así lograr disminuir la entropía nuevamente en los medios interiores. Quizás no sea una exageración decir que es la creación y la destrucción de barreras semi-permeables es lo que le permite a un sistema ser complejo; esto es, le otorga la posibilidad de generar distintas clases de flujos con respecto a lo que recibe del medio y, en base a las funciones que dichos flujos crearon

con las estructuras presentes en un momento determinado, devolver el “resultado” de esa función al medio, en donde “medio” puede ser el sinnúmero de medios que pueden decirse presentes en un sistema complejo. Así, son precisamente los flujos que la estructura organizada del sistema soporta los que dan origen a las funciones. La “maleabilidad” de los estados internos, mediante la creación y destrucción de barreras semipermeables hace que un sistema lo suficientemente complejo pueda realizar funciones muy distintas ante pequeños cambios en las condiciones tanto internas como externas (ver fig. 5.5). Explicar un sistema complejo se convierte así en la tarea dar cuenta de por qué cierto *diseño* interior ante los flujos exteriores resuelven un problema, además de especificar por qué un estado particular es un problema *para el sistema*, no solo para el observador. Esta tarea involucra una búsqueda sobre el universo de diseños posibles que deberá incurrir en una iteración de las dos clases de búsquedas o estrategias comentadas en el capítulo anterior de la mano de las primeras investigaciones sobre sistemas complejos de von Neumann. Un proceso que puede verse también en la forma en la que, por ejemplo, se *diseñan* algunos sistemas complejos que deben insertarse en un medio ya rico en sistemas complejos, como es el caso del diseño y desarrollo de software, y, claro, como lo es el mismo diseño de teorías y modelos científicos. Esto se debe a que todos ellos se pueden ver como procesos de resolución de problemas mediante la búsqueda de alternativas en un espacio muy grande de soluciones posibles constreñido por una serie de diversos elementos —internos y externos—, sobre las que se diseñarán las heurísticas como recurso para delimitar el espacio de búsqueda (con la clara dificultad de que cada nueva propuesta puede radicalmente cambiar no sólo el espacio de búsqueda, sino la utilidad de las heurísticas mismas).

Aprendizaje y diseño

De la misma manera en la que un sistema complejo presenta esta maleabilidad interna (que se presenta a un observador como multiplicidad de estados) para *satisfacer* una funcionalidad demandada por un ambiente, aquel constructo que en última instancia se diseñe y se postule como “conceptualmente equivalente” al sistema bajo estudio, presentará propiedades similares, algunas de las cuales se provienen del hecho de que deberá ser él mismo producto de un *proceso de diseño* en el que se integrarán “componentes” con un complejo conjunto de requisitos que imponen restricciones sobre su uso compartido y adecuado. De la misma forma, pues, en que la maleabilidad del sistema se encuentra *soportada* por la cantidad de elementos y sus interconexiones que le permiten crear y destruir lo que vemos como barreras semipermeables a lo largo de múltiples descomposiciones posibles del sistema, la forma en la que se obtienen descripciones del sistema ocurren bajo un proceso similar, tanto en términos de la clase de interpretación a la que se debe recurrir para su uso como de la clase de sistema que puede soportar un proceso de descubrimiento o diseño. Partes fundamentales de estos procesos pueden verse el lo que Simon llama el “ciclo de generación y prueba” que está involucrado en las instancias de diseño bajo el cual se puede satisfacer tanto la necesidad de descomposición como la de no desatender la interrelación

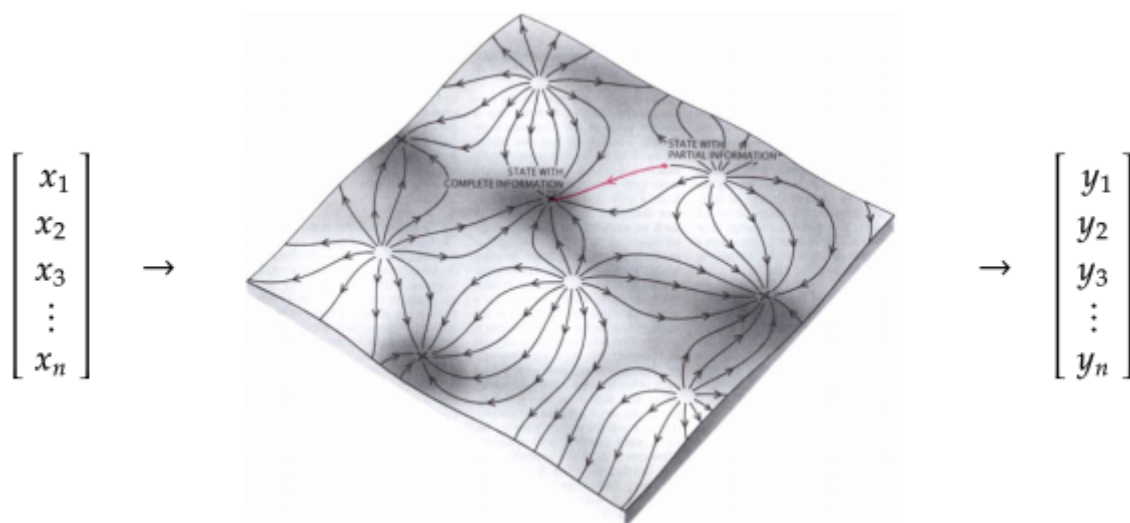


Figura 5.5: Un sistema complejo visto como un paisaje energético intrincado creado por barreras semi-permeables en su interior. El vector \vec{x} de la izquierda representa un posible conjunto de entradas que recibe del medio, mientras que \vec{y} son los valores de salida del sistema para esa configuración inicial luego de tiempo de observación. El paisaje puede cambiar constantemente, a veces a causa de unos de los valores de entrada que da lugar a un cambio estructural significativo en el sistema.

entre las partes:

Una manera de abordar la descomposición, tomando en cuenta que las relaciones entre los componentes no pueden ignorarse del todo, es reconocer que el proceso de diseño conlleva, primero, la generación de alternativas y, luego, la comprobación [*test*] de estas alternativas ante una batería de requerimientos y restricciones. No tiene por qué haber un único ciclo de generación y prueba, sino que puede haber toda una serie de tales ciclos y subciclos. Los generadores definen implícitamente la descomposición del problema de diseño y las pruebas garantizan que las consecuencias indirectas importantes sean detectadas y sopesadas. Las descomposiciones alternativas corresponden a las distintas maneras en que las responsabilidades del diseño final se dividen entre generadores y comprobaciones.^{XCIII} (H. A. Simon, 1996/2006, pp. 154-155)

Bajo mi perspectiva, es precisamente esta clase de proceso de generación de alternativas y de búsqueda y selección sobre las alternativas creadas —operando bajo las restricciones que convierten a dichos procesos en heurísticas de diseño— lo que constituye el núcleo de un proceso de aprendizaje; especialmente cuando el resultado del proceso es tanto un patrón que puede funcionar como memoria en tanto ante cierta situación (i.e. un ambiente) puede dar lugar a lo que puede observarse como un comportamiento (i.e. una serie de *outputs*) que cumple el objetivo que el ambiente generó en el sistema. Esto lleva a concebir

aquello que es novedoso —y en última instancia, *epistémicamente emergente*— como relativo a la estructura de soporte de conocimiento, estructura que puede ella misma ser un sistema complejo, con varias jerarquías que dan lugar a distintos “niveles de conocimiento”, de acuerdo al nivel de abstracción que determine la estructura de conocimiento (esto es, el modelador-observador) desde la que se describa el sistema. Estos puntos, incluyendo el elusivo concepto de nivel, son tratados con más detalle en el capítulo 7, pero aquí ya se puede ir observando cómo el entramado de estos conceptos comienzan a formar un patrón por medio del cual se puede estudiar el entramado mismo. En particular, la manera en que modelamos a los sistemas complejos puede resultar epistemológicamente fértil como recurso para comprender las intrincadas tramas que están detrás de los procesos mismos en torno al conocimiento. En una línea que recuerda a las clases de búsquedas en las que pensaba Turing, Simon comentaba en esta dirección sobre la similitud entre descubrir algo novedoso para un agente con la de descubrir algo novedoso para *todo* agente (es decir, para la comunidad de agentes), lo que precisamente puede conducir a generar procesos automatizados de descubrimiento:

No hay una línea que divida claramente el aprendizaje de las cosas más conocidas del aprendizaje de las cosas que son nuevas para todo el mundo. Lo que resulta novedoso depende de lo que ya sepa quien resuelve un problema y de la ayuda que se reciba del entorno para incrementar ese conocimiento. Podríamos esperar por ello que unos procesos muy parecidos a los que utilizan los sistemas que aprenden puedan usarse para desarrollar sistemas que descubran nuevos conocimientos.^{XCV} (H. A. Simon, 1996/2006, p. 126)

Niels K. Jerne —uno de los pioneros en postular el proceso de selección que opera en el sistema inmunológico para la generación de anticuerpos específicos, trabajos que lo llevaron a compartir el Premio Nobel de Medicina con César Milstein y Georges J.F. Köhler en 1984— reflexionaba en una dirección muy similar a la de Simon acerca de cómo la historia de la biología deja entrever que las teorías que se postularon inicialmente para explicar lo que parecía una forma de aprendizaje, en última instancia resultaron involucrar (o ser acerca de) un proceso de selección:

Si nos remontamos a la historia de la biología, parece que siempre que un fenómeno se asemeja al aprendizaje, se propuso primero una teoría instructiva para explicar los mecanismos subyacentes. En todos los casos, ésta fue sustituida posteriormente por una teoría selectiva. Así, se pensaba que las especies se habían desarrollado por aprendizaje o por adaptación de los individuos al medio, hasta que Darwin demostró que se trataba de un proceso selectivo. Se pensaba que la resistencia de las bacterias a los agentes antibacterianos se adquiría por adaptación, hasta que Luria y Delbrück demostraron que el mecanismo era selectivo. Monod y su escuela demostraron que las enzimas adaptativas eran enzimas inducibles que surgían de la selección de genes preexistentes. Por último, la formación de anticuerpos, que se creía basada en la instrucción del antígeno, resulta ahora de la selección de patrones ya existentes. Queda

pues por preguntarse si el aprendizaje por parte del sistema nervioso central no será también un proceso selectivo; es decir, que tal vez el aprendizaje no sea tampoco aprendizaje.^{XCV} (Jerne, 1967/1994, p. 282)

No estoy de acuerdo con su conclusión, en tanto creo que en todos los casos sí se tratan de fenómenos de aprendizaje, aunque algunos impliquen selección; el punto central es que es necesario dar cuenta del proceso de generación de alternativas sobre las que se seleccionará y del nivel desde el cual se pretende dar la explicación de un fenómeno. Así, podríamos decir que si bien hay muchas formas en las que en un proceso de aprendizaje se puede instanciar, lo que hacemos conceptualmente al decir de un proceso que es tal es generar una *clase de abstracción* según la cual, pese a las diferencias, podemos clasificar el comportamiento observado *como si* fuera una instancia de un proceso de generación que da lugar a fenómenos similares, donde la similitud no está dada por un morfismo estructural o dinámico a secas, sino por el tipo de comportamiento y funciones que puede realizar en conexión con el ambiente estudiado o prescrito.³⁶ Lo importante aquí para hablar de aprendizaje es reconocer que hay una nueva función, el sistema que aprende presenta un comportamiento o capacidad que antes no tenía. Claro que aquí hay que considerar la perspectiva de las capacidades desde la cual se está describiendo al sistema: un sistema se puede decir que aprendió sólo si se conoce la historia de dicho sistema y se sabe que frente a exposiciones al mismo ambiente, su capacidad original para actuar en él era distinta a la que tiene ahora. Por este motivo es que, en última instancia, podemos describir los procesos de aprendizaje como una selección efectuada sobre una clase de *feedback* que se recibió de un ambiente interno o externo sobre el “rendimiento funcional” de un cambio estructural o dinámico.³⁷

Así vemos que para poder decir que un sistema aprende, debemos ser capaces de especificar el tipo de comportamiento que se espera del sistema —lo que puede implicar la descripción en términos de objetivos, pregonada originalmente por los cibernéticos; lo que habilitará hablar de estos sistemas en términos de especificaciones—. Esto nos lleva, a su vez, a tener que considerar los estados posibles dentro de los múltiples “espacios epistémicos” —en analogía con el espacio de fase— en donde una métrica del rendimiento o *performance* del sistema se pueda medir con respecto al objetivo que se *prescribe* para su diseño o para su explicación. Claramente ambos puntos están íntimamente relacionados, ya que pueden verse como instancias de satisfacción de restricciones.

³⁶ Algo similar ocurre —desde mi perspectiva— con los sistemas conceptuales y lingüísticos; sistemas que de la misma manera en que lo hacen los sistemas propiamente computacionales, dependen de la tarea que pueda llevar a cabo un intérprete.

³⁷ Es en este sentido que leo la siguiente sugerencia de Simon: “Cuando examinamos las fuentes de las que tanto los sistemas de resolución de problemas como el sistema evolutivo obtienen su selectividad, descubrimos que la selectividad siempre puede equipararse con algún tipo de retroalimentación informativa procedente del entorno inmediato” (H. A. Simon, 1996, p. 195).^{XCVI}

De todo esto puede verse, nuevamente, una conexión profunda e interesante entre el estudio de los sistemas complejos y el diseño de muchas clases de artefactos tecnológicos, en particular aquellos que trabajan de manera distribuida en tiempo y espacio. Sin entrar en la discusión de cómo caracterizar una tecnología, desde mi perspectiva el diseño de tecnologías —tanto artefactuales como conceptuales— implica una búsqueda en un espacio de lo posible que surge de generar un conjunto que se definirá como una unidad semi-permeable que interactuará de maneras tanto especificadas como, quizás, impredecibles con aquello que termine constituyendo su medio. Del caso del espacio interno de los artefactos, ampliamente concebidos como el producto de las ciencias de lo artificial, Simon comentaba que

Lo fundamental para su descripción lo constituyen los objetivos que conectan el sistema interior con el exterior. El sistema interior consiste en una organización de fenómenos naturales capaz de lograr los objetivos deseados dentro de un rango de ambientes; aunque por lo general habrá muchos sistemas naturales funcionalmente equivalentes, capaces de hacer lo mismo.^{XCVII} (H. A. Simon, 1996/2006, p. 13)

Esto, según ya adelanté en varios lugares y como argumento mejor en el capítulo final, también se aplica a los “productos” fundamentales de la empresa científica. La pregunta que se hace Simon a continuación, bien puede aplicarse a la descripción de un “sistema natural”; con comillas, ya que el fenómeno que se encuentre será, en efecto, *sistematizado* por un agente para su descripción:

El entorno exterior determina las condiciones para la consecución de objetivos. Si el sistema interno está correctamente diseñado, se adaptará al entorno externo, de forma que su comportamiento quedará determinado en gran parte por el comportamiento de este último, exactamente como ocurría en el caso del «hombre económico». Para predecir cómo se comportará, lo único que tenemos que preguntar es: «¿Cómo funcionaría en estas circunstancias un sistema diseñado racionalmente?» El funcionamiento adopta la forma del entorno en que se mueve.^{XCVIII} (H. A. Simon, 1996/2006, p. 13. El énfasis es mío)

Claro que esto no quita la posibilidad de que el sistema “diseñado racionalmente” haga uso de procesos al azar *ex profeso* diseñados para ser aprovechados por el sistema para lograr generar posibles configuraciones internas y externas de manera tal que las mejores puedan ser seleccionadas con base en su contribución con respecto a las condiciones que tanto el ambiente como la estructura interna, en ese *milieu* de conexión, fijan como condiciones y medios para la satisfacción de lo que, desde la perspectiva de un modelador o diseñador, constituye el objetivo del sistema para dicho ambiente o escenarios. Esto también ilustra por qué la heurística de tomar una perspectiva epistémica *desde el sistema mismo* puede ser fértil.³⁸ Así, la pregunta por, por ejemplo, “¿cómo sabe esta parte de un sistema que

³⁸Este aspecto de fertilidad de la heurística de ver a un sistema como si fuera diseñado racionalmente aparece ya en la obra de C. D. Broad, uno de los emergentistas británicos cuya posición exploro brevemente

tal otra parte es parte del mismo sistema?”, en lugar de personalizar o postular un homínulo o una entelequia vitalista, nos obliga a repensar qué es lo que se entiende por “conocimiento” en un sentido bastante alejado, en algunos casos, de un sistema conceptual humano. Lo mismo que, como vimos recién, ocurría con la noción de aprendizaje cuando se toma en consideración algunos comportamientos o fenómenos biológicos complejos como productos de un proceso subyacente que ahora puede ser explicado. Nuevamente, se trata de ver cómo dos estrategias de explicación distintas pueden converger para dar lugar a una nueva, que puede cambiar algunas cajas negras de aquellas por otras.

Del origen de la vida al origen de la complejidad (y de vuelta)

Muchos sistemas complejos, tanto naturales como artificiales, existen en un “balance extraño” entre configuraciones posibles que pueden ser descritas en términos de los patrones a los que dan origen: como extremadamente ordenados y fijos por un lado; extremadamente desordenados y maleables por el otro.³⁹ En paralelo a los trabajos de criticalidad de Bak mencionados en la sección anterior, hacia mediados de la década de 1980 se volvió popular en los círculos que estudiaban sistemas complejos hablar de la vida “al límite del caos”, término que popularizarían especialmente Stuart S. A. Kauffman (1993), Norman Packard (1988) y Christopher Langton (1990) y Langton (1986).⁴⁰ Si bien es un concepto muy fácil de emplear de manera equivocada, especialmente cuando se argumenta teleológicamente para afirmar que los sistemas adaptativos evolucionan hacia el borde del caos porque es allí donde son más evolutivamente aptos —es decir, evolucionan para evolucionar hacia el borde del caos porque allí es donde mejor pueden evolucionar—, puede ser una idea muy fértil si no se pierde de vista la *función* que dicho estado puede servir para un organismo o sistema que llega a ese estado. Ahora bien, decir de un sistema u organismo —tomados como una unidad en un ambiente determinado— que está al borde del caos (o que evolucionó para estar en ese estado) es confundir el carro con el caballo o, cuanto menos, confundir algunas perspectivas. Un sistema aislado (término que bordea ser un oxímoron) no está al de suyo al borde del caos, sólo puede estarlo para otro sistema con el que interactúa y para el cual puede servir como una “fuente de azar”, una parte de su ambiente (o de un sistema que tiene a ambos como subsistemas) que se puede interpretar como el origen de la variedad necesaria para generar cambios en la estructura interna. Estos cambios pueden

en el capítulo 7, ya que es una de las más cercanas a la de muchos científicos en la actualidad (ver sección 7.1). Con respecto al diseño, comentaba ya en 1925: “Supongamos que un sistema se compone de tales partes dispuestas de tal forma como se podría esperar si hubiera sido construido por un ser inteligente para cumplir un determinado propósito que tenía en mente. Y supongamos que, cuando investigamos el sistema más cuidadosamente bajo la guía de esta hipótesis, descubrimos partes hasta ahora inadvertidas o relaciones hasta ahora inadvertidas entre las partes, y que éstas aún concuerdan con la hipótesis. Entonces debería llamar a este sistema “teleológico”. (Broad, 1925, p. 85)”

³⁹Estas imágenes mentales se vuelven más palatables luego de la presentación en términos de autómatas celulares en el capítulo siguiente, sección 6.3

⁴⁰La historia temprana del origen de la idea, casi al mismísimo límite del caos, se encuentra muy bien relatada en (Lewin, 1993, Cap. 3).

ser luego seleccionados si hay alguna fuente de presión sobre ellos en términos de la función que cumplan para los desempeños o *performances* del sistema visto de manera integral.

Claro que un caso límite es aquel en el que el sistema mismo se ve al borde del caos para otro sistema muy particular: su observador; a quien la tarea de encontrar una descripción *sencilla* de ese sistema al borde del caos no le será nada simple, especialmente si el ambiente en el cual lo pretende estudiar no limita sustancialmente el número último de configuraciones posibles. Esto también es importante porque sugiere la necesidad de distinguir entre el orden propio de un sistema y el orden que es capaz de crear en un ambiente, lo que impactará de manera directa en la forma en la que pretenda medir la complejidad de un sistema dado. Precisamente una forma de notar la acción de un sistema complejo es la de comparar el orden presente en un ambiente determinado en dos momentos diferentes.

Todo esto nos deja al borde de una pregunta fundamental, relacionada con la génesis misma de los sistemas complejos y la posibilidad de su mantenimiento en el tiempo y evolución. ¿Cómo puede un sistema ser lo suficientemente robusto como para no perder su identidad ni su funcionalidad con respecto a un ambiente con el que interactúa y al mismo tiempo ser lo suficientemente flexible como para poder cambiar su estructura interna de manera tal de desarrollar flujos que puedan soportar otras funciones y, por tanto, poder seguir funcionando en nuevos ambientes? La respuesta, creo, está en pensar en la forma en la que un sistema puede “resolver” los conflictos que hacen a su mismo origen, solución que suele involucrar la aparición de lo que ya notamos como estructuras jerárquicas, que puede funcionar como *selectores* de estrategias. Dado que la solución a un conflicto probablemente cree otros que a su vez necesitarán solución, se puede ver aquí en parte una de las razones por las que el aumento de la jerarquía de control suele estar acompañada por una mayor complejidad. Quizás no haya mejor lugar para explorar algunas de estos puntos que hacerlo mediante un breve pasaje por las dificultades que trae intentar determinar el complejo origen de muchas complejidades: la vida misma.

Una vez que se genera un adentro y un afuera, ya están dados los elementos básicos para un “conflicto original”, una barrera con el medio que por su misma estructura puede verse como un elemento de protección del medio interno ante las posibles perturbaciones del medio, que ahora es externo. Una vez que existe una diferencia entre un medio interno y un medio externo, un medio interno puede volverse un medio externo para otro sistema que se encuentre “atrapado” en él. Una hipótesis plausible sobre el origen de la vida —y por tanto de las estructuras complejas— es precisamente la de una clausura por medio de alguna clase de membrana que, reduciendo significativamente el espacio que otras moléculas simples podían ocupar, hizo mucho más probable su encuentro y, como consecuencia, la generación de nuevas funcionalidades dadas las nuevas moléculas que

se crearon por combinación de dichos elementos más simples. Bien podríamos decir que se trata de un caso de emergencia *bottom up* o desde abajo; una barrera que al cambiar el espacio de interacciones posibles —funcionando en cierta medida de catalizador al disminuir el tiempo necesario para que las moléculas se encuentren— puede dar origen a una nueva funcionalidad *interna*. El mismo Darwin especuló en esta dirección sobre un posible origen de la vida con la imagen de lo que hoy se conoce como “sopa primordial”, término que fue introducido por J. B. S. Haldane, quien llegó independientemente a una hipótesis similar a la que Alexander Oparin había introducido en Rusia a principios de la década de 1920. A esta hipótesis general, que sostiene que el ambiente pre-biótico del planeta Tierra podría haber contado ya con los elementos químicos básicos para la aparición de moléculas orgánicas más complejas, se la conoce como la hipótesis heterotrófica del origen de la vida o la hipótesis Oparin-Haldane. A diferencia del océano como ambiente originario, Darwin se había imaginado algo un tanto más mundano y, quizás, un tanto más plausible: un pequeño charco:

A menudo se dice que en la actualidad se dan todas las condiciones para la primera producción de un organismo vivo, que podrían haber estado presentes alguna vez. Pero si (y oh qué gran si) pudiéramos concebir en algún pequeño y cálido charco con todo tipo de amoníacos y sales fosfóricas, —la luz, el calor, la electricidad, etc. presentes—, que un compuesto de proteínas se formase químicamente, listo para sufrir cambios aún más complejos, en la actualidad tal materia sería instantáneamente devorada, o absorbida, lo que no habría sido el caso antes de que se formaran las criaturas vivas.^{XCLIX} (C. Darwin a J.D. Hooker, 1º de febrero de 1871, (Darwin, 1871).

La clave es, claro, que estos compuestos tengan cierta “complejidad mínima” provista tanto por su nueva estructura como por el ambiente en el que se encuentran para poder estar «listos para experimentar cambios más profundos». De mi conocimiento, Darwin no continuó especulando en esta dirección, pero quizás podría haber pensado que aquellos cambios más complejos debían a cierto punto incluir alguna clase de proceso análogo a la selección natural como un mecanismo de exploración de los efectos de las combinaciones posibles en un ambiente en constante devenir por esas mismas combinaciones nuevas. La selección natural, vista como el mecanismo de evolución de una población, muestra precisamente una tensión entre múltiples factores que deben encontrar un equilibrio para poder operar. Esto es necesario para que pueda haber tanto cambio como conservación, prueba y error —o, quizás mejor dicho, prueba *por error*— de distintas combinaciones que luego sean puestas a prueba. Así vista, la selección funciona porque restringe las combinaciones que no son útiles para el ambiente en el que se encuentran, atentos a la reflexividad que surge del hecho de que cada pequeña modificación literalmente cambia el paisaje en el que se encuentran todos los subsistemas que estén conectados de algún modo; una suerte de dialéctica, como siempre insistió Richard Lewontin:

Sin embargo, el énfasis en el equilibrio debe tener en cuenta el hecho evidente de que

la evolución sigue produciéndose. El registro fósil no muestra ningún indicio de que la formación y la extinción de especies hayan cesado o incluso se hayan ralentizado, y las tasas de cambio morfológico dentro de las líneas evolutivas siguen siendo altas, incluso en los horizontes fósiles más recientes. Si la evolución y la adaptación siguen produciéndose, ¿cómo es posible que el mundo se encuentre en un estado estable? La respuesta que se da es que el medio ambiente está en constante cambio, siempre deca- yendo con respecto a la adaptación actual de las especies. Según este punto de vista, la evolución continuada de los organismos se limita a seguir el ritmo del entorno en movimiento, que empeora, pero no ocurre nada a nivel global. El medio ambiente empeora porque los recursos se agotan, porque los competidores, los depredadores y las presas evolucionan, y porque cualquier cambio hace que las adaptaciones anteriores queden obsoletas. Ninguna especie puede estar nunca perfectamente adaptada porque cada una sigue un objetivo móvil, pero todas las especies existentes están cerca de su óptimo. Las especies se extinguen si evolucionan con demasiada lentitud para seguir el entorno en movimiento o se dispersan con demasiada lentitud para seguir el ritmo geográfico de su entorno preferido. De este modo, la teoría evolutiva moderna resuelve la aparente contradicción entre la observación de la evolución continua y la exigencia ideológica de que el conjunto de organismos sea estable y óptimo.^C (Lewontin & Levins, 1985, p. 25)

Así, las adaptaciones locales pueden generar adaptaciones globales por el acoplamiento entre los elementos interactuantes presentes en el ambiente. Cualquier atisbo de estabilidad solo es tal frente a escenarios particulares y en escalas de observación lo suficientemente cortas como para no notar cambios de importancia en la *encapsulación* que esconde la dinámica constante subyacente de una entidad y que le permite mostrarse al ambiente como estable.⁴¹ Así, cualquier evaluación de la formación de un individuo u organismo debe especificar su contexto e historia, atendiendo a las incertidumbres que estarán presentes en dicha descripción:

Existe, y ha existido durante mucho tiempo, una gran cantidad de evidencia que demuestra que la ontogenia de un organismo es la consecuencia de una interacción única entre los genes que porta, la secuencia temporal de los ambientes externos por los que pasa durante su vida y los eventos aleatorios de las interacciones moleculares dentro de las células individuales. Son estas interacciones las que deben incorporarse a cualquier relato adecuado de cómo se forma un organismo.^{C1} (Lewontin; 2002, pp. 17-18)⁴²

⁴¹Encapsulación es uno de los conceptos claves para comprender la abstracción, tal y como se explora en la sección 7.2.

⁴²Aunque en general estoy de acuerdo con Lewontin, encuentro un tanto desafortunada su recurrente interpretación de la metáfora computacional como inadecuada por ser “extremadamente determinista”. Creo que en esto continuó la lectura de las máquinas —y, por extensión, de las computadoras— que según señalé antes, tiene su centro de gravedad en Descartes y sólo empezó a desplazarse gracias a la darwinización de la noción de máquina que propició especialmente la cibernética. Por ejemplo, en este sentido sostiene Lewontin: “El organismo no está determinado ni por sus genes ni por su entorno, ni siquiera por la interacción entre ellos, sino que lleva una importante impronta de procesos aleatorios. El organismo no se computa a sí mismo a partir de la información de sus genes, ni siquiera a partir de la información de los genes y la

Para un organismo, y para los organismos dentro de organismos, tanto la posibilidad de su evolución como de su misma existencia depende de la satisfacción simultánea de una serie de factores que solo puede lograrse gracias a esa dinámica en la que pueden verse en acción factores causales “débiles” que condicionan constantemente las posibilidades de cada individuo. Sewall Wright daba cuenta de cómo la evolución depende de la posibilidad de mantener una suerte de homeostasis al nivel del ecosistema, al punto de sugerir la similitud del ecosistema con la de organismo particular:

He intentado hacer un juicio sobre las condiciones de la evolución basándome en las consecuencias estadísticas de la herencia mendeliana. La conclusión más general es que la evolución depende de un cierto equilibrio entre sus factores. Debe haber mutaciones genéticas, pero una tasa excesiva da lugar a una variedad de anormalidades, no a la evolución; debe haber selección, pero un proceso demasiado severo destruye el campo de la variabilidad y, por lo tanto, la base para el avance posterior; la prevalencia de la endogamia local dentro de una especie tiene consecuencias evolutivas extremadamente importantes, pero una endogamia demasiado estrecha conduce simplemente a la extinción. Un cierto grado de mestizaje es favorable, pero no demasiado. *En esta dependencia del equilibrio, la especie es como un organismo vivo. En todos los niveles de organización la vida depende del mantenimiento de un cierto equilibrio entre sus factores.*^{CIII} (Wright, 1932, p. 365. El énfasis es mío)

Ahora bien, para que un proceso de selección natural pueda comenzar, se requiere una base que pueda autosostenerse y que tenga la suficiente capacidad para replicarse en un ambiente rico en elementos básicos como para poder lograrlo. Al explorar esta historia brevemente, podremos observar que de la misma manera en la que la evolución y la estabilidad parcial requieren de un mantenimiento de múltiples factores que pueden incluso entrar en directo conflicto al nivel de lo que se tome como un individuo en un medio, lo mismo ocurre al considerar la evolución de un grupo de individuos que puede verse como un “superorganismo” y que precisamente lo mismo ocurre en niveles “más básicos” en los “organismos” que hacen a un organismo.

Lo que quiero destacar a continuación es cómo en muchos casos el origen de la complejidad puede verse en términos de la aparición de una “encapsulación parcial” de entidades que gracias a un nuevo equilibrio dinámico hecho posible por la encapsulación pueden generar nuevas capacidades de comportamiento robustas.

Una de las hipótesis más prometedoras sobre el origen de la vida es la llamada “hipótesis del mundo de ARN”. A diferencia del ADN, una cadena de ARN tiene (generalmente) una sola cadena de nucleótidos. Esta diferencia estructural lleva a su plegamiento y le da un rol químicamente mucho más activo que al ADN, que puede verse más como secuencia de entornos. La metáfora de la computación no es más que una forma moderna de la metáfora de Descartes sobre la máquina. Como toda metáfora, capta algún aspecto de la verdad, pero nos extravía si la tomamos demasiado en serio” (Lewontin; 2002, p. xx).^{CII}

una memoria, al punto que requiere del ARN como intermediario para la síntesis de proteínas. Al consistir de bases dobles, el ARN puede almacenar información en un patrón distintivo (como el ADN), pero al poder plegarse puede provocar (y catalizar) reacciones químicas, lo que incluye la posibilidad de catalizar la reacción química que puede producir una copia de una cadena misma de ARN, solo por mencionar alguna de los tantos roles que puede tener el ARN en la vida celular. A efectos de esta investigación, el punto clave no es tanto la (auto)replicación en sí, sino la creación de funciones sobre la base de una diferencia particular (por tanto, generando un patrón) en una estructura sub-unitaria que lleva a que la unidad en sí tenga ciertas funciones en un ambiente determinado, como puede ser la de autorreplicarse.

Sin entrar en los detalles químicos —que no son nada sencillos—, alcanza con notar que la diferencia particular está en la manera en la que el ARN forma pares de bases, que funcionan como si fueran “plantillas” para la generación de una molécula complementaria o, directamente, la síntesis de otras proteínas. Los pares de base también hacen a la razón por la que en esta estructura extremadamente sencilla puede verse en acción una suerte de selección natural, algo que puede observarse con facilidad en el laboratorio cuando se introduce una cadena de ARN en una solución de nucleótidos básicos junto con una enzima que cataliza la replicación del ARN.⁴³ En muy poco tiempo se puede observar la alta tasa de replicación de la cadena original, mientras que también se pueden observar algunas mutaciones puntuales, que de hecho pueden afectar la reproducibilidad de la misma cadena, ya que, por ejemplo, puede plegarse y dificultar la acción de la enzima —si la torsión estructural lo permite, bases complementarias en la misma cadena pueden enlazarse, lo que de hecho puede alterar radicalmente la función de esa cadena como proteína—, o incluso puede cortarse y entonces son cadenas más pequeñas las que se replican, que pronto pueden dominar la muestra, ya que se copian con mayor rapidez. También se puede introducir artificialmente una presión de selección, por ejemplo mediante la incorporación de otra enzima que degrade el ARN presente. Si alguna mutación hace que la nueva cadena sea resistente a dicha enzima, pronto dominará el ambiente.

Ahora bien, esa misma plasticidad estructural-funcional —su “naturaleza dual” como almacén de información y como *actuador* a base de dicha información⁴⁴— la vuelve tanto frágil como probablemente incapaz de *autoreplicarse*. Aquí hay dos puntos interrelacionados para desenredar: la tensión entre novedad y conservación junto con la tensión entre unidades similares por ocupar un mismo lugar en un ecosistema, como puede ser el consumo de un recurso particular (en este caso, nucleótidos base); al mismo tiempo que

⁴³La pandemia provocada por la propagación mundial del virus SARS-COV-2 en 2020 nos obligó a familiarizarnos con esta técnica de laboratorio, ya que es el método más importante al que se recurre para detectar la presencia del virus mediante la identificación de su material genético, al punto que las siglas PCR —por el nombre en inglés de la reacción en cadena de la polimerasa— se volvió de uso cotidiano.

⁴⁴No creo que sea exagerado decir que en una cadena de ARN se puede ver tanto un genotipo como un fenotipo.

vemos otro caso de cómo aparece una de las dificultades epistémicas intrínsecas al lidiar con sistemas complejos: la inferencia de la función en un ambiente desde el conocimiento de la organización interna del sistema, especialmente para los casos en los que la organización interna pueda ser interpretada como información útil o funcional para algún otro elemento del ambiente. Problema que aparece en múltiples niveles de organización ya que la diferencia que hace la diferencia —por usar ese viejo adagio de Gregory Bateson— puede encontrarse desde el nivel que se postule como ontológicamente fundamental para el nivel del descripción que se haya tomado hasta en el nivel de abstracción más alto que haya resultado de dicha descripción. Además, claro, las estructuras cuyas funcionalidades solo pueden explicarse desde dichos niveles “más altos” pueden interferir —y por lo tanto causar diferencias— en el nivel constitutivo ya que no hay ninguna clausura ontológica que impida dicha acción.⁴⁵

En los términos que se introducen en el capítulo final, esta “naturaleza dual” que presentan ciertos sistemas que conlleva la generación de funciones radicalmente novedosas gracias a la acción de un sistema sobre sí mismo, puede describirse como si, ante un ambiente correcto o lo suficientemente rico, una cierta estructura “sintáctica” puede dar lugar a una función (esto es, un *programa*) que tenga como propósito crear una réplica de sí misma, efectivamente funcionando como su propio intérprete, generando así una *computación* propiamente dicha; una transición de fase que conlleva la aparición de una capacidad que en todos los momentos anteriores de la estructura sintáctica no estaba dada y es un primer paso a una universalidad funcional.

¿Puede algo así ocurrir en el caso del ARN recién introducido? Si bien es posible pensar que una molécula particular de ARN tenga la complejidad suficiente como para funcionar de plantilla para su auto-replicación y simultáneamente tener la función de catalizar dicha reacción, existen un gran número de dificultades que sugieren que cierta improbabilidad de dicho escenario. En particular, la complejidad de dicha molécula —medida en la cantidad de pares de bases— la vuelve frágil tanto estructural como informacionalmente: la codificación de las bases que puede indicar la construcción de la misma molécula debería ser tan larga que la probabilidad de que se produzcan errores en el copiado es también demasiado alta —y la molécula no lo suficientemente robusta— como para que de la copia pueda resultar una molécula con las mismas capacidades que la “original”. Un tanto simplificado, este fue el diagnóstico de Manfred Eigen (1971) y constituye uno de los pilares de la llamada “Paradoja de Eigen”.

En este trabajo, Eigen introduce una serie de elementos que muestran la forma

⁴⁵Esto es una consecuencia del tipo de naturalismo que comenté en el primer capítulo; naturalismo que, como espero sea el caso ahora es más fácil de aceptar como una consecuencia del estudio mismo de la naturaleza de los sistemas complejos. En los capítulos siguientes este punto es analizado bajo la rúbrica filosófica usual de “causalidad descendente”, término que encuentro poco feliz ya que su direccionalidad está algo sesgada.

en la que las comunidades que estaban aproximándose al problema del origen de la vida desde la química y la bioquímica empezaron a hacer una interpretación de las sugerencias que habían aparecido en la década anterior acerca de la posible función del “lenguaje” de la información y de cómo ésta podía instanciarse en sistemas moleculares que dieran comienzo a procesos de reproducción y selección con base en las funcionalidades que el carácter físico-químico de dicha información permitía. Bajo mi lectura, parte del diagnóstico de Eigen puede verse como una naturalización de la discusión que ya presentamos aquí como característica de la biología de finales del siglo XIX y comienzo del XX de la mano de Reinke y de von Uexküll que aquí presentamos en el segundo capítulo; en el que se puede apreciar la influencia de la cibernética en el vocabulario de la biología molecular: “La función catalizadora en combinación con varios mecanismos de retroalimentación que provocan ciertas propiedades de crecimiento autopotenciadas del sistema.^{CIV} (Eigen, 1971, p. 471)”

La estrategia de Eigen para solucionar la paradoja es similar a la que había propuesto von Neumann: es posible pensar que lo que se puede observar como un todo que cumple una serie de funciones pueda describirse (y quizás instanciarse) como si fueran dos o más entidades que en su acoplamiento interactúan de manera tal de dar origen a una nueva funcionalidad. En la propuesta de Eigen, las unidades que interactúan son todas ellas auto-catalíticas y logran una reacción general auto-catalítica porque el ciclo hereda las propiedades de las partes. En su propuesta inicial esto implica un acoplamiento entre dos clases de entidades biológicas, las proteínas por un lado y los ácidos nucleicos por el otro. Las primeras pueden formar acoplamientos catalíticos entre ácidos nucleicos que hacen de soporte físico de la información gracias a su tendencia a formar pares dobles, las proteínas por lo tanto funcionan como el elemento de interacción primordial que pueden unir activamente las cadenas informacionales con las que pueden interactuar. La naturaleza de esta unión es lo que en última instancia permitiría el crecimiento exponencial de ciertas estructuras informacionales, estructuras que ellas mismas pueden *guiar* el proceso de replicación. Así, lo que se postula es que

Una combinación de instrucciones complementarias con acoplamiento catalítico dará lugar a un comportamiento de selección no lineal. Tenemos que encontrar la forma más sencilla de acoplar las funciones de los ácidos nucleicos y las proteínas para reproducir un tipo de comportamiento evolutivo que pueda conducir a la estructura y las funciones de la célula viva. No debemos pretender explicar el trayecto histórico de la evolución. Lo único que podemos intentar es enunciar los requisitos mínimos y obtener una idea de los principios físicos del proceso evolutivo. Independientemente de su estructura particular, el sistema tiene que utilizar las propiedades de formación de códigos de los ácidos nucleicos, así como las capacidades catalíticas de las proteínas. Por tanto, requiere la nucleación de una maquinaria de traducción.^{CV} (Eigen, 1971, p. 503)

Esto puede entonces interpretarse como la propuesta de una solución abstracta al problema en términos de las condiciones que debe satisfacer —en este caso, que debe poder dar cuenta de cómo es que emerge lo que puede verse como un código y al mismo tiempo de la maquinaria necesaria para la interpretación de dicho código para convertirlo en “funcional”— y, por otra parte, la posible instanciación o implementación de dicho *diseño* a base de substratos físico-químicos. Nótese aquí en acción las dos estrategias que había sugerido von Neumann (*à la* Turing y *à la* McCulloch-Pitts) apoyando el pasaje entre las dos en términos de una abstracción que puede ser implementada de diversas maneras siempre y cuando la implementación respete las restricciones del diseño.⁴⁶

En la especificación de este problema también puede verse una forma de conflicto que debe poder resolverse: la especificidad de las reacciones de catálisis por un lado y la rapidez con la que deben desarrollarse. La primera requiere enlaces fuertes y selectivos, lo que pone en jaque a la velocidad de la reacción. Aquí pues debe surgir una regulación por parte de un equilibrio, que puede verse en todos los procesos en los que cuales hay restricciones específicas sobre espacios de búsqueda, pero restricciones que deben ser lo suficientemente débiles como para evitar un atascamiento en el ciclo operativo, al mismo tiempo que deben ser lo suficientemente restrictivas para evitar la inespecificidad de los cambios que ocurren y que de dichos cambios pueda extraerse alguna clase de “utilidad” para el sistema.

Se ha sugerido que, de hecho, la solución de Eigen es una instancia particular de un ciclo que tiene como elementos ciclos cerrados entre sí en términos de su composición material-energético pero capaces de “alimentar” o “encender” el paso siguiente del ciclo, que al menos requiere dos unidades mínimas de *descripción*, una dando soporte a la otra. De esta manera, el hiperciclo de Eigen no es, en sentido estricto, un conjunto autocatalítico *per se*, sino lo que puede verse como un conjunto estructurado de conjuntos autocatalíticos que pueden dar origen a la reproducción y a la conservación de la información. Así, si bien como un todo pueden lograr catalizar la replicación de otros miembros del conjunto —y por tanto del conjunto mismo—, cada miembro debe, además, catalizar la reacción que lo mantiene estable dentro del ciclo. Esta confusión es bastante usual en la literatura, como señala Szathmáry:

El hiperciclo molecular propuesto por Eigen y elaborado por Eigen y Schuster es un sistema en el que los replicadores autocatalíticos también se ayudan heterocatalíticamente unos a otros en la replicación, de modo que la replicación de cada miembro es catalizada por al menos otro miembro.^{CVI} (Szathmáry, 2013, p. 1)

⁴⁶La lectura epistemológica de esta estrategia de resolución de problemas introduce un ciclo de retroalimentación entre la implementación y el diseño, esto es que el las especificaciones del diseño puedan tener que adaptarse debido a las dificultades que la implementación de una abstracción puede conllevar (ver sección 7.3).

Así, si bien el ciclo general que propuso Eigen no sería *auto*-catalítico en el sentido de que la función de cada elemento en el ciclo no es propiamente la de catalizar la formación y, por tanto, permitir la permanencia del elemento “siguiente”, sino la de permitir su funcionalidad, que es la de reproducir la información en una reacción multiplicativa y rápida. Esto es, cada una de esas unidades debe ya verse como auto-catalítica .

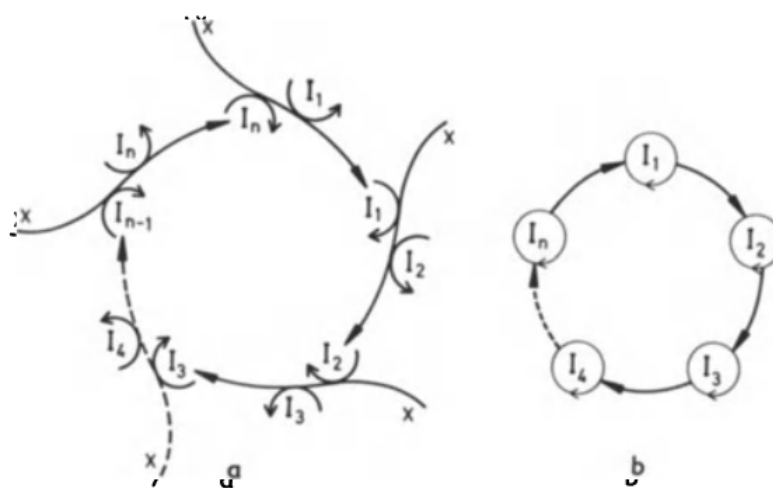


Fig. 7. A catalytic hypercycle consists of self-instructive units I_i with two-fold catalytic functions. As autocatalysts or – more generally – as catalytic cycles the intermediates I_i are able to instruct their own reproduction and, in addition, provide catalytic support for the reproduction of the subsequent intermediate (using the energy-rich building material X). The simplified graph (b) indicates the cyclic hierarchy

Figura 5.6: Figura 7 de (Eigen & Schuster, 1979, p. 5)

Algunos han visto en esto una dificultad que tendría esta teoría para explicar el origen de la vida tal y como la conocemos en la Tierra, proponiendo que quizás otro paso complementario, pero independiente, sea necesario para explicar el origen del metabolismo, que en retroalimentación con el proceso de reproducción podrían explicar el origen de las características esenciales de la vida, incluyendo la robustez ontológica o metaestabilidad que define tanto su autonomía como su relación con el medio. Siguiendo a von Neumann, quien ya había remarcado la necesidad de postular al menos inicialmente una instanciación separada de los procesos de replicación y de metabolismo para dar lugar a la evolución de sistemas complejos, Freeman Dyson, entre otros, sugiere complementar las ideas del origen de la vida y la complejidad del estilo de la de Eigen con un proceso paralelo que pueda explicar el origen del metabolismo, proceso que luego puede soportar el origen de la replicación. El modelo propuesto por Dyson, que pretende recuperar en líneas generales elementos de la teoría originalmente propuesta por Oparín y por Hal-

dane, precisamente elabora en la posibilidad de establecer conjunto de elementos cuya interacción mutua forme un ciclo autoacatalítico.

Eigen está en lo cierto en sugerir que debe hacerse una distinción entre dos clases de selección, de lo que se sigue una nueva concepción del rol de los errores y del azar para explicar la génesis de la complejidad a base de estructuras estables que pueden modificar su propio ambiente y, por tanto, modificarse a sí mismas dada su dependencia con el ambiente. Lo que puede volver a un sistema autónomo, pero robusto es la *abstracción* que forma con respecto a las operaciones del ambiente y las que puede hacer sobre él. En esencia, esto puede verse como una heurística, en tanto se toma al espacio de búsqueda de combinaciones posibles como infinito en la práctica, de tal manera que la probabilidad de *volver* a encontrar soluciones en dicho espacio es muy baja (aunque no imposible), por lo que una buena estrategia es conservar tantas soluciones como sea factible incluso si ante un ambiente nuevo esa solución no se encuentre activa o “expresada”. No solemos pensar en las células como comunicadoras de soluciones de problemas de satisfacción de restricciones que comunican dicha solución por medio de la reproducción, pero creo que eso es esencialmente lo que puede decirse que son bajo el punto de vista resultante de este análisis. Y son ellas mismas un ejemplo de solución a un problema particular de restricciones en conflicto: la autonomía con apertura al medio, lo que termina creando la posibilidad de un agente que pueda actuar sobre el medio para, casi paradójicamente, mantener su autonomía.⁴⁷

⁴⁷Quizás sea este un buen momento para observar que una forma de caracterizar a las paradojas en general es en términos de la satisfacción simultánea de restricciones incompatibles, algo que suele suceder precisamente cuando se busca sistemas (como muchos sistemas formales) que sean tanto flexibles y generales como específicos al mismo tiempo. La forma de solucionar la paradoja normalmente involucra, a su vez, la introducción de una nueva restricción que tenga como efecto pretendido eliminar la instancia, de manera tal que la flexibilidad no siga siendo un “peligro” para el sistema. Generalmente esto requiere la creación de un metalenguaje que determine las propiedades de los lenguajes y en el cual se puedan especificar cuando diversas clases de elementos pueden verse como constituyendo un todo con elementos en común, bajos los cuales pueden definirse operaciones para tratarlos de manera *abstracta*, esto es, sobre la base de sus especificaciones y no de la naturaleza particular de las instancias. A propósito, esto sugiere un posible límite para muchas lógicas como lenguaje para una descripción del mundo por ser precisamente demasiado estáticas al siempre considerar elementos constitutivos básicos o elementales que ellos mismos no pueden cambiar. Tanto la metafísica como el lenguaje deben, por lo tanto, dar lugar a descripciones procesuales para poder dar cuenta de los cambios de estados y de naturaleza que se encuentran en el accionar de los sistemas complejos.

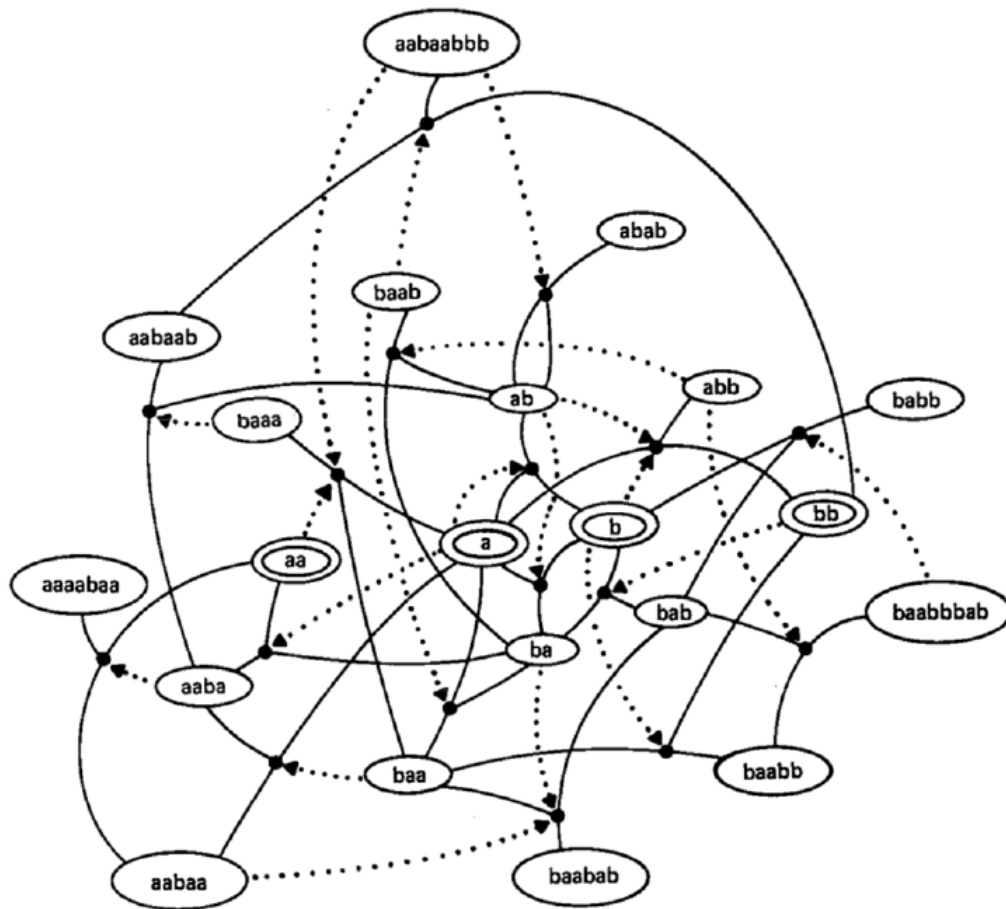


Figura 5.7: Ilustración de un conjunto auto-catalítico “sintáctico” visto como un grafo, según J. D. Farmer y col. (1986). Los conjuntos con doble línea son las semillas (o lo que podríamos denominar el caso base del conjunto). Los conjuntos con líneas simples son otros compuestos “químicos”, representados por sus secuencias de componentes. Las líneas completas representan reacciones y las líneas puntuadas la acción catalizadora de los componentes en algunas reacciones. Tomado de (J. D. Farmer y col., 1986, p. 53)

Es gracias a las múltiples barreras semi-permeables que un sistema puede mantenerse estable incluso frente a ambientes internos y externos fluctuantes y, fundamentalmente, puede ser considerado como un individuo para otros agentes en el ambiente y pese a su individualidad ser tratado “de manera general” basándose en el tipo o clase de entidad que es para un observador en el ambiente de ese sistema. Así, gracias a esta *abstracción*, el sistema puede mantenerse lejos del equilibrio termodinámico al que está destinado el ambiente general y al mismo tiempo crea unidades con las que los otros elementos en el ambiente pueden interactuar y, en muchos casos, cooptar o incorporar como soluciones a

otros problemas; creando de esta manera nuevos sistemas en el ambiente.⁴⁸

Uno de los conceptos introducidos por Eigen para comprender la paradoja que lleva su nombre —y la solución que propuso— es el de “umbral de error”. Se trata del límite de la cantidad de errores o mutaciones que un sistema que instancia una organización que puede interpretarse como información puede soportar sin que su capacidad para mantener el patrón que hace a la misma información se vea comprometida. Esto es, más allá de ese límite los cambios estructurales son tales que conllevan la pérdida tanto de la información útil como del *error* útil, lo que permite la plasticidad del sistema. Para esto, el sistema debe operar cerca del umbral de error, pero ni demasiado lejos de él —ya que deja de evolucionar por ser demasiado estático— ni muy cerca, porque corre el riesgo de perder la autonomía o diferencia con el medio de manera total y repentina, ya que atravesaría una transición de fase irreversible. Como mencioné anteriormente, la paradoja resulta de que la cantidad de bases que sería necesaria para que una secuencia codifique la maquinaria necesaria que puede ser instanciada a base de esa codificación y que tenga como función corregir los errores de la replicación es tan compleja que supera el umbral de estabilidad o de error que su soporte físico puede soportar. Es decir, solo secuencias muy largas pueden servir de plantilla para la maquinaria que podría hacer copias fieles de esas secuencias para poder replicarlas. Nuevamente estamos frente a un caso de la aparente imposibilidad de una implementación de un diseño para satisfacer simultáneamente dos requisitos que entran en conflicto. La manera de resolver el problema es encontrar una forma en la que la información que codifica la maquinaria de replicación necesaria esté distribuida para que su copiado pueda ser más robusto. Paradójicamente, esto significa que debe haber una mayor posibilidad de mutaciones, pero que sus consecuencias no conlleven la destrucción del sistema de soporte informacional, sino, al contrario, hacerlo más resistente a la degradación. Esto requiere un conjunto dinámico de múltiples elementos que puedan cada uno mutar en el otro de manera tal que pese a las diferencias básicas o puntuales de cada elemento, la información en tanto capacidad de codificación debe poder ser recuperada de la dinámica que resulta de las estructuras más simples de las partes. Esto es, el sistema de recuperación o de lectura de la información debe poder detectar lo relevante pese a la presencia de mayor ruido. En otros términos, en la *quasiespecie* que forma la “nube” o conjunto de mutantes debe poder ser *interpretado* como un todo y su información *evaluada* con respecto a la funcionalidad que posibilita luego de la traducción de dicha informa-

⁴⁸Quizás aquí se pueda observar en qué disiento con otras caracterizaciones de vida que ponen tanto énfasis en la autonomía que, en mi opinión, terminan entrando en dificultades para mantener un materialismo extremo que les permita hacer uso de la autonomía misma como un criterio para delimitar un sistema. Un caso es el de la propuesta de autopoeisis de Humberto Maturana y Francisco Varela, cuya principal falencia encuentro en su insistencia en que la organización interna de un sistema no pueda afectar la dinámica que lo sostiene como individuo autónomo, junto con su insistencia en la *clausura informacional* por la que el sistema mismo no tendría entradas ni salidas (ontológicamente), sino que estas están necesariamente atadas a las descripciones que un agente externo haga del sistema que observa. Pese a la profunda influencia que recibieron de la cibernética, la noción de máquina que articula su propuesta mecanicista es, para mí, todavía demasiado cartesiana y determinista. (cf. p. ej. Maturana & Varela, 1972)

ción a una instancia funcional; así, un nuevo bucle de retroalimentación debe surgir para vincular la utilidad de un genotipo con la funcionalidad que le otorga a un fenotipo. Esto significa que el fenotipo, él mismo un genotipo expresado, debe poder interpretar y “someter a evaluación” la utilidad de la funcionalidad de un genotipo con respecto al ambiente de operación en el que se encontrará la instancia operativa o traducida de dicha información. Esta es la razón por la que existen variantes de un mismo virus, secuencias de información genéticas no idénticas pero relacionadas manera tal que constituyen un *cluster* o grupo de “replicones” en una distribución dinámica.⁴⁹ Este modelo de la unidad de replicabilidad de una población de genotipos fue observada en laboratorio por primera vez en el virus *Qubevirus durum*, un bacteriofago más conocido como QBeta o Q β :

La secuencia de nucleótidos del ARN-32P de los clones de fago Q β se muestreó mediante electroforesis bidimensional en gel de poliacrilamida de los oligonucleótidos resistentes a la ARNasa T1 (huella digital T1). Alrededor del 15 % de los clones derivados de una población Q β multipasada mostraron patrones de huellas dactilares que se desviaban de los del ARN de la población total. Todas las desviaciones examinadas podían atribuirse a una y, con menor frecuencia, a dos o más transiciones de nucleótidos. [...] Proponemos que una población de fagos Q β se encuentra en un equilibrio dinámico, con mutantes viables que surgen a un ritmo elevado [...] por un lado, y que son fuertemente seleccionados en contra por el otro. El genoma del fago Q β no puede describirse como una estructura única definida, sino como una media ponderada de un gran número de secuencias individuales diferentes.^{CVII} (Domingo y col., 1978, Abstract. El énfasis es mio.)

Considero que esta es una de las características esenciales de un sistema complejo, precisamente la que le permite ser un sistema y almacenar información que puede ser luego procesada o expresada funcionalmente y ser evaluada en un ciclo de retroalimentación con respecto a las capacidades que otorga al sistema mismo para la preservación de su autonomía en un ambiente; uno que puede siempre degradarlo, pero que al mismo tiempo es su condición de posibilidad. Por lo tanto, es en las consecuencias o efectos que produce la relación de una multiplicidad de elementos que, casi paradójicamente, los elementos y el todo resultante pueden verse como parte del todo que constituyen. Las descripciones que un agente epistémico proponga para dichos sistemas deberán contemplar dichas relaciones, por lo que no deben ser eliminadas sino modeladas como partes funcionales

⁴⁹Lo mismo puede decirse de otras muchas entidades que, en principio, parecerían no tener mucho que ver con un umbral de error. Sin embargo, se podría pensar que incluso los lenguajes naturales y artificiales deben establecer un valor difuso de interpretabilidad o coherencia, en la que las posibilidades de la sintaxis se ven constreñidas por la evaluación semántica que se hará de ellas. A su vez, esto nos permite ver cómo procesos basados en reglas simples que permitan una “infinitud restringida” de posibilidades, como lo es una gramática recursiva, es una mejor solución al problema que una mera lista que no pueda ser generada por medio de esas reglas. De nuevo, vemos aquí “en acción” las distintas formas en las que se puede *expresar* un patrón y otra cara del viejo problema matemático-filosófico de la extensión y la intensión. La semántica, así, no es otra cosa que una “sintaxis en acción”, algo que la sintaxis de esta investigación deja entrever, pero cuya interpretación adecuada todavía no ha sido implementada.

que satisfacen una relación que puede *describirse* en términos de las entradas y salidas posibles para el nivel de abstracción que sea tomado para la descripción del sistema. Esto conllevará la necesidad epistémica de ver al resultado de la descripción como una abstracción misma en este sentido, que debe atender a la relación funcional que guarda con otras descripciones equivalentes. En otras palabras, la robustez emergente de las interacciones de los múltiples elementos interactuantes en un sistema deberá ella misma ser descrita por ensambles modelos robustos que surgen de hacer el mismo tipo de análisis de por qué múltiples modelos son modelos del mismo fenómeno, pese a las diferencias internas de cada uno. Es decir, requieren de un soporte interpretativo que evalúe su utilidad epistémica una vez que son traducidos a vehículos representacionales que pueden ser evaluados contra los efectos observables del sistema en el ambiente al que el agente epistémico tenga acceso a dicho sistema. Entre sí, curiosamente, esos modelos diferentes, pero similares, van a tener entre ellos mismos que satisfacer restricciones epistémicas.

5.2.10. Robustez *redux*

Antes de pasar a una descripción de este proceso de abstracción presente en la formulación de algunas “familias” o quasispecies de modelos para sistemas complejos, creo que es necesario expandir sobre algunos puntos de la presentación recién hecha sobre la robustez misma de los sistemas complejos y del tipo de conflicto que parece estar asociado; aquél que obliga a que precisamente sea a través de la emergencia de una estructura jerárquica (en el sentido sugerido por Simon y que había ya sido anticipado por la cibernética) que dicho conflicto se pueda tanto controlar como aprovechar para la creación de nuevas estructuras jerarquías construidas sobre las unidades “autónomas” (con comillas, puesto que ya vimos que es una autonomía necesariamente relativa a sólo algunos aspectos) ya presentes como “soluciones” a los conflictos antecesores, conflictos que la hicieron, de hecho, posible.

En *El origen de las especies*, ya Darwin recurría a la noción de un conflicto como una de las “fuerzas” que mueven la acción de la selección natural. Dicha idea de conflicto está expresada en términos de la competencia por los recursos en un ecosistema, que Darwin leyó originalmente de Malthus y si bien su rol en la teoría de la selección natural tal y como fue publicada por Darwin no es tan central, sí habría sido en gran parte responsable para la inspiración de la teoría hacia finales de la década de 1830. En *El origen* sí se pueden leer pasajes como el siguiente:

Al observar la naturaleza, es muy necesario tener siempre presente las consideraciones anteriores, y no olvidar nunca que cada uno de los seres orgánicos que nos rodean puede decirse que se esfuerza al máximo por aumentar su número; que cada uno vive en una lucha en algún período de su vida; que una fuerte destrucción recae inevitablemente sobre los jóvenes o los viejos, durante cada generación o a intervalos recurrentes. Si se alivia cualquier control, si se mitiga un poco la destrucción, el núme-

ro de especies aumentará casi instantáneamente hacia cualquier cantidad. El rostro de la naturaleza puede compararse con una superficie que cede, con diez mil cuñas afiladas apiladas juntas y empujadas hacia adentro por golpes incesantes, a veces una cuña es golpeada, y luego otra con mayor fuerza.^{CVIII} (Darwin, 1859, pp. 66-67)

La adaptación —o lo que a esta altura me permito describir como el aprendizaje del ecosistema o de la economía natural— es una consecuencia del tipo de estructuras que pueden surgir en un sistema metaestable que tiene elementos cuya naturaleza puede cambiar sin dejar de participar o de ser parte de y tener consecuencias sobre el resto de los agentes del ecosistema. Tan oculto como esencial es ese orden que conecta a los elementos en sus múltiples espacios de interacción y les permite aprender de los otros:

De las observaciones anteriores puede deducirse un corolario de la mayor importancia, a saber, que la estructura de todo ser orgánico está relacionada, de la manera más esencial aunque a menudo oculta, con la de todos los demás seres orgánicos, con los que entra en competencia por el alimento o la morada, o de los que tiene que escapar, o de los que es presa.^{CIX} (Darwin, 1859, p. 77)

El orden oculto del origen de las especies, está, como nos recuerda John Holland Holland (1995), oculto, pero por todos lados, especialmente sus efectos. Von Neumann también especuló acerca de la posibilidad de encontrar en los autómatas complejos señales de “ruido ordenado”, esto es, ruido que bajo el uso controlado por otra parte del autómata o como un producto espontáneo de la sincronización de distintos elementos pueda generar el orden que se observa, usualmente producto de una regulación “jerárquica” de las acciones de estos elementos mediante la operación de un selector, de manera semejante a como ocurre en la evolución:

Hay algunas indicaciones (no quiero entrar en los detalles ahora) de que algunas partes del organismo pueden actuar antagonísticamente entre ellas, y la evolución se parece algunas veces más a una invasión de una región por otra que a una evolución en sí [...]. No es improbable que a la hora de construir un autómata en este momento sea necesario planificarlo, no directamente, sino bajo la guía de algunos principios generales, más una máquina que puede efectivizarlos, y construya el autómata final y lo haga de tal manera que nosotros no sepamos ya qué es lo que ese autómata esté haciendo. [...] Me parece que si el autómata primario funciona en paralelo, si tiene varias partes que pueden actuar simultánea e independientemente sobre características distintas, es probable que obtengamos síntomas de conflicto. (von Neumann, 1951, pp. 9-10)

En más de un sentido, un sistema complejo es una red de restricciones en conflicto; conflicto que paradójicamente puede llevar a sus soluciones a través de la concreción de estructuras que pueden tanto mediar como aprovechar ese conflicto para mantener la metaestabilidad del sistema y, al mismo tiempo, darle la capacidad de realizar nuevas funciones en un ambiente. Ya vimos como tanto von Neumann como Eigen utilizaron un caso

muy particular de una invasión para describir como una serie muy pequeña de *instrucciones* podían modificar radicalmente el comportamiento de un sistema, al punto de quizás impedirle el mantenimiento de su propia estabilidad funcional: la invasión que un virus puede hacer de una célula para cooptarla como máquina para su “propia” reproducción. Pero hay invasiones que pueden resultar mucho más ventajosas para las capacidades del sistema “original”, si es que de alguna manera el sistema se puede permitir o soportar el acoplamiento sin perder integridad estructural o funcional. Cuando un sistema se vuelve parte de otro sin que ninguna de las partes pierda por completo su identidad en cuanto unidad funcional, las capacidades del nuevo sistema pueden aumentar extraordinariamente; al punto de que bien podríamos hablar de haber transcurrido una transición de fase, luego de la cual la descripción de los comportamientos posibles del sistema puede volverse mucho más difícil desde el conocimiento previo que de él se haya tenido. Usando la metáfora computacional, diríamos que el sistema ha ganado nueva funcionalidad gracias a la incorporación de un nuevo módulo con el que puede interactuar. Un ejemplo de una teoría biológica que puede describirse en estos términos es la teoría de la simbiogénesis o endosimbótica, según la cual un organismo puede absorber a otro para generar un simbiote o superorganismo que puede ser una nueva unidad de selección. Probablemente heredera de las reflexiones en torno a las similitudes entre las sociedades humanas y las animales características de la Edad Moderna, esta teoría entró en la biología hacia la segunda mitad del siglo XIX, tanto de la mano de figuras a favor de Darwin (como Herbert Spencer) y en contra (como Johannes Reinke); y tuvo un profundo impacto en algunos botánicos rusos de principios del siglo XX Gontier, 2016. Especialmente gracias a los trabajos de Lynn Margulis (Margulis, 1970; Sagan (Margulis), 1967), la teoría ha ganado cierta evidencia microbiológica y hoy puede considerarse como una buena explicación para dar cuenta de la aparición de algunas subunidades funcionales de las células como las mitocondrias en los animales y los cloroplastos en las plantas, que originariamente podrían haber sido procariotas que alguna protocélula pudo “aprovechar” (Zimorski y col., 2014).

5.3. Resumen y conexiones

Un tanto de la mano de Herbert Simon, la presentación aquí realizada de las propiedades notables de los sistemas complejos estuvo orientada a verlos en términos de una clase particular de artefactos: aquellos que pueden computar con, y gracias a, errores. Esto hace a la centralidad de la noción de robustez para su descripción, noción que también puede aplicarse al tipo de aproximaciones que el estudio de la complejidad requiere, que será objeto de los próximos capítulos.

Esta visión sobre los sistemas complejos, vistos como configuraciones espaciotemporales que pueden “aprovechar” parte de esa misma configuración como una memoria que determinará su comportamiento a medida que interactúa con otras configu-

raciones, también sugiere una profunda analogía con ciertos aspectos ligados a la programabilidad o reconfiguración por instrucciones de las computadoras, especialmente las digitales. Ahora bien, y como consecuencia de la partición forzada por decir de una configuración que es un sistema, su memoria bien puede estar afuera del sistema, en su ambiente; nuevamente en conexión con la posibilidad en computación de ver a los datos como instrucciones (y viceversa), e incluso al software como hardware por otros medios (y viceversa), asumiendo un sistema interpretativo de soporte lo suficientemente capaz. Esta analogía me llevará a postular en el capítulo 7 la noción de abstracción como central para comprender la misma posibilidad de la existencia de los sistemas complejos como la posibilidad de que un agente epistémico pueda lograr conocimiento de ellos y cambiar su comportamiento adecuadamente.

Un análisis cuidadoso de los numerosos aspectos conceptuales que emergen del empleo de las técnicas de renormalización en el estudio de sistemas complejos significaría una tesis en sentido propio, por lo que aquí me limito a remitir a parte de la literatura filosófica que ha trabajado parcialmente algunos de estos aspectos (Butterfield, 2014; Butterfield & Bouatta, 2015; Fraser, 2020; Huggett & Weingard, 1995). Si bien diré algo brevemente más adelante, advierto desde ya que no soy del todo explícito en una de las intuiciones que ha guiado parcialmente esta investigación y que versa sobre una posible conexión conceptual entre las técnicas de renormalización y las “transiciones de fase” que se pueden observar entre las clases de complejidad computacional o algorítmica.

La historia y filosofía de los Sistemas Adaptativos Complejos (CAS, por las siglas en inglés) como metateoría de la complejidad ha sido trabajada con detalle en la interesantísima tesis doctoral de Marzio Pantalone (2013), que ampliamente supera a esta, al menos, en la profundidad del análisis de la evolución y en cantidad de epígrafes.

Capítulo 6

El arte de estudiar sistemas complejos

Además de señalar la variedad de estrategias que se emplean en el estudio de los sistemas complejos —de las cuales apenas tomo aquí una muestra casi no representativa de la población—, el objetivo de este capítulo es señalar una forma de interpretar para la misma epistemología de los modelos científicos la noción de robustez discutida en el capítulo anterior. En el proceso, señalo algunos de los aspectos de lo que antes remarqué como la centralidad de la relación modelo-modelo o entre modelos. Es precisamente en este espacio o punto de encuentro de los modelos en donde se puede hacer las afirmaciones producto de la confluencia de las metodologías discutidas anteriormente. En la última sección de este capítulo, aprovecho la misma idea del espacio de encuentro o de intercambio de modelos para caracterizar al estudio mismo de los sistemas complejos

6.1. Paisajes y más paisajes

Como se ha señalado anteriormente, una de las características de muchos sistemas complejos radica en la emergencia de nuevas propiedades en un ecosistema de entidades, impulsadas por los cambios que la dinámica interna de las mismas entidades presentes y de sus interacciones puede traer para todas las entidades que dan forma al superorganismo que es su ecosistema. Esto presenta un claro desafío para modelar esta clase de sistemas ya que al menos hay que dar cuenta del acoplamiento que una entidad o individuo tiene en sus ecosistemas, al mismo tiempo que hay que hacerlo con respecto al acoplamiento interno de los procesos que hacen a cada individuo. Cambios internos tienen la posibilidad de crear un nuevo *tipo* de individuo que afecta a todo el ecosistema, mientras que cada cambio interno, al mismo tiempo, puede afectar a todo el individuo mismo. La “evaluación” de cualquier cambio, así, debe hacerse con respecto a todos estos acoplamientos internos y externos.

Sigo a Dennett (1996) en sostener que la selección natural —y esencialmente todo proceso evolucionario— puede al menos describirse como un proceso algorítmico, que desde una perspectiva general involucra los siguientes pasos, que deben poder ser explicados:

1. Una nueva clase o tipo de entidad es generada, es decir, se crea un nuevo tipo de proceso encapsulado que hereda gran parte de sus propiedades de otras entidades similares, pero presenta alguna nueva característica que hace que la evaluación con respecto al ambiente en el que opera pone en relevancia las diferencias con respecto a las anteriores.
2. La entidad entra en interacción con el resto del ecosistema o ambiente y su funcionalidad con respecto a ese ambiente se despliega. La función de la nueva entidad es ahora “evaluada” con respecto a sus efectos en el ecosistema. La perturbación que la novedad trae al ambiente puede tener distintas consecuencias, incluyendo la posibilidad de que todo su ecosistema se vea reconfigurado. A grandes rasgos puede decirse que la nueva entidad puede o ser destruida por el ambiente o ser aceptada —y quizás incluso “aprovechada”— por el ambiente. Esto es, la nueva entidad se extingue, continúa existiendo aunque sin provocar reconfiguraciones importantes o bien puede proliferar y modificar el ambiente incluso radicalmente.
3. La nueva entidad pasa a formar parte del ambiente; efectivamente convirtiéndose en parte del espacio de posibilidad de cualquier próxima entidad que surja y con la cual pueda interactuar directa o indirectamente. Durante el tiempo en el que no haya entidades o perturbaciones nuevas —y, por lo tanto, el ciclo vuelva al primer paso—, el ambiente puede considerarse en un equilibrio dinámico o metaestable.

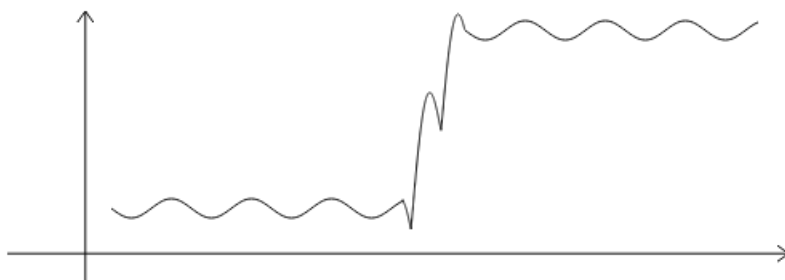


Figura 6.1: Posible representación de un equilibrio puntuado por un espacio de rápida transición. La variable independiente es el tiempo según un observador. La variable dependiente dependerá de la métrica con la que se evalúe el sistema. Mi mirada se inclina por pensar en términos de las configuraciones posibles que pueden ser observadas e interpretadas como distintas por el observador.

Como en el caso de tantos sistemas complejos, uno de los puntos más intrincados para modelar en un proceso adaptativo es la multiplicidad de dependencias y retroalimentaciones presentes entre las entidades involucradas; las que efectivamente hacen a la dinámica del proceso. Ya mencionamos en el capítulo anterior cómo Sewall Wright introdujo la metáfora de un paisaje para describir en él la dinámica de una población con respecto a la aptitud o *fitness* que tendría una especie en un ambiente determinado en base a las variaciones en su material genético. La metáfora es muy útil, creo, en tanto es gracias a ella que uno puede representar características del proceso de búsqueda sobre la base de los recorridos posibles que pueden llevarse a cabo en ese paisaje en busca de terrenos más altos en aptitud; y en eso puede verse una analogía —que resultó muy fértil en términos de los modelos que produjo— con un sistema físico que busca minimizar su energía.¹ En estos casos, como también ocurre en los sistemas que se modelan con las ecuaciones tipo Lotka-Volterra, el paisaje en sí es estático. Esto significa que las trayectorias en este espacio abstracto representan los posibles caminos de un conjunto de entidades —como los genes de una población— con respecto a un ambiente que no cambia. En otros términos, lo que está aquí operando es la transformación, soportada por la formulación de la teoría, del problema original en un problema de optimización de la aptitud, donde la aptitud es una *función de evaluación* del rendimiento de las posibles combinaciones genéticas en un conjunto de individuos con respecto a la posibilidad de un comportamiento que se pretende observar (o que se postula como observable).

Aunque es una estrategia sólida —de hecho considero que esencialmente es una buena descripción del proceso de búsqueda de modelos posibles para un fenómeno, en línea con la caracterización de la estrategia de Turing comentada en el capítulo 4—, la gran limitación de este tipo de modelos está en su consideración del ambiente como estático, tanto con respecto a los cambios que las entidades y procesos involucrados en ese ambiente pueden sufrir que impactan directamente en la adaptabilidad de la especie cuyo genoma se está evaluando, como con respecto a la posibilidad de ese genoma de modificar su propio ambiente. Esto es, no puede dar cuenta del proceso de creación destructiva anteriormente comentado y que vemos reflejado especialmente en el segundo paso del algoritmo evolutivo. Además, una característica del proceso de creación destructiva es que un pequeño cambio introducido por una nueva entidad puede cambiar radicalmente el paisaje de todos los actores involucrados.² Ya vimos cómo ésta es una característica de los sistemas complejos en estado crítico, en donde una pequeña modificación microscópica, a veces a causa de una simple señal, puede desencadenar una serie de transformaciones “desproporcionadas” en las características macroscópicas; esto es, del sistema como un todo. Aquí también se puede observar uno de los problemas para modelar esta clase de

¹Un interesante dirección para usar esta clase de modelos de manera más directa en epistemología puede encontrarse en el trabajo de M. A. Fuentes y Miguel (2016).

²Introduzco aquí, nuevamente casi al pasar, el lenguaje de “actores”, que será mejor caracterizado en el capítulo siguiente; aunque algo dije ya al respecto de su uso, particularmente en la nota en página 266.

sistemas con un abordaje que podríamos denominar como “clásico”: la dinámica del sistema cambia constantemente las condiciones iniciales y las condiciones de contorno del problema. Al mismo tiempo, el proceso es abierto, haciendo que efectivamente no se pueda determinar con antelación el universo de lo posible para el fenómeno, lo que conllevará un ajuste constante de los modelos que se postulan para dicho fenómeno; modelos que tendrán, a su vez, a otros modelos como restricciones. Esto hace que uno de los objetivos del estudio de la complejidad sea intentar determinar el adyacente posible para un fenómeno sobre la base de todo el conocimiento que se tenga de los factores involucrados en su dinámica, atentos a la incertidumbre que surge del hecho de que el adyacente o espacio de lo posible puede ser radicalmente distinto en dos unidades de tiempo consecutivas dada la co-evolución de las dependencias. Además, de la misma manera en la que las interacciones entre las entidades que se están intentando modelar están restringidas a crear nuevas entidades mediante combinaciones de las ya existentes, lo mismo podrá decirse de los modelos que se usen para describirlas. Quizás pueda verse aquí ya que la clave está en intentar comprender y describir las dependencias, dado que son ellas lo que hace que en estos procesos evolucionarios existan restricciones sobre el universo de lo posible. Al mismo tiempo en que esto ofrece una ventaja, hace que la descripción de estos sistemas no pueda hacerse mediante modelos estadísticos simples porque no se puede asumir la independencia de los eventos. Esto es, no se debe asumir que sean el resultado de procesos no-correlacionados.

Son muchos los recursos teóricos que se han desarrollado para el estudio de los procesos evolucionarios, aquí sólo destaco algunos, poniendo especial énfasis en cómo se apoyan en y contribuyen al desarrollo de múltiples disciplinas. Un caso interesante es la generalización de la teoría de juegos originalmente introducida por von Neumann y Morgenstern (1944), modificada explícitamente para comprender procesos evolucionarios. La Teoría de juegos evolutiva es una rama de investigación activa impulsada originalmente por (J. M. Smith & Price, 1973) como recurso formal para estudiar la teoría de la evolución, pero actualmente se la puede considerar como parte del arsenal disponible para estudiar sistemas complejos,³ especialmente muy bien recibida en algunas comunidades de estudio

³J. McKenzie J. M. Alexander (2021) señala algunos de los múltiples contextos en los que esta teoría ha visto una aplicación fructífera: altruismo, comportamiento en juegos de bienes públicos (un caso prototípico de la experimentación en economía), empatía, cultura humana, comportamiento moral, propiedad privada, comportamiento protolingüísticos, aprendizaje y normas sociales. Es interesante notar que parte del análisis filosófico que llevó a cabo David Lewis a finales de los años sesenta en *Conventions* estuvo motivado y soportado por una de las ramas menos exploradas de la teoría tradicional de los juegos: la de los juegos cooperativos o de coordinación. En su presentación, Lewis también comenta cómo la discusión original de Thomas Schelling (1960/1980) sobre estrategias de conflicto y de coordinación lo llevó a ver un posible argumento en contra de la desestimación que habían hecho algunos filósofos sobre la convención como problema digno de análisis: “Mi teoría de la convención tiene su origen en la teoría de los juegos de coordinación pura —una rama descuidada de la teoría general de los juegos de von Neumann y Morgenstern, muy diferente en método y contenido de su exitosa y más conocida teoría de los juegos de conflicto puro—. Los juegos de coordinación han sido estudiados por Thomas C. Schelling y fue él quien me proporcionó los elementos de

sobre la economía, como señalaba, por ejemplo, Larry Samuelson en la década del 90, como una manera de extender el análisis de la teoría de juegos original para casos en los que la racionalidad de los agentes involucrados y su conocimiento sobre las circunstancias se encontraba acotado:

El punto de partida de un modelo evolutivo es la creencia de que las personas no son siempre racionales. En lugar de surgir como resultado de un proceso de razonamiento perfectamente racional en el que cada jugador, armado con el conocimiento común de la racionalidad perfecta, resuelve el juego, las estrategias surgen de un proceso de aprendizaje por ensayo y error en el que los jugadores descubren que algunas estrategias funcionan mejor que otras. Los agentes pueden razonar muy poco en el curso de este proceso de aprendizaje. En su lugar, se limitan a realizar acciones, a veces con gran consideración y a veces sin pensar en absoluto. Su comportamiento se rige por heurísticas [*rules of thumb*] normas sociales, convenciones, analogías con situaciones similares o por otros sistemas, posiblemente más complejos, para convertir los estímulos en acciones. (Samuelson, 1998, p. 15)

Las palabras claves aquí son, para mí, “estrategias” y “aprendizaje”; los dos directamente relacionados con la búsqueda de una aptitud óptima, normalmente llevando a un estado evolucionariamente estable para la población. En los términos introducidos en el capítulo anterior, podríamos decir que este es un estado robusto al que la población como un todo vuelve ante perturbaciones no muy grandes. Un concepto relacionado —pero no idéntico— es el de una estrategia evolucionariamente estable, que es aquella que una vez que ha sido adoptada por una población queda “fijada” puesto que cualquier otra estrategia lleva a una disminución de la aptitud; por lo que puede ser incluso mantenida solo por la selección natural. Este concepto ha sido de mucha fertilidad, incluso el análisis evolucionario de la cooperación de Robert Axelrod (1984) se basa en él. Lo que deseo remarcar aquí es cómo estos conceptos siguen dependiendo de la postulación de una solución en equilibrio, supuesta incluso en la forma en la que se postula la función de aptitud para toda una población —incluso de muchas especies— en base a la aptitud de cada uno de los miembros que se estén considerando como unidades (ya sea individuos o especies). La matriz de pagos de la teoría clásica de juegos se interpreta en términos de aptitud y el éxito de una estrategia como éxito reproductivo.

La naturaleza estocástica de este proceso de ensayo y error —y algunas de las similitudes con problemas en física estadística— quizás puede verse más claramente en una modelización análoga para este caso, haciendo uso de la llamada “ecuación de replicación”, que es una instancia de lo que se conoce como “ecuaciones maestras” que se usa

una respuesta a Quine y a White” (Lewis, 1969, p. 3). Soy de la creencia de que esta clase de aproximaciones, en los que se contempla un balance entre conflicto y acuerdo, son claves para comprender las intrincadas dinámicas de las comunidades científicas, especialmente desde una interpretación de solución de problemas. Schelling es un nombre de moneda corriente en el estudio de los sistemas complejos, especialmente por su modelo de segregación que comento más abajo.

para describir fenomenológicamente la manera en la que un sistema cambia de estado a base de la probabilidad de transición, usualmente expresada en una matriz. Muchos problemas en ciencia, de hecho, puede reinterpretarse —o *traducirse*— como instancias de una ecuación maestra, lo cual puede ayudar a ver puntos en común en dinámicas observadas en disciplinas muy distintas.⁴ Así, para el caso de la biología que hemos introducido, la siguiente ecuación puede considerarse como una reinterpretación en estos términos:

$$\frac{dx_i}{dt} = x_i (f_i(x) - \Phi(x))$$

$$\Phi(x) = \sum_{j=1}^n x_j f_j(x)$$

Aquí x_i representa la proporción de una clase de individuos en la población total, x es el vector de la distribución o la abundancia de las clases en la población, $f_i(x)$ es la aptitud de cada tipo o especie i , mientras que $\Phi(x)$ es la aptitud promedio de la población:

$$\Phi(x) = \sum_{j=1}^n x_j f_j(x)$$

La probabilidad de replicación de una especie puede depender de la abundancia de todas las otras en la población, por lo que la replicación depende de la frecuencia (como lo era en el caso del ARN comentado en el capítulo anterior).⁵ El tipo de análisis específico que se pueda llevar a cabo dependerá claramente de la forma que tome la función de aptitud que se esté considerando, pero el punto que quiero resaltar aquí es cómo en estos modelos, incluso en las versiones no-lineales que tienen una alta tasa de acoplamiento *entre especies*, la posibilidad de un estado de equilibrio para la población yace en que, en última instancia, el cambio en el tiempo del sistema no “habilita” cambios radicales en el paisaje de aptitud debido a que el conjunto de especies y de sus interacciones posibles está fijado y no evoluciona como producto de las interacciones mismas. Esto significa, crucialmente, que no puede usarse para calcular cuál sería la aptitud de un nuevo tipo de entidades en una población. Sin importar lo intrincada que pueda ser la dinámica, en sentido estricto, una ecuación con estas características sólo puede modelar un sistema evolutivo en una escala temporal excesivamente pequeña; en donde, paradójicamente, no

⁴Ya vimos en el capítulo 3 cómo esta fue una preocupación en la obra de Bertalanffy y una de las motivaciones detrás de la Teoría General de los Sistemas como una propuesta de hacer más riguroso el proceso de pasar conocimiento de una disciplina a otra identificado qué tienen en común fenómenos cuya ontología subyacente se considere, al menos en un principio, como diferente o distante. Esta pregunta nos acompaña un tanto más en el capítulo final, donde retomamos la conexión del estudio de los sistemas complejos con la discusión filosófica acerca de modelos científicos, en donde el punto clave será la posibilidad de *reinterpretar* modelos para distintos fenómenos.

⁵De hecho quizás resulte interesante comparar la ecuación de replicación con la ecuación de las quasi-especies introducida por Eigen y Schuster: $\frac{dx_i}{dt} = \sum_{j=1}^n x_j f_j Q_{ji} - \Phi(x)x_i$, en donde Q_{ji} es la matriz que indica la tasa de mutación de un j a un i .

hay evolución en sentido estricto, ya que no hay instancias de novedad radical, aquellas que verdaderamente amplían el espacio de lo posible.

Una forma particular de emergencia se puede observar en un modelo de evolución deliberadamente simplificado, y que tiene como objetivo mostrar la importancia de dar cuenta de las dependencias e influencias que las partes involucradas en un proceso tienen para el desempeño de lo que puede describir como una función, introducido originalmente por (S. Kauffman & Levin, 1987). Se trata del modelo llamado NK, y que toma su nombre por los dos parámetros con los que trabaja y que le permiten ajustar precisamente qué tan escarpado [*rugged*, en inglés] es el terreno que resulta de la función de adaptación de una serie de entidades co-dependientes que pueden combinarse de distintas maneras, y cuya funcionalidad depende, al mismo tiempo, de las combinaciones de los otros elementos involucrados en la constitución de un individuo. Así, los dos supuestos fundamentales de este modelo es que un organismo o individuo tiene una función de adaptación que está determinada como el promedio de la adaptación de cada una de las partes componentes y cuya secuencia puede decirse que lo describen y determinan, por lo que pueden interpretarse como sus “genes”. El parámetro N determina la longitud de la cadena genética, mientras que los genes se toman como binarios, esto es, que los valores que puede tomar cada uno es 0 o 1: activo o no. El punto clave es la forma en la que se introduce la interdependencia de los estados, mediante la forma en la que se determina la función de adaptación de cada uno de los genes. El valor para cada gen está fijado en base a la dependencia que cada uno de ellos tiene con respecto a un número K de otros genes. Esto significa que lo que efectivamente determina la adaptabilidad de cada gen es la red que conforma junto a todos los otros. Así, en este modelo, lo que se vuelve importante para las posibles variaciones de la secuencia que describe a un individuo es su epistasia: el efecto de cada mutación posible depende de la presencia o ausencia de otra mutación. Aquí, los supuestos del modelo hacen que todas las mutaciones sólo puedan ser puntuales, lo que simplifica el análisis. Pese a las numerosas idealizaciones, que podrían decirse que convierten al modelo NK en un “juguete epistémico”, el tipo de comprensión que estos modelos altamente idealizados habilita en una comunidad que estudia ciertos fenómenos los hace dignos de atención, tanto para científicos como para filósofos que reflexionan sobre las prácticas de los primeros. Aquí solo quiero señalar algunos puntos que considero que son importantes para una comprensión filosófica del estudio de los sistemas complejos y la forma en la que dicho estudio puede impactar en nuestra manera de comprender el entendimiento científico de fenómenos naturales y artificiales.

Desde un primer plano, esta clase de modelos señala la importancia de estudiar lo que podría llamarse el “conectoma funcional” de los elementos involucrados. En el modelo NK, la red de este conectoma es extremadamente sencilla, al punto que puede representarse mediante una matriz de adyacencia binaria que en cada entrada identifique si dos genes o posiciones de la secuencia poseen interacción epistática o no. Este conectoma

es funcional porque la estructura propia de la secuencia no está determinada por la matriz, sino que ésta representa una consecuencia para la función de adaptación, que es la que se postula como función de evaluación de la optimalidad de dicha secuencia en el espacio de aptitud del individuo. Si bien la “distancia estructural” en el espacio de las secuencias puede ser muy pequeño —es decir que, por ejemplo, dos secuencias pueden diferir en apenas un valor o bit— las consecuencias de un cambio tan sencillo pueden ser drásticas para el individuo en términos de la clase de desplazamiento que ahora tiene en el espacio de aptitud. Estamos aquí frente a otro caso de no-linealidad, en el que un pequeño cambio en la estructura del sistema puede tener consecuencias funcionales desproporcionadas desde el punto de vista de la capacidad del individuo que sufrió el cambio para realizar una acción —o cumplir una función— en su ambiente de operación.

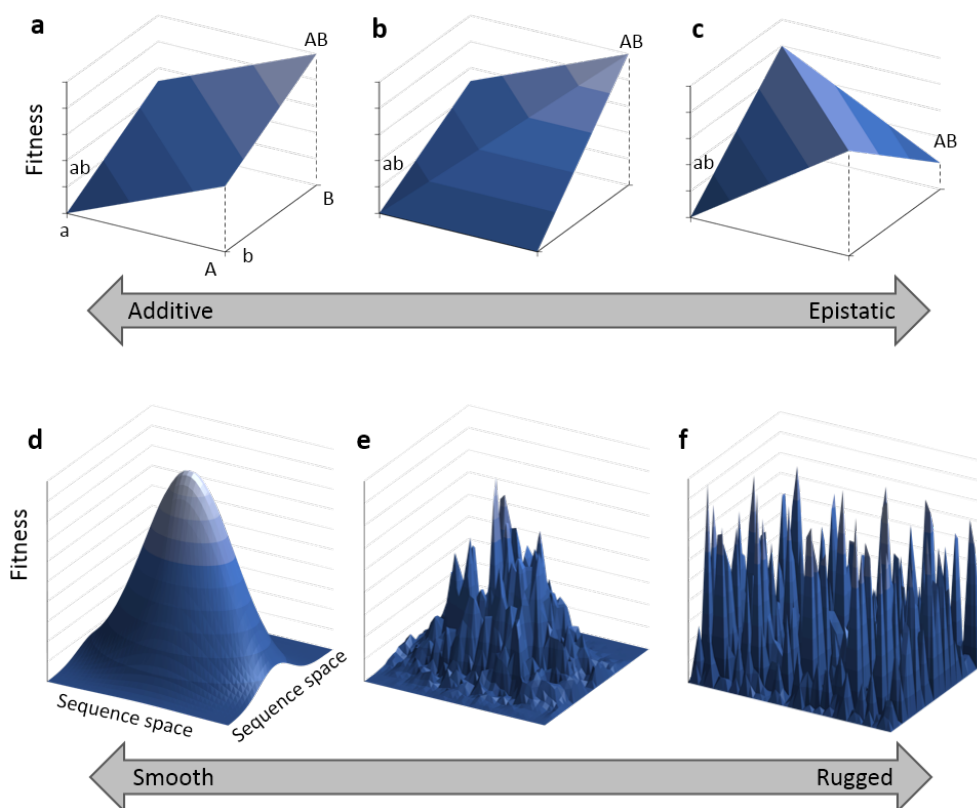


Figura 6.2: Distintas clases de comportamiento de mutaciones, aditivas, positivas y epistáticas. Debajo: lo escarpado de los paisajes va en aumento a medida que las interacciones se vuelven todas epistáticas, en cuyo caso final el paisaje es tan escarpado que es efectivamente desordenado y azaroso. La mayoría de los sistemas complejos están en un espacio intermedio, lo que al mismo tiempo que genera la posibilidad de la creación de entidades compleja dificulta enormemente la exploración del espacio de comportamientos posibles para un agente epistémico que intenta conocer el sistema. Imagen por Thomas Shafee, CC BY 4.0, via Wikimedia Commons.

A su vez en, a través de variaciones de este modelo se puede apreciar cómo opera la robustez en algunos sistemas complejos. Si de pronto se cambia la dinámica del modelo para representar un ambiente en el que la tasa de mutación es muy alta, las simulaciones numéricas indican una tendencia tanto a la aparición de quasi-especies —los individuos sufren más cambios pero se mantiene una unidad como *grupo* de clases de individuos que mutan la una a la otra, introducidas en el capítulo anterior— como al favorecimiento de individuos que sean más robustos frente a los cambios; esto es, serían seleccionados aquellos individuos cuyo perfil genético presente menos inter-dependencia (Edlund & Adami, 2004). Una posible consecuencia de esto es que ante circunstancias en las que el ambiente es hostil para entidades altamente interconectadas, se podrá notar una tendencia hacia una encapsulación en procesos más estables y con partes menos dependientes entre sí, pero que, al mismo tiempo, generan nuevas entidades estables en el ambiente que pueden ser aprovechadas por medio de interacciones más débiles para generar otra clase de estructuras complejas. Esta es otra razón por la cual los sistemas complejos tienden a presentar estructuras jerárquicas y modularidad, como vimos en ???. También vimos en 5.2.9 cómo esto puede llevar a generar condiciones en las que estructuras secundarias de control surgen por la imposibilidad de satisfacer simultáneamente restricciones o condiciones impuestas por una clase de interacción entre los elementos, y es gracias a esa estructura de control que procesos metaestables pueden surgir. Con inspiración en las ciencias de la computación, es a este proceso que, como sugiero en la sección 7.2, debe entenderse como la generación de abstracciones, y es en base a esta clase de procedimientos que forman entidades en base a procesos que la creación de muchos sistemas complejos se hace factible, al igual que es lo que posibilita su conocimiento.

El modelo NK también nos deja señalar un punto clave para un análisis de la forma en la que ganamos conocimiento de estos aspectos tan intrincados de los mundos naturales y artificiales. Este punto es la similitud que tienen —o pueden tener— los modelos que se postulan para comprenderlos y es un aporte más a la afirmación de la importancia de la relación modelo-modelo. Si bien fue desarrollado de manera independiente y llegando a él a través de la necesidad de crear un modelo sencillo sobre el que trabajar el problema de la dependencia interactiva de los genes, el modelo de Kauffman es similar a modelos propuestos para comprender a los vidrios de espín, fenómenos que también muestran frustración, desorden y lo que epistémicamente expresamos como la dependencia de un parámetro de control:

El modelo NK es muy similar a una clase famosa y bien estudiada de modelos que surgen en la física estadística, llamados vidrios de espín [*spin-glasses*] (Edwards y Anderson 1975; Sherrington y Kirkpatrick 1975; P. W. Anderson 1985; Binder y Young 1986; Stein, Baskaran, et al. 1987). De hecho, Anderson (comunicación privada) ha señalado que el modelo NK es una forma de vidrio de espín. Esto es importante para nosotros por dos razones. En primer lugar, una característica de los vidrios de espín llamada frustración ayuda a explicar las características de los paisajes de aptitud con

múltiples picos. En segundo lugar, existen profundas similitudes entre los comportamientos de un sistema físico en una superficie potencial compleja a una temperatura finita y una población que se adapta en un paisaje de aptitud escarpado a una tasa de mutación finita. En otras palabras, las herramientas de la física estadística se aplican a la biología de las poblaciones. (S. A. Kauffman, 1993, p. 43)

La función de aptitud de hecho puede interpretarse en términos de una “energía negativa” que el organismo tiende a optimizar en el paisaje que resulta de su interacción con un potencial en el ambiente; potencial que se ve modificado por el accionar mismo del organismo en tanto puede modificar el ambiente.

Es precisamente esta clase de convergencias en el altamente restrictivo espacio de los modelos posibles que sugieren la posibilidad de ver patrones comunes en sistemas que, quizás a primera vista, podrían parecer muy distintos.⁶ En esta dirección, son de destacar los trabajos de muchos miembros de la comunidad de física de la materia condensada que ayudaron a trasladar *insights* obtenidos en sistemas físicos particulares —en especial aquellos obtenidos a través de modelos para los vidrios de espín— para comprender el problema increíblemente complejo del plegado de proteínas (p. ej. Ansari y col., 1985; Gol’danskiĭ y col., 1983).⁷

Otro punto importante a señalar aquí, en virtud de la relación entre estos modelos, es que estos modelos dejan entrever cómo en la naturaleza ocurren lo que en otros contextos se denominan búsquedas con heurísticas en un espacio de soluciones posibles —las mismas que ya comentamos al mencionar la importancia que ellas tuvieron para Turing, entre otros—, en donde ciertas restricciones sobre las soluciones admisibles logran efectivamente hacer posible encontrar soluciones “suficientemente buenas” en donde encontrar soluciones óptimas podría ser extremadamente difícil. Retomo este punto en el capítulo final, ya que también sugiere la conexión entre los estudios de la complejidad tal y como la hemos explorado en esta investigación con otra clase de complejidad que, si bien no es idéntica, pese a compartir el nombre, los puntos de encuentro entre las dos deben ser todavía explorados con mayor profundidad: la complejidad computacional de los algoritmos.

⁶Sobre la similitud entre los modelos de Kauffman y los vidrios de espín, ver especialmente los trabajos de Derrida y Flyvbjerg (1986) y Derrida y Stauffer (1986). (Aviso para el lector filosófico, no es *ese* Derrida.)

⁷En (Rocklin y col., 2017) pueden consultarse algunos de los avances del campo y de particular interés filosófico creo que es la conceptualización que hacen los autores del modelado en términos de *diseño* y la retroalimentación entre modelos y experimentos a gran escala en biología molecular. Recientemente se han logrado importantes avances sobre la capacidad computacional para predecir la estructura funcional de una proteína a partir de su secuencia de aminoácidos gracias a la utilización de técnicas de aprendizaje automático basadas en arquitecturas muy complejas de redes neuronales artificiales (Jumper y col., 2021; Senior y col., 2020), otro campo que tanto en términos de técnicas como de modelos es una de las áreas importantes que hacen al estudio de los sistemas complejos y señala muchos de los aspectos de la profunda interrelación entre la física estadística y la ciencia de la computación. Ver sección 6.4 donde brevemente se describe el avance del campo desde las ya mencionadas redes neuronales de McCulloch y Pitts (1943).

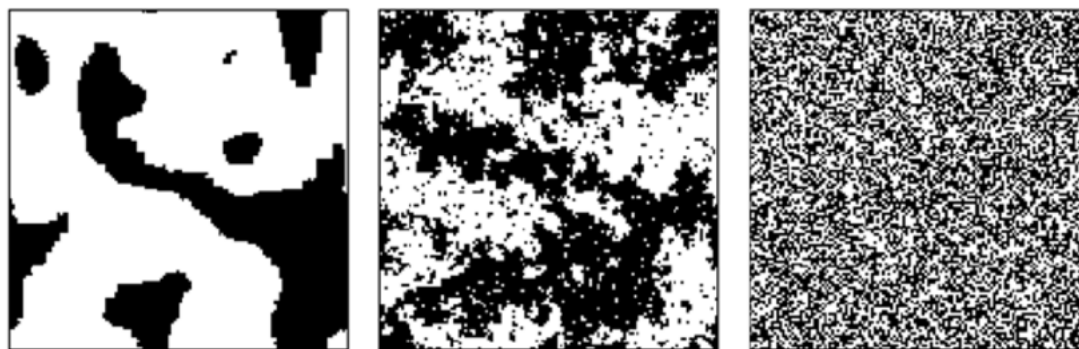


Figura 6.3: Instantáneas de la evolución de un modelo de Ising en dos dimensiones en regímenes distintos correspondientes a distintos valores de un parámetro de control. (1) ordenados, (2) crítico, (3) estocástico .

Transiciones de fase semejantes a las del modelo de Ising pueden observarse en una gran variedad de sistemas. Particularmente interesante para el estudio de los sistemas complejos es el denominado «modelo de segregación» de Thomas Schelling, que suele ser tomado como uno de los primeros «modelos basados en agentes». El nombre se debe a que el modelo tiene unidades que interactúan con otras de acuerdo a reglas prefijadas y, sin que medie una ley global para el comportamiento, comportamientos no triviales aparecen en la macro-escala. En algunos casos, particularmente cuando se usa para explorar dinámicas de comportamiento social, pueden dar lugar a explicaciones de por qué muchas veces el resultado global va incluso en contra de las preferencias explícitas de los individuos involucrados. Schelling (1960/1980, p. 91) menciona muy brevemente a los fenómenos de segregación racial, citando el texto pionero de Morton Grodzins (1957), quien introdujo el término «punto de quiebre» o «de transición» [*tipping point* en inglés] en la sociología, importándolo desde la física. Schelling (1969, 1971) elaboró sobre la intuición de Grodzins y logró demostrar que los patrones de segregación en varias ciudades podían explicarse por una leve preferencia al número de vecinos de la misma raza que los individuos aceptaban. Además, señaló con claridad lo extremadamente sensible que los patrones eran a mínimos cambios en las preferencias de los agentes del modelo, que muy fácilmente podía dejar de manifestar configuraciones en equilibrio (ver figura 6.4)

Una exploración interesante y original de la similitud entre el modelo de segregación de Schelling y el fenómeno de *clustering* o formación de agrupamientos en física puede verse en (Vinković & Kirman, 2006). Dicho sea de paso, el uso de algoritmos de agrupamiento es una técnica muy utilizada en algunas comunidades, especialmente para hacer minería de datos bajo aprendizaje automático o maquínico ya que hay algoritmos que pueden sugerir criterios de agrupación para distintas clases de entidades que no fueron provistos explícitamente durante la programación. Técnicas muy similares se pueden aplicar a una diversidad de datos provenientes de dominios muy distintos, en tanto pue-

dan compartir una representación o *codificación* en un espacio vectorial con una métrica aplicada como función de distancia. Por ejemplo, una misma técnica se puede aplicar en biología para clasificar animales y plantas, en medicina para clasificar enfermedades, en sociología para identificar perfiles de individuos en base a su comportamiento, o incluso para reprocesar señales de diversas fuentes a fin de disminuir el grado de ruido.

Además, desde el punto de vista de un análisis epistémico, considero que se puede pensar cómo la fertilidad de un modelo depende del grado de conexión que tenga con otros modelos que una comunidad epistémica tenga disponible en un momento determinado. Esto cuenta tanto estructuralmente, en tanto los modelos pueden ser parte de otros modelos, como “cognitivamente”, en tanto la interpretabilidad de un modelo para un agente cognitivo dependerá de la familiaridad que dicho agente tenga con respecto a la *clase* de modelos que se conforma en base a las características que compartan bajo las distintas interpretaciones posibles.

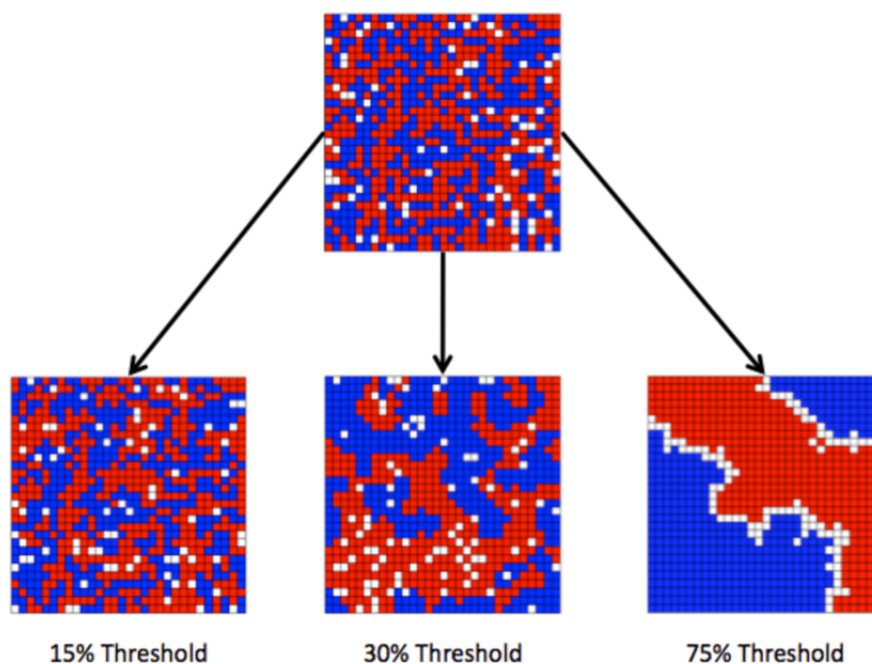


Figura 6.4: Instantáneas de la evolución de un modelo de Schelling en dos dimensiones en regímenes distintos correspondientes a distintos valores del parámetro de control (el porcentaje de vecinos similares deseado).

Esto se debe a que en sistemas complejos los flujos que pueda soportar un sistema dependen de las clases de conectividades actuales y posibles en base de las partes, conectividad que dependerá de la variedad de flujos, en tanto para un tipo de flujo un sistema puede estar máximamente conectado mientras que para otro tipo de flujo, las mismas partes del sistema podrían estar efectivamente desacopladas.

El estudio de las distintas clases de redes en las que pueden decirse que interactúan los sistemas bajo estudio se vio potenciado en la actualidad gracias a la disponibilidad de grandes cantidades de datos, mayor poder de resolución de los instrumentos y el aumento en la capacidad de almacenamiento y procesamiento computacional de datos, en muchos casos gracias a la ayuda de algoritmos de aprendizaje maquina, que en muchos casos hacen uso de arquitecturas inspiradas en las mismas clases de redes neuronales que se encuentran en sistemas vivos (redes que, de hecho, se remontan a las presentadas originalmente por McCulloch y Pitts en 1943 y que fueron mencionadas brevemente en el capítulo 4). Esto ha llevado a una especialización en el estudio de las redes en base al tipo de conexiones y clase de elementos que se considere que están siendo conectados en esa red. De manera general se pueden englobar a los estudios de redes en sistemas biológicos dentro de la rúbrica disciplinar de la biología de sistemas,⁸ y entre las redes bajo estudio se pueden mencionar a manera de ejemplo las redes de interacción entre proteínas (que hacen a los llamados “interactomas”), las redes de regulación genética (redes de interacción entre genes y proteínas). En este último caso, se suele hacer una distinción de acuerdo al grado de control, en tanto las redes podrían describir los ciclos de retroalimentación entre genes y productos de los genes en las células (como ARN y proteínas) —trabajos herederos de las contribuciones fundamentales de François Jacob y Jacques Monod sobre el operón *lac* en el metabolismo ante la presencia de lactosa en el ambiente de la *E. Coli*— y las redes que forman entre los múltiples reguladores mismos de la interacción génica, en tanto la funcionalidad de uno suele depender en la funcionalidad de otro. Esto ha permitido comenzar la exploración de patrones de interacción genética similares en distintas clases de organismos modelo (Costanzo y col., 2010) como en proteínas modelo (Poelwijk y col., 2019). Además del estudio propio de las redes neuronales biológicas, otros casos de disciplinas emergentes en torno al estudio de redes en sistemas biológicos los constituyen el estudio de las redes metabólicas —ellas mismas generalizaciones de rutas metabólicas—, las redes tróficas y las redes de interacciones entre especies; estas últimas ligadas desde muy temprano en la historia de la biología a la gran “red de la vida” que hacía a la “economía animal”, concepto utilizado por el mismo Darwin como se señaló en el capítulo anterior. En las últimas dos décadas, el perfeccionamiento de estas técnicas de alta capacidad ha llevado a un mayor solapamiento entre los estudios de la biología más clásica y de la biología computacional, y así a lo que se ha llamado el nacimiento de las “-ómicas”

⁸Si bien es difícil determinar un criterio para el nacimiento o aparición de un campo científico particular, en la comunidad de biólogos de sistemas se suele hacer referencia a los trabajos pioneros de Eric H. Davidson, que llevaron a la obtención temprana del genoma del *Strongylocentrotus purpuratus* (Andrew Cameron & Davidson, 2007; E. H. Davidson y col., 2002; Sodergren y col., 2006), el mismísimo erizo de mar en el que Driesch había querido verificar la hipótesis de Roux y en lugar vio evidencias que, según él, lo obligaban a postular una nueva clase de vitalismo. (Rothenberg, 2016) ofrece un recorrido sobre la producción científica de Davidson, en donde también comenta el giro que sus presentaciones tuvieron luego de la secuenciación del genoma del erizo de mar, que se enfocaron tanto en encontrar similitudes semejantes en otros organismos modelo y a convencer a algunas comunidades sobre la necesidad de poner a prueba de manera más robusta toda afirmación de conexiones causales que se hagan en sistemas complejos con propiedades emergentes.

debido a la posibilidad de recabar datos de manera paralela y masiva sobre plataformas experimentales, efectivamente integrando computación y experimentación a una nueva escala: genómica, transcriptómica, proteómica, interactómica, metagenómica. La intersección de estas áreas suele recibir el nombre de «biología de sistemas» (Alon, 2019; Walhout y col., 2012). (Walker y col., 2017) es una muestra de parte del potencial filosófico presente en estas nuevas aproximaciones al mundo de la vida.

Tanto el estudio de las propiedades estadísticas de las redes como su conexión con las propiedades de otras estructuras matemáticas como los grafos constituyen una de las áreas de investigación más activas dentro del campo de la ciencia de los sistemas complejos (Barabási, 2016; Easley & Kleinberg, 2010; M. Newman, 2018; M. E. Newman, 2003). Parte de esto se debe a la gran cantidad de fenómenos que pueden interpretarse como una red cuando se abstraen los componentes o se toman como “cajas negras”. Una vez identificado cierto patrón relevante, conocimiento del dominio sobre el tipo de conexiones puede enriquecer significativamente la comprensión o la capacidad de intervención sobre el sistema que se estudia.

6.2. Patrones *à la* Turing

Ya hemos visto en esta investigación cómo gran parte del origen del estudio de la complejidad se vio motivado por los intentos de hacer por la biología lo que la mecánica hizo por la física, atendiendo, claro, a las posibles diferencias entre ellas dada la naturaleza de lo que se estaba estudiando; en algunas ocasiones esto incluso llevó a la consideración de un reduccionismo metodológico. Ahora bien, más allá de las distintas formas de reduccionismo que se pueden pensar, considero que lo importante está en la forma en la que mediante el uso de modelos se permitió la “transferencia de conocimiento” entre distintos dominios científicos, especialmente habilitando el uso de técnicas matemáticas de muy diversas clases para intentar encontrar explicaciones a ciertos patrones —también de muy distinta índole— que se podían encontrar en la naturaleza y en su estudio. Así, la biología teórica que en cierta medida nació de los intentos de comprender y unificar —y en algunos casos *rechazar*— la cosmovisión resultante de la mirada de Darwin, como fueron los de Reinke, Spencer y von Uexküll, influyeron en las primeras “matematizaciones” que sufrió la biología, en donde se deben destacar, por un lado, la línea estadística de Ronald Fisher, Sewall Wright, J.B.S. Haldane y Woodger —que condujo a la primera gran síntesis evolucionaria de la biología—, y por el otro una tradición un tanto más “mecánico-matemática” en donde se puede notar la influencia de otras figuras del siglo XIX como Verhulst y Helmholtz en Volterra, Lotka y Thompson, quienes a su vez tuvieron profunda influencia en Bertalanffy. Otros herederos de esta tradición, y que en su intento de hacer por la biología lo que la matemática había hecho por la física pueden en retrospectiva verse como los fundadores de lo que en la actualidad se conoce como biología de sistemas,

son Nicholas Rashevsky y Walter Elsasser. Antes de que tomara el título de “biología matemática”, el programa de investigación de Rashevsky respondía al nombre de “biofísica matemática” y desde sus comienzos estuvo motivada por encontrar principios generales de los organismos que pudieran describirse matemáticamente y, en el proceso, funcionar como una guía para la unificación de todas las ciencias en tanto pueda permitir dar cuenta de sus relaciones. El primer esbozo de su propuesta aparece publicada por primera vez en 1934 en el segundo volumen de la revista *Philosophy of Science*, recién fundada por Feigl, en donde hace especial énfasis en la complejidad de los fenómenos de la biología y en cómo la justificación de su estudio mediante la matemática se puede realizar en analogía al éxito que la matemática tuvo para con la física, bajo el supuesto de que pueda mantener la trazabilidad de las idealizaciones empleadas:

Es cierto que los fenómenos biológicos son *quizá* más complejos que los físicos usuales. Pero incluso estos últimos son, a primera vista, tan complejos que su tratamiento matemático completo puede parecer imposible. Y, sin embargo, es precisamente el método matemático de aproximación el que nos permite ver a través de esa complejidad.

Lo importante en el método matemático es abstraer de un grupo muy complejo de fenómenos sus características esenciales y simplificar así el problema. Las características más complejas se abordan entonces gradualmente, según su grado de importancia y complejidad, como aproximaciones segundas, terceras y superiores. Es cierto que, al abstraer, perdemos, por así decirlo, el contacto con la realidad; pero esto no causa ningún daño *mientras lo tengamos siempre presente*. (Rashevsky, 1934, p. 178. Énfasis en el original)

Es así que esta nueva rama de la biología teórica puede ir incluso más allá del estudio experimental en tanto puede dar cuenta de explicaciones posibles:

La biofísica matemática estudia todas las posibilidades físicamente concebibles de lo que puede ocurrir en un sistema biológico. La estudia sin tener en cuenta si la posibilidad en cuestión proporciona *la* explicación de un determinado fenómeno biológico. Estudia todas las explicaciones posibles. Y sólo después de que dicho estudio nos haya proporcionado una visión clara de todas las posibilidades, el experimento puede decidir qué posibilidades se encuentran en la naturaleza. (Rashevsky, 1934, p. 181. Énfasis en el original)

En su primer *magnum opus*, es todavía más explícito acerca del rol que tienen en dichas explicaciones las idealizaciones y las entidades teóricas que se crean en la utilización de modelos:

Siguiendo el método fundamental de las ciencias físico-matemáticas, no intentamos una descripción matemática de una célula concreta, en toda su complejidad. Comenzamos con un estudio de sistemas muy idealizados, que en principio pueden no tener ninguna contrapartida en la naturaleza real. Este punto debe destacarse especialmen-

te. Se puede objetar contra este enfoque que los sistemas no tienen ninguna relación con la realidad y que, por tanto, las conclusiones que se extraigan de estos sistemas idealizados no pueden aplicarse a los reales. Sin embargo, esto es exactamente lo que se ha hecho, y se hace siempre, en física. El físico sigue estudiando matemáticamente, en detalle, cosas no reales como “puntos materiales”, “cuerpos absolutamente rígidos”, “fluidos ideales”, etc. *No hay cosas como esas en la naturaleza*. Sin embargo, el físico no sólo las estudia, sino que aplica sus conclusiones a las cosas reales. Y ¡mira! Tal aplicación conduce a resultados prácticos, al menos dentro de ciertos límites. Esto es así porque, dentro de estos límites, las cosas reales tienen propiedades comunes con las ficticias idealizadas. Sólo un superhombre podría captar matemáticamente de una vez la complejidad de una cosa real. Los mortales comunes debemos ser más modestos y acercarnos a la realidad asintóticamente, por aproximación gradual.^{CX} (Rashevsky, 1938/1960, p. 1 Énfasis en el original)

La biología matemática procedería entonces por esta vía en la búsqueda de principios generales en términos de las conexiones o relaciones que *puedan* existir entre distintas entidades, también abstractas, que se combinan para realizar funciones biológicas; la “parte física” sería luego recuperada por medio de una *realización*; Rashevsky siempre siendo consciente de la interacción necesaria de la teoría con la experimentación y que, en última instancia, estaba tratando con organismos formados por elementos físicos: “Sin embargo, como los fenómenos biológicos están muy relacionados con los físicos, en este libro buscaremos, siempre que sea posible, interpretaciones físicas, de acuerdo con el deseo de unificar todas las ciencias naturales.”(Rashevsky, 1938/1960, p. x). Rashevsky, atento a la generalidad de su propuesta, extendió luego las aplicaciones a la posibilidad de una sociología matemática; efectivamente trasladando el método de estudio propuesto hacia otras clases de procesos en los que las similitudes descubiertas por las analogías —algunas ya provenientes del siglo XIX— permitían ver en otras materialidades y escalas las mismas clases de principios generales de organización (Rashevsky, 1959).

Mucho más podría decirse de la obra de Rashvesky, y particular de la influencia que tuvo en algunas comunidades, muchas veces incluso por medio de sus alumnos como lo fueron Waltter Pitts, Robert Rosen y Herbert Simon,⁹ mas aquí sólo pretendo señalar la importancia que tuvo en su obra una mirada sobre las clases de construcciones teóricas que se permiten en una ciencia y la reflexión filosófica que debe acompañarlas, especialmente si es una disciplina que pretende modificar las fronteras de la clase de conocimiento acerca de un conjunto de fenómenos. Baste de momento también mencionar sus trabajos pioneros en la formulación de lo que hoy denominamos redes neuronales artificiales (especialmente luego de los trabajos de Pitts junto a McCulloch, cuya estrategia

⁹Aunque parte del tiempo de su doctorado Simon estuvo en Berkeley, CA, Simon estudió su carrera de grado y posgrado Chicago (obtuvo su B.A. en 1936 y se doctoró en 1943), donde fue alumno tanto de Rashevsky como de Rudolf Carnap; aunque su influencia más profunda y director formal de su doctorado fue Henry Schultz, uno de los fundadores de la econometría, fallecido en un accidente de tránsito a finales de 1938).

ya comentamos) (Rashevsky, 1933) y sus intentos de transportar las ecuaciones de difusión en física para formalizar los fenómenos de difusión en las células (Rashevsky, 1940, Capítulo 1). Dicho sea de paso, el estudio de los fenómenos de transporte, aquellos que implican el cambio o “traslado” de cantidades como la masa, la carga o el momento entre distintos sistemas, desde muy temprano se apoyó en la determinación de alguna similitud que tuviera el transporte en sí mismo, sin depender de la clase de “sustancia” que se esté intercambiando. Incluso con un grado de generalidad mayor, se puede hablar del transporte de probabilidades, algo que notó el mismo Laplace en su esfuerzo hacia una prueba del teorema central del límite. Esta parte de la historia de la física y la matemática del siglo XIX es sin duda muy interesante por varios motivos, deberá ser suficiente mencionar aquí la tensión que todavía existía a principios de dicho siglo entre aceptar una noción de acción a distancia o ceder ante la posibilidad de la realidad física de los campos matemáticos que recién estaban haciendo su entrada en el campo de la física importados desde la matemática (Hesse, 1961; Narasimhan, 2009). Curiosamente, ya en el siglo XX el concepto físico de campo y su éxito para la explicación y unificación de los fenómenos eléctricos y los magnéticos, lo volverían un recurso para algunos biólogos y filósofos quienes veían en él la posibilidad de continuar evadiendo una reducción de los principios de la vida a explicaciones meramente mecánicas (p. ej. Burr & Northrop, 1939).¹⁰

Alan Turing fue otro de los pioneros que incurrió en este traspaso de habilidades para intentar dar cuenta de algunos de esos patrones biológicos hacia el final de su vida, dando lugar a dos importantes artículos de un Turing un tanto menos conocido, pero que es el mismo Turing intentando aplicar sus habilidades matemáticas al problema de la explicación de un patrón en el mundo al que llega incluso por una motivación filosófica cuyas consecuencias ya hemos ido observando a lo largo de esta investigación: dar cuenta de los patrones complejos en la naturaleza sin la necesidad de postular fuerzas vitales inexplicables ni diseñadores inteligentes activamente involucrados (Hodges, 2004, p. 431). Turing (1952) se concentra en el problema de la morfogénesis en animales, y es el que repasamos de manera muy breve aquí, mientras que Turing 1954, arreglado para su publicación por Hoskin y Richards luego de la muerte de Turing, se concentra en el problema análogo en la filotaxis: el patrón —muchas veces en espiral— que forman las hojas u otras estructuras vegetales cuando crecen alrededor de un eje central.

No he logrado encontrar registros en la obra de Turing de alguna referencia a la

¹⁰Con distintas ontologías subyacentes, la importancia de los fenómenos eléctricos y magnéticos en biología comenzarían a ser tenidos nuevamente en distintas ramas, especialmente en embriología, hacia finales del siglo XX. (Levin, 2003) es un muy buen *review* de la literatura hasta ese entonces. En la rama filosófica, también profundamente influenciado por la reconversión de la ontología a la que nos obligaría tanto la noción de campo como la importancia de los fenómenos *propriamente* biológicos, hay que destacar la figura de Whitehead, uno de los iniciadores de las metafísicas de procesos; metafísicas que considero otra de las grandes consecuencias filosóficas del estudio de la complejidad y que menciono brevemente en el capítulo siguiente, brevedad que no se debe a su poca importancia —todo lo contrario—, sino al énfasis que se ha puesto en esta investigación sobre la epistemología.

obra de Rashevsky.¹¹ El conocimiento de los problemas biológicos por parte de Turing se puede extraer de las referencias que menciona (Waddington, 1940). El texto de Waddington es un resumen del conocimiento hasta el momento de las investigaciones empíricas e intentos de integraciones teóricas referidas al desarrollo de los embriones, con especial énfasis en los “organizadores”, las entidades que serían capaces de *inducir* cambios estructurales para el desarrollo y que habían sido introducidas por Hans Spemann en la década de 1920 gracias a sus técnicas experimentales que continuaron por desterrar la hipótesis de la preformación de Roux al tiempo que daba mayor credibilidad a los “campos morfogenéticos” que habían sido propuestos en la década anterior y especialmente apreciada por Paul Weiss, figura clave, junto con Bertalanffy, en la popularización del organicismo como posición de resolución del conflicto entre vitalistas y mecanicistas (E. Mayr, 1982).¹² En cierta medida, en la propuesta de Turing uno puede encontrar una intención teórica semejante, en tanto postula una entidad teórica que en última instancia da cuenta del fenómeno a explicar; pero con plena consciencia de los límites de su acercamiento. Ahora bien, la entidad propuesta tiene la intención de servir de “puente” entre la posible manifestación físico-química de dicha entidad y su descripción matemática. Aquí, en mi opinión, se puede ver en Turing el mismo tipo de estrategia de modelización *top-down* que ya había caracterizado su trabajo en ocasiones anteriores, como mencionamos en el capítulo 4. Al mismo tiempo, en términos de la clase de representación matemática a usar también se puede apreciar cómo continúa la misma preocupación de Turing por la efectividad y plausibilidad del cálculo, tanto pensando en la obtención manual de soluciones así como la posible implementación en términos numéricos. En otro trabajo de la época expresaba que “Ningún método matemático puede ser útil para ningún problema si requiere demasiado cálculo” (Turing, 1954; Cooper & van Leeuwen, 2013, p. 323).^{CXI} Esto es en parte lo que motiva la aclaración acerca de la clase de construcción matemática que propone y que hacen a las primeras líneas del artículo:

En esta sección se describirá un modelo matemático del embrión en formación. Este modelo será una simplificación y una idealización, y en consecuencia una falsificación. Es de esperar que los aspectos que se han conservado para la discusión sean los de mayor importancia en el estado actual de los conocimientos.^{CXII} (Cooper & van Leeuwen, 2013; A. M. Turing, 1952, p. 689)

Aquí Turing no sólo reconoce los límites del conocimiento biológico de la época —si es que no también los suyos—, sino que al mismo tiempo el carácter heurístico y exploratorio de esta clase de investigación, en términos de una descripción plausible de un mecanismo que puede dar cuenta de una serie de observables y que pueden funcionar en distintos contex-

¹¹Sobre la conexión entre la propuesta de Turing y la de Rashevsky, nada mejor que comenzar con el trabajo de Rosen (1968).

¹²Recordemos que Waddington fue miembro del Club de la Biología Teórica, junto con los Needham, Woodger, J.D. Bernal. (Ver también nota en 77.) Los “organizadores” también deben recordarnos de los “dominantes” postulados por Reinke dos décadas antes.

tos, incluyendo el biológico, como una suerte de guía sobre qué clase de instanciaciones físicas de estos procesos se podrían luego buscar en la naturaleza.

El sistema que se va a considerar consiste, por tanto, en masas de tejidos que no crecen, pero en cuyo interior reaccionan químicamente determinadas sustancias y a través de las cuales se difunden. Estas sustancias se llamarán morfógenos, ya que la palabra pretende transmitir la idea de un productor de formas. No se pretende que tenga un significado muy exacto, sino que es simplemente el tipo de sustancia a la que se aplica esta teoría. Los evocadores de Waddington son un buen ejemplo de morfógenos (Waddington 1940). Estos evocadores que se difunden en un tejido, de alguna manera lo persuaden para que se desarrolle a lo largo de líneas diferentes de las que se habrían seguido en su ausencia.^{CXIII}

Es mediante la descripción de la interacción de estas nuevas entidades que Turing pretende dar cuenta del carácter que ve como un requisito indispensable para la creación de patrones complejos: la inestabilidad, al menos de manera instantánea en el momento de encuentro entre los morfógenos. El tratamiento matemático en sí es el mismo que caracteriza al tratamiento usual de sistemas físicos; esto es, se logra por medio de una descripción de lo que constituye un estado del sistema para luego computar cómo dicho estado cambia en base a una “ley” descrita en términos de ecuaciones diferenciales según la cuál se puede computar el estado en los instantes consecuentes. Si bien en este sentido la propuesta de Turing es más bien clásica, lo que considero más destacable para una lectura epistemológica es la manera en la que Turing es consciente del riesgo que tienen las simplificaciones a las que se recurre para hacer del problema uno tratable en términos de la representación elegida. Dichas simplificaciones pueden, en efecto, hasta suprimir el fenómeno que se pretende estudiar. Es por esta razón que las entidades que se introducen en el modelo deben de alguna manera “esconder” la complejidad usualmente asociada con la inestabilidad, pero sin eliminarla por completo, de forma que se pueda hacer uso de ella en algunos instantes durante la evolución del sistema como un todo. La complejidad, entonces, se esconde pero al mismo tiempo se genera una forma de interactuar con ella de manera más ordenada. Aquí efectivamente hay una operación de *abstracción* que se logra mediante la introducción de una nueva entidad cuyas propiedades y formas de interacción con otras entidades son definidas por el modelador (incluyendo el medio en el que se encuentran) y entran en acción en momentos determinados de la evolución del sistema que se describe; y es gracias a dicha abstracción que se genera un espacio de interfaz entre las entidades teóricas del modelo que, finalmente, logran dar cuenta de un mecanismo plausible para la generación de los patrones que pueden ser luego observados. Turing presenta brevemente una clásica forma de argumentar a favor de, por ejemplo, ignorar las desviaciones de las simetrías presentes y, por tanto, presuponer su conservación y luego introducir una inestabilidad de otra manera. Para Turing, en cambio, hay un problema con esos argumentos ya que eliminan la posibilidad de ver las inestabilidades ligadas a la ruptura misma de la simetría y que dicha ruptura pueda ser aprovechada por el sistema para generar patrones

en base a dichas inestabilidades:

Hay una falacia en este argumento. Se asumió que las desviaciones de la simetría esférica en la blástula podían ignorarse porque no hay gran diferencia en la forma de la asimetría. Sin embargo, es importante que haya algunas desviaciones, ya que el sistema puede alcanzar un estado de inestabilidad en el que estas irregularidades, o ciertos componentes de las mismas, tienden a crecer. Si esto ocurre, se suele alcanzar un nuevo equilibrio estable, en el que la simetría desaparece por completo. La variedad de estos nuevos equilibrios no será normalmente tan grande como la variedad de irregularidades que los originan.^{CXIV} (Cooper & van Leeuwen, 2013; A. M. Turing, 1952, p. 693)

Una forma de leer la última oración es como un argumento de la robustez de los patrones resultantes de las inestabilidades, en tanto pueden verse como atractores de las trayectorias resultantes de cada una de las condiciones forzadas por las interacciones entre los elementos. En el corazón del modelo de Turing se encuentran dos elementos. Por un lado, un sistema de ecuaciones que representan las reacciones (esto es, las interacciones) catalíticas o autocatalíticas que ocurren *entre* dos sustancias distinguibles (en este caso, los morfógenos postulados) y, por el otro lado, un mecanismo que fuerce la distribución espacial de los componentes que interactúan. El nombre de ecuaciones de reacción-difusión proviene de que precisamente se están describiendo estos dos mecanismos, la reacción entre las entidades y la difusión que se encarga del transporte de los reactantes en el espacio. En una de las versiones más sencillas, para el caso de dos morfógenos, Turing presenta las siguientes ecuaciones de la interacción de dos concentraciones de reactantes X e Y , para cada célula r que se interactúa con dos células vecinas $r - 1$ y $r + 1$ (A. M. Turing y col., 1992, p. 698):

$$\begin{aligned}\frac{dX_r}{dt} &= f(X_r, Y_r) + \mu(X_{r+1} - 2X_r + X_{r-1}) \\ \frac{dY_r}{dt} &= g(X_r, Y_r) + \nu(Y_{r+1} - 2Y_r + Y_{r-1})\end{aligned}$$

Las funciones f y g son la tasa de cambio de los morfógenos que se ve afectada por los factores o parámetros de difusión de cada uno. Es la difusión lo que amplifica las inestabilidades presentes necesarias para romper la simetría que de otra manera tendrían las reacciones si su espacio de encuentro fuera perfectamente homogéneo; esto es, si no fuera por la difusión la interacción entre los reactantes estables sería ella misma estable. Son una miríada de pequeños cambios los que pueden desestabilizar el sistema:

Se ha supuesto que el sistema se encuentra al principio en un estado homogéneo estable, pero que se ve ligeramente perturbado de este estado por algunas influencias no especificadas, como el movimiento browniano o los efectos de las estructuras vecinas o ligeras irregularidades de su forma. Se supone también que se producen cambios lentos en las velocidades de reacción (o, acaso, en las difusibilidades) de los

dos o tres morfógenos considerados. Esto podría deberse, por ejemplo, a cambios en la concentración de otros morfógenos que actúan en el rol de catalizador o de suministro de combustible, o a un crecimiento concurrente de las células, o a un cambio de temperatura. Se supone que tales cambios sacan al sistema del estado estable. Los fenómenos cuando el sistema es apenas [just] inestable fueron el objeto particular de la investigación.^{CXV} (Cooper & van Leeuwen, 2013; A. M. Turing, 1952, p. 717)

A su vez, como mencionamos ya, clave para el tratamiento matemático es el supuesto de linealidad, que sólo se vuelve no-lineal en el momento instantáneo de interacción para luego continuar siendo tratado como lineal:

Para que el problema fuera matemáticamente tratable, fue necesario suponer que el sistema nunca se desviaba mucho de la condición homogénea original. Esta suposición se denominó “suposición de linealidad” porque permitía sustituir las funciones generales de velocidad de reacción por otras lineales. Esta suposición de linealidad es muy importante. Su justificación reside en el hecho de que es de esperarse que los patrones producidos en las primeras etapas cuando es válida tengan una fuerte similitud cualitativa con los que prevalecen en las etapas posteriores cuando no lo es.^{CXVI} (Cooper & van Leeuwen, 2013; A. M. Turing, 1952, p. 717)

La última oración es clave desde una lectura epistemológica. Atento al hecho de la diferencia existente entre el proceso subyacente al fenómeno y la simplificación a la que recurre el modelo, la justificación que sugiere Turing se apoya en que la clase de observables que generará el modelo corresponden cualitativamente a aquellos que se conocen del fenómeno en sí. Dicho de otra manera, una de las columnas en las que se apoya la justificación de cualquier modelo es aquella que conecta a los patrones que, desde un *modelo de observación* particular, se pueden tildar de equivalentes.¹³ Así, pese a las diferencias en términos de la estructura misma del modelo con otros modelos propuestos por Turing a lo largo de su vida, hay una similitud crucial en términos de la metodología empleada para justificar el uso de modelos altamente idealizados; de hecho creo que es una similitud que se puede interpretar como análoga a la del Test de Turing, como comenté en el capítulo 4 y que exploro en términos de abstracciones. Estrategias de justificación de este tipo son claves de análisis para los contextos de construcción y evaluación de modelos, no solo en sistemas complejos.¹⁴

¹³Lo cual me recuerda a un pasaje de von Neumann: “Otro buen ejemplo es el fenómeno de la turbulencia en el caso viscoso, en el que se descubre de repente que las soluciones realmente importantes de un problema que tiene una simetría muy elevada no poseen esa simetría. Desde un punto de vista heurístico, lo importante no es encontrar la solución más sencilla del problema, sino analizar estadísticamente ciertas grandes familias de soluciones que no tienen nada en común entre sí, salvo ciertos rasgos estadísticos (J. Neumann & Burks, 1966, p. 34).^{CXVII}”

¹⁴Entre pasillos, se suele escuchar una anécdota atribuida a Turing: alguien le habría preguntado si su modelo de morfogénesis podía explicar las rayas de una cebra, a lo que contestó que eso era muy fácil, lo difícil era explicar la parte del caballo.

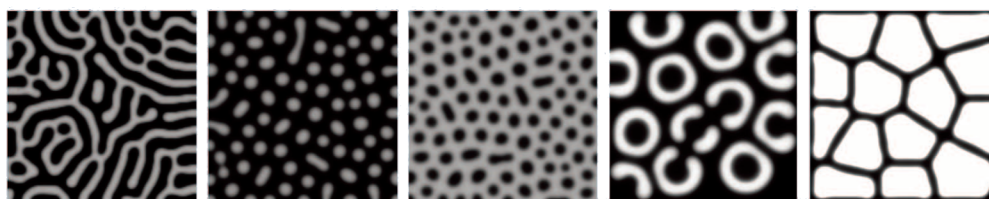


Figura 6.5: Simulaciones de patrones de Turing en 2 dimensiones. Las ecuaciones son las mismas en todos los casos, con pequeñas variaciones en los valores de los parámetros. Figura 2B de (Kondo & Miura, 2010, p. 1618)

Los modelos de reacción-difusión “al estilo Turing” continúan mostrando su fertilidad epistémica en la actualidad, con aplicaciones en muy diversas áreas; solo para mencionar algunos ejemplos: en embriología, como parte del mecanismo de acción de los genes *hox* (Sheth y col., 2012), en el crecimiento de un cristal microscópico de bismuto (Fuseya y col., 2021), en el diseño biológicamente inspirado de filtros de agua (Tan y col., 2018) y, quizás un tanto más especulativamente, para explicar la estructura y propagación del material de un disco galáctico (Smolin, 1996). La literatura filosófica ha visto con entusiasmo el reinterés en los modelos de morfogénesis propuestos por Turing y sus derivados, entre los que puedo destacar la reciente contribución de Gelfert (2018), quien ve en ellos una instancia de modelos exploratorios (en lugar de representacionales) y Rodríguez (2015), quien además de una lectura detallada del artículo de Turing, hace una reflexión del rol y la evolución de los modelos matemáticos en las exploraciones teóricas concernientes a la forma en biología. Claro que entre otros modelos importantes para el estudio de los sistemas complejos que fueron propuestos en la misma época, debemos destacar el de Hodgkin y Huxley (1952) —quienes hacen su modelo con un sistema de ecuaciones de reacción-difusión, en este caso para dar cuenta de la difusión del potencial eléctrico en el axón de un calamar (Lamberti & Rodríguez, 2007)—.

Patrones similares a los de Turing (en una escala temporal mucho menor) se pueden observar en la conocida reacción de Belousov–Zhabotinsky (BZ), instancia de una clase de reacciones que crean osciladores no lineales y que han sido uno de los objetivos perseguidos por la modelización en la termodinámica de no-equilibrio. En una curiosa conexión con Turing, recientemente Dueñas-Díez y Pérez-Mercader (2019) han mostrado cómo construir una computadora química Turing-completa utilizando como “procesador” una reacción BZ.

6.3. Autómatas celulares

Los autómatas celulares representan una interesante familia de modelos sobre la que se puede explorar con nueva luz una serie de problemas filosóficos tradicionales, a la vez

que pone de manifiesto nuevos problemas. En lo que sigue, me limito a comentar algunos aspectos concernientes a estos modelos como un espacio de exploración de patrones “de alto nivel” gracias a los cuales se podrían encontrar propiedades que comparten sistemas físicos de muy distinta naturaleza y a adelantar algunos puntos sobre la emergencia que son tratados con mayor precisión conceptual en el capítulo siguiente. En el proceso, los autómatas celulares, vistos como un caso particular de los denominados “modelos basados en agentes”, ilustrarán también la importancia que tienen como *modelos de modelos* y la necesidad de comprender mejor el rol que las abstracciones —vistas como *encapsulaciones* de procesos— y su consecuente jerarquía tienen tanto para el funcionamiento como para la descripción de sistemas complejos.

En sentido estricto, los autómatas celulares son un capítulo dentro de la gran área de la ciencia de la computación llamada usualmente teoría de autómatas, con la clara relación que ella tiene con el estudio general de las propiedades de los lenguajes formales. Esto, de hecho, convierte a los mismos autómatas celulares en una forma de estudiar problemas tanto matemáticos como conceptuales en torno a la misma noción de computación y ha sido una fuente de inspiración para comprender algunos de los aspectos físicos que estarían tanto detrás de la computación en sí como de la misma posibilidad de dar descripciones computacionales de fenómenos físicos. En esta investigación ya nos hemos encontrado con algunos de los trabajos pioneros en esta área, particularmente en la discusión de algunos puntos centrales de la *Introducción a la cibernética* de Ashby (1956), en donde puede apreciarse, a su vez, la íntima conexión de ese campo con el estudio general de los sistemas dinámicos. Una definición o caracterización usual de un autómata A , es en términos de una 5-tupla $A = \langle \Sigma, \Gamma, Q, \delta, \lambda, \rangle$, en donde Σ es un conjunto finito de símbolos que constituyen el alfabeto en el que se codifican los valores de entrada para el autómata, mientras que Γ es el conjunto homólogo para los valores de salida. Q es el conjunto de estados posibles del autómata, de cuya cardinalidad dependerá si el autómata puede considerarse finito o no. Es importante notar cómo en la postulación de Q ya se encuentran una serie de supuestos conceptuales; principalmente en torno a si los estados de la máquina son ónticos o epistémicos, lo que impactará, en última instancia, en el tipo de garantía que se puede obtener al utilizar esta clase de modelos formales para sistemas físicos. Como sugiero en el capítulo siguiente, pero como ya puede dejarse entrever por los señalamientos hechos hasta el momento, ni la imputación de la relación de modelado ni el conjunto de estados son simples, y mucho menos libres de varias clases de teorías que tenga el agente epistémico que intenta su descripción. Continuando con la definición general clásica de autómatas, δ es una función de transición $\delta : Q \times \Sigma \rightarrow Q$ que establece la conexión entre los elementos del conjunto de valores de entrada con los estados “internos”; mientras que λ es el equivalente para mapear los estados internos (resultantes de la dinámica subyacente por δ) con los símbolos del conjunto de valores posibles de salida: $\lambda : Q \times \Sigma \rightarrow \Gamma$.

Es con restricciones particulares sobre los elementos de estos conjuntos que nos encontramos frente a los denominados autómatas celulares (AC), cuya “celularidad” proviene de la semejanza que los estados tienen con las celdas que el mismo Robert Hook vio con su microscopio y que llevó a bautizar a las células con dicho nombre. Dispuestas en una grilla de dimensionalidad finita, cada una de estas células o celdas puede estar en una serie de estados, siendo el caso más simple que los estados sean posibilidades binarias. La función de transición, muchas veces llamada la regla del autómata, deberá definir el estado en el que se encontrará una célula particular en el momento siguiente, de acuerdo al estado de las células con las que interactúa; que suelen ser descritos como los vecinos próximos de las células. Gran parte del interés en los CA radica en el hecho de que pese a que las interacciones entre las celdas sean extremadamente locales y por definición se excluyan las interacciones de largo rango o alcance, bajo algunas reglas se puede observar la aparición o emergencia de *patrones globales* o *macropatrones* con propiedades muy interesantes.

Vida artificial, o autómatas que se creen células

Quizás parte de la culpa de la identificación de las células de los autómatas celulares con su obvio análogo biológico se deba a que su introducción en los estudios de la complejidad fue de ellas como modelos posibles de un fenómeno tan evidentemente biológico que hasta se lo suele tomar como la característica fundamental para hablar de un organismo vivo: su capacidad de auto-reproducirse o de hacer copias de sí mismo. Fue tras una sugerencia de Stan Ulam —que en aquel entonces estaba trabajando sobre cómo modelar la estructura reticular de los elementos cristalinos— que von Neumann decide abandonar su primer modelo cinemático (ver p. 216) y concentrarse en describir un autómata celular de dos dimensiones que sirva como prueba de la posibilidad de una descripción *maquinica* de un sistema que se auto-reproduce, con la auto-reproducción ahora entendida como la duplicación de un patrón global en el “ambiente” de un autómata celular.¹⁵ A su vez, y como ya remarcamos también anteriormente, el modelo de replicación tenía como objetivo poder dar cuenta no solo de la replicación misma sino de identificar una serie de condiciones necesarias para que el proceso de replicación pueda soportar alguna clase de evolución. Es decir, el constructor no debería estar limitado a efectuar los cambios en el nuevo ambiente que llevan a la aparición en ese ambiente de una copia del original, sino que debe poder seguir “instrucciones de ensamblado” que den lugar a una copia incluso con alguna variación que luego pueda ser recodificada y que las copias que se hagan de esa copia tengan

¹⁵Otro punto a destacar es la generalidad de la estrategia de discretización como técnica de cálculo y de abstracción. Ulam y von Neumann aprovecharon la idea para simplificar el cálculo en mecánica de fluidos introduciendo grupos complejos de moléculas que se comportaran de acuerdo al comportamiento de sus vecinos en una estructura reticular; algo que debería hacernos reflexionar sobre la aplicación de algunas técnicas de mecánica estadística en otras áreas de investigación, al mismo tiempo que debe hacerlo sobre la importancia de generar abstracciones sobre el comportamiento de grupo de entidades para describir su patrón global.

ellas mismas la variación. Ahora bien, la variación no debe darse únicamente cuando hay un error en el proceso de construcción, sino que también puede darse mediante modificaciones muy pequeñas —equivalentes a mutaciones puntuales— en la parte del ambiente que funciona como plantilla —y “modelo codificado”— del auto-reproductor. El constructor universal es universal con respecto al ambiente en el que se encuentra, es decir, sus operaciones están definidas con respecto a lo que es posible —y, por complemento, a lo que es imposible— en el ambiente en el que opera, por lo que puede al mismo tiempo ser visto como un modelo del ambiente, en el que se presta tanto a intervenir para conseguir los recursos para la construcción como para almacenar la información necesaria —en forma de patrones de elementos de dicho ambiente— que debe hacer de memoria de trabajo para la construcción de la copia. La construcción, en tanto implicará un cambio significativo entre los estados del ambiente, define una computación particular:

Una comparación entre la computadora universal M_u y el constructor universal M_c muestra que en la estructura celular de von Neumann, la computación y la construcción son actividades similares. Tanto M_c como M_u son procesadores de datos finitos que pueden interactuar con una cinta indefinidamente extensible. (Burks, en J. Neumann & Burks, 1966, p. 294)

Pese a esta extremadamente simple presentación de los autómatas celulares, aquí ya podemos observar una de las formas que tendrá la conceptualización sobre la emergencia: la determinación de lo posible, bajo la forma de reglas de transformación de los estados del particular mundo al que da lugar el autómata —recordemos que el autómata no se identifica con el patrón espacial y temporal, sino con el espacio que permite su desarrollo bajo las restricciones de las reglas— de ninguna manera implica que del conocimiento de dichas reglas se pueda predecir con precisión qué clases de patrones tendrán lugar partiendo de ciertas configuraciones originales, donde predecir se entiende conocer sin llevar a cabo una *implementación* de la secuencia completa de estados. Y, quizás tanto más importante, no determinar *a priori* qué clase de comportamientos globales podrán tener dichos patrones cuando se los tome a ellos mismos como unidades autónomas. En otras palabras, no es posible determinar desde el mero conocimiento de las reglas qué clase de comportamientos *globales* son posibles con respecto a *todas* las condiciones iniciales posibles, pero dichas transformaciones pueden ser aprovechadas por otros sistemas o incluso por partes del mismo autómata para realizar una *computación*. De esta manera, la computación puede verse aquí como la *extracción de significado* para y por un agente epistémico particular de las transformaciones de estado que puede observar en un mundo al que tiene acceso en tanto observador y, en muchos casos, sobre el que puede intervenir por intermedio de los acoples con los que pueda generar interfaces con el ambiente en el que las transformaciones ocurren.

Clave aquí es que incluso cuando el agente epistémico es él mismo susceptible de una descripción computacional, el acople entre los dos sistemas computacionales es tan

inderterminable desde el punto de vista de la descripción de las reglas de transformación de los estados de cada celda porque, en efecto, bajo tal descripción se pierde la abstracción de los procesos que requerían de la abstracción inducida por el acoplamiento parcial de la interfaz. Estas clases de abstracciones, que tienen una suerte de lugar natural en la creación de sistemas computacionales artificiales complejos, son tanto ontológica como epistémicamente necesarias para el surgimiento de un sistema complejo como para la posibilidad de ganar conocimiento sobre ellos; lo que exploro con más detalle en las secciones 7.2 y 7.3. Por el momento, deseo explorar dos puntos que considero epistémicamente relevantes del trabajo con autómatas celulares, de la mano de algunas de las exploraciones subsiguientes de esta clase de universos modelo introducidos por von Neumann y que presentan, a la vez, una suerte de plataforma en la que poner a prueba y explorar intuiciones relativas a problemas epistemológicos.

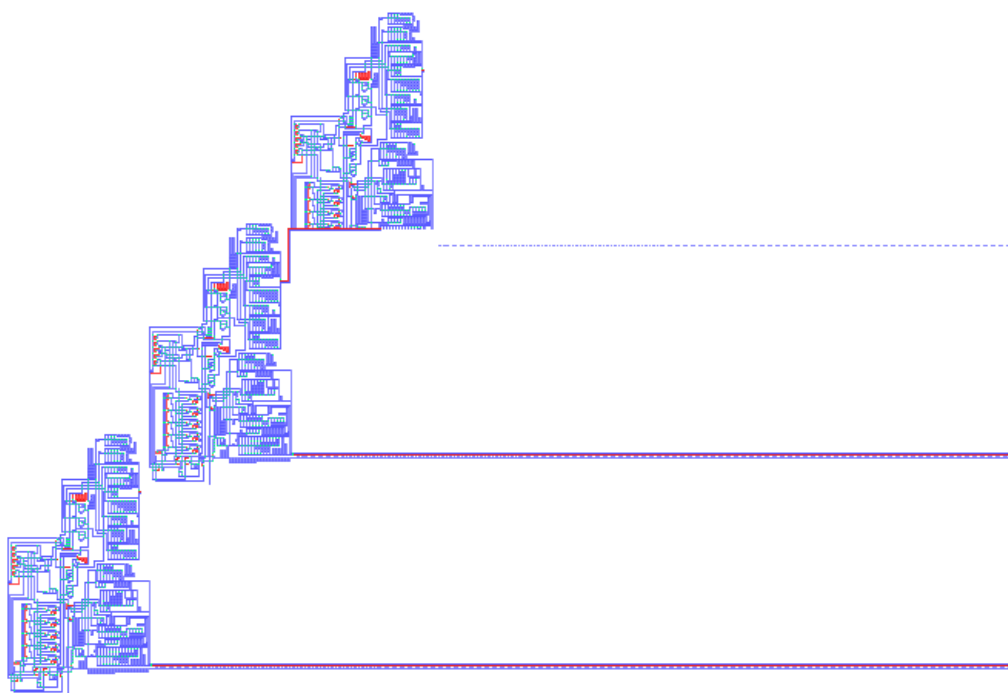


Figura 6.6: Primera implementación de un constructor universal basado en el modelo de von Neumann. Estrictamente se trata de un autómata celular de 32 estados (en lugar de los 29 del modelo original), que aunque equivalente, simplifica considerablemente la estructura necesaria en el autómata para lograr la replicación. La banda que surge de la estructura y se extiende hacia la derecha es la "cinta" que el autómata construye en el ambiente en base a su propia estructura y que luego puede leer para producir su copia. El modelo es capaz de evolución en la próxima generación, tanto un cambio en el patrón de la cinta o del autómata propiamente dicho impactará en la estructura de la copia resultante. (Pesavento, 1995)

El (otro) juego de la vida

La exploración teórica más sistemática y profunda de los autómatas celulares luego de la obra de von Neumann editada y completada por Burks, fue la publicación de Edgar F. Codd (1968), basada en su tesis doctoral de 1965, en donde demostró que incluso un autómata celular con 8 estados —significativamente menos a los 29 del original de von Neumann— eran suficientes para su auto-reproducción.¹⁶ Pero el verdadero interés por esta clase de sistemas aparcería recién en 1970 gracias a uno todavía más simple aunque igual de capaz, y que despertaría una comunidad de académicos y entusiastas que continúa dedicada a su estudio. El “Juego de la vida” fue formulado por John Conway y “popularizado” por Martin Gardner, tras escribir sobre él en la columna que entonces redactada para la revista *Scientific American*. Se trata de uno de los autómatas celulares más conocidos, y que introdujo a muchos a explorar el campo que luego se daría a llamar “Vida artificial”. A diferencia del autómata celular originalmente pensado por von Neumann, que también es de dos dimensiones, el Juego de la vida se destaca por la simplicidad de los estados que pueden tener las celdas, ya que en su formulación original y usual se reduce a simplemente a estar “encendidas o vivas” o “apagadas o muertas”. Las reglas de evolución del sistema también son extremadamente simples. La evolución temporal de las celdas está dada por el cambio simultáneo de todas ellas, de acuerdo a si

- Una célula muerta o apagada cuenta en $t(n - 1)$ con exactamente 3 células vecinas vivas, se enciende o nace en el instante t_n siguiente.
- Una célula viva con 2 o 3 células vecinas vivas sigue viva en t_n , en otro caso muere (metafóricamente, por “soledad” o por “superpoblación”).

Pese a la simplicidad de las reglas, incluso bajo un escenario en que las dimensiones del autómata no crecen indefinidamente, no es factible determinar su comportamiento *global* a largo plazo ni predecir qué clase de patrones pueden ser observados mediante un proceso de cálculo que sea intrínsecamente más corto que lo que puede denominarse el proceso de simulación, esto es, llevar a cabo paso a paso las transformaciones que indican las reglas en una condición inicial determinada, y luego volver a hacerlo con el estado o condición del ambiente resultante. Esta complejidad intrínseca en el comportamiento de un autómata celular definido por reglas de transformación tan sencillas, ha llevado a algunos filósofos a reflexionar sobre estos patrones como un caso de comportamiento emergente, como es el caso de Mark Bedau (2008). Para ello, se apoya en una distinción entre dos clases de simulaciones, las explícitas y las “por atajo”, que bien podríamos llamar *compresibles*:

¹⁶Si bien no se dedicó a continuar esta línea de investigación de manera directa, creo que en la forma en la que se aproximó a los sistemas distribuidos y al problema de la integridad de los datos dejan entrever mucho de su trabajo con autómatas celulares. Su modelo de base de datos relacionales y el diseño de lenguajes formales y procedimentales para tratar con ellos le valerían el premio Turing en 1981.

- Simulación explícita: derivación *paso a paso* de las propiedades macro (es decir, los observables o los patrones “de alto nivel”) desde los estados micro que constituyen a la entidad y la simulación refleja la evolución completa de cada uno de dichos estados en cada unidad de tiempo de ejecución.
- Simulaciones por atajo: en algunos casos es posible derivar o predecir el estado futuro de un sistema sin llevar a cabo una simulación explícita, usando por ejemplo una fórmula matemática que “resuma” la dinámica macro.

En su tratamiento del comportamiento emergente en variantes del Juego de la vida, Bedau correctamente diagnostica un problema al que debe enfrentarse cualquier “teoría final de la emergencia”:

La clasificación de los tipos de emergencia supone una distinción entre un nivel micro y un nivel macro, y la cuestión es especificar qué es lo que hace que lo macro emerja de lo micro. Podemos estar interesados en cómo una célula individual para un organismo. Como muestra este ejemplo, un nivel macro en un contexto puede ser un nivel micro en otro; la distinción macro/micro depende del contexto y cambia según nuestros intereses. Además, una jerarquía anidada de niveles macro sucesivamente mayores da lugar a múltiples niveles de emergencia. *Cualquier teoría final de la emergencia debe aclarar cuáles son esos niveles y cómo se relacionan.*^{CXVIII} (Bedau, 2008, p. 157. El énfasis es mío)

Aunque a mi juicio no presenta una solución a dicho problema, toda su argumentación se basa en la posibilidad de hacer una distinción entre niveles micro y macro. Por ejemplo, en su formulación de lo que considera como emergencia débil —en comparación con una emergencia fuerte que estaría más cerca de una posición vitalista en cierto sentido— sostiene que este concepto

se refiere al comportamiento global conjunto [*aggregate*] de los procesos de micro-nivel pero las interacciones de micro nivel están entrelazadas en una red tan complicada que el comportamiento global no tiene una explicación simple.

que inmediatamente lo lleva a la afirmación de que

la idea central detrás de la emergencia débil es que los poderes causales emergentes se pueden derivar de la información del micro-nivel pero sólo de una manera compleja y específica

(Bedau, 2008, p. 160). Aunque Bedau por momentos parece creer que en base a esta definición de emergencia débil puede incluso hablarse de una emergencia *ontológica*, considero que su insistencia en que existe tanto dependencia ontológica como causal de los niveles superiores a los inferiores, mientras que existe una clara independencia o irreducibilidad explicativa, hacen que su posición sea mejor vista como postulando una emergencia epis-

témica. Ahora bien, sí creo que Bedau está en lo cierto en remarcar que hay un límite *computacional* involucrado en nuestra dificultad de predecir el comportamiento futuro de un autómatas celular como el Juego de la vida, que proviene, fundamentalmente, del tipo de computación de la que es capaz este simple sistema, y que también hace en parte a la razón por la que debemos recurrir a simulaciones para comprender a los sistemas complejos, muchas de ellas simulaciones computacionales de las reglas mismas que definen la dinámica del sistema. Es en base a dichos límites computacionales que considero que se puede hacer el pasaje a una afirmación sobre la existencia de emergencia o de comportamiento realmente novedoso en términos ontológicos, aunque atentos al hecho de que desde mi punto de vista toda afirmación ontológica presupone una manera particular de comprender y postular nuestras capacidades epistémicas desde las que se proyectarán dichas afirmaciones.

El Juego de la vida, en virtud de su capacidad de computación universal, en tanto es capaz de simular una máquina de Turing, es esencialmente indecidible, lo que de hecho puede verse como un corolario del problema de la parada, que el mismo Alan A. Turing (1936) introdujo en su resolución del problema de la decisión hilbertiano: dado dos patrones A y B en un autómatas celular capaz de computación universal, no hay un algoritmo mediante el cual se pueda aseverar con certeza que tomando a A como condición inicial, el autómatas produzca B en algún momento de su ejecución o desarrollo.¹⁷

La prueba original de la capacidad computacional del Juego de la vida fue dada por Conway mismo junto a colaboradores en (Berlekamp y col., 1982), mostrando que todos los elementos necesarios postulados en un modelo que ya se sabe que es computacionalmente universal tienen análogos construibles en este autómatas (básicamente, una red de señales, una memoria y compuertas lógicas). Con el tiempo, las exploraciones del universo computacional del Juego de la vida ha permitido la construcción explícita —o implementaciones— de máquinas de Turing y otras arquitecturas computacionales (ver figura).

Si no hubiese una limitación de los recursos disponibles, bien podríamos especular que el Juego de la vida es todavía mucho más capaz de generar alguna forma de vida más similar a la que estamos habituados a pensar con respecto al término “vida”:¹⁸

¹⁷Entiendo por “desarrollo” aquí algo más cercano al término inglés “*unfolding*” que a “*development*”, aunque claramente los dos están relacionados, en cuanto clase de proceso que se *despliega* en el tiempo. En alemán, por ejemplo, puede también hacerse una distinción entre *Entwicklung*, más cercana al contexto evolutivo, y *Entfaltung*, como despliegue o desdoblamiento, si es que no como “manifestación”. Curiosamente, en términos técnicos, la operación contraria a la convolución, que considero una clase de proceso de abstracción.

¹⁸Habría mucho más para decir entre la intrincada relación entre complejidad como característica de algunas entidades o de los sistemas que ellas pueden conformar y la complejidad computacional —en el sentido de la dificultad medida en términos de recursos computacionales necesarios para llevar a cabo un programa— y si bien digo algo más al respecto más adelante, a efectos de esta investigación el tema es más

Al observar la complejidad y variedad aparentemente ilimitadas de los patrones de evolución de [el Juego de la vida], resulta casi imposible dejar de imaginar, junto con Conway, que, si el juego se desarrollara realmente en un entramado infinito, seguramente surgirían verdaderas “formas de vida” vivas, que quizás evolucionarían a su vez hacia “organismos” más complejos y posiblemente sensibles. (Ilachinski, 2001, p. 133)

Ahora bien, creo que estas afirmaciones deben matizarse con la capacidad de un agente epistémico que observa dichos patrones y busca determinar que la clase de transformaciones que ahí ocurren son lo suficientemente significativas como para proceder a la afirmación de la analogía con respecto al dominio de otro campo de conocimiento, como podría ser el de la biología. Estas posibilidades sugeridas por modelos tan sencillos es lo que en parte llevó a la aparición del campo de estudio denominado como vida artificial, de alguna manera la búsqueda de “patrones comunes” en sistemas cuyos substratos últimos —aquellas últimas entidades que hagan a la “implementación” de dicho patrón— sean de naturaleza distinta, dando lugar a, entonces, “químicas” e incluso “vidas” distintas. Estaríamos frente a una descripción en la que los detalles particulares de la implementación son dejados de lados porque no hacen a la diferencia del comportamiento general y abstracto que se está explorando. En la vida artificial, como subconjunto de las ciencias o disciplinas que estudian los sistemas complejos, puede verse cómo todavía hay dejes de las aspiraciones a una teoría general de clases de comportamiento que permita transferir conocimiento entre dominios por medio de la detección o postulación de regularidades generales, cercanas a las propuestas originales de Bertalanffy o incluso de la matemática biológica *à la* Rashevsky. Sirvan las siguientes citas de Christopher Langton, uno de los pioneros del campo de la vida artificial, como ejemplos del tipo de objetivos que caracterizaron desde sus comienzos a esta área disciplinar:

La vida artificial es el estudio de sistemas artificiales que exhiben comportamiento que es característico de los sistemas vivos naturales. Es la búsqueda de explicar la vida en cualquiera de sus posibles manifestaciones, sin restricción a los ejemplos particulares que han evolucionado en la tierra. Esto incluye: experimentos biológicos y químicos, simulaciones por computadora y esfuerzos puramente teóricos. Los procesos que ocurren a escalas moleculares, sociales y evolutivas están bajo investigación.

La meta última del campo de la vida artificial sería la creación de la ‘vida’ en algún otro medio, idealmente un medio *virtual* en el que la esencia de la vida se haya abstraído de los detalles de su implementación en *cualquier* hardware en particular. Nos gustaría construir modelos tan parecidos a la vida que dejaran de ser *modelos* de la vida para convertirse en *ejemplos* de la vida misma. (Langton, 1986, p. 147. Énfasis en el original)

Aunque el estudio de la vida artificial puede considerarse como el estudio de siste-

bien un punto de llegada para otro comienzo que un punto inicial, aunque como ya se habrá notado, el tema ha estado presente entre las sombras y las premisas desde muy temprano, pero de momento continuaré evitando su ataque frontal.

mas artificiales que presentan comportamientos característicos de los sistemas vivos naturales, no debe verse únicamente como un intento de simular los sistemas vivos tal y como se dan en la 'naturaleza' tal y como la conocemos. Por el contrario, debe verse como un intento de 'abstraer de los sistemas vivos naturales su forma lógica'. En este sentido, debe verse como el estudio no sólo de la vida orgánica, sino de la vida en principio. (Langton, 1986, pp. 147-148)

Podría así bien decirse que la vida artificial busca entender a la vida *como puede ser*, no sólo como lo es en las instancias particulares a las que tenemos acceso de momento para observar o podemos crear. Mucho ha cambiado en el estudio de la vida tanto natural como artificial desde que la vida artificial emergió como campo de investigación, y aunque todavía no hemos sido capaces de encontrar una lista de condiciones necesarias y suficientes para caracterizar a lo vivo, una rápida mirada a la historia reciente de los campos sugiere una suerte de convergencia de las metáforas computacionales sobre la vida, si es que no una tendencia a la literalización de dicha metáfora, en la que tanto la noción de qué es vida como la de qué entendemos por computación se ha visto alterada y retroalimentada; casi de la misma manera en la que von Neumann, entre otros, habían predicho cuando comenzaron a mirar a la naturaleza de lo vivo como una fuente de inspiración sobre cómo diseñar computadoras que fueran, si no más rápidas que las postuladas hasta entonces, más eficientes y más robustas:

En otras palabras, los organismos naturales están contruidos para que los errores sean lo menos evidentes, lo más inofensivos posible. Los autómatas artificiales están diseñados para que los errores sean lo más evidentes, lo más desastrosos posible. La razón de esta diferencia no está muy lejos de encontrar. Los organismos naturales están lo suficientemente bien concebidos como para poder funcionar incluso cuando se producen fallos. Pueden funcionar a pesar de las disfunciones, y su tendencia posterior es eliminarlas. Un autómata artificial podría diseñarse ciertamente para poder funcionar con normalidad a pesar de un número limitado de disfunciones en ciertos ámbitos limitados. Sin embargo, cualquier mal funcionamiento representa un riesgo considerable de que se haya iniciado algún proceso de degeneración general en la máquina. Por lo tanto, es necesario intervenir inmediatamente, ya que una máquina que ha empezado a funcionar mal rara vez tiene tendencia a restablecerse, y lo más probable es que vaya de mal en peor. Todo esto nos lleva a una cosa. Con nuestros autómatas artificiales nos movemos mucho más en la oscuridad de lo que la naturaleza parece estar con sus organismos. Estamos, y aparentemente, al menos en la actualidad, tenemos que estar, mucho más "asustados" por la aparición de un error aislado y por el mal funcionamiento que debe haber detrás. Nuestro comportamiento es claramente el de un exceso de precaución, generado por la ignorancia.^{CXIX} (von Neumann, 1956, p. 412)

Lo que creo que emerge de esta mirada es la necesidad de integrar las "desviaciones" del comportamiento esperado —esperado en base a la simplicidad de nuestros modelos— de la misma manera en que la naturaleza —especialmente en la biología— parece tender a

crear sistemas modulares cuyas recombinaciones pueden dar lugar a fenómenos radicalmente distintos, aquello que bajo un punto de vista es un error, en una mirada un tanto más integradora es una propiedad emergente de la organización y que puede ser aprovechada como un punto de apoyo para generar otras novedades más y más radicales. Hoy el campo de la vida artificial es un ámbito el que las simulaciones tienen un rol protagónico, aunque en contraste con las intenciones originales, se trata de una integración de modelos parciales para distintas clases de procesos que ocurren por ejemplo en una célula prototípica (Hutchison y col., 2016; Thornburg y col., 2022), mostrando así una profunda retroalimentación con el área de estudio que suele llamarse biología sintética. Cada vez más técnicas de inteligencia artificial se integran para automatizar el proceso de diseño de un organismo que luego se implementa “sintéticamente” (ver, p. ej. Kriegman y col., 2020).

Me atrevo desde ya a decir que el mundo no es complejo en virtud de la simplicidad de nuestros modelos, sino que nuestros modelos son simples en virtud de la complejidad de la naturaleza; pero así como la combinación de lo simple da lugar a lo complejo en el plano ontológico, lo mismo ocurre en nuestro plano epistémico cuando pretendemos conocer la naturaleza, y esa comprensión —local, algo difusa y en constante cambio— solo se logra cuando nuestros modelos simples se integran ellos mismos y podemos ver cómo se relacionan unos con otros.

Autómatas celulares esenciales

Una “tercera etapa” que se puede apreciar en la investigación de autómatas celulares y su relación con el estudio de sistemas complejos son una serie de proyectos nucleados alrededor de los trabajos de Stephen Wolfram, que comenzaron en la década de 1980 y en distintas variantes continúan hasta la actualidad. Solo deseo en lo que sigue destacar algunas características de esta línea de trabajo, tomándolo como uno de tantos ejemplos de lo que presupone una línea de “investigación empírica” en el trabajo con sistemas formales que requieren una implementación particular para ser estudiado y de ellos como un caso de *modelos de modelos*. Como he señalado anteriormente, y aunque no sea el objeto principal de esta tesis, sí considero esencial para cualquier aproximación epistemológica a campos de conocimiento que hagan uso de distintas clases de sistemas formales (ya sean altamente específicos o no sean más que un lenguaje natural regimentado o aumentado por alguna teoría formal particular como puede ser la teoría de conjuntos) notar la tensión esencial que aparece en todos estos campos entre lo que podríamos llamar una “exploración interna” del lenguaje y su capacidad tanto representacional como inferencial para llevar a cabo un estudio del tipo de fenómeno (natural, formal o artificial) para el que se lo pretende usar, y los casos en los que el lenguaje o sus métodos internos asociados no resultan suficientes para llevar a cabo dicha tarea por lo cual se debe recurrir a otros medios de creación de representaciones que, quizás con lo que los matemáticos tilden de

“un tanto menor rigor”, puedan servir como medio de estudio de las propiedades de un modelo particular o incluso como plataforma para la generación de pruebas formales.

Simple casos que me llevan a hacer estas consideraciones son aquellas en las que la naturaleza de lo que se está estudiando mediante un lenguaje formal requieren, por ejemplo, de integración numérica o computacional o directamente de alguna clase más sofisticada de exploración del espacio de posibilidades por fuerza bruta; casos en los que normalmente la fuerza bruta para la exploración debe ser orientada por medio de heurísticas dada la clase de complejidad en la que el problema se encuentra. Probablemente dentro de este gran universo, una de las pruebas más conocidas es la del teorema de los cuatro colores, prueba que dieron originalmente Appel y Haken (1977) y que suscitó una “pequeña crisis filosófica” en la comunidad matemática, dado que se trató de uno de los primeros casos en que la prueba no era “inspeccionable” por expertos humanos (Swart, 1980; Teller, 1980; Tymoczko, 1979), casi presagiando algunos de los debates que se darían luego en otros ámbitos que implican simulaciones computacionales —y actualmente inteligencia artificial— en los que se pasará a hablar de su opacidad epistémica (Humphreys, 2004). Con conexiones más directas al ámbito del estudio de los sistemas complejos, otras pruebas relevantes para destacar son la prueba que dio O.E. Lanford (1982) acerca de la conjetura de clases de universalidad que había propuesto Michel Feigenbaum unos años antes (Feigenbaum, 1978, 1979) También podríamos destacar la prueba al problema 14 de Smale acerca de la caoticidad del atractor de Lorenz y algunas de las aplicaciones de la teoría KAM (Figueras y col., 2017).¹⁹

Durante gran parte de la década de 1980, Stephen Wolfram se encargó de explorar de manera sistemática varios sectores del universo computacional que abrieron los autómatas celulares, tanto como modelos de otros modelos, con relativa ventaja en términos de la eficiencia con respecto al costo computacional de la resolución de los modelos originales, y de los autómatas ellos mismos como modelo del comportamiento de sistemas complejos. Es interesante notar cómo Wolfram, en el prefacio del volumen publicado con trabajos en uno de los primeros *workshops* organizados para presentar avances sobre el estudio de lo que hoy tomamos como sistemas complejos,²⁰ considera a los mismos autómatas celulares como una idealización de ecuaciones diferenciales parciales, en las que el tiempo y el espacio se han discretizado y el conjunto de valores posibles para las variables dependientes se toma como finito. Se tornan así modelos discretos para sistemas homogéneos en los que las interacciones son locales y que pueden *interpretarse* en términos de

¹⁹Dicho sea de paso, una teoría que no ha generado la cantidad de discusión filosófica que se merece, probablemente por la dificultad técnica que rodea a su formulación. Probablemente (Dumas, 2014) sea la introducción más amigable que se puede consultar. Algo similar, curiosamente, puede decirse de otra teoría abreviada con tres letras y que también incluye a Kolmogorov, como lo es la AIT por las siglas en inglés de *Algorithmic Information Theory* o Teoría Algorítmica de la Información en español (TAI). Sobre esta, ver especialmente (Chaitin, 2007), aunque en esta tesis aparecerá brevemente en la página 370.

²⁰Comento más sobre este evento y otros en la última sección de este capítulo.

computaciones; esto es, modelos de modelos:

La naturaleza discreta de los autómatas celulares permite establecer una analogía directa y significativa entre los autómatas celulares y las computadoras digitales. La configuración inicial de un autómata celular se corresponde con el “programa” y los “datos iniciales” de una computación. El “procesamiento” se produce a través de la evolución temporal de un autómata celular, y los “resultados” del cálculo vienen dados por las configuraciones obtenidas. Mientras que las computadoras electrónicas digitales habituales procesan los datos en serie, unos pocos bits a la vez, los autómatas celulares procesan un gran (o infinito) número de bits en paralelo.^{CXX} (Wolfram, 1984b, p. vii)

Nótese el lenguaje con el que se describen los resultados de un trabajo sobre la aplicación de modelos de autómatas celulares en hidrodinámica, con énfasis en las ventajas de la implementación:

Este trabajo ha aportado pruebas de que los autómatas celulares simples pueden reproducir las características esenciales del comportamiento termodinámico e hidrodinámico. Estos modelos entran en contacto con los resultados de la teoría de los sistemas dinámicos y la teoría de la computación. También deberían dar lugar a simulaciones prácticas eficientes, especialmente en ordenadores de procesamiento paralelo. Los autómatas celulares pueden reproducir potencialmente el comportamiento descrito convencionalmente por ecuaciones diferenciales parciales en muchos otros sistemas cuya dinámica intrínseca implica muchos grados de libertad sin gran disparidad de escalas.^{CXXI} (Salem & Wolfram, 1985, p. 3)

En su exploración, Wolfram se concentró en lo que denomina autómatas celulares esenciales, aquellas 256 combinaciones resultantes de todas las reglas de evolución posibles para una celda binaria y cuyo valor siguiente se puede expresar en términos del valor de tres celdas vecinas en el instante de la evaluación. Sobre la evolución de estos autómatas celulares, llevó a cabo una taxonomización de las clases de comportamiento que podía observarse, sugiriendo la existencia de cuatro tipos de autómatas:

Diferentes estados iniciales con una determinada regla de autómata celular dan lugar a patrones que difieren en los detalles, pero que son similares en cuanto a la forma y las propiedades estadísticas. Diferentes reglas de autómatas celulares producen patrones muy diferentes. No obstante, un estudio empírico sugiere que pueden identificarse cuatro clases cualitativas, que dan lugar a cuatro formas límite características:

- (1) estado espacialmente homogéneo;
- (2) secuencia de estructuras simples estables o periódicas;
- (3) comportamiento caótico aperiódico;
- (4) estructuras localizadas complicadas, algunas de las cuales se propagan.

Todos los autómatas celulares dentro de cada clase, independientemente de los de-

talles de sus reglas de construcción y evolución, muestran un comportamiento cualitativamente similar. Esta universalidad debería hacer que los resultados generales sobre estas clases sean aplicables a una amplia variedad de sistemas modelados por autómatas celulares. (Wolfram, 1984a, p. 419)

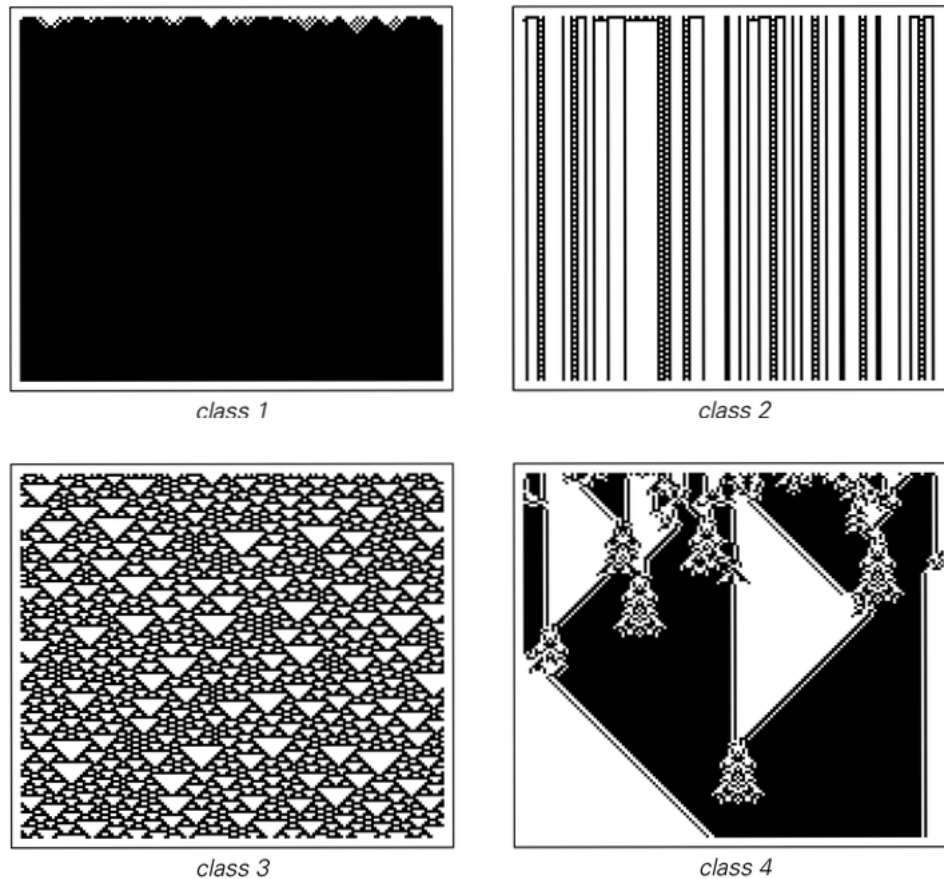


Figura 6.8: Las cuatro distintas clases de comportamiento en las que se pueden clasificar los 256 autómatas celulares elementales. En la clase 1 se encuentran aquellas cuyo comportamiento culmina rápidamente en un punto fijo, con todas las celdas encendidas o apagadas. De clase 2 son aquellas que generan un ciclo, un mismo patrón que se repite constantemente. Las de la clase 3 no parecen presentar ciclos sencillos, sino que parecieran ser caóticas. A las de la clase 4 Wolfram las llama complejas, dado que por momentos presentan estructuras que se repiten o mantienen, pero al mismo tiempo algunos de sus partes parecen caóticas. La regla 110, que se ha demostrado ser capaz de computación universal, está en esta 4ta clase. (Wolfram, 2002, p. 231)

El punto más significativo a resaltar es que, como muchas propiedades que se dicen de un sistema, su naturaleza y su complejidad son nociones relativas a la capacidad modeladora que tenga un observador. Como tal, solo en caso de que se pueda dar una des-

cripción acabada y universal de lo que significa ser un agente modelador, se podría decir de manera rotunda si para cualquier agente posible una propiedad es un emergente o no, como lo es un patrón global en un autómata celular. La dificultad aquí radica en que decir que una descripción de un agente es una buena descripción no es una cuestión formal, sino empírica. Algo similar a lo que ocurre con la Tesis de Church-Turing, que será una de las bases del capítulo siguiente para decir que, en última instancia, la pregunta por si X es una propiedad emergente relativa a un observador es, estrictamente, una pregunta indecidible, como lo es determinar si una teoría o un modelo es “verdadero” sin calificativos. Ahora bien, al menos parcialmente esta conclusión sí puede verse como una consecuencia del trabajo con autómatas celulares, en tanto en muchas ocasiones pueden servir como un espacio de pruebas matemáticamente tratable para ciertas intuiciones acerca de lenguajes formales y de sus límites para capturar las interacciones de agentes en el tiempo, especialmente cuando se trata de ambientes altamente idealizados.

Si bien el interés por los autómatas celulares como medio para modelar sistemas complejos no tiene ya el ímpetu que se observaba en la década de 1980 y comienzos de la década siguiente, todavía continúan constituyendo una fértil clase de modelos, como lo demuestra la variedad de campos en los que se continúan empleando; destacándose recientemente su uso para optimizar flujos de tránsito vehicular y peatonal en ubicaciones de alta densidad poblacional (p. ej. Zapotecatl y col., 2017). Prueba de la amplitud de campos a los que se continúan aplicando son las muy variadas publicaciones dedicadas (p. ej. Hoekstra y col., 2010; Schiff, 2011) y los trabajos presentados en las conferencias dedicadas, especialmente la bienal *International Conference on Cellular Automata for Research and Industry* (ACRI) que se desarrolla cada dos años desde 2002.²¹ Dentro de este gran universo de modelos, encuentro destacables para pensar acerca de la naturaleza de los sistemas complejos y de las distintas maneras en las que se puede decir que llevan a cabo una computación los trabajos de David Ackley, quien dentro la comunidad de vida artificial puede considerarse el atractor más fuerte con respecto a una noción de computación robusta como había sugerido von Neumann (Ackley, 2013; Ackley & Williams, 2011). A propósito, Ackley funcionará ahora como interfaz a la última clase de modelos que pretendo explorar en este breve repaso, ya que durante la década de 1980 estuvo muy involucrado en otra comunidad que es heredera de los trabajos tardíos de Turing y von Neumann: el estudio de las redes neuronales artificiales.

6.4. Redes neuronales “artificiales”

Von Neumann fue uno de los primeros que logró ver la capacidad que tenían las recientemente formuladas neuronas artificiales del estilo McCulloch-Pitts para hacer mucho más que para lo que fueron planteadas originalmente. Además de poder servir para instanciar

²¹Cuyas actas se pueden consultar en la serie *Celluar Automata*:

un cálculo lógico en una arquitectura (léase “en una organización”) inspirada en el cerebro humano —y por tanto servir como evidencia de que lo que realmente estaría haciendo el cerebro humano es precisamente instanciar un cálculo lógico— von Neumann vio en esta primera formulación de la “equivalencia funcional” de dos representaciones muy distintas, una forma de ver las limitaciones de cada una de ellas y cómo podía dicha equivalencia ser usada para generar una nueva descripción incorporando elementos de ambas, pero que en la extensión se amplíe el rango de fenómenos para los que puede usarse o, lo que también resultaría equivalente, que pueda instanciarse en nuevas arquitecturas que, quizás a *prima facie* poco de equivalentes parecieran tener dada las posibles diferencias en la naturaleza de los componentes involucrados en una organización o sistema. Así es cómo von Neumann comenzó a ver las mismas limitaciones de la lógica —como se la entendía hasta la época—, para dar cuenta de fenómenos complejos, algo que lo llevó a sugerir cómo ésta debía “actualizarse” para responder al desafío.

Todo esto no altera mi creencia en que una nueva teoría, esencialmente lógica, es necesaria para entender a los autómatas de alta complicación y, en particular, el sistema nervioso central; *es probable, sin embargo, que en este proceso la lógica tenga que atravesar una pseudomorfosis hacia la neurología, mucho más que hacia el otro lado.* (von Neumann, 1987a, p. 414. El énfasis es mío)

Parte de la limitación está en la forma en la que se concibe al tiempo en la lógica o, quizás mejor dicho, lo excluido que está y la consecuente dificultad de expresar en ella cualquier clase de dinámica. En la inherente evolución temporal de un autómata, von Neumann de hecho veía cómo ciertas dificultades de las representaciones lógicas podían sortearse:

Hay una diferencia importante entre la lógica convencional y los autómatas que la representan. El tiempo nunca ocurre en la lógica, pero toda red o sistema nervioso tiene un desfase temporal definido entre la señal de entrada y la respuesta de salida. *Una secuencia temporal definida es siempre inherente al funcionamiento de tal sistema real.* Esto no es del todo una desventaja. Por ejemplo, previene la aparición de varios tipos de círculos más o menos viciosos (relacionados con la “no-constructividad”, la “impredicatividad” y similares) que representan una clase importante de peligros en los sistemas lógicos modernos. ^{CXXII} (von Neumann, 1956/1987b, p. 554. El énfasis es mío)

Es importante notar que los ciclos a los que se refiere von Neumann son aquellos que llevan a ciertas paradojas cuando la representación no admite diferencias (temporales y de clases); algo que bajo una representación capaz de dar cuenta de la relación *diacrónica* entre los estados *locales* de los elementos involucrados puede ser considerado no como un problema, sino más bien como una ventaja, aunque exija lidiar con la consecuente dificultad a la hora de expresar los estados globales que surgen de la interacción de elementos que, bajo esta nueva concepción, están un tanto más “aislados” de los otros elementos.

Existe una equivalencia entre los principios lógicos y su materialización [*embodiment*] en una red neuronal, y aunque en los casos más sencillos los principios pueden proporcionar una expresión simplificada de la red, es muy posible que en los casos de extrema complejidad ocurra lo contrario.^{CXXIII}(von Neumann, 1987a, p. 414)

Quizás la forma más concreta en la que las especulaciones de Turing y von Neumann acerca de estructuras computacionales probabilísticas e inspiradas en la clase de computación que podría estar llevando a cabo el cerebro humano, fue la implementación presentada por primera vez en enero de 1957 por Frank Rosenblatt. En su reporte técnico, Rosenblatt (1957) comienza por describir el interés creciente en crear una máquina que sea “capaz de conceptualizar entradas [*inputs*] de luz, sonido, temperatura, etc., que surgen directamente del ambiente —el mundo fenoménico con el que todos estamos familiarizados— en lugar de requerir la intervención de un agente humano para digerir y codificar la información necesaria” (Rosenblatt, 1957, p. 1). Entrenado en la psicología fisiológica de la época, Rosenblatt reconoce en la tarea de reconocer patrones complejos de información algo análogo al proceso de *asociación* o *generalización* de estímulos que parece hacer el cerebro humano cuando aprende a asociar distintos estímulos como correspondientes a una misma *clase* de experiencias.

Rosenblatt impone dos requisitos fundamentales para llevar a cabo esta tarea por medio de su dispositivo. Por un lado, las identidades entre los patrones deben ser “aprendidas o adquiridas por la experiencia”. Esto significa que quien lo diseña no debe incorporar estructuras en la “programación” que puedan verse como “carga teórica” (o conocimiento innato) y que, por tanto, limiten la exploración del espacio de configuraciones posibles. Esta es la primera referencia directa a que dicha máquina efectivamente puede “aprender”, y es importante notar la similitud con la propuesta de Ashby de cómo el diseñador del Homeostato simplemente se limitó a “proveer de suficiente variedad”. Por otro lado, impone un requisito económico, que es el de que “el número de unidades funcionales en el sistema de almacenamiento o memoria debe ser mucho menor que el número de formas o memorias a ser retenidas” (Rosenblatt, 1957, p. 1).²² Para poder cumplir con dichos requisitos, Rosenblatt se basa en sus resultados teóricos anteriores que le sugieren que debería ser factible implementar dicho sistema que “aprenderá a reconocer similitudes o identidades entre patrones [...] de una manera que puede ser análoga a los procesos de percepción de un cerebro biológico” (Rosenblatt, 1957, p. 2). El punto clave que le permitirá hablar de *aprendizaje* es lo que señala inmediatamente a continuación, que es que el “sistema propuesto depende de principios probabilísticos para su operación, en lugar de deterministas, y gana su confiabilidad de las propiedades de las mediciones estadística obtenidas de una gran población de elementos” (Rosenblatt, 1957, p. 2). El nombre que recibirá este sistema es el de “Perceptrón” y es la arquitectura básica del aprendizaje au-

²²Hoy por hoy llamaríamos a este punto un requisito de *compresibilidad*, que, más allá del juego de palabras, creo que está profundamente relacionado con el de compresibilidad.

tomatizado (o *maquínico*) supervisado. En este mismo trabajo ya aparece una referencia a lo que puede denominarse como la “opacidad epistémica” de esta clase de implementaciones, de aprendizaje automatizado, y ligada a su indeterminabilidad. Así, también puede verse como una “caja negra”, cuya naturaleza debe también pensarse en términos de su capacidad para conectar entradas con salidas, es decir, no tanto en qué es sino en qué es lo que puede hacer en un ambiente para un observador del acoplamiento sistema-ambiente. Pensando en su implementación como un sistema electrónico específico, aunque el nombre se generalizó para esta arquitectura de aprendizaje que luego podría ser simulada en otra clase arquitecturas de computación universal, Rosenblatt comenta que

podemos considerar al perceptrón como una caja negra, con una cámara de TV para la entrada y una impresora alfabética o un conjunto de señales de luz como salida. Su rendimiento [performance] puede entonces ser descrito como un proceso de aprender a dar la misma señal de salida [...] para todos los estímulos ópticos que pertenecen a alguna clase constituida arbitrariamente (Rosenblatt, 1957, p. 1).

Minsky y Papert (1969/1988) demostraron la imposibilidad de los perceptrones simples para resolver problemas muy sencillos pero cuyos valores de entradas no son linealmente separables. En base a ese resultado, especularon que un perceptron con mayor cantidad de capas intermedias entre las capas de neuronas de entrada y de salida se encontraría con las mismas dificultades para funcionar de manera óptima frente a esa clase de problemas. Junto con la dificultad de implementar los perceptrones —tanto en una simulación computacional como en un hardware dedicado como había sido el caso del perceptron original—, la comunidad tomó por prueba a la especulación de Minsky y Papert, lo que llevó a un relativo abandono de la investigación en redes neuronales artificiales, algo en lo que también colaboró la pérdida de financiamiento ocurrida a principios de la década de 1970.²³ Kunihiko Fukushima fue uno de los pioneros quien mantuvo viva esta manera de abordar el estudio de las redes inspiradas en el cerebro humano, tanto como medio para estudiar al cerebro mismo como para implementar en computación capacidad de procesamiento visual. La estructura de sus modelos del Cognitron (Fukushima, 1975) y el posterior Neocognitron (Fukushima, 1980) pueden considerarse perceptrones multicapa inspirados en la neurobiología de la corteza visual, fundamentalmente en los trabajos pioneros de Hubel y Wiesel (1959, 1962).

La historia de los trabajos con redes neuronales artificiales, ya sean como medio para estudiar los cerebros animales o como estrategia de investigación en inteligencia artificial —ya sea general o aplicada a problemas particulares— creo que sirve para ilustrar

²³Este es el período que se suele denominar como «el primer invierno de la inteligencia artificial». La temprana muerte de Rosenblatt en un accidente náutico en 1971 también llevó a la desaparición del principal atractor en los Estados Unidos de esta aproximación a la neurobiología. Ashby, quien había llevado a cabo investigaciones en esta dirección tras su llegada a la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign tras la invitación de von Foster en 1960, se retiró en 1970 y falleció en 1972.

parte de la forma en la que el campo de investigación propio de los sistemas complejos se fue conformando gracias a los intentos de articular el cruce de modelos entre distintas disciplinas. Ya hemos podido observar casos de esta interfaz, particularmente entre la matemática, la biología y las ciencias de la computación. Creo que la ciencia de la computación también tiene un rol particular en esta historia, no solo en tanto las comunidades científicas comenzaron lentamente a aprovechar el poder de cómputo disponible como medio para resolver numéricamente modelos cuya complejidad no permite ser resueltos analíticamente, mucho menos visualizarlos, sino también en términos de comenzar a articular explicaciones computacionales de fenómenos naturales, de manera mucho más generalizada que los casos prototípicos de la inteligencia humana y de la auto-reproducción de las células, sino también en términos de poder observar procesos computacionales en distintas clases de substratos o incluso en algunos casos a suponer ontologías más radicales en las que son los procesos computacionales los que dan origen a las partículas y las leyes de la física.²⁴ Para el caso puntual del estudio de los sistemas complejos y de las redes neuronales artificiales en particular debe destacarse el aporte de John Hopfield (1982) quien en gran parte es responsable de inaugurar el estudio y el diseño de redes neuronales (artificiales y naturales) a través de sus propiedades físicas colectivas, resultados en parte provenientes de sus colaboraciones con Richard Feynmann y Carver Mead.²⁵ Por medio de modelos como las redes neuronales tipo Hopfield es que se puede apreciar parte de la riqueza epistémica que proviene de la equiparación de distintas clases de modelos y en ello poder aunar recursos conceptuales de disciplinas muy distintas, como en este caso de la teoría de los sistemas dinámicos, la física estadística (bajo la forma de física de la materia condensada) y de la teoría de la computación. Esta es la clase de equivalencia que en el capítulo siguiente sostengo que aparece gracias a la postulación de un nivel de abstracción sobre los observables codificados e interpretados de un fenómeno que se pretende estudiar. La equivalencia se toma aquí interpretando a la computación como un sistema que evoluciona en el tiempo entre dos estados que se toman arbitrariamente como de entrada y de salida y cuya dinámica está constreñida por la estructura interna del sistema de tal manera que un agente o sistema puede generar comportamiento útil a base de los

²⁴Entre las primeras figuras más destacadas que especularon en esta dirección se encuentran Konrad Zuse, John A. Wheeler, Edward Fredkin y Tommaso Toffoli. Línea que en mayor o menor medida también han explorado Gregory Chaitin, Gerard t' Hooft, Seth Lloyd y Stephen Wolfram, entre otros. La reciente selección de trabajos llevada a cabo por Cuffaro y Fletcher (2018) y la breve introducción filosóficamente orientada a la intersección de la computación con la física llevada a cabo por Duwell (2021) constituyen buenas puertas de entrada a la dirección general que ha tomado la discusión conceptual alrededor de esta intersección.

²⁵Mead ha sido otra figura clave en la articulación entre distintas disciplinas, incluyendo la ingeniería de materiales para la computación y el diseño de circuitos integrados, impulsando también lo que se conoce como computación neuromórfica (Furber, 2016). Su interés por aplicar la física a la biología se vio catalizado por uno de los pioneros en el área: Max Delbrück, quien aquí ya fue mencionado en la página 205. Aunque no tan especulativa como las propuestas teóricas recién mencionadas, Mead ha hecho algunas contribuciones importantes acerca de la emergencia colectiva de las propiedades electromagnéticas de la materia (Mead, 2002)

pares «entrada,salida» que pueda generar gracias a las intervenciones sobre el sistema o su ambiente. Modelos como el de Hopfield muestran la importancia de la memoria —tanto en cuanto estructura como en dinámica— como característica de los sistemas complejos, a la vez que habilita nuevas maneras de comprender a los sistemas naturales y a los artefactuales en base a su capacidad de mostrar propiedades computacionales. Especialmente dejan ver cómo, cuando son tomados como un todo en base a sus interacciones, elementos simples pueden mostrar propiedades en cuanto a su comportamiento global que se puede interpretar como computacionales, al tiempo que remarca la necesidad de la corrección de errores, especialmente para ser una instancia de lo que denomino *computación robusta*:

Las propiedades computacionales de utilidad para los organismos biológicos o para la construcción de ordenadores pueden surgir como propiedades colectivas de sistemas —que tienen un gran número de componentes simples y equivalentes (o neuronas)—. *El significado físico de la memoria de contenido direccionable se describe mediante un flujo apropiado en el espacio de fase del estado de un sistema.* Se presenta un modelo de dicho sistema, basado en aspectos de la neurobiología pero fácilmente adaptable a los circuitos integrados. Las propiedades colectivas de este modelo producen una memoria direccionable por contenido que produce correctamente una memoria completa a partir de cualquier subparte de tamaño suficiente. El algoritmo para la evolución temporal del estado del sistema se basa en el procesamiento paralelo asíncrono. Otras propiedades colectivas emergentes incluyen cierta capacidad de generalización, reconocimiento de la familiaridad, categorización, corrección de errores y retención de secuencias temporales. *Las propiedades colectivas sólo son débilmente sensibles a los detalles de la modelización o al fallo de los componentes individuales.* (Hopfield, 1982, p. 2554. Los énfasis son míos)

Las redes de Hopfield son una instancia de una clase o familia de modelos que han servido como punto de encuentro o interfaz entre técnicas y teorías de distintas disciplinas. Además, han servido para iluminar cómo en gran medida la búsqueda de soluciones puede apoyarse en la transformación de las representaciones del problema de manera tal que las restricciones del problema original sean más factibles de ser alcanzadas. Esto creo que se aplica tanto al nivel de las búsquedas que puede hacer un individuo como las que puede llevar a cabo. El caso de las redes de Hopfield, solo por poner un ejemplo cercano, permiten ver cómo un problema como el de explicar la memoria y su conexión con la computación puede verse de cara a un problema de optimización local cuya dinámica de exploración de lo posible está dirigido por leyes o principios físicos. En esta dirección se pueden destacar a las “máquinas de Boltzmann”, que fueron introducidas Hinton y Sejnowski (1983); un algoritmo para su aprendizaje fue presentado luego por (Ackley y col., 1985), en donde toman su nombre actual por primera vez. Clave en todas estas arquitecturas son la forma en la que se trabaja con la corrección de errores y propagación de los errores dentro de una red. Gran parte de estos *insights* pudieron trasladarse a los perceptrones multicapa, que mediante un nuevo algoritmo resultaron ser capaces de aproximar cualquier función computable (Rumelhart y col., 1986). Pese a las limitaciones

del hardware de la época, grandes avances se lograron al aplicar el algoritmo para las redes multicapa a arquitecturas como las del Cognitron, que buscaban replicar en parte algunas de las particularidades de la corteza visual de los mamíferos (Lecun y col., 1989). La amplia disponibilidad de datos y la ampliación de poder de cálculo, especialmente en las unidades de procesamiento de vídeo, llevaron al éxito en múltiples contextos de esta clase de arquitecturas (y variantes de ella) con muchas capas de neuronas, hoy aplicada en muchos ámbitos, además de la visión computacional en donde emergieron primeramente (LeCun y col., 2015; Sejnowski, 2018). Tanto como técnicas de procesamiento de datos y como modelos propiamente dichos —por tanto como “técnica” de generación de datos—, en la actualidad estas arquitecturas computacionales están teniendo un profundo impacto en la manera de hacer ciencia en diversas comunidades, y presentan una serie de desafíos que los filósofos de las ciencias deben atender, especialmente en tanto brindan una nueva forma de entender los programas de una epistemología naturalizada y de cómo describir los procesos de descubrimiento y aprendizaje. Ya en la década de 1980, los trabajos de Rumelhart y sus colaboradores en el Grupo de Procesamiento Paralelo Distribuido [PDP, por *Parallel Distributed Processing*], a su vez, dieron lugar a una nueva serie de aproximaciones en distintas áreas de la filosofía, especialmente en el surgimiento de una filosofía de las ciencias cognitivas como área con relativa independencia de la filosofía de la mente, aunque continúan compartiendo problemas fundamentales, como el de la conciencia.

Para los objetivos de esta investigación, lo que pretendo destacar es cómo se interrelacionan nuestra capacidad para obtener conocimiento sobre un sistema complejo, al mismo tiempo que, cuando el conocimiento que se genera trata sobre las capacidades mismas de un sistema complejo de generar conocimiento, debemos usar dichos resultados para pensar la naturaleza misma de los procesos de generación de conocimiento y entendimiento científico. Tanto en las distintas disciplinas que hacen al estudio de los sistemas complejos como en muchas otras, incluso aquellas que puedan tomarse como “netamente teóricas o formales” (incluyendo a la filosofía misma), la dinámica asociada a la elaboración de modelos parece proceder sobre la base de poder generar nuevos elementos que se toman como fundamentales en un nivel de abstracción y sobre el que se pueden integrar las explicaciones de los comportamientos observados; permitiendo incluso cambiar qué es lo que caracteriza a los elementos tomados como elementales, ya que en última instancia aunque sus propiedades se digan o postulen como intrínsecas, se conocen por sus efectos detectables bajo el esquema de codificación y abstracción que se esté empleando. Esto se logra a partir de la posibilidad de recrear en medios artificiales —matemáticos, computacionales o concretos— la manera en que un sistema cambia su estructura interna al mismo tiempo que cambia el ambiente en el que se encuentra y poder determinar la equivalencia entre el medio artificial o modelo y el fenómeno o “sistema natural” que se estudia; nuevamente, siempre bajo un esquema de codificación sobre el que se determinarán los observables del sistema. Dicho esquema, además, es una suerte de andamio

provisorio, en tanto se ajustará a medida que el nuevo conocimiento devenga en una nueva descripción o teoría de las transformaciones tomadas como posibles.

Así, las lecciones aprendidas sobre el estudio del cerebro y su impacto en la manera en la que se entiende a la filosofía misma de las ciencias, creo que pueden tomarse como importantes para el estudio de los sistemas complejos; y, en general, acerca de nuestra posibilidad última de conocer acerca del mundo y del conocer acerca del conocer. La visión que tengo en mente es ciertamente similar a la propuesta por algunos “neurofilósofos”, aunque enfatizando los aspectos computacionales generales que se implementan en los cerebros humanos al margen de las particularidades que surgen de la implementación (que en última instancia permitiría decir de sistemas complejos que no tienen un cerebro como el de los humanos que también, a su medida, conocen). A modo de ejemplo, podemos tomar esta reflexión que hace Paul Churchland tras una revisión de por qué algunas de la tesis de la forma que tomó el funcionalismo en la filosofía de las ciencias cognitivas fueron paulatinamente perdiendo terreno:

En términos más generales, la perspectiva de la cognición que emerge de la neuroanatomía y la neurofisiología ofrece una concepción totalmente novedosa del modo de representación fundamental del cerebro. La nueva unidad de representación propuesta es el patrón de niveles de activación en una gran población de neuronas (no la frase interna en algún “lenguaje del pensamiento”). Y la nueva perspectiva ofrece también una concepción correlativamente novedosa del modo fundamental de computación del cerebro. En concreto, la nueva unidad de computación es la transformación de un patrón de activación en un segundo patrón de activación al forzarlo a través de la amplia matriz de conexiones sinápticas que una población neuronal proyecta a otra población (no la manipulación de frases según “reglas sintácticas”.^{CXXIV} (Churchland, 2005, p. 47)

Aunque el conexionismo —nombre que tomó esta posición en filosofía que daba preeminencia al estudio de las capacidades cognitivas fundamentalmente por medio de redes neuronales artificiales— originalmente se definió, al menos en parte, por oposición tanto a tesis funcionalistas como a aquellas que veían a la cognición en términos de procesamiento simbólico— hoy en día no es tan simple hacer la distinción dada la ocurrencia de modelos híbridos (Smolensky, 1990; Smolensky & Legendre, 2006) que no se limitan a lo que podríamos denominar una mera implementación en un nivel de abstracción más bajo de una arquitectura de procesamiento simbólico, sino que efectivamente articulan las dos clases de representaciones en una nueva abstracción. En el capítulo siguiente y final articularé una mirada desde la cual se puede reinterpretar estas lecciones no tanto en términos de reducción o eliminativismos —como lo hace el mismo Churchland— sino en términos del nivel de abstracción que se toma para describir el sistema, el ambiente y las operaciones de observación y manipulación que un agente epistémico puede realizar sobre el par <sistema, ambiente> para integrar explicaciones provenientes de estrategias de

diseño *top-down* y de construcción *bottom-up*, que bajo cierto nivel de abstracción pueden interpretarse equivalentes en cuanto a las transformaciones que describen.

Pero antes de eso, en la sección siguiente hago pequeño recorrido de la misma idea —de la creación de espacios de interfaz entre modelos— pero con vistas a la historia reciente de cómo el estudio de la complejidad se ha ido cristalizando.

6.5. Historia (y “sociología”) temprana del estudio de los sistemas complejos

Ya hemos visto cómo la pregunta por la complejidad fue surgiendo originalmente en las distintas disciplinas científicas y, al mismo tiempo, cómo dicha pregunta fue catalizando la existencia de nuevas disciplinas científicas especializadas en aquellos aspectos de la complejidad de la naturaleza que parecía, al menos temporariamente, no poder reducirse a las explicaciones de las disciplinas ya constituidas. Como hemos visto también, parte del deseo de los primeros estudiosos de la complejidad era que la naturaleza interdisciplinaria que el fenómeno de la complejidad parecía requerir cristalizara alrededor de una nueva disciplina cuyo objeto de estudio sean precisamente los puntos en común de los sistemas complejos. Sin embargo, los estudios de la complejidad como disciplina científica tardaron varias décadas desde esos primeros diagnósticos en tomar «vida propia», para usar una expresión usual de Ian Hacking. En 1990, Aspray podía afirmar con razón lo siguiente al comentar sobre la esperanza de figuras como von Neumann y Wiener acerca de formar una «ciencia unificada de la cibernética» que pudiera instituir un vocabulario común sobre el que apoyar el entendimiento y el estudio de los sistemas complejos:

Al final, sin embargo, los éxitos no vinieron de la mano del estudio interdisciplinar, sino de la revitalización y el crecimiento de nuevas subdisciplinas dentro de las disciplinas científicas y de ingeniería tradicionales (inteligencia artificial, teoría de autómatas, modelización biológica, teoría de la codificación, teoría de la comunicación, homeostasis, teoría de la información, teoría de las funciones recursivas, robótica) que de alguna manera implican el estudio de la información, el control y la comunicación. Estas subdisciplinas utilizan métodos y conceptos apropiados por la cibernética, pero se especializan y los aplican a las necesidades particulares de su disciplina científica matriz (informática, ingeniería eléctrica, matemáticas, fisiología o psicología). (Aspray, 1990, p. 210)

Sin embargo, y quizás como consecuencia de la manera en que cada una de estas disciplinas fue tomando como herramientas conceptos que habían tenido su primer atractor en las Cibernéticas (incluyendo ya en ellas a las variantes más ingenieriles de la Teoría General de los Sistemas), hacia mediados de la década de 1980 vuelve a surgir el interés por nuclear los estudios de la complejidad. La condición de posibilidad para ello creo que

puede verse en la que la computadora y la noción misma de computación fueron tomando un rol cada vez más importante en el quehacer práctico de disciplinas muy distintas. Nace así una preocupación no sólo por el mejor uso de la computadora como técnica de simulación, ya sea digital o analógica, sino la pregunta por la computación misma como fenómeno que podía —y debía ser— estudiado no sólo como herramienta ingenieril o como interés matemático, sino que incluso podía verse como un recurso conceptual clave para estudiar otros fenómenos naturales. Al mismo tiempo, la creciente inclusión de la computadora como recurso obligó a que sus usuarios deban ser más explícitos en términos del contenido y conocimiento de fondo implicado en las explicaciones pretendidas. Simon hacía el siguiente diagnóstico del diseño de programas como mediador de comunicación entre campos:

la habilidad para comunicarse entre distintos campos —ese terreno común— proviene del hecho de que todos los que utilizan los ordenadores de manera sofisticada los usan para diseñar o para participar en procesos de diseño. Consecuentemente, ya sea como diseñadores o como diseñadores de procesos, hemos tenido que ser más explícitos que nunca sobre lo que implica la creación de un diseño y sobre lo que sucede mientras se está llevando a cabo esa creación.^{CXXV} (H. A. Simon, 1996/2006, p. 165)

Para aquellos interesados en las capacidades cognitivas de los agentes involucrados y de sus habilidades para resolver problemas y producir conocimiento, ya sea de manera individual o comunitaria, esto permitía crear o postular un nivel de abstracción lo suficientemente general para abordar el problema desde el punto de vista de cómo desarrollar un sistema artificial que pudiera realizar la misma clase de solución de problemas. Todo esto requería un «libre comercio» entre distintas disciplinas:

Los verdaderos objetos de ese nuevo libre comercio intelectual entre las muchas culturas son nuestros propios procesos mentales, nuestros procesos de elaboración de juicios, de decisión, de elección, de creación. Estamos exportando de una disciplina a otra las ideas de las formas en que un sistema de procesamiento de información organizado en serie como el ser humano —o un ordenador, o un compuesto de hombres, mujeres y ordenadores en organizada cooperación— resuelve problemas y alcanza metas en entornos externos de gran complejidad.²⁶ (H. A. Simon, 1996/2006, p. 165)^{CXXVI}

Creo que Peter Galison ha sido uno de los primeros en explorar más a fondo la

²⁶Esto me recuerda a una expresión usual de Donald Knuth: “La ciencia es lo que entendemos lo suficientemente bien como para explicárselo a una computadora. El arte es todo lo demás que hacemos”. Knuth también avanzó en la dirección propuesta por Simon con su sugerencia de «programación letrada», que implica ser explícitos acerca de la naturaleza del problema y del diseño involucrado en la solución, para mejorar la comunicación de los programas *entre humanos*: “Cambiamos nuestra actitud tradicional ante la construcción de programas: En lugar de imaginar que nuestra principal tarea es ordenar a una computadora lo que debe hacer, concentrémonos más bien en explicar a los seres humanos lo que queremos que haga una computadora” (Knuth, 1984, p. 97) Cuando Simon mencionaba que por momentos se dedicaba a la psicología, muchos solían retrucarle que él era un psicólogo de computadoras, no de humanos.

metáfora económica para estudiar las dinámicas de intercambio de “productos epistémicos”, comenzando su análisis por la manera en que las comunidades de físicos teóricos y experimentales debían genera una zona de intercambio de los bienes que producían para poder continuar con sus propias agendas:

Al igual que dos culturas, distintas pero que viven lo suficientemente cerca como para hacer intercambios, pueden compartir algunas actividades y divergir en muchas otras. En particular, las dos culturas pueden llevar a lo que llamaré la zona de intercambio [*trading zone*] objetos que tienen un significado radicalmente diferente para el proveedor y el destinatario. Lo crucial es que, en el contexto altamente local de la zona de intercambio, a pesar de las diferencias de clasificación, significado y criterios de demostración, los dos grupos pueden colaborar. Pueden llegar a un consenso sobre el procedimiento de intercambio, sobre los mecanismos para determinar cuándo los bienes son “iguales” entre sí. Incluso ambos pueden entender que la continuación del intercambio es un requisito previo para la supervivencia de la cultura más amplia de la que forman parte. (Galison, 1999, p. 146)

Gran parte de la tarea de desarrollar el lenguaje *pidgin* entre las dos culturas recayó sobre los programadores de simulaciones, en tanto gran parte de su actividad puede verse como una manera de “traducir” los resultados de la teoría a una implementación particular —un modelo de simulación— cuyos resultados puedan luego compararse con resultados experimentales; al mismo tiempo que debían involucrarse en las etapas del diseño experimental para las tareas de todas las comunidades pudieran llevarse a cabo y retroalimentarse. Una de las consecuencias fue la aparición de lo que Galison llama «categorías de acción», que yo interpreto como una abstracción o interfaz por medio de la cual miembros de una comunidad pueden interactuar con las acciones o actividades de miembros de otras comunidades cuyos productos o resultados necesitan.²⁷

Atrapado entre una vida de máquina y una vida de símbolo, el programador de computadoras en física se convirtió tanto en un paria como en un intermediario insustituible, estableciendo una precaria función transaccional conocida por los pueblos fronterizos de todos los continentes. A lo largo de la década de 1960, la computadora transformó por completo la física de partículas; entre los cambios que trajo consigo se encuentra la creación de una categoría de acción (el análisis de datos) que fue, a su manera, una carrera tan completa como la construcción de aceleradores o la teoría de campos. (Galison, 1996, p. 139)

En esta misma dirección, creo que el uso cada vez más ubicuo de la computadora en tanto recurso o artefacto técnico (habilitando tanto resultados numéricos que antes eran inaccesibles y nuevas formas, especialmente visuales, de acceder y comprender los resultados

²⁷ Aquí también hay una conexión interesante de ser explorada entre esta noción de abstracción como “acuerdo interpretativo” de acciones y la sugerencia de algunos filósofos de la tecnología de ver a los estándares como artefactos (Lawler, 2020); detrás de la cual veo una simetría que creo que vuelven factible pensarlos en la otra dirección también: los artefactos como estándares de diseño y acción o comportamiento.

de los cálculos) y en su rol de “instrumento conceptual” —efectivamente tomando el rol que las máquinas en sentido general habían tenido en las décadas anteriores—, tanto en sus encarnaciones teórico-abstractas, sus implementaciones técnico-ingenieriles y las distintas formas en las que la computación se ha visto como un fenómeno natural (muchas veces bajo la rúbrica de “procesamiento de información”), me llevan a considerar estas nuevas preocupaciones por la computabilidad como un paso necesario para la conformación de un campo de estudio de los sistemas complejos que bien podría decirse que hace de “tejido conectivo” o punto de encuentro entre modelos de distintas disciplinas.

6.5.1. El surgimiento de las ciencias de la complejidad

Una de las primeras reuniones científicas dedicadas al intercambio de ideas acerca de la naturaleza computacional de la naturaleza fue la «Conferencia de Física de la Computación» llevada a cabo del 6 al 8 de mayo de 1981 en la Endicott House del MIT, en Dedham, Massachusetts. Coorganizada por el MIT e IBM (MIT Endicott House, 2018; “Physics of Computation”, 1982), en la conferencia confluyeron científicos de diversas disciplinas, entre los que deseo destacar a Charles Bennett, Freeman Dyson, Gregory Chaitin, Rolf Landauer, Carl Hewitt, Edward Fredkin, Tommaso Toffoli, John Wheeler, Richard Feynman, Konrad Zuse, Carl Petri, Danny Hillis, Artur Burks, Norman Packard y Jim Crutchfield. Muchas de las ideas y trabajos allí presentados y discutidos tendrían un profundo impacto en las agendas de investigación de muchas disciplinas, no sólo de la física y de la computación. Las actas de esta conferencia fueron luego publicadas en los números 6-7 y 12 del volumen 21 del *International Journal of Theoretical Physics* al año siguiente.

Quizas la primera reunión específicamente convocada para avanzar sobre la investigación del conjunto de fenómenos y sus propiedades que hoy se asocian al estudio de los sistemas complejos comparte uno de los organizadores de la conferencia de 1981 y sea el *workshop* que organizaron Doyne Farmer, Tommaso Toffoli y Stephen Wolfram, que tuvo lugar en el Los Alamos National Laboratory en 1983. Los trabajos allí presentados giraban en torno a cómo los modelos de autómatas celulares podían ser estudiados con métodos y modelos de distintas disciplinas, además de poder servir como una nueva fuente de exploración para desenredar fenómenos físicos, químicos, biológicos y hasta socio-económicos. Además de los organizadores, Chris Langton, James Crutchfield, Stuart Kauffman, Norman Margolus y Danny Hillis fueron algunos de los participantes (D. Farmer y col., 1984).

El interés por el estudio de los sistemas complejos llevó a la fundación del primer centro para nuclear a investigadores de diversas áreas para fomentar el encuentro, la discusión y la diseminación de este núcleo teórico, cuya extraña naturaleza ya podía apreciarse en el interés de sus fundadores en que el instituto no se cree alrededor de una disciplina sino alrededor de *personas*, en vistas al libre intercambio.

El Instituto Santa Fe (SFI por Santa Fe Institute) fue fundado en Santa Fe, Nuevo Mexico en 1984 por Murray Gell-Mann, David Pines, George Cowan, Stirling Colgate, Nick Metropolis, Herbert L. Anderson, Peter A. Carruthers y Richard Slansky. A excepción de Gell-Mann y de Pines, todos ya se encontraban trabajando en Nuevo Mexico, particularmente en el Laboratorio Nacional de Los Alamos, laboratorio que originalmente sirvió como lugar de coordinación científica para el Proyecto Manhattan desde 1943 bajo la dirección de J. Robert Oppenheimer.

Las primeras reuniones organizadas por el Instituto tenían el objetivo de despertar el interés en la comunidad científica de una institución con la visión interdisciplinar y polifacética que luego lo caracterizaría. Hacia finales de 1984 se organizaron dos *workshops* bajo la rúbrica de «Síntesis emergentes en la ciencia» [*Emerging Syntheses in Science*], con sede en Los Alamos y con subsidio de las fundaciones MacCarthur y Carnegie (German, s.f.). El título completo final de los *workshops* fue «Una respuesta al reto de las nuevas síntesis en la ciencia: Un nuevo tipo de institución de investigación y enseñanza» [*A Response to the Challenge of Emerging Syntheses in Science: A New Kind of Research and Teaching Institution*]

Entre los participantes estuvieron Charles Bennett, Manfred Eigen, Philip W. Anderson, Murray Gell-Mann, Gian-Carlo Rota, Jack Cowan, Marcus Feldman, Hans Frauenfelder, David Pines, Alwyn Scott, Jerome Singer, Frank Wilczek, and Stephen Wolfram.

Los trabajos de estos eventos fueron luego publicados en el comienzo de una serie editada por el Instituto (Pines, 1988).²⁸

De los muchos *workshops* organizados por el SFI en sus primeros años (que hasta incluyen uno sobre teoría de cuerdas organizado por Gell-Mann), destaco uno de 1985 titulado «Evolución, juegos y aprendizaje: Modelos de adaptación en las máquinas y la naturaleza» [*Evolution, Games, and Learning: Models for Adaptation in Machines and Nature*], que también tuvo sede en Los Alamos y fue organizado por Doyne Farmer y Norman Packard. En la presentación de las actas de los trabajos presentados en el *workshop*, que fueron publicados en el *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 22(1) de 1986, los organizadores comentan acerca de los temas que se mencionan en el título, en donde se puede apreciar el intento de articular miradas sobre lo natural y lo artificial a través de las ideas de aprendizaje y diseño:

Los tres temas indicados en el título de la conferencia se inspiraron en un interés común por éstos, combinado con la sensación de que existen conexiones más profundas entre ellos de lo que parece. La evolución, al fin y al cabo, es uno de los mejores ejemplos de un proceso capaz de aprender y diseñar espontáneamente. De alguna manera,

²⁸Mencionado sea de paso (Hertz y col., 1991), otro volumen de la serie que fue clave para la diseminación temprana de las ideas alrededor de la computación neuronal.

la naturaleza comienza con bloques de construcción muy simples y la ingeniería tiene lugar automáticamente a medida que se desarrollan los organismos complejos. El esclarecimiento de los principios subyacentes de la adaptación en la evolución biológica bien podría conducir a mejores métodos para lograr el aprendizaje de las máquinas y la inteligencia artificial. A la inversa, los esquemas de adaptación para el aprendizaje de las máquinas pueden proporcionar un contexto sencillo en el que investigar la base matemática de la evolución biológica. (J. D. Farmer & Packard, 1986, p. vii)

Entre los participantes se encontraban Gian-Carlo Rota (quien presentó una memoria de Stan Ulam, fallecido en 1984), I.J. Good (quien fue colaborador de Turing en Blatchley Park), Bernardo Huberman (físico argentino, hizo su carrera de grado en la Universidad de Buenos Aires antes de radicarse en Estados Unidos), John Maynard Smith, Stuart Kauffman, Terrence Sejnowski, Geoffrey Hinton, John Holland y Stephen Wolfram.

El Instituto Santa Fe continúa en la actualidad siendo uno de los centros más importantes que nuclea a investigadores en el área de sistemas complejos, y continúa caracterizándose por la diversidad de sus actividades, tanto de investigación como de extensión, incluyendo escuelas de verano para estudiantes de grado y posgrado, cursos masivos en línea (usualmente conocidos como MOOCs), actividades culturales, entre otras. Solo por mencionar un ejemplo en el que puede apreciarse la manera en la que el instituto continúa enfocándose en promover una mirada amplia sobre los estudios de la complejidad con énfasis en las síntesis que se puedan lograr mediante modelos entre sistemas de muy diversa naturaleza, destaco algunos de los objetivos del reciente programa de Complejidad Interactiva dirigida por Miguel Fuentes:

- Reconocer las regularidades intersistémicas [*cross-system*] que rigen los sistemas complejos y disponer de un vocabulario para describir esas propiedades
- Comprender los enfoques utilizados para entender los sistemas complejos y las consideraciones para emplear diferentes enfoques
- Trabajar en colaboración para definir y abordar una cuestión de la ciencia de los sistemas complejos

Entre los numerosos institutos o departamentos dedicados al estudio de los sistemas complejos fundados luego del Instituto Santa Fe, destaco algunos de Latinoamérica:

- Departamento de Sistemas Complejos del Instituto de Física de la Universidad Autónoma de México.²⁹
- Instituto de Sistemas Complejos de Valparaíso, Chile.³⁰

²⁹https://www.fisica.unam.mx/es/departamentos/sistemas_complejos.php

³⁰<http://www.sistemascomplejos.cl>

- Centro de Estudios Multi-disciplinarios en Sistemas Complejos y Ciencias del Cerebro (CEMSC3) de la Universidad Nacional de San Martín (UNSAM), Buenos Aires, Argentina.³¹

También se pueden destacar grupos de investigación y programas de especialización radicados en diversas instituciones:

- El grupo GRIFE en la Universidad de San Pablo, donde se ha articulado el Programa de Pós-graduação em Modelagem de Sistemas Complexos
- La especialidad en sistemas complejos de la Maestría en Ciencias Físicas del Instituto Balseiro, Bariloche, Río Negro, Argentina.³²
- El grupo de filosofía de la ciencia de la Sociedad Argentina de Análisis Filosófico (SADAF), que se especializa en los aspectos conceptuales de la modelización de sistemas complejos, incluyendo aquellos derivados de las distintas representaciones del aprendizaje y sus patologías; y de toma de decisiones en contextos de incertidumbre.³³ Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.³⁴

6.6. Resumen y conexiones

La selección aquí planteada es una mínima muestra de la variedad de recursos que se emplean en el estudio de los sistemas complejos.³⁵ De hecho ha estado sesgada por una mirada sobre la complejidad como un proceso computacional, que también se encuentra detrás de la interpretación de la emergencia y la abstracción que llevo a cabo en el capítulo siguiente. El núcleo ha estado puesto en cómo una aproximación a la manera en la que se articulan modelos en un espacio de interacción en el cual los patrones generados por modelos distintos (y quizás pensados para fenómenos distintos) pueden interpretarse como equivalentes en el sentido del tipo de comportamiento que generan. “Articular” quizás sea una palabra un tanto fuerte, dado que la interpretación de la equivalencia de patrones que justifican el pasaje o el intercambio entre modelos o entre disciplinas muchas veces carece de las credenciales metodológicas o epistémicas que suele exigirse en algu-

³¹http://www.unsam.edu.ar/escuelas/ciencia/cemsc3_1/

³²<http://www2.ib.edu.ar/index.php/academicas/informacion-carreras-de-posgrado/maestria-en-ciencias-fisicas/236-sistemas-complejos.html>

³³Además de (M. A. Fuentes & Miguel, 2016) mencionado más arriba, otro ejemplo producido por miembros de este grupo es (M. A. Fuentes y col., 2014).

³⁴https://www.sadaf.org.ar/index.php?option=com_k2&view=item&id=567:grupo-de-filosof%C3%ADa-de-las-ciencias&Itemid=235&lang=en

³⁵Además de la gran cantidad de referencias ya incluidas, visiones panorámicas de la diversidad de estrategias para aproximarse a la complejidad del mismo estudio de la complejidad se pueden consultar en algunas de estas obras de las que personalmente he aprendido mucho: (Boccaro, 2010; Deutsch & Dormann, 2017; M. A. Fuentes, 2015; Miller & Page, 2007; M. Mitchell, 2011; M. E. J. Newman, 2011; Nicolis & Nicolis, 2012; Nishimori, 2001; Shalizi, 2003; Stein & Newman, 2013; Tranquillo, 2019; West, 2017)

nos contextos. La única justificación en muchos casos, como decía von Neumann, es que se espera que funcione (ver pág. 179). Finalmente, este espacio de modelos puede verse como una quasi-especie, como un ensamble de modelos que mutan entre sí por medio de las estrategias generales bottom-up y top-down que para que luego el ensamble se tome como una abstracción sobre la cual se puede interpretar su relación con otra abstracción, en la cual la abstracción del ensamble de modelos a veces funciona como un submódulo: el que codifica los estados observables y accionable del sistema estudiado y sobre el que se establecerá la función de evaluación del ensamble, habilitando así la acción de un nuevo ciclo de retroalimentación general. La ciencia, después de todo, también es un sistema complejo que funciona (o se ejecuta) sobre sistemas complejos.

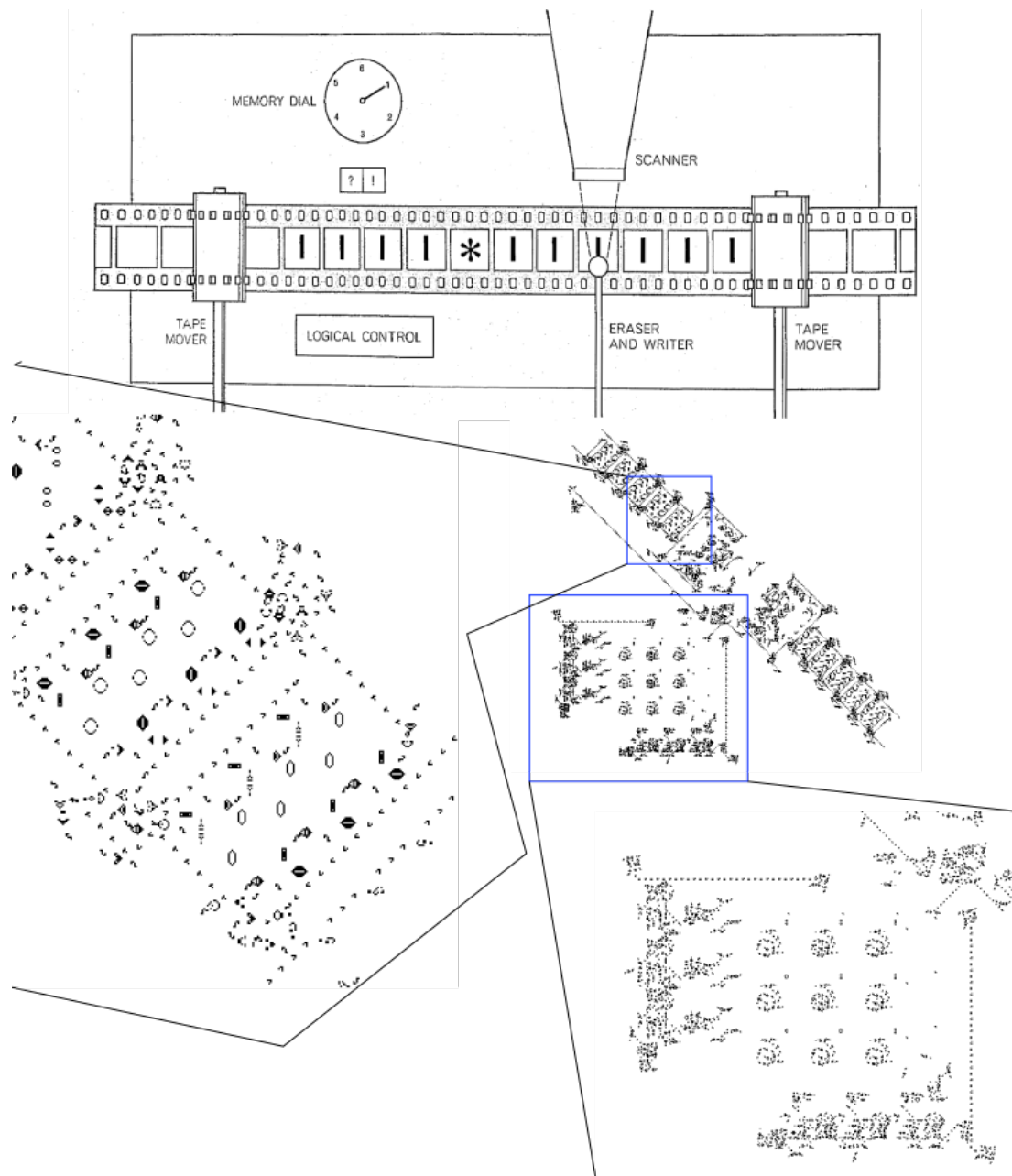


Figura 6.7: Arriba: representación diagramática de una máquina universal de Turing interpretada como una línea de producción por Hao Wang (1965, p. 100).

Debajo: Implementación de una máquina universal de Turing en el Juego de la vida de Conway por Paul Randall. En la configuración inicial, 36.539 celdas (o células) están encendidas (o vivas). Captura hecha desde el programa Golly. Los cuadrados azules demarcan la zona ampliada, debajo el autómata finito que hace de instrucciones y a la izquierda se amplía una de las pilas (o *stacks*, en inglés que implementa la cinta o memoria). Los detalles de la implementación se pueden consultar en (Rendell, 2016).

Capítulo 7

Abstracción y emergencia en (y por) sistemas complejos

El estudio de los seres vivos permite apreciar mejor lo primitiva que es todavía la física.

Albert Einstein, carta a Leo Szilard, 12 de julio de 1947

Un objetivo para el futuro sería determinar el grado de conocimiento que la célula tiene de sí misma y cómo utiliza este conocimiento de manera “reflexiva” cuando está siendo desafiada.

Barbara McClintock, conferencia de aceptación del Premio Nobel (1983)

En el estudio de los sistemas complejos puede verse cómo dos de las facetas centrales del reduccionismo como problema filosófico aparecen a simple vista y, en cierta medida, puede hasta decirse que hacen al estudio mismo de dichos sistemas. Una de estas facetas es la pregunta por la relación entre las distintas áreas o dominios del conocimiento, mientras que la otra es la relación entre partes y todos. Estas dos caras forman un retrato de Jano, ya que creo que es inevitable enfrentarse a uno sin al mismo tiempo atender al otro rostro; lo que muestra, a su vez, la interrelación entre las preguntas epistemológicas y las ontológicas. No creo que sea una exageración sugerir que de la misma manera en la que el estudio de los sistemas complejos requiere concentrarse en la *interfaz* que surge de entre las interacciones de sus componentes, el estudio de los problemas filosóficos debe llevarse a cabo de manera similar, esto es, poniendo el foco constantemente en la relación emergente entre problemas filosóficos, y la consecuente aparición de nuevas facetas y nuevos problemas. La aparición de un nuevo campo disciplinar suele ser una consecuencia de la

imposibilidad en la práctica de llevar a cabo una *reducción* de cierto ámbito de fenómenos a las “herramientas epistémicas” (teorías, modelos, técnicas, etc.) de las disciplinas existentes. En su lugar, lo que suele ocurrir es una apropiación de las herramientas en la nueva disciplina.

En las observaciones de los cibernetas en términos de cajas negras (que aquí hicieron su aparición en el capítulo 3) puede verse un deceso de una posición de reducción al estilo de aquella clase de reducción “ontológicamente neutral” que suele asociarse con los primeros días del empirismo lógico y que —tanto por vías positivas como negativas— influyó considerablemente en las reflexiones filosóficas subsiguientes, tanto de científicos como por parte de filósofos profesionales. Figuras como Rudolf Carnap y Otto Neurath consideraban que la reducción —y consecuente unificación— de las ciencias estaba dada por la traducción de las afirmaciones de distintos dominios de producción de conocimiento a un lenguaje común y teóricamente neutral que pudiera considerarse como el “punto de encuentro” entre aquellas primeras afirmaciones (y conceptos asociados) con los enunciados observables posibles, donde estos últimos se pueden conocer por un mismo método para todas las ciencias:

La base de estas diversas divisiones no es meramente de conveniencia, sino que se trata de la opinión generalmente aceptada de que las diversas ciencias nombradas son fundamentalmente distintas en cuanto a la temática, las fuentes de conocimiento y técnicas. A esta opinión se opone la tesis defendida en este trabajo de que la ciencia es una unidad, que todos los enunciados empíricos pueden expresarse en un único lenguaje, que todos los estados de cosas son de un mismo tipo y que se conocen por el mismo método. (Carnap, 1934/1995, p. 32)

La diferencia entre las cajas negras de los cibernetas y la del positivismo lógico (aunque estrictamente es un término que, hasta donde sé, nunca usaron y fue introducido por primera vez por Rosenblueth y Wiener) yace en que las cajas negras pueden *componerse*, postulando así la existencia de otras cajas en su interior, algunas cognoscibles y otras no tanto, pero que en términos de la manera en la que están relacionadas estas partes en su interior es cómo dan lugar al comportamiento que se puede observar que producen. Y, fundamentalmente, en esto no hay un rechazo de la metafísica —como buscaban los positivistas lógicos— sino que, por el contrario, se acepta que la metafísica, o al menos la ontología, es un paso tanto necesario para y dependiente de la capacidad de producir conocimiento. Esto es, la ontología corresponde a una *proyección epistémica*, una postulación que se hace en virtud del conocimiento. Ahora bien, considero que esa proyección es necesaria para la producción misma de conocimiento; la evidente circularidad aquí no es viciosa, sino que se vuelve virtuosa a partir de reconocer que se trata de un proceso cuyos elementos se toman como distintos para el análisis, pero que sólo funcionan en coacción, generando un ciclo que depende de un proceso con una evolución en el tiempo inexorable; descripción que nos obliga a estudiar al conocimiento mismo como un caso más de

aquello *acerca* de lo que se produce conocimiento.

En lo que sigue, comienzo el largo proceso de apenas *señalar* cómo algunos aspectos de nuestra comprensión general del conocimiento científico y de sus condiciones de posibilidad se ven afectados por el mismo avance del conocimiento científico, en particular por el del estudio de los sistemas complejos. Al mismo tiempo, recuperando los trazos pincelados en los capítulos anteriores, propongo una forma de entender a la emergencia que haga explícita una posible articulación entre una comprensión epistémica y una ontológica de este concepto. Esto se logra en parte mostrando que al incorporar en el análisis tanto el rol del observador-conocedor (sea éste un agente o una comunidad de agentes) como las acciones o prácticas que debe llevar a cabo en la formulación de conocimiento de la naturaleza de la que él mismo es parte, necesariamente deben articularse estrategias de abordaje que implican la proyección ontológica que ya mencioné, proyección sobre la cual se pueden basar futuras afirmaciones de conocimiento sobre lo proyectado.

Quizás ya pueda notarse el dejo kantiano que esta posición tiene, especialmente si se recuerda la forma en la que, según vimos en el capítulo 2 de esta investigación, la posición expuesta originalmente por Kant fue reinterpretada por los primeros intentos de encontrar una posición intermedia —o explícitamente anti-reduccionista— entre una postura netamente mecanicista y otra de corte vitalista.

7.1. Emergencia, reducción y complejidad

Es poco probable que un tema tan complicado como la emergencia se someta pacíficamente a una definición concisa.

Johh H. Holland (1998, p. 3)

Emergencia es un concepto que apareció de distintas maneras a lo largo de esta investigación, y es una de las preocupaciones filosóficas que más se puede apreciar asociada al estudio de los sistemas complejos; algo que quizás se deba en particular por lo “arraigada” que suele estar la creencia en algunas comunidades científicas —especialmente en la física— sobre el ideal de predictibilidad perfecta sobre los fenómenos de la naturaleza que se podría obtener a partir del conocimiento de sus *mecanismos* fundamentales. El estudio de sistemas complejos, con su inherente dificultad para hacer buenas predicciones (y retrodicciones) sobre su comportamiento, estaría, por tanto, poniendo en jaque la creencia tan enraizada acerca del poder de la empresa científica como medio para generar certezas —o “verdades”— acerca del mundo natural a base de explicaciones del nivel que se tome como ontológicamente fundamental o esencial, el de aquellas substancias que hagan a la naturaleza última de lo ocurre, en tanto todo lo que ocurre lo hace por composición de esas entidades primeras.

Quizás hasta un tanto en contra de la clase de base del conocimiento que en última instancia le hubiese gustado obtener, la conjunción de la mecánica de Newton con su «*hypothesis non fingo*» constituyen la primera “asistencia gravitacional” en el desplazamiento de la forma de interrogar a la naturaleza y de tomar nota de sus respuestas que había comenzado con la revolución científica —o que de hecho fue el puntapié de tal revolución, especialmente de la mano de Galileo, de quien se puede decir que fue pionero al ver la necesidad de combinar el mundo de las “situaciones artificiales”, tanto mentales como artesanales, en donde sobresale una noción de *experiencia*, con ese otro mundo de la razón que parece por momentos también poder describir el mundo natural mediante los mundos que crea entre puntos, líneas, ángulos y otros caracteres que puede ir combinando.¹

Creo que la habilitación de nuevos espacios epistémicos —y por tanto es un carácter importante a tener en cuenta en un análisis del progreso científico— se da cada vez que se generan nuevas *representaciones manipulables*, tanto para fenómenos y aspectos de ellos ya identificados como *sobre o acerca de* las representaciones o modelos ya existentes. Ciertamente, detrás de todas estas *abstracciones* (ver más abajo), se pueden llevar a cabo proyecciones ontológicas, como ya remarqué; y es muchas veces en base a esas proyecciones que luego se pueden realizar distintas clases de extrapolaciones, incluyendo aquella que extrapola una forma particular de producción de conocimiento como *locus explicativo* último. Este es el caso de muchos de los “reduccionismos predictivos” que han aparecido a lo largo de la historia de la ciencia y que, además, suele tanto producir como ser causa de una confusión (o identificación) entre predicciones y explicaciones; siendo quizás el demonio de Laplace uno de sus ejemplos más claros:

Podríamos considerar el estado presente del universo como el efecto de su pasado y la causa de su futuro. Un intelecto que en cierto momento conociera todas las fuerzas que ponen en movimiento a la naturaleza, y la posición de todos los ítems de los que la naturaleza está compuesta, si este intelecto fuera también lo suficientemente vasto

¹Si bien Newton en los *Principia* no puede dar una explicación causal de la gravedad, no sólo creía que investigar las causas de la naturaleza era una empresa digna de ser perseguida, sino también que la exploración de esas causas debía proceder en términos de niveles. Si bien por momentos Newton parece proponer una “física de Dios” y asumir una forma de panteísmo, es consciente de los límites epistémicos que poseen los seres humanos y que el acceso o estudio a las causas últimas debe proceder en una suerte de camino inverso desde los efectos a las causas primeras. Las consecuencias de la interpretación matemática del mecanicismo newtoniano tendría su apogeo en el fenomenalismo encabezado por Mach hacia finales del siglo XIX en términos de una erradicación de la metafísica, rúbrica bajo la que caería cualquier intento de ir más allá de los fenómenos accesibles en tanto requerirían de una extrapolación que, según Mach, no era un paso epistemológicamente válido. Más allá de las hipótesis bajo las cuales operará en su formulación estadística de la termodinámica —supuestos que merecen un análisis filosófico detallado cuyo lugar no es aquí—, la sugerencia de Boltzmann de la manera en la que se debe trazar la conexión entre la multiplicidad de los estados microscópicos de los constituyentes de un sistema macroscópico bajo estudio constituye un caso particular de lo que sugiero debe entenderse como una abstracción, en tanto se postula una relación de muchos estados a un número menor al mismo tiempo que se cambia el nivel de análisis bajo el supuesto de que el cambio de nivel sólo conlleva facilidades para el análisis pero no introduce nuevos estados posibles en el nivel inferior o microscópico. Mi interpretación de Newton le debe mucho a (Moulines, 1976)

para poder analizar estos datos, podría colocar en una sola fórmula los movimientos de los cuerpos más grandes del universo y aquellos del átomo más pequeño; puesto que para ese intelecto nada sería incierto y el futuro, al igual que el pasado, le estaría presente a sus ojos.

(Laplace, 1812, p. ii) Bajo el estado del conocimiento de la naturaleza a comienzos del siglo XIX, Laplace se permitía continuar su presentación de su “demonio” de la siguiente manera:

La mente humana se permite, en la perfección que le ha podido otorgar a la astronomía, un dejo de esta inteligencia. Sus descubrimientos en la mecánica y en la geometría, junto con el descubrimiento de la gravitación universal, le han permitido comprender en las mismas expresiones analíticas, los estados pasados y futuros del sistema del mundo. Al aplicar los mismos métodos a otros objetos de su conocimiento, ha logrado relacionar fenómenos observados a leyes generales, y anticipar aquellos que, dadas ciertas circunstancias, deben aparecer. Todos estos esfuerzos en la búsqueda de la verdad tienden a llevar a la mente de manera continua hacia la inteligencia que acabamos de mencionar, aunque siempre se mantendrá infinitamente distante de esta inteligencia. (Laplace, 1812, pp. ii-iii)

La “infinita distancia” a la inteligencia de este demonio a la que permanece el intelecto humano, lo obliga a recurrir a “metodologías epistémicamente imperfectas” (en contraste contra este ideal) con las que lidiar en la formulación de conocimiento en todos los ámbitos en los que dicha perfección analítica no pueda obtenerse, como es el caso de la probabilidad como técnica de conocimiento, que de hecho es el tema del tratado en el que Laplace hace su comentario. Si bien el argumento de Laplace tiene una serie de problemas y objeciones que se le pueden plantear, en parte provenientes de las conclusiones epistémicas que realiza —e inspiró en muchos de sus lectores— hay dos puntos en particular que deseo destacar, por su conexión con el problema filosófico de la emergencia y la reducción. Por un lado, se encuentra la mención explícita de las capacidades limitadas de los seres humanos en cuanto agentes epistémicos. Dejando de lado, si es que es factible, la pregunta ontológica por la “naturaleza última de la naturaleza”, todo agente epistémico se enfrentaría a una clase de límite de lo cognoscible en base a la finitud de sus medios de cálculo y de observación. Esto es, se debe enfrentar a mediciones imperfectas en el pasaje de las observaciones a un sistema de representaciones, sistema con el cual el agente puede luego operar sobre las representaciones para obtener resultados que puedan ser luego comparados con otras observaciones. Nace así un criterio de la corrección o verosimilitud de las predicciones que se pueden hacer en base a las observaciones en conjunción con un aparato teórico, cuya función es la de generar una novedad antes de que esa novedad aparezca en la naturaleza. El éxito predictivo se vuelve así un indicador de la corrección del sistema teórico empleado para tal empresa. A esta postura podríamos llamarle “el lado fenomenológico de la ecuación”. Del otro lado, suele escribirse una realidad cuyas operaciones y entidades sean *equiparables* a las operaciones del sistema de cálculo empleado

del lado fenomenológico. Gran parte de los problemas de la filosofía de la ciencia giran en torno a cómo comprender esta relación, y en particular la cantidad de entidades básicas que deban postularse de cada lado.²

Aunque hay entonces un reconocimiento de los límites de las capacidades de los agentes, el ideal regulativo sigue siendo el de la perfección de predicción que tendría un demonio laplaceano para conocer todo estado futuro desde el conocimiento total de un estado actual y de las leyes que rigen sus transformaciones. Si esta actitud o postura se pone en conjunción con la creencia en un atomismo, según el cual existen entidades últimas irreducibles y que componen todo lo que existe, es posible formular una tesis sobre el conocimiento último por reducción a los estados posibles y las leyes de transformación de estas entidades últimas. Es bien conocida la expresión de Dirac, como mucho eco laplaceano, acerca de cómo el único problema que queda por resolver es el de la dificultad del cálculo:

La teoría general de la mecánica cuántica está ya casi completa, y las imperfecciones que aún persisten están relacionadas con el ajuste exacto de la teoría a las ideas de la relatividad. Éstas sólo plantean dificultades cuando se trata de partículas a gran velocidad y, por lo tanto, no tienen importancia en la consideración de la estructura atómica y molecular y de las reacciones químicas ordinarias, en las que, de hecho, suele ser suficientemente precisa si se desprecia la variación de la masa con la velocidad de la relatividad y se suponen sólo las fuerzas de Coulomb entre los distintos electrones y núcleos atómicos. *Las leyes físicas subyacentes necesarias para la teoría matemática de una gran parte de la física y de toda la química son, pues, completamente conocidas, y la dificultad estriba únicamente en que la aplicación exacta de estas leyes conduce a ecuaciones demasiado complicadas para ser solubles.* (Dirac, 1929, p. 714. El énfasis es mío)

Si bien es cierto que gran parte del progreso científico se debe a nuestro aumento de la capacidad de cálculo (Humphreys, 1990, 2004), dicho progreso al mismo tiempo tiene un costado empírico, que necesariamente impactarán en la manera en que se pueda comprender la relación entre los dos lados de la ecuación imaginada. La *reducción* última a una descripción teórica y sistema de cálculo asociado solo puede darse entonces bajo el supuesto de que la totalidad de las capacidades de esas entidades, cualquiera sea el ambiente (i.e. otras entidades fundamentales y conglomerados de ellas) han sido descriptas. Parte del argumento que presento en este capítulo debe leerse como en contra de esta suposición. Si bien es cierto que mucho del conocimiento del mundo puede progresar por el

²O, precisamente, de qué lado es correcto ubicarlas. Quizás pueda sonar como una exageración, pero desde mi punto de vista del rol que tiene la filosofía y la epistemología en particular como “conectora de problemas”, creo que la mayoría –si es que no todos– los problemas conceptuales asociados a la ciencia pueden verse como casos particulares de esta “tensión esencial” entre posiciones eliminativistas en un extremo y “n-alistas” (donde el dualismo es el caso $n = 2$), con discusiones muchas veces enardecidas por confundir las dimensiones metodológicas, epistemológicas y ontológicas que cualquier descripción conceptual conlleva y cuya conexión también debe aclararse.

aumento de nuestra capacidad de cálculo, y no solo limitado a la predicción, sino a nuestra capacidad de dar explicaciones, todo conocimiento teórico se enfrenta a la última prueba y constante fuente de novedad que debe entenderse en términos de nuestra capacidad de acción o intervención en la naturaleza que pretendemos conocer, como bien ha sido articulado por (Hacking, 1983), entre otros. Pero, de todas maneras, se puede todavía sostener que el conocimiento científico puede tener esta doble cara de teorías o representaciones por un lado, y experimentos por el otro; y al mismo tiempo que todo conocimiento pueda ser reducido, y en última instancia derivado de, aquel provisto por la disciplina que estudia aquellas entidades fundamentales. Una de las formas en la que surge la pregunta por la fertilidad epistemológica de una concepción de emergencia es precisamente la de desatar formas de reducción y criterios asociados de un reduccionismo ontológico. Paul Hoyningen-Huene lo expresa de esta manera:

La idea esencial de emergencia sostiene que cuando se combinan elementos (nivel A) para conformar un sistema (nivel B), este sistema puede mostrar propiedades nuevas e inesperadas, propiedades que son fundamentalmente incomprensibles, impredecibles e inderivables desde el nivel de los componentes. Obviamente, esta idea está en completa oposición a la intuición reduccionista fundamental y puede ser llamada la intuición emergentista fundamental. Ambas intuiciones presuponen el reduccionismo ontológico: el sistema B está compuesto por componentes-A. Sin embargo, difieren sobre las consecuencias de este hecho, es decir, sobre si es posible o no inferir el reduccionismo epistemológico, explicativo y funcional a partir de él. (Hoyningen-Huene, 2007/2019, p. 124)

Por esta razón, gran parte del interés por la noción de emergencia surge también como una manera de legitimar una rama específica del conocimiento científico y sostener su autonomía. Este fue el caso, como vimos, por algunas de las preocupaciones filosóficas alrededor del surgimiento de la biología como disciplina autónoma desde mediados del siglo XIX en adelante. Incluso en la actualidad, sigue siendo tema de debate la validez de la afirmación de Dirac y la subsecuente pregunta por si el obstáculo es una cuestión de “meramente” la dificultad del cálculo o si, más bien, existen incluso fenómenos cuya naturaleza no pueda ser captada *en su totalidad* al nivel de los componentes que se tomen como fundamentales. Así, la autonomía y, por tanto, la *irreductibilidad* de la química a alguna rama de la física es un tema de debate actual en la filosofía de la química, como se puede observar en numerosos capítulos de la colección (Scerri & McIntyre, 2014). Fenómenos como la superconductividad ha sido usada por algunos como un claro ejemplo de emergencia, mientras que por otros es visto como un logro más de un programa reductivista.³

³Estoy extrapolando un tanto, pero esto me recuerda a una expresión de von Neumann acerca de los riesgos de sobreparametrizar un conjunto de datos que se pretende modelar: “Con cuatro parámetros, puedes aproximar un elefante. Dame cinco y haré que hasta mueva la trompa.” La lección filosófica creo que es que con suficientes “parámetros conceptuales” se puede ajustar un caso a casi cualquier descripción teórica. El arte, para variar, está en encontrar el balance entre generalidad y especificidad, algo que quizás por definición no pueda lograrse para todos los casos.

Una de las posiciones más influyentes sobre cómo entender el reduccionismo es la propuesta por Ernst Nagel. Si bien claramente no fue Nagel el primer filósofo de la ciencia en dar un modelo de reducción, sí podría decirse que se trata del primer modelo detallado de qué es lo que cuenta como reducción bajo una concepción particular de teorías y leyes científicas, y al mismo tiempo que marcó el camino principal que seguirían las reflexiones filosóficas al respecto —muchas veces como una mala interpretación, a mi juicio, de la postura nageliana—, su modelo deja en claro que lo que está en discusión es la justificación de la *explicabilidad* de ciertas regularidades con respecto a un fenómeno que fueron encontradas en un dominio particular de investigación por parte de otro campo de investigación:

Una reducción, en el sentido en el que empleamos aquí la palabra, es la explicación de una teoría o de un conjunto de leyes experimentales establecidas en un campo de investigación por otra teoría formulada habitualmente, aunque no invariablemente, para otro dominio. (Nagel, 1961/2006, p. 445)

No es mi intención analizar aquí en profundidad el modelo nageliano, sólo pretendo usarlo como camino para señalar algunos de los problemas que han surgido por no tener en cuenta de manera correcta el rol de las capacidades inferenciales y los objetivos de los agentes epistémicos involucrados. Además, estas concepciones suelen considerar a la reducción y la emergencia como procesos sincrónicos, en lugar de atender a las transformaciones en el tiempo que estarían involucradas. Pero el modelo de Nagel sí ilustra algo que creo que es necesario atender a la hora de hablar de progreso del conocimiento (léase “evolución”) y del aprendizaje, asociando estos puntos a la utilidad o fertilidad de las transferencias de conocimiento entre dominios. La posición de Nagel es sin duda un tanto rígida, especialmente por el rol que cumple en ella la lógica:

se efectúa una reducción cuando se demuestra que las leyes experimentales de la ciencia secundaria (y, si ésta posee una teoría adecuada, la teoría también) son consecuencias lógicas de las suposiciones teóricas (inclusive de las definiciones coordinadoras) de la ciencia primaria. (Nagel, 1961/2006, p. 463)

Las definiciones coordinadoras son las habitualmente denominadas “leyes puente” que se agregan a la teoría reductora para poder hacer efectiva la relación con las consecuencias de la teoría a ser reducida. Este punto, que muchos han tomado como crucial en el modelo de Nagel, es uno de sus puntos más débiles, en tanto las leyes puente suelen ser agregadas como axiomas de manera *ad hoc* para que las expresiones resultantes incluyan términos que hagan referencia a las entidades de las leyes experimentales o fenomenológicas de la teoría reducida. Parte de la debilidad resulta del esquema formal que se emplea, en tanto no puede dar cuenta de la dinámica inherente en los procesos que busca explicar, forzando esta en una regla en los esquemas de codificación. Nagel reconoce que esto puede volver a la reducción inerte y no llevar al desarrollo del dominio científico cuyas leyes están siendo

reducidas, lo cual es un requisito para una buena reducción:

para que una reducción señale un avance intelectual de importancia no basta que leyes establecidas previamente de la disciplina secundaria estén representadas dentro de la teoría de la disciplina primaria. La teoría también debe ser fértil en sugerencias útiles para desarrollar la ciencia secundaria y debe brindar teoremas referentes al tema de ésta que aumenten o corrijan sus leyes. (Nagel, 1961/2006, p. 473)

Una forma habitual de entender estar crítica suele ser reconociendo la desconexión o falta de “relación natural” que puede estar ocurriendo en la relación de reducción, a veces por sostener la importancia de las relaciones formales por sobre las ontológicas o “causales”. La relación entre los dominios, por tanto, no debe ser inerte ni agregada desde afuera. Ulises Moulines lo expresa en estos términos:

Sin embargo, el actual concepto estructuralista de la reducción todavía no dice todo lo que hay que decir sobre la reducción. Hay al menos otro aspecto de la reducción que se pasa por alto en el esquema (R).⁴ Es lo que me gustaría llamar “el aspecto ontológico”. Quiero argumentar que, para tener una imagen completa de una relación reductiva entre dos teorías, hay que tener en cuenta algún tipo de relación entre los respectivos dominios. De lo contrario, cuando nos enfrentemos a un ejemplo particular de un par reductivo, nos parecerá que todo lo que tenemos es una relación matemática *ad hoc* entre dos conjuntos de estructuras, que quizás por casualidad tengan las propiedades matemáticas que exigimos a la reducción, pero que no dicen realmente nada sobre “el mundo”. Podríamos tener una relación reductora entre dos teorías que son completamente extrañas entre sí. (Moulines, 1984, p. 55)

Esto es, debemos poder extraer o ganar algo, en términos epistémicos, con la reducción. Sin embargo, este problema, creo, no solo afecta a la relación de reducción, sino a cualquier relación que intente atar o conectar un sistema con otro, especialmente si la naturaleza de esos sistemas es distinta; ahora bien, también creo que la misma dificultad aparece cuando se intenta relacionar dos sistemas o modelos formales. En todos los casos existe un costo en términos de la dificultad asociada con el proceso o las operaciones involucradas por los agentes epistémicos para llevar a cabo cualquier cambio de representación, incluso sin tomar en cuenta la dificultad del descubrimiento. En última instancia, debemos considerar que toda complejidad ontológica u organizacional conlleva una complejidad cognitiva, las cuales están necesariamente vinculadas por una complejidad computacional o complejidad de las transformaciones o pasajes de una a otra. Además, incluso bajo complejidad organizacional finita, a base de sus operaciones, la complejidad operativa y cognitiva que puede ser creada es infinita:

Con esta interminable exfoliación de niveles de leyes, nuestro conocimiento del orden legal del mundo se autopotencia y siempre pueden surgir nuevas combinaciones para explotar las interrelaciones entre las antiguas disciplinas. Dada la química y la

⁴Moulines aquí se refiere puntualmente a su reconstrucción del estructuralismo de Sneed.

biología, podemos desarrollar la bioquímica; dadas las matemáticas y la astronomía, podemos desarrollar las matemáticas de las relaciones astronómicas. En cada uno de estos frentes cabe esperar nuevos conocimientos sobre los procesos legaliformes. Y está claro que tal proliferación infinita de leyes serviría también para bloquear cualquier perspectiva de completar la ciencia. En consecuencia, no es necesario suponer que la complejidad física de la naturaleza tenga que ser ilimitada para que la naturaleza tenga una profundidad cognitiva ilimitada. Al fin y al cabo, la tarea primordial de la ciencia consiste en descubrir los niveles de orden legal de la naturaleza, y la complejidad legal actual de la naturaleza es suficiente para nuestros propósitos actuales de proporcionar un descubrimiento potencialmente interminable.^{CXXVII} (Rescher, 1998, p. 46)

Bajo mi punto de vista, toda discusión de las relaciones entre distintas representaciones debe, por tanto, apoyarse sobre el costo operativo de transformar una en otra; de hecho la fertilidad epistémica dependerá sobre la factibilidad de llevar a cabo en la práctica dichas transformaciones y al menos en algunos casos poder reemplazar no solo una representación por otra, sino las operaciones o acciones que las representaciones permiten a los agentes epistémicos. Las reducciones no deben verse como afirmaciones en principio o en términos de “reducciones etcétera” como decía Hayek:

Hay que añadir aquí algunas observaciones sobre el significado evidente de nuestras conclusiones para evaluar los distintos tipos de “reduccionismos”. En el sentido de la primera de las distinciones que hemos hecho repetidamente —en el sentido de descripción general—, la afirmación de que los fenómenos biológicos o mentales no son “nada más que” ciertos complejos de eventos físicos, o que son ciertas clases de estructuras de tales eventos, estas afirmaciones son probablemente defendibles. Pero en el segundo sentido —la predicción específica—, que es el único que justificaría las afirmaciones más ambiciosas del reduccionismo, son completamente injustificadas. Una reducción completa sólo se lograría si pudiéramos sustituir la descripción de los acontecimientos en términos biológicos o mentales por una descripción en términos físicos que incluyera una enumeración exhaustiva de todas las circunstancias físicas que constituyen una condición necesaria y suficiente de los fenómenos biológicos o mentales en cuestión. De hecho, tales intentos siempre consisten —y sólo pueden consistir— en la enumeración ilustrativa de clases de acontecimientos, normalmente con un “etc.” añadido, que podrían producir el fenómeno en cuestión. Tales “etc.” no son reducciones que nos permitan prescindir de las entidades biológicas o mentales, o sustituirlas por un enunciado de sucesos físicos, sino que son meras explicaciones del carácter general de la clase de orden o patrón cuyas manifestaciones específicas sólo conocemos a través de nuestra experiencia concreta de ellas.^{CXXVIII} (F. A. Hayek, 1964, p. 65. El énfasis es mío)

Ahora veremos brevemente estos puntos desde la dirección “contraria”: la de la emergencia.

7.1.1. La emergencia de la emergencia

Pensamos que en la física —la Relatividad Especial y General, la Mecánica Cuántica y la Teoría Cuántica de Campos con el Modelo Estándar— encontraremos los fundamentos de los que podemos derivar el mundo, el devenir último. No podemos. Lo último puede apoyarse en los fundamentos, pero no es derivable de ellos. Este último, un desenvolvimiento incognoscible, se desprende de sus amarras fundacionales y flota libremente. Como dijo Heráclito, el mundo fluye.

Stuart S. A. Kauffman (2019, p. xii)

John Stuart Mill fue uno de los primeros en proponer ciertas generalidades como principios explicativos para fenómenos como los organismos que parecían surgir “desde abajo”, sosteniendo por un lado cierta continuidad con la constitución física de los elementos mientras que al mismo tiempo alguna clase de autonomía con respecto a las propiedades de las partes que se traducían en la necesidad de explicaciones de otra clase. Así comienza la tarea filosófica que caracterizaría a las posiciones emergentistas: la de formular un punto de contacto o de encuentro entre las posiciones extremas de los mecanicistas y su aparente reduccionismo a ultranza y los argumentos de imposibilidad de los vitalistas que conllevaban a operaciones de causas finales bajo alguna interfaz (o una armonía preestablecida) entre sustancias de distinto orden o clase (trasladando efectivamente así los criterios cartesianos para la explicación de la razón al reino de lo vivo). J. S. Mill en 1843 ya puede hacer afirmaciones como la siguiente:

Los cuerpos orgánicos están compuestos de partes semejantes a las de las materias inorgánicas, y que ellas mismas han estado primeramente en estado inorgánico; pero los fenómenos vitales que resultan de la yuxtaposición de estas partes en una cierta manera, no tienen ninguna analogía con los efectos que producirían las sustancias compuestas, consideradas como agentes puramente físicos. Sea cualquiera el grado de adelanto que pueda alcanzar el conocimiento de las propiedades de los diversos ingredientes de un cuerpo vivo, es cierto que nunca la simple adición de acciones separadas de estos elementos equivaldría a la acción del cuerpo vivo mismo. (Mill, 1843/1917, p. 349)

Mill va a agrupar a los efectos de los seres organizados y de la materia compuesta bajo el nombre de “heteropáticos”, a los que corresponderán leyes heteropáticas, en claro contraste con las propias de los fenómenos simples (u “homopáticos”) que pueden explicarse por las leyes homopáticas de la mecánica y la posibilidad de sumar o componer las causas de manera sencilla. También hay una distinción de grado o de nivel. Así, las leyes heteropáticas (de alto nivel) no *suplant*an a las leyes de bajo nivel (tanto heteropáticas como homopáticas) sino que las suplementan, siempre y cuando no entren en conflicto. Dice

Mill sobre esta relación en el caso de los organismos vivos:

Estos cuerpos continúan como antes de obedecer a las leyes químicas y mecánicas, tanto que la acción de estas leyes no es contrarrestada por las leyes nuevas que los gobiernan como seres organizados. En suma: cuando tiene lugar un concurso [*concurrency*] de causas que ponen en juego leyes nuevas, no teniendo analogía con ninguna de las que se manifiestan en la acción de causas separadas, las leyes nuevas, aun suspendiendo una parte de otras, pueden coexistir con otra parte y aun combinar el efecto de estas leyes con el suyo propio. (Mill, 1843/1917, pp. 351-352)

Los efectos homopáticos responden pues al principio de “composición de causas”. Las causas se pueden descomponer y calcular la resultante. Las leyes que finalmente subsuman la relación entre estas causas y los efectos se dicen leyes homopáticas y permiten hablar de la operación de un modo mecánico de acción. Mientras que los efectos heteropáticos se caracterizan, en cambio, por vía negativa, en cuanto violan el principio de composición de causas. Esto es: la acción conjunta de múltiples causas no se produce por una manera suma de efectos individuales, sino que realmente actúa como un todo, y estaríamos frente a un modo químico de acción.

Esta simple exposición de la postura de Mill puede verse como semejante en muchos puntos con la manera en que algunos nuevos mecanicistas ven en la distinción entre máquinas simples y máquinas complejas:

La naturaleza y la plausibilidad de los modelos mecanicistas también se ven influidas por las características del pensamiento humano, especialmente por la propensión de los seres humanos a trazar las operaciones de forma lineal o paso a paso. Esto es especialmente evidente cuando consideramos las formas de organización posibles. Muchas máquinas son sencillas y constan de sólo un puñado de piezas que interactúan mínimamente o de forma lineal. En estas máquinas podemos rastrear y describir los acontecimientos que se producen de forma directa, relacionando primero lo que hace un componente y luego cómo afecta al siguiente. Este tipo de máquinas no requieren un gran esfuerzo cognitivo. Sin embargo, algunas máquinas son mucho más complejas: un componente puede afectar y ser afectado por varios otros, con un efecto en cascada; o puede haber una retroalimentación significativa de las etapas “posteriores” a las “anteriores”. En este último caso, lo que es funcionalmente dependiente no está claro. La interacción entre los componentes se vuelve crítica. Los mecanismos de este último tipo son sistemas complejos. En el extremo, son sistemas integrados. En estos casos, intentar comprender el funcionamiento de toda la máquina siguiendo las actividades de cada componente por fuerza bruta puede ser inútil.^{CXXIX} (Bechtel & Richardson, 1993/2010, p. 18)

Como mencioné anteriormente, no creo que esa complejidad sea *meramente* cognitiva, pero sí encuentro fértil la distinción entre clases de máquinas, aunque en virtud de los que sean capaces de hacer en un ambiente determinado y para la codificación con la que

decida operar su observador, no tanto en términos de sus operaciones internas.

El término “emergencia” propiamente dicho fue usado en esta dirección por primera vez por George Henry Lewes (1817–1878), adelantándose así a muchos filósofos que ya en el siglo XX volverían a ver a la emergencia como un concepto útil para explicar la naturaleza de lo mental y su relación con el substrato físico. Es interesante notar también como este filósofo se enfrentó al problema de la continuidad material de todo lo existente, mientras que al mismo tiempo que debía poder dar cuenta de la especificidad de las entidades existentes, lo que lograba introduciendo una noción de “modos de existencia”, procediendo a clasificar a las ciencias en base a los modos que estudian:

La ciencia es la clasificación sistemática de la experiencia. Postula la unidad de la Existencia con grandes variedades en los Modos de Existencia; asumiendo que hay una Materia en todas partes igual, bajo grandes diversidades en las complicaciones de sus elementos. La distinción de los Modos no es menos indispensable que la identificación de los elementos. Estos Modos se agrupan bajo tres órdenes supremos: Fuerza, Vida, Mente. Bajo el primero, se encuentran las propiedades generales que presentan todas las sustancias; bajo el segundo, las propiedades de la materia; bajo el tercero, las propiedades generales que presentan las sustancias animales organizadas. La primera clase se subdivide en Física, celeste y terrestre, y Química. La física trata de las sustancias que se mueven como masas, o que vibran y giran como moléculas, sin sufrir ningún cambio apreciable de integridad estructural; muestran cambios de posición y de estado, sin los correspondientes cambios en sus elementos. La química trata de las sustancias que sufren cambios moleculares de composición que destruyen su integridad.^{CXXX} (Lewes, 1877, pp. 4-5)

Los seres vivos todavía sufren una transformación más radical, pero al ocurrir de manera simultánea en todo el organismo se logra mantener un equilibrio que hace permanecer a la estructura, pese al cambio constante de sus elementos componentes; en línea con los determinismos internos planteados por Bernard:

La segunda clase, aunque presenta propiedades físicas y químicas, se distingue notablemente por la adición de propiedades llamadas vitales. Su peculiaridad consiste en lo siguiente: sufren cambios moleculares de composición y descomposición que son simultáneos, y por esta simultaneidad conservan su integridad de estructura. Cambian su estado, y sus elementos, pero conservan su unidad, e incluso cuando se diferencian siguen siendo específicos. A diferencia de todos los demás cuerpos, los organizados nacen, crecen, se desarrollan y decaen, a través de una serie prescrita de evoluciones graduadas, siendo cada etapa la condición indispensable de su sucesor, no apareciendo nunca ninguna etapa sino en su orden serial.^{CXXXI} (Lewes, 1877, p. 5)

La tercera clase son aquellas que mientras conservan las características de las anteriores, se vuelven «especializadas» por una nueva propiedad denominada «sensibilidad», convirtiendo así a las anteriores por medio de «nuevas complejidades de las fuerzas elementales»

(Lewes, 1877, p. 5). Parte del objetivo de Lewes aquí es poder desarrollar una metafísica más simple, sin la necesidad de postular nuevas y absolutamente distintas sustancias, sino mostrar que la variedad de fenómenos observados podía ser vista como una consecuencia de la evolución de las operaciones de las que es capaz la materia, en cuyas etapas hay una fuerte dependencia de las clases de organización que se dieron anteriormente, pero al mismo tiempo se generan nuevas capacidades. Es precisamente con respecto a la evolución y generación de nuevas formas que Lewes emplea por primera vez el término «emergencia» (y al mismo tiempo se adelanta al debate entre continuistas y equilibrios puntuados):

El paciente trabajo de muchos observadores (¡cuánta paciencia sólo pueden concebir los que han hecho tales observaciones!) ha detectado algo de esta maravillosa historia, y ha permitido a la mente imaginar algunas de las incesantes separaciones y reuniones, químicas y morfológicas. Cada etapa de la evolución se presenta como la consecuencia de una etapa precedente, a la vez una emergencia y una continuación; de modo que no es posible la transposición de etapas; cada una tiene su lugar asignado en la serie.^{CXXXII} (Lewes, 1877, pp. 212-213)

Esta manera *diacrónica* de ver a la emergencia, como la creación de novedad, contrastará luego de manera fuerte con la mirada filosófica que ve a la emergencia como una posición por definición anti-reduccionista y la interpreta de manera *sincrónica*. Aunque Lewes, claro, atiende correctamente a que hay una jerarquía en términos de la relación que existe entre las ciencias, que es una de dependencia. Si bien no habla de emergencia en este sentido epistémico, bien puede leerse como proponiendo una suerte de anti-reduccionismo. En particular, es recién en la biología que puede apreciarse la importancia de la «precesión de las causas»:

Las diversas ciencias, en su desarrollo en serie, desarrollan todo el arte del Método. Las matemáticas desarrollan la abstracción, la deducción y la definición; la astronomía, la abstracción, la deducción y la observación; la física agrega la experimentación; la química agrega la nomenclatura; la biología agrega la clasificación y, por primera vez, la importante noción de las *condiciones de existencia* y de la variación de los fenómenos en condiciones variables, de modo que la relación del organismo con su medio es algo que nunca debe perderse de vista. En la Biología también emerge claramente por primera vez lo que considero la verdadera noción de causalidad, es decir, la *procesión* de causas, la combinación de factores en el producto, y no una determinación *ab extra* del producto. En la Vitalidad y la Sensibilidad se nos hace saber que las causas están *dentro* y no *fuera* del organismo; que el efecto orgánico es la causa orgánica en funcionamiento; que hay autonomía pero no autocracia; el efecto surge como una resultante de las condiciones cooperantes. En la Sociología, por último, vemos que se ponen de relieve las *condiciones históricas de la existencia*. A partir de la debida apreciación de las condiciones de existencia, materiales e históricas, captamos el verdadero significado del principio de la relatividad.^{CXXXIII} (Lewes, 1877, p. 5. Énfasis en el original)

De esta manera, las ciencias de los modos más complejos de existencia dependen de las ciencias de los modos más simples, ya que estas últimas ayudan a la explicación de los fenómenos complejos, pero dichos eventos no pueden reducirse a las dimensiones por ellas estudiadas.

Las posturas de Mill y Lewes fueron muy influyentes en los programas filosóficos de comienzos del siglo XX que se dieron a llamar «emergentistas» y tenían como misión aclarar el vacío conceptual que permanecía al intentar dar cuenta de la autonomía de las ciencias especiales —básicamente toda que no fuera la física, incluyendo la psicología y la sociología— aceptando al mismo tiempo una metafísica que no obligue ni a un dualismo ni a formas de idealismo. Samuel Alexander — el primero del conjunto usualmente referido como “los emergentistas británicos”— hace explícita la búsqueda de un fisicalismo no-reductivo, que quizás pueda caracterizarse en líneas similares al llamado monismo anómalo que en filosofía analítica suele asociarse a la posición defendida principal, pero no exclusivamente por Donald Davidson (D. Davidson, 1970/1980). Al igual que G. H. Lewes y gran parte de la posterior tradición analítica del siglo XX, Alexander llega a esta posición por una preocupación por la naturaleza de lo mental y su relación con el mundo físico, posición en la que también se puede apreciar la manera en que su temprana forma de entender a la ética a través de la biología influye en la forma en la que pretender defender tanto la continuidad de lo mental con el sistema físico que parece soportarlo, pero, al mismo tiempo, mostrar que existe una identidad propia y autónoma:

La mente, aunque desciende en su lado físico de las formas inferiores de existencia, es, cuando llega, una nueva cualidad en el mundo, y no deja de ser original porque en ciertos aspectos sea resoluble en movimientos físicos, como no desaparece el color porque sea resoluble en vibraciones.^{CXXXIV} (S. Alexander, 1914, p. 26)

De hecho, la posición que mantendrá con respecto a los niveles en la naturaleza se apoya en sugerir que la relación entre los distintos órdenes o niveles es similar a la relación que existe entre el cuerpo y la mente.⁵ La influencia de Lewes también es notable en la forma en la que Alexander define qué es un objeto a base de un cierto grado de complejidad de su agregación, y de cuyas interacciones nuevas clases o complejidades de movimientos podrán surgir, siendo la consciencia una de las motivaciones y objeto de estudio:

Las cosas o los existentes empíricos son [...] agrupaciones dentro del Espacio-Tiempo, es decir, son complejos de eventos o movimientos puros en diversos grados de complejidad. Tales finitos tienen todos los caracteres categoriales, es decir, todas las características fundamentales que se desprenden de la naturaleza de cualquier espacio-tiempo [...] como en el curso del Tiempo llega a existir una nueva complejidad de movimientos, surge una nueva cualidad [...] El caso que nos sirve de pista es la apa-

⁵También es notable la influencia de William James, quien en el texto de 1914 es mencionado en dos ocasiones, con especial referencia a la edición de los ensayos sobre empirismo radical (James, 1912) que Perry confeccionó tras la muerte de James en 1910.

rición de la cualidad de la conciencia a partir de un nivel inferior de complejidad que es el vital.^{CXXXV} (S. Alexander, 1920, v. 2, p. 45)

Es en virtud de su complejidad que estos procesos conllevan la existencia de nuevos órdenes o niveles en la naturaleza, con comportamiento propio y leyes especiales:

La cualidad superior emerge del nivel inferior de la existencia y tiene sus raíces en él, pero emerge de él, y no pertenece a ese nivel, sino que constituye su poseedor un nuevo orden de existente con sus leyes especiales de comportamiento.^{CXXXVI} (S. Alexander, 1920, v. 2, p. 46)

Aunque Alexander sí deja abierta la posibilidad de que ante el progreso científico, la física y la química puedan brindar explicaciones de estos entramados complejos de existentes:

Se trata, pues, de una determinada constelación o complejo o colocación de procesos físico-químicos que se comportan vitalmente, y la presencia de tales constelaciones hace que la estructura a la que pertenecen sea un organismo. Llamarla organismo no es más que marcar el hecho de que su comportamiento, su respuesta a la estimulación, es, debido a la constelación, de un carácter diferente de los que la física y la química se ocupan ordinariamente, y en este sentido algo nuevo con una cualidad apropiada, la de la vida. *Al mismo tiempo, este nuevo método de comportamiento es también físico-químico y puede ser exhibido sin resto en términos físico-químicos, siempre que se conozca la naturaleza de la constelación.* [Hasta que no se conozca esa constelación, lo que es especialmente vital puede eludir la aplicación fragmentaria [*piecemeal*] de los métodos de la física y la química [...]. Si el estudio de la vida no es uno con una materia peculiar, aunque esa materia sea resoluble sin residuos en procesos físico-químicos, entonces nos veríamos obligados en última instancia a declarar [...] que la psicología es un departamento de la fisiología, y la fisiología de la física y la química [...].^{CXXXVII} (S. Alexander, 1920, v. 2, pp. 62–63. El énfasis es mío)

En los términos en los que la discusión filosófica tomará luego, tras el retorno de la preocupación por la emergencia, la posición de Alexander podría considerarse como una propuesta por una «emergencia débil»; se trata de patrones causales de alto nivel que no se agregan ni mucho menos reemplazan a las interacciones fundamentales o de bajo nivel, aunque pese a que, en tanto composición última toda dinámica de alto o macro nivel sea llevada a cabo por entidades de micro nivel, las interacciones no sólo no se pueden predecir desde el conocimiento que se tenga de las entidades del micro nivel, sino que esos patrones de comportamiento de los agregados o estructuras tampoco podrían existir. Es por eso que conllevan la necesidad de un nivel de *explicación* autónomo, con su propio vocabulario conceptual.⁶

⁶Aunque una clara diferencia con posiciones de emergencia débil como la de Mark Bedau comentada en el capítulo anterior (sección 6.3) está en la importancia de reconocer la dificultad intrínseca de las operaciones necesarias para substituir conocimiento de macro-nivel por uno de micro-nivel y obtener los mismos resultados de manera eficiente (o en la *práctica*).

La metafísica general (si es que no decir directamente cosmogonía) de Alexander no tuvo muchos adeptos, pero sí creo que se puede decir que tuvo profunda influencia en la manera en la que muchos filósofos se acercaron a problemas metafísicos y epistemológicos, como North A. Whitehead y los otros dos miembros del conjunto de emergentistas británicos, Lloyd Morgan y C.D. Broad.

La postura de Broad es particularmente interesante porque además de concebir una forma inferencial de la emergencia, según la cual las propiedades de algunos fenómenos no pueden predecirse desde el conocimiento de sus partes constitutivas.

Dicho en términos abstractos, la teoría emergente afirma que hay ciertos conjuntos, compuestos (digamos) por constituyentes, A, B y C en una relación R entre sí; que todos los conjuntos compuestos por constituyentes del mismo tipo que A, B y C en relaciones del mismo tipo que R tienen ciertas propiedades características; que A, B y C pueden aparecer en otros tipos de complejos en los que la relación no es del mismo tipo que R; y que las propiedades características del conjunto R(A;B;C) no pueden deducirse, ni siquiera en teoría, a partir del conocimiento más completo de las propiedades de A, B y C aislados o en otros conjuntos que no sean de la forma R(A;B;C).^{CXXXVIII} (Broad, 1925, p. 61)

También agrega un factor relativo a su descubrimiento: hasta no encontrar instancias de dicho fenómeno, no se pueden formular leyes para ordenar y ganar control o predicción sobre tales instancias o tipos. Siguiendo un tanto la línea de Mill, Broad llama a estas leyes que no pueden derivarse de las leyes que rigen sobre los estratos inferiores «leyes trans-ordinales»:

No hay nada, por lo que veo, misterioso o anticientífico en una ley transordinal o en la noción de características últimas de un orden dado. Una ley transordinal es tan buena como cualquier otra; y, una vez descubierta, puede utilizarse como cualquier otra para sugerir experimentos, hacer predicciones y darnos un control práctico sobre los objetos externos. La única peculiaridad es que debemos esperar a encontrar un caso real de un objeto de orden superior antes de poder descubrir dicha ley; y que no podemos deducirla de antemano de ninguna combinación de leyes que hayamos descubierto observando agregados de orden inferior.^{CXXXIX} (Broad, 1925, p. 79)

Esta postura es curiosamente cercana a lo que algunos físicos contemporáneos creen que puede hacer a la necesidad de una noción de emergencia como un punto clave para nuestra comprensión del mundo, en tanto gran parte de las leyes que pueden postularse como subyacentes a los fenómenos observables pueden decirse de tener un origen colectivo:

Cada vez estoy más convencido de que todas las leyes físicas -y no sólo algunas- son de origen colectivo. Quiero decir con esto que la distinción entre leyes fundamentales y leyes que se derivan de éstas es un mito, como lo es también la idea de que se puede dominar el universo por medio de la matemática exclusivamente.

En general, las leyes físicas no pueden predecirse sólo con el pensamiento: deben descubrirse por la vía empírica, en tanto el control de la naturaleza sólo se consigue cuando ésta lo permite por medio de un principio de organización. (Laughlin, 2005, p. xv)

Laughlin llega a esta conclusión tras una expansión del argumento que originalmente presentó junto a David Pines en un artículo desafiantemente titulado “La teoría del todo”, con clara intención de seguir una veta similar a la planteada originalmente por Anderson (1972). Laughlin y Pines trae a colación, básicamente, tanto los límites empíricos como calculacionales que conllevaría una teoría del todo si con ella se pretendiera hacer alguna clase de predicción o explicación de un fenómeno cuya escala diste de la de las entidades elementales de la teoría. Introduciendo brevemente la ecuación de Schrödinger como una descripción de la dinámica fundamental, sugieren que

La Teoría del Todo no es ni remotamente una teoría de todo. Sabemos que esta ecuación es correcta porque se ha resuelto con precisión para pequeñas cantidades de partículas (átomos aislados y moléculas pequeñas) y se encontró que concuerda en detalle con los experimentos. Sin embargo, no se puede resolver con precisión cuando el número de partículas excede alrededor de 10. Ninguna computadora existente, o que alguna vez existirá, puede romper esta barrera porque es una catástrofe dimensional. (Laughlin & Pines, 2000)

Más allá de algunos detalles de la manera en la que se presenta la argumentación, los autores señalan una serie puntos que creo que deben ser tenidos en cuenta en cualquier discusión sobre emergencia y reducción. En particular, creo que ponen de manifiesto con claridad que en todos los casos se trata de explorar las consecuencias de algunas premisas filosóficas que muchas veces quedan tácitas. Aquí, una tiene que ver con las dificultades y limitaciones que, casi paradójicamente, se enfrenta cualquier afirmación que diga que algo es posible *en principio*; clase de afirmaciones que, además, suelen prestarse a malas interpretaciones, especialmente cuando se intenta extrapolarlas mediante una analogía a un área o esquema de representación distinta de la original.⁷ Un segundo punto relacionado con éste es la importancia de la capacidad de cálculo disponible y la dificultad de los problemas computacionales; la complejidad computacional debe también tenerse en cuenta en cualquier afirmación acerca de la reducibilidad entre clases de fenómenos en cuya descripción estén involucrados sistemas formales.

⁷Quizás uno de los ejemplos más claros tienen que ver con las interpretaciones que se han propuesto sobre dos resultados matemáticos íntimamente relacionados: los teoremas de incompletitud de Gödel y las tesis sobre la computabilidad de Turing, Church, Kleene, Post y Markov. Dicho sea de paso, un problema semejante se ha planteado desde muy temprano en (filosofía de) la matemática, en torno a si las pruebas de existencia se toman como válidas, a diferencia de, por ejemplo, las pruebas constructivas promovidas por los intuicionistas y simpatizantes allegados. Excede a mis capacidades espacio-temporales actuales y quizás a aquellas posibles, pero me atrevo a decir que cualquier elucidación de este punto —y de su razonable conexión con la irrazonable efectividad de las matemáticas en las ciencias— debe comenzar por y elaborar sobre las reflexiones ofrecidas por L. Brouwer y H. Weyl. (Ver también la nota en página 233)

7.1.2. Emergencias contemporáneas

Gran parte de la investigación actual sobre sistemas complejos se centra en la emergencia de la complejidad, es decir, en la evolución de los sistemas.

Herbert H. A. Simon (1996, p. 179)

El éxito de la mecánica cuántica como candidata a teoría que pudiera explicar el comportamiento de toda la materia, y también el éxito de programas reduccionistas como el caso de la biología molecular, llevaron tanto a científicos como a filósofos a no seguir profundizando en la exploración del concepto de emergencia como parte fundamental de un marco conceptual sobre el que desarrollar filosofía de la ciencia. Esta tendencia comenzó a revertirse lentamente hacia la década de 1970, en parte como consecuencia del surgimiento de las ciencias de los sistemas complejos, aunque también en virtud del reconocimiento por parte de los filósofos acerca de las dificultades técnicas propias de las prácticas científicas teóricas, experimentales y computacionales. Algunos filósofos de la mente también se acercaron al problema en virtud de las dificultades que las ciencias cognitivas —incluyendo a las neurociencias y al campo de la inteligencia artificial— presentaban para explicar (o replicar) fenómenos como la conciencia.

Es de destacar que parte de esta preocupación siguió girando en torno a la pregunta por la autonomía y la legitimidad de las ciencias particulares o especiales, como se puede apreciar en el título alternativo del artículo de Jerry Fodor (1974) “Special Sciences (Or: The Disunity of Science as a Working Hypothesis)”, que resuena por la oposición a Oppenheim y Putnam (1958), quienes proponían que por la *composición* metafísica del todo sobre la base de las partes, la *explicación* de los fenómenos de cualquier nivel superior podría, al menos en principio, darse en los términos de la ciencia que se encargue de estudiar el nivel inferior o fundamental, como comento en la sección siguiente. De todas maneras, más allá del título, el claro objetivo de Fodor era arremeter en contra del modelo de reducción de Nagel y tender hacia posiciones filosóficas que atiendan a la complejidad de las prácticas científicas y a las consecuencias epistemológicas y metafísicas de la variedad de metodologías. Una de las formas que esta complejización de la noción de reducción tomó para argumentar precisamente en contra de la necesidad de postular un nivel emergente ha sido en términos de la superveniencia de aquello que se considere emergente (entidades, propiedades, etc) en un nivel determinado de aquello que, para ese nivel, provenga de un nivel que se declara como “más fundamental” y sobre el cual deberían llevarse a cabo las explicaciones de dichos fenómenos “emergentes”. Jaegwon Kim es uno de los filósofos que más se ha esforzado en desarrollar esta posición estando a favor una metafísica fisicalista reductivista:

Si existen propiedades emergentes, son causalmente, y por lo tanto explicativamente,

inertes y, por lo tanto, en gran medida inútiles para el propósito de las teorías causales / explicativas. Si estas consideraciones son correctas, las propiedades de nivel superior pueden servir como causas en relaciones causales descendentes sólo si son reducibles a las propiedades del nivel inferior. La paradoja es que si son tan reducibles, ya no son realmente de “nivel superior”. (Kim, 1999, p. 33)

Algo interesante a notar es que la razón por la que Kim pretende descartar la posibilidad de cualquier acción o delimitación del todo o sistema sobre sus partes —lo que puede darse a llamar como «causalidad descendente» [*downward causation*]

— es que asume que hay *una* configuración particular de la totalidad de los componentes esenciales o constitutivos que hacen al sistema que puede *explicar* el comportamiento observable. Además, asume que dicho estado es capaz de ser conocido y de inferir la evolución de los estados futuros en base al conocimiento recabado.

Por mi parte, creo que hay que aceptar que el estado de esa configuración depende de una proyección ontológica a partir de un estado de conocimiento perfectible y que nunca puede considerarse más que *efectivo*, dejando así lugar para la realizabilidad múltiple de los estados efectivamente observables; a cuyo análisis además debe sumarse la limitación de la capacidad de cálculo o inferencial que tengan los agentes epistémicos involucrados en el estudio de ese fenómeno particular que se pretende explicar. Nótese en lo siguiente cómo Kim pareciera operar a partir de la posibilidad de obtener un conocimiento completo de un nivel fundamental y de un estado particular de su configuración en un momento determinado:

Supongamos que cualquier objeto tiene una descripción microestructural completa única: es decir, cualquier sistema físico puede describirse exhaustivamente en términos de

- (i) las partículas básicas que lo constituyen (esto supone el atomismo, que la mayoría de los emergentistas clásicos aceptaban);
- (ii) todas las propiedades físicas intrínsecas de estas partículas;
- (iii) las relaciones que configuran estas partículas en una estructura (con “unidad sustancial”, como habrían dicho algunos emergentistas). (Kim, 1999, pp. 6-7)

De esto, según Kim, se sigue entonces que

Tal descripción nos dará la “relación” total de los constituyentes basales de los que hablaban a menudo los emergentistas; también nos da lo que podemos llamar la propiedad total micro-basada (o propiedad microestructural total) del sistema - una macropropiedad (macro ya que pertenece al sistema como un todo) que está constituida por los microconstituyentes básicos del sistema, sus propiedades y las relaciones estructurantes que los configuran en un sistema con unidad y estabilidad como una sustancia. (Kim, 1999, p. 7)

Desde mi punto de vista, la validez de un argumento semejante solo puede seguirse bajo la creencia en la posibilidad de obtener la misma clase de conocimiento que parece solo estar disponible para un demonio laplaceano, algo que está más allá de todos nuestros límites en tanto que seres finitos.

Las críticas usuales a esta concepción de reduccionismos atienden a que en todos los casos se trata de reducciones locales, sin una sistematicidad gracias a la cual se pueda generalizar a toda la ciencia. Nancy Cartwright, por citar un ejemplo, pone en estos términos su crítica a la clase de fundacionalismo metafísico podrían acompañar a estas reducciones más débiles:

La superveniencia se presenta como un paso adelante respecto al reduccionismo. De manera simplista, supongo que la ventaja es que podemos sustituir una clase de reducción más débil, la “reducción de token a token”, por las más tradicionales “reducciones de tipo a tipo”, que estaban mostrándose difíciles de llevar a cabo. Pero el punto de vista tradicional tenía argumentos a su favor. La ciencia esboza una serie de conexiones bastante sistemáticas entre las microestructuras y las macropropiedades. A menudo, el esbozo es un tanto tosco, a veces es preciso, pero su fiabilidad suele limitarse a circunstancias muy especiales. (Cartwright, 1999, p. 31).

En contra de estos fundamentalismos, Cartwright va a proponer un pluralismo nomológico metafísico:

El pluralismo nomológico metafísico es la doctrina según la cual la naturaleza se rige en distintos ámbitos por diferentes sistemas de leyes no necesariamente relacionados entre sí de manera sistemática o uniforme; por un rejunte de leyes [*by a patchwork of laws*]. El pluralismo nomológico se opone a cualquier tipo de fundamentalismo. Me refiero especialmente a los intentos de la física de reunir todos los fenómenos en sus propias teorías abstractas (Cartwright, 1999, p. 31).

Recientemente, Paul Humphreys ha introducido tanto una interesante taxonomización de distintas formas de concebir a la emergencia como una postura para la identificación de una propiedad *ontológicamente* emergente. Su clasificación concibe tres variedades de emergencia (inferencial, conceptual y ontológica) que puede cada una ser sincrónica o diacrónica, quizás siendo esta identificación de la dimensión temporal una de sus principales virtudes, ya que hace explícito el hecho de que en muchos casos de emergencia —entendida como la generación de alguna novedad entre las regularidades esperadas del mundo— esta se da en base a un cambio en los tipos de estados o de entidades que son accesibles en un instante o rango temporal determinado:

La emergencia diacrónica implica principalmente, pero no exclusivamente, la aparición de fenómenos nuevos a partir de fenómenos precedentes como resultado de un proceso que se extiende en el tiempo; la emergencia sincrónica implica la coexistencia simultánea de objetos o propiedades nuevos de “nivel superior” con objetos o

propiedades existentes en algún “nivel inferior”, donde la expresión “niveles” se interpreta mejor de forma metafórica. Observo que es posible que tanto la emergencia diacrónica como la sincrónica se den en un mismo proceso. Esta dimensión temporal es ortogonal a la división tripartita de la dimensión relacional; cada una de esas tres divisiones tiene variantes diacrónicas y sincrónicas. (Humphreys, 2016, p. 43)

Se habla, entonces, de una emergencia inferencial cuando hay alguna clase de impedimento en base al conocimiento *posible en principio* que se tiene de los constituyentes que interactúan de aquello de lo que son capaces de producir cuando entran en relación. La postura de Broad sería, entonces, de emergencia inferencial sincrónica, mientras que la de Bedau mencionada como de emergencia débil en el capítulo anterior es inferencial pero diacrónica. Creo que la postura de Bedau tiene una ventaja sobre la de Broad en tanto hace explícita la necesidad de comprender el proceso mismo de realizar la inferencia. (Una consecuencia de esto es que, de hecho, las concepciones sincrónicas de la emergencia constituyen una abstracción sobre las emergencias diacrónicas).

Por otro lado, estamos frente a una emergencia conceptual cuando una entidad, o una de sus propiedades, que forma parte de un dominio de conocimiento con un marco conceptual determinado, no puede dar cuenta basándose en sus capacidades descriptivas de un fenómeno particular detectado; por lo que éste requiere de la elaboración de un marco conceptual novedoso y probablemente autónomo con respecto a otro campo disciplinar. El caso prototípico al que se suele apelar es a la biología. Así es, por citar un ejemplo, como E. Mayr introduce la autonomía de los conceptos de la biología con respecto a conceptos de la física o de la química, de lo que también se sugiere que se sigue una autonomía metodológica:

El marco conceptual de la biología es completamente diferente al de la ciencias físicas y no puede reducirse a ese. El papel que desempeñan tales procesos como la meiosis, la gastrulación y la depredación en la vida de un organismo no se puede describir con referencia solo a leyes físicas o reacciones químicas, aunque los principios físico-químicos estén operando. Los procesos más amplios que estos conceptos biológicos describen simplemente no existen fuera del dominio de la mundo viviente. Por lo tanto, el mismo evento puede tener significados completamente diferentes en varios dominios conceptuales diferentes. (E. Mayr, 1988, p. 18)

Mayr a continuación pasa a explicar qué es lo que entiende por un mismo evento con significados distintos; algo que luego interpretaré como respondiendo a niveles de abstracciones distintos:

El cortejo de un animal macho, por ejemplo, se puede describir en el lenguaje y el marco conceptual de la ciencias físicas (locomoción, renovación de energía, procesos metabólicos, etc.), pero también se puede describir en el marco de la conducta y la reproducción biológicas. Y esta última descripción y explicación no se puede reducir a teorías de las ciencias físicas. Fenómenos biológicos como especies, competencia,

mimetismo, territorio, migración e hibernación se encuentran entre los miles de ejemplos de fenómenos organísmicos para los que una descripción puramente física es en el mejor de los casos incompleta, si es que no irrelevante (Mayr 1982: 62-63). Durante mucho tiempo los conceptos fueron bastante descuidados en las ciencias físicas. Su importancia, bajo el nombre de *themata*, ha sido recientemente enfatizada por Holton (1973). (E. Mayr, 1988, p. 18).

Así, Mayr sugiere que, pese a estar compuestos de fenómenos simples (que podrían ser explicados por ciencias que estudian dicha clase de fenómenos), si lo que se pretende es estudiar los fenómenos relativos a los organismos, y hacerlo en el nivel de descripción en el cual se le da sentido a esos comportamientos, dichos fenómenos no pueden explicarse sin apelar a conceptos propios de ese nivel. Esto significaría que de la reducción ontológica o composicional no se sigue una reducción metodológica ni una conceptual. Las dos referencias internas en la cita de Mayr son interesantes. Por un lado, en (E. Mayr, 1982) hay un tratamiento más detallado de su postura anti-reduccionista y de una comprensión de la emergencia en términos de la impredecibilidad, por lo que se puede observar como para él la emergencia inferencial y la conceptual conviven:

Lo único que afirman [los emergentistas] es que la reducción explicativa es incompleta, ya que en los niveles superiores de complejidad de los sistemas jerárquicos surgen caracteres nuevos y anteriormente imprevisibles. Por lo tanto, los sistemas complejos deben estudiarse en todos los niveles, porque cada nivel tiene propiedades que no se muestran en los niveles inferiores. (E. Mayr, 1982, p. 64).

En última instancia, lo que caracteriza a los organismos, para Mayr, es su composición jerárquica (ya que todo sistema en potencia puede pasar a formar parte de otro sistema) y los procesos históricos que pueden causar diferencias en la organización y en el comportamiento del sistema bajo estudio. Dirá Mayr más adelante en el tiempo, habiendo ya adoptado la expresión de “programa informacional” para dar cuenta de los procesos teleonómicos como una de las características distintivas de los organismos:

Tal vez la forma más concisa de caracterizar la naturaleza tan singular de los organismos sea describirlos como *sistemas organizados jerárquicamente, que funcionan sobre la base de programas de información históricamente adquiridos*, una definición que no se aplica a ningún objeto inerte. (E. Mayr, 1996, p. 103. Énfasis en el original)

En la última parte de la oración, Mayr aprovecha para dar una definición de vida; mientras que yo me limitaría a proponerlo como un posible criterio de distinción entre sistemas simples y complejos, o al menos para una taxonomización de distintas clases de sistemas complejos. Al mismo tiempo, sugiero que “programa de información” es un concepto que puede interpretarse en términos de memoria a la que puede accederse para cambiar el estado interno del sistema en base al cual se da un comportamiento, como vimos en 5.2.5.

Otro aspecto interesante introducido por Mayr para comprender la autonomía

de la biología y, por tanto, en qué sentido podría decirse emergente, es su mención al rol de los conceptos y lo importante que es para una filosofía de la ciencia la reflexión sobre ellos. La imposibilidad de una reducción explicativa de los fenómenos biológicos se basa en acusar a quienes proponen un reduccionismo así semejante de cometer una falacia al confundir conceptos con procesos:

El reduccionismo de la teoría es una falacia porque confunde procesos con conceptos. Como ha señalado Beckner (1974), procesos biológicos como la meiosis, la gastrulación y la depredación son también procesos químicos y físicos, pero sólo son conceptos biológicos y no pueden reducirse a conceptos físico-químicos. Además, cualquier estructura adaptada es el resultado de la selección, pero esto también es un concepto que no puede expresarse en términos estrictamente físico-químicos. (E. Mayr, 1982, p. 62)

Quizás pocos términos en filosofía tengan tantos conceptos asociados —y se digan de tantas maneras— como “concepto”.⁸ Mayr no es del todo explícito con respecto a lo que entiende por qué es un concepto, pero sí sugiere que los conceptos pueden verse como análogos a las leyes en las ciencias como la física y la química, análogos cuya principal diferencia esta en que son mucho más flexibles al mismo tiempo que tienen un rol heurístico; y tanto su refinamiento como la introducción de conceptos novedosos hacen a la caracterización del progreso científico de una disciplina, si es que no de la ciencia general. Creo que Mayr está en lo cierto, pero su mirada puede todavía ser refinada. En particular, sugiero más adelante que, por ejemplo, los conceptos de alto nivel propios de la biología constituyen abstracciones sobre procesos físicos en tanto se postula su necesidad para las explicaciones en ese nivel de fenómenos. Lo importante a notar es que los conceptos de los niveles inferiores no son eliminados, sino que son reinterpretados como restricciones sobre la clase de conceptos de alto nivel que puedan pensarse. De hecho, las heurísticas en general pueden verse como abstracciones sobre restricciones, en tanto permiten tornar o convertir una serie de restricciones sobre un universo de posibilidades en reglas o procedimientos que permiten a quien las usa como herramientas poder encontrar soluciones plausibles a ciertos desafíos que un ambiente le presenta pese a la capacidad limitada para llevar a cabo algunas clases de inferencias.

Al mismo tiempo, debe también tenerse en cuenta que las descripciones mismas y su formulación en términos de conceptos también son procesos, que en algunos casos pueden ser descritos sin especificar detalles concernientes a su implementación. Ahora bien, y retomando la taxonomización de Paul Humphreys sobre la emergencia, estaríamos frente a una emergencia de corte ontológico precisamente cuando encontramos una novedad en el nivel de las implementaciones. Como su nombre lo indica, la emergencia ontológica no depende, por definición, del estatus de conocimiento que se tenga al respecto

⁸Especialmente en la nueva tendencia contemporánea de definir a la filosofía misma como una empresa abocada a la ingeniería conceptual.

de un ámbito de fenómenos, sino de la mutabilidad de las entidades básicas existentes:

La emergencia ontológica afirma que algunos rasgos u objetos emergentes son rasgos reales del mundo y su condición de emergentes no depende ni del estado de conocimiento de los agentes cognitivos ni del grado de sofisticación del aparato representacional empleado por dichos agentes. Esta independencia de los agentes cognitivos permite que los rasgos emergentes ontológicos sean componentes objetivos y autónomos del mundo, y no artefactos de un aparato de representación o de nuestras limitaciones epistemológicas. (Humphreys, 2016, p. 65)

Como bien lo indica Humphreys a continuación, la emergencia ontológica es la forma más controvertida de emergencia. Por mi parte, considero que en la discusión hay algunos puntos válidos, especialmente la importancia que en última instancia tienen en ella las prácticas experimentales, en líneas similares a lo indicado más arriba según las sugerencias de Anderson y Laughlin, pero creo que cualquier afirmación ontológica debe tomarse como una proyección sobre la naturaleza que se hace desde un estado del conocimiento, especialmente de lo que se tomen como las mejores prácticas y posibilidades experimentales. Por lo tanto, en caso de hablar de emergencia ontológica, sugería tomar una postura de precaución, no ajena a las disciplinas como la física y la química, y decir que lo que se toma como ontológico y fundamental es efectivo, el mismo sentido en que se emplea el término para describir una teoría, como en «teoría de campo efectivo». El punto que quiero enfatizar es que, de la misma forma que en la antigüedad se presentó el eterno debate entre causas y efectos, hoy tenemos el mismo debate en términos de teoría fundamental y “mera” descripción fenomenológica (ver, p. ej., Hartmann, 2001).⁹

Esta es la manera en la que Humphreys entiende la motivación antisuperveniencia de la emergencia ontológica por fusión:

Aunque el papel original de la emergencia por fusión era mostrar cómo las relaciones de superveniencia no se aplican cuando se produce la fusión, ese papel es generalizable a cualquier relación de dependencia similar. Tales relaciones de dependencia requieren la existencia continua de algunas instancias de propiedades basales que puedan fijar la instancia de la propiedad emergente. Una característica esencial de la fusión es la pérdida de tales objetos o propiedades basales cuando se fusionan para producir un todo unificado. (Humphreys, 2016, p. 72)

Uno de los objetivos con la postulación de una emergencia ontológica por fusión que persigue Humphreys, es señalar algunos de los inconvenientes que puede tener una mirada de la emergencia que tome a la superveniencia u otra relación de dependencia basal, ya

⁹Por lo tanto, en cualquier caso, hablar de ontología fundamental es tratar de una proyección epistemológica a un nivel inferior al cual nos podemos acercar en un límite; necesitando así una explícita toma de postura sobre la naturaleza de lo real o sobre cuál teoría es “más fundamental”. Como señalo más abajo, ninguna de las dos posiciones, es *metodológicamente* más fundamental, sino que se tratan de posturas diferentes y necesarias para cualquier desarrollo del conocimiento.

que estas requieren que las entidades de los niveles inferiores continúen existiendo, mientras que en una emergencia transformacional las entidades mismas involucradas dejan de existir como entidades autónomas y son, por definición, irreducibles. En algunos casos, la emergencia transformacional puede involucrar un cambio de dominio.¹⁰

La emergencia transformacional se produce cuando un individuo que se considera un elemento fundamental de un dominio D se transforma en un tipo diferente de individuo a^* , a menudo pero no siempre como resultado de las interacciones con otros elementos de D , y se convierte así en miembro de un dominio diferente D^* . Los miembros de D^* son de un tipo diferente al de los miembros de D . Poseen al menos una propiedad nueva y están sujetos a leyes diferentes que se aplican a los miembros de D^* pero no a los de D . El hecho de que una entidad fundamental pueda transformarse hace que la emergencia transformacional sea esencialmente diferente del atomismo generativo, en el que las entidades fundamentales son inmutables. (Humphreys, 2016, p. 60)

Aquí la postura de Humphreys parece tener bastante en común con la de Broad, en tanto el dominio y las entidades que éste subsume parecen depender de las regularidades empíricas que se puedan encontrar y que hacen, por tanto, a una *clase* o *tipo* de entidades. Sin entrar en detalles de su análisis, creo que este aspecto vuelve a la posición de Humphreys algo más dependiente de una epistemología de lo que él mismo sugiere. Aunque sí se trataría de una formulación de lo emergente distinta de aquellas planteadas con anterioridad, puesto que el peso no está tanto en el esquema conceptual ni en la capacidad inferencial —aunque aspectos de estos estén presentes; Humphreys hace bien al recordarnos que las categorías de emergencia no son excluyentes— sino en la posibilidad de que las historias causales o las trayectorias de las entidades individuales converjan, generando así un nuevo estado en el mundo, en términos de la *clase* de entidades presentes en un momento determinado. Esto es lo que creo que puede hacer de esta concepción de la emergencia un candidato interesante para la clase de emergencia que se observa en los sistemas complejos, en tanto los procesos evolutivos pueden dar lugar a propiedades o funcionalidades muy distintas, ya sea por fusión propiamente dicha o por abstracción, en donde técnicamente no ocurre una fusión, pero *funcionalmente* ocurre una transformación en los tipos de comportamientos que puede permitir para cualquier otro agente que tome al resultado del proceso de abstracción *como si* se tratase de una nueva entidad, que bien puede ser fundamental para un nivel de descripción. Por tanto, como señalo en breve, es a través de procesos de abstracción que de hecho se generan tanto niveles de descripción junto con jerarquías o clases de comportamientos posibles bajo las cuales se pueden clasificar sistemas.

¹⁰En esto, como bien nota Humphreys (2016), la posición es distinta de la original de (Humphreys, 1997). Para un cuidadoso análisis de la emergencia por fusión —incluyendo algunas posibles críticas— ver (Humphreys, 2016, pp. 56-93)

Como primera conclusión de lo hasta aquí discutido, los puntos que considero cruciales y que deben ser atendidos corresponden a la noción de “nivel” que esté involucrada y, relativa a ella, la manera en la que se dé cuenta del proceso de evolución y eventual aparición de nuevos niveles y novedades fenoménicas susceptibles de ser explicados e intervenidos usando explicaciones de ese nuevo nivel.

Nótese también que junto con el problema clásico del eventual pasaje entre causas y efectos o entre descripciones, la emergencia como problema filosófico también nos hace enfrentar a otros problemas ya mencionados en los capítulos anteriores: la similitud y la autonomía, tanto de entidades como de sus marcos epistémicos asociados. Creo que en todos estos casos estamos frente a un problema que sólo puede considerarse como bien definido si se toman en cuenta las capacidades inferenciales de los agentes involucrados, cuyo nivel de abstracción o de descripción para un fenómeno *determinará* la posibilidad de postular una equivalencia entre causas y efectos en un dominio determinado (ver subsección siguiente).

En esta dirección, considero que una forma de determinar cuándo estamos frente a una propiedad que emergente y que, por tanto, es epistémicamente más fructífero tratarla bajo un nuevo esquema descriptivo que tome nuevas propiedades o capacidades como primitivas, ocurre cuando el comportamiento en el tiempo de un sistema para un observador particular demanda más y más recursos por parte del agente epistémico. Así, de hecho al mismo tiempo podemos avanzar en una definición de la complejidad del sistema mismo. Recientemente, Miguel Fuentes también ha sugerido una definición de complejidad en esta dirección, que tiene en cuenta el marco conceptual bajo el cual se describe un fenómeno:

Complejidad modélico-paramétrica C^* : Es una función que, a cada valor del parámetro de control de un determinado modelo utilizado para explicar el sistema en estudio, asigna el valor de la complejidad de Kolmogorov. (M. Fuentes, 2020, p. 89)

En base a esto, puede elaborar una definición de emergencia:

Propiedad emergente modélico-paramétrica E^* : Una propiedad será emergente, E^* , para el valor del parámetro de control, si la complejidad modélico-paramétrica C^* en ese valor del parámetro de control presenta una discontinuidad de tipo escalonado, es decir si se cumple que a un lado del valor del parámetro de control la complejidad notoriamente menor que al otro lado del parámetro de control. (M. Fuentes, 2020, pp. 89-90)

En esta formulación, el parámetro de control es parte del modelo matemático de un fenómeno, pero creo que bien puede interpretarse también para las intervenciones posibles que (y sus consecuencias) que un agente puede realizar sobre el sistema que observa u

estudia. Las transiciones entre fases obligan a cambiar de representación. Podemos brevemente retomar el lenguaje de “Más es diferente”:

La idea esencial es que en el llamado límite [cuando N tiende a infinito] de los grandes sistemas (en nuestra propia escala macroscópica) no sólo es conveniente, sino esencial, darse cuenta de que la materia sufrirá "transiciones de fase" matemáticas bruscas y puntuales hacia estados en los que las simetrías microscópicas, e incluso las ecuaciones de movimiento microscópicas, son en cierto modo violadas. La simetría sólo deja como expresión ciertos comportamientos característicos, por ejemplo, las vibraciones de gran longitud de onda, cuyo ejemplo familiar son las ondas sonoras; o los inusuales fenómenos de conducción macroscópica del superconductor; o, en una analogía muy profunda, la propia rigidez de las redes cristalinas, y por tanto de la mayoría de la materia sólida. Por supuesto, no se trata de que el sistema viole realmente, en lugar de romper, la simetría del espacio y el tiempo, sino que, debido a que sus partes encuentran energéticamente más favorable mantener ciertas relaciones fijas entre sí, la simetría sólo permite que el cuerpo en su conjunto responda a las fuerzas externas.^{CXL} (Anderson, 1972, p. 395)

Voy a interpretar a esta última afirmación de Anderson como un caso de abstracción, por la cual la descripción del sistema como un todo puede describirse en términos de simetrías en las representaciones que son posibles en los niveles macroscópicos pese a que las representaciones de las partes no las poseen.

El punto central en todos estos casos es que estamos frente a un *modelo de modelos*, esto es, para una serie de modelos particulares (uno para cada valor de un parámetro de control) *clasificados* en un conjunto o categoría por la presencia del parámetro de control; clase sobre la cual se puede llevar a cabo una partición sobre la base de la cantidad de recursos que se necesitan para la descripción y cuyo cambio en un valor particular del parámetro conlleva un comportamiento análogo al de una transición de fase (a lo que anteriormente me referí como «sensibilidad informacional a las condiciones iniciales», página 258). Más importante todavía es que para sistemas cuyos componentes son de naturaleza fundamental (efectivamente definida como tal sobre la base de un nivel de abstracción), la clase de comportamiento emergente, so supuesto de una teoría de lo posible en términos de la relación entre las entradas y las salidas observables, muestran instancias de patrones que pueden clasificarse como comunes; esto hace que puedan presentar realizabilidad múltiple al mismo tiempo que las teorías de lo posible y las metodologías detrás de ellas también presenten un análogo de realizabilidad múltiple que denotan un comportamiento semejante, ya sea bajo una interpretación formal entre las teorías o bajo una convergencia empírica robusta, lo que nos obliga a reflexionar sobre este punto de encuentro entre las descripciones.

El párrafo anterior puede ser algo críptico de momento, pero puede verse como una síntesis de lo que desarrollo a continuación, donde comienzo a desentrañar estos

puntos junto con una mirada sobre la abstracción, en tanto considero que es un aspecto necesario tanto para la existencia, el estudio y la creación de sistemas complejos.

7.2. Abstracción (y otros conceptos abstractos)

Si este punto de vista es correcto, la teoría de sistemas deberá basarse en métodos de simplificación, y se fundará, esencialmente, en la ciencia de la simplificación. [...] El teórico de sistemas del futuro, sugiero debe ser un experto en cómo simplificar.^{CXLI}

W. Ross Ashby (1964/2013, p. 594)

En varios pasajes de esta tesis he mencionado la forma en la que la computación, de manera muy semejante a la evolución, procede mediante un constante balance de factores. Es más, precisamente la constante capacidad de poder convertir algunos de esos factores en otros para mantener así al mismo proceso en marcha es lo que los caracteriza. Lo mismo, creo, vale para nuestras *descripciones* de estos fenómenos. Lo que me lleva a decir esto proviene de lo ya mencionado acerca de la compensación que se puede decir que tiene que poder hacer una máquina de Turing universal para balancear entre la complejidad del programa y la complejidad de los datos sobre los que opera (ver pág. 220). Nuestras descripciones del mundo deben proceder de manera semejante, compensando lo que no está en los datos por un procedimiento que permite, partiendo de esos datos incompletos, proceder a una búsqueda de “configuraciones internas” que tengan como resultado una imitación lo suficientemente buena de lo se está estudiando. Esto es: un proceso que produciría datos semejantes a los que observaríamos. Bajo mi lectura, Simon argumentaba en esta dirección al comentar de los aspectos empíricos involucrados en la computación y en la posibilidad de encontrar leyes simples y generales para describir su comportamiento:

A medida que conseguimos ampliar y profundizar nuestros conocimientos teóricos y empíricos sobre las computadoras, descubrimos que en gran parte su comportamiento se rige por leyes generales simples, que lo que aparecía como complejidad en el programa de la computadora era en gran medida complejidad del entorno al que el programa buscaba adaptar su comportamiento.^{CXLII} (H. A. Simon, 1996, p. 21)

Tanto en nuestras descripciones como en el mundo, esto requiere de un aislamiento temporal, en los dos sentidos de este término, en tanto suele ocurrir por un lapso de tiempo finito y porque una parte del sistema se aísla parcialmente del resto; algo semejante ocurre en nuestras descripciones que ahora se hacen contra el tiempo y, por tanto, deben describirse en términos de operaciones.

Otra forma de decir esto es mediante la equivalencia de las siguientes expresiones. Primero, una sobre lo que ocurre en los sistemas complejos, tanto naturales como

artificiales, con respecto a la capacidad (y necesidad) de aislamientos temporales:

Desde la perspectiva del entorno interno la división suele tener una ventaja correspondiente. En numerosas ocasiones, el que un sistema determinado consiga un fin particular o una adaptación va a depender sólo de unas cuantas características del ambiente externo y en absoluto de los detalles de ese entorno. Los biólogos están bien familiarizados con esta propiedad de los sistemas adaptativos que se denomina homeostasis. Es una propiedad importante de la mayoría de buenos diseños, ya sean biológicos o artificiales. De algún modo otro, el diseñador aísla el sistema interno del ambiente, de manera que se mantiene una relación invariante entre el sistema interno y el fin, con independencia de las variaciones en un amplio espectro de la mayoría de los parámetros que caracterizan al ambiente externo. (H. A. Simon, 1996/2006, p. 9)

Luego, otra sobre el aspecto crucial que de la computación que ya vimos de la mano de Turing y de von Neumann, quienes también lo usaron como recurso para comprender el mundo. Ya sea pensado en términos de la equivalencia funcional del tiempo con el espacio de las operaciones o de los datos con los procedimientos, este aspecto central de la computación es lo que permite crear tanto sistemas que computen como lenguajes para aprovechar esos procedimientos o para diseñarlos:

La abstracción metalingüística —el establecimiento de nuevos lenguajes— desempeña un papel importante en todas las ramas del diseño de ingeniería. Es especialmente importante para la programación de ordenadores, porque en la programación no sólo podemos formular nuevos lenguajes, sino que también podemos implementarlos construyendo evaluadores. Un evaluador (o intérprete) de un lenguaje de programación es un procedimiento que, cuando se aplica a una expresión del lenguaje, realiza las acciones necesarias para evaluar dicha expresión. No es una exageración considerar esto como la idea más fundamental de la programación: el evaluador, que determina el significado de las expresiones en un lenguaje de programación, es un programa más. (Abelson y col., 1996, p. 489)

Fundamentalmente, pues, podemos usar un lenguaje particular para hablar del mismo lenguaje (incluso en programación para interpretar el mismo lenguaje) pero para definir abstracciones por medio de las cuales parte del ambiente de ejecución (incluyendo la interfaz con el usuario humano) pueden interactuar con otros procedimientos u objetos sin necesidad de conocer los detalles del interior del objeto o procedimiento. Resta, entonces, hablar de niveles, de abstracciones y de niveles de abstracciones, puesto que debemos definir las clases de modelos a partir del nivel de abstracción que especifican, donde un nivel de abstracción debe considerar lo que es posible observar y modificar, por lo que requiere de una teoría que describa, por las acciones que es posible realizar y los efectos, pero no necesariamente la manera en la que se implementarían. Lo que suele recibir el nombre de niveles son las interfaces entre las clases de modelos definidas por una abstracción.

7.2.1. Niveles, niveles...

En la literatura filosófica, suele ocurrir que la noción de nivel se asume como sobreentendida, intuitiva o como un problema ya resuelto. Gran parte se debe a asumir una posición sobre la composicionalidad de la materia sobre un nivel que se propone como fundamental, composicionalidad sobre la cual pueden apoyarse las afirmaciones de reducibilidad, tanto epistémicas como metodológicas, como se señaló anteriormente. Una de las articulaciones más claras e influyentes es la propuesta de niveles “fundamentales” sugeridos por Oppenheim y Putnam (1958) (las comillas en “fundamentales” son de los autores).

| | |
|---|------------------------------|
| 6 | Grupos sociales |
| 5 | Seres vivos (multicelulares) |
| 4 | Células |
| 3 | Moléculas |
| 2 | Átomos |
| 1 | Partículas elementales |

Cuadro 7.1: Niveles sugeridos por Oppenheim y Putnam (1958, p. 9)

Una de las condiciones que debe cumplir la clasificación propuesta es que los niveles superiores sean candidatos a una micro-reducción, so condición de que se justifique la hipótesis metodológica de la unificación de la ciencia.

la posibilidad de ordenar las ramas de manera que se indiquen las principales micro-reducciones potenciales que se interponen entre la situación actual y el estado de la ciencia unitaria. La forma más natural de hacerlo es por sus universos de discurso. Ofrecemos, por lo tanto, un sistema de *niveles* reductivos elegido de tal manera que una rama con las cosas de un nivel dado como su universo de discurso será siempre una micro-reducción potencial de cualquier rama con las cosas del siguiente nivel superior (si lo hay) como su universo de discurso. (Oppenheim & Putnam, 1958, p. 9)

Si bien no se puede negar que el discurso que presentan es a favor de una reducción, la clase de reducción resultante, y por tanto de la conexión o interfaz entre los niveles, dependerá fuertemente de la manera en la que se conciben las entidades teóricas (en lo que incluyo a las teorías mismas) dentro de cada disciplina. Además, la principal justificación que dan los autores para su propuesta está tanto atada a los éxitos empíricos de esta tendencia y no pierden de vista las dificultades *en la práctica* que tendría explicar el comportamiento de entidades propias de los niveles superiores recurriendo solamente al vocabulario de las disciplinas que estudian los niveles inferiores.

Ya hemos mencionado que una buena parte de la literatura de la filosofía de las ciencias ha intentado generar un marco de trabajo y de interpretación de la actividad científica en campos en los que es común encontrar explicaciones en término de los mecanismos que están involucrados en la producción de un fenómeno. Muchas veces de

hecho se afirma que se trata de buscar el mecanismo que subyace al fenómeno, llevando casi naturalmente a noción de nivel. Tanto esta noción como la serie de estrategias metodológicas asociadas son consideradas como pluralistas en tanto no suelen llevar un reduccionismo a ultranza, sino que también se busca atender a una integración de niveles, de mecanismos e incluso de explicaciones en diversos campos disciplinares (Darden, 2016). Los niveles para los mecanicistas típicamente no corresponden a ninguna disciplina en particular, sino que están, por decirlo de alguna manera, en la naturaleza misma. Si bien esto permite superar algunos de los problemas que la visión clásica —o “heredada”— de los niveles solía traer, especialmente cuando se lo identifica con un programa reduccionista que pretende explicar la totalidad de los fenómenos de la naturaleza mediante un único método, gran parte de los problemas persisten, si es que no se agravan, por la fuerte ontologización de mecanismos y niveles que se describen. De hecho, suelen sugerir que toda explicación de los mecanismos como un todo se hace en términos de los componentes involucrados, sus interacciones y su actividad organizada (Craver, 2007, p. 128).¹¹

En los niveles de mecanismos, los elementos de la relación son los mecanismos que se comportan en los niveles superiores y sus componentes en los niveles inferiores. [...] La relación entre niveles es la siguiente: El Φ -endo de X está en un nivel mecanicista inferior a un Ψ -endo si y sólo si el Φ -endo de X es un componente en el mecanismo para el Ψ -endo de S . Los componentes de nivel inferior se organizan entre ellos para formar componentes de nivel superior.^{CXLIII} (Craver, 2007, p. 189)

Un punto en particular que creo que esta concepción de niveles sugerida por los mecanicistas captura correctamente es los componentes pueden anidarse y ser vistos en un nivel de descripción como mecanismos (i.e. lo que se pretende explicar), mientras que lo que entonces se tomó como el mecanismo a explicar puede volverse un componente dentro de otro mecanismo. Esta es una característica de una noción de nivel que quiero conservar, pero al mismo tiempo, en tanto creo que una noción de complejidad debe atender tanto al observador de un sistema como a su capacidad para interactuar con él y, en ello, las capacidades tanto del sistema como del observador de reconocer los resultados de las transformaciones, las capacidades de descripción y de transformación del par (sistema, ambiente) deben incorporarse como un criterio distintivo de la manera en la que dichos niveles se establezcan. Para esto, además, considero que la noción de máquina tiene un rol central que jugar en nuestras descripciones del mundo natural. La neutralidad hacia la noción de máquina, y por tanto con toda clase de artefactos, es, paradójicamente, uno de los puntos más débiles del nuevo mecanicismo como marco interpretativo según el cual hacer filosofía de la ciencia. Esto lleva a que incluso las nociones esenciales, como actividades y organización, en base a las cuales definen la misma idea de qué es un mecanismo sin poder ser precisadas.

¹¹Solo recientemente algunos nuevos mecanicistas han reconocido algunos posibles límites fuertes en las estrategias de descomposición, por lo que se necesitaría explicar la emergencia misma de los mecanismos (Bechtel & Bollhagen, 2021; Green y col., 2018).

Una de las más interesantes propuestas en la literatura que acerca una noción de niveles al estudio de los sistemas complejos y mantiene constantemente en perspectiva la naturaleza procesual y diacrónica de su aparición y de su estudio es la formulada por William Wimsatt; postura que de hecho también ha sido muy influyente en los nuevos mecanicistas, como puede notarse en esta formulación:

Por nivel de organización, me refiero aquí a niveles de composición: divisiones jerárquicas de cosas (paradigmáticamente, pero no necesariamente, cosas materiales) organizadas por relaciones parte-todo, en las que los todos en un nivel funcionan como partes en el siguiente (y en todos los niveles superiores). (Wimsatt, 2007, p. 201)

Para Wimsatt, los niveles de los que hay que dar cuenta son aquello que hacen que, a medida en que se produce un cambio de escala, nuevas formas de *organización* puedan emerger y producir así un nuevo rango de fenómenos cuya explicación no puede depender exclusivamente de lo que ocurre en los niveles inferiores. Es precisamente por tratar de abarcar este aspecto que encuentro la propuesta de Wimsatt mucho más satisfactoria que la de los mecanicistas.

Wimsatt da una interpretación que no descuida el aspecto ontológico de los niveles de organización como una característica del mundo y su riqueza fenoménica. En su presentación, Wimsatt es tanto explícito con la influencia de Simon como con el sabor kantiano de su propuesta:

Las opiniones expresadas aquí muestran fuertemente la influencia de Simon, pero van más allá en otras direcciones. Insto a un punto de vista que Simon compartiría: que los niveles de organización son un rasgo profundo, no arbitrario y extremadamente importante de la arquitectura ontológico de nuestro mundo natural, y casi con certeza de cualquier mundo que podría producirse, y ser habitado o entendido por, seres inteligentes. (Esto le da a los niveles un sabor casi kantiano.) Los niveles y otros modos de organización no pueden darse por sentados, sino que exigen caracterización y análisis. (Wimsatt, 2007, pp. 203-204)

Específicamente, lo que debe analizarse detalladamente las clases de relaciones que se puedan encontrar y detallar *entre* niveles. El énfasis en la reducción es, sin duda, una forma de investigar las relaciones posibles entre los niveles, aunque quizás algo sesgada por el objetivo epistémico que en última instancia esté regulando la investigación. Lo fundamental es que un mismo objeto (o proceso o fenómeno) puede —y en breve diré que *debe*— ser descrito desde diferentes niveles:

Puesto que cualquier objeto material complejo puede describirse en un número de diferentes niveles de organización, las relaciones de identidad, composición o ejemplificación, deben mantenerse entre las descripciones del mismo objeto en diferentes niveles. Estos proporcionan importantes medios adicionales para acceder a los diferentes niveles y calibrar las relaciones entre ellos, y la inspiración para teorías meca-

nicistas reduccionistas explicativas del comportamiento de los sistemas en cuestión.
(Wimsatt, 2007, p. 205)

De hecho, creo que se debe ir un poco más lejos y sostener que las mismas ideas o relaciones de identidad, autonomía, composición, ejemplificación e instanciación, entre muchas otras, solo tienen sentido en base a la generación de invariantes a medida que se explora aquello que se está estudiando bajo una diversidad de modelos, lo que subsume, para mí, escalas y métodos. Wimsatt parece entender algo en la misma dirección cuando sugiere, en lo que va a decir que es lo más cerca que estará de una *definición*, ver a los niveles de organización “como máximos locales de regularidad y previsibilidad en el espacio de fases de modos alternativos de organización de la materia. (Wimsatt, 2007, p. 209)”. Así, los fenómenos en cada nivel se pueden beneficiar de un vocabulario particular a ese nivel para las explicaciones correspondientes; algo que, paradójicamente, comparte con la presentación de niveles de Oppenheim y Putnam (1958). La figura 7.1 reproduce la ilustración de los máximos de regularidad para posibles escalas. Allí también pueden observarse algunas de las consecuencias que podría traer para la predictibilidad una “mala elección de variables”, lo que debería recordarnos algo del lenguaje empleado por los cibernetas.

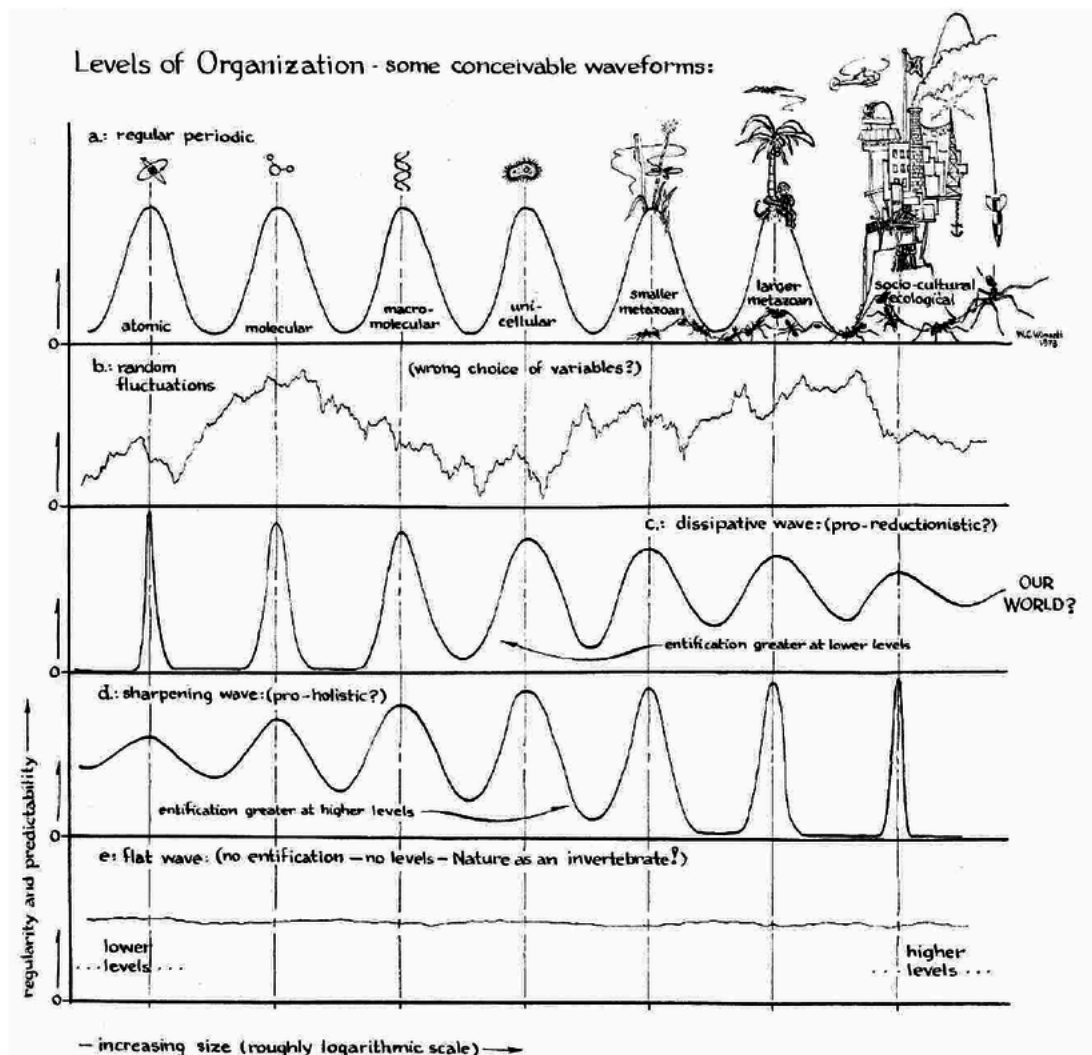


Figura 7.1: Distintas formas de concebir a los niveles de organización como máximos de predictibilidad a medida que se cambia la escala, según Wimsatt (2007, pp. 224-225)

Wimsatt llamará a un conjunto determinado de variables una *perspectiva*:

Las perspectivas implican un conjunto de variables que se utilizan para caracterizar sistemas o para dividir objetos en partes, que en conjunto dan una explicación sistemática de un dominio de fenómenos, y son peculiarmente sobresalientes para un observador o clase de observadores debido a las formas características en que esos los observadores interactúan causalmente con el sistema o sistemas en cuestión. (Wimsatt, 2000, p. 227)

En un agregado que hace en el libro comentando este punto en el artículo original comenta:

Si tuviera que cambiar el nombre de este tipo de perspectiva ahora (como probablemente debería hacerlo), las llamaría secciones —abreviatura de secciones transversales (¡o tal vez a veces cortes transversales en casos más confusos!)— vistas elegidas por arquitectos, ingenieros y anatomistas para mostrar aspectos relevantes de sus estructuras complejas; vistas que pueden cruzarse entre sí de varias maneras y en varios ángulos; puntos de vista que se reconocen individualmente como incompletos; vistas que pueden ser especializadas o mejores para representar o para resolver diferentes problemas; y puntos de vista que (como las perspectivas) contienen información no solo individualmente, sino también en la forma en que se articulan. (Wimsatt, 2007, p. 231)

Creo que Wimsatt está en lo correcto aquí, y que es precisamente lo que puede aportar el estudio de los sistemas complejos y, por tanto una tarea fundamental que debe dar cuenta una reflexión epistemológica de dicha práctica: cómo distintas representaciones de un mismo fenómeno, se articulan entre distintos agentes epistémicos y sus comunidades, no sólo para explicar un mismo fenómeno sino hasta para poder identificarlo como tal; esto es lo que referí anteriormente como la relación modelo-modelo en capítulos anteriores. A su vez, un mismo agente puede —y probablemente *deba* (en particular en cualquier etapa que pueda describirse como de descubrimiento o aprendizaje)—, representaciones alternativas de un mismo fenómeno, incluso operando bajo el mismo nivel de abstracción.

En mi caso, seré ontológicamente más austero, y aunque estoy algo más cerca de la selva de Wimsatt que del desierto de Quine, sí creo que esta mirada sobre los niveles de hecho debe verse como una consecuencia de una mirada funcional que puede crear complejidad mediante un procedimiento algo paradójico: la reducción de una forma de complejidad mediante un proceso de abstracción como condición de posibilidad para la creación de estructuras y procesos todavía más complejos.

7.2.2. Abstracciones (abstractas y concretas)

Hablar concretamente de “abstracción” parece casi una paradoja contenida en el mismo término, casi bordeando la inefabilidad de algunas entidades propias de la teología. La carga semántica en filosofía del término abstracción es inmensa, y con justa causa, porque ha sido usada por algunos filósofos para caracterizar la manera en la que los seres humanos obtienen conocimiento del mundo y pueden hablar de *ellos*: tanto del mundo como del conocimiento. El “ascenso semántico” que se esconde detrás de esa afirmación no es un mero accidente, sino que es precisamente lo que creo que debe captar una concepción filosófica de la abstracción como posibilidad de conocimiento.¹²

Aristóteles fue el primero en postular una noción de abstracción para explicar la

¹²También “esconde” mi postura epistemológica de realista naturalista de base quineana, que a esta altura está bastante a la vista, pero que, paradójicamente, deberá permanecer, de momento, un tanto abstracta.

forma en la que los seres humanos pueden generalizar desde la experiencia, en el sentido de ser capaces de obtener conocimiento válido y universal partiendo de la necesariamente finita experiencia que se puede obtener por medio de los sentidos (Bäck, 2014). La inducción, así, es para Aristóteles una abstracción. El término que emplea en griego es *afáiresis* [ἀφαίρεσις], que tanto como su contraparte latina *abstractio* indica una separación o una substracción. Cada ciencia, para Aristóteles, ocurre bajo el estudio de abstracciones de elementos, como la substancia. Esto es, cada una toma una propiedad del objeto bajo estudio como fundamental, y aunque efectivamente se lleva a cabo una separación, no conlleva una eliminación de los otros aspectos. Aunque estudien *abstracciones*, las ciencias siguen estudiando lo real, según algunas interpretaciones de Aristóteles.

El desplazamiento de “abstracción” desde esta clase de operación sobre lo real al sentido de aquello que no es real en tanto producto de una operación de lo mental, es resultado de las teorías del conocimiento empiristas propias del siglo XVII, entre los que hay que destacar el “debate” entre Berkeley y Locke.¹³ Gottlob Frege quizás fue quien más explícitamente intentó atar estos mundos en una teoría del significado, nuevamente sugiriendo una línea de trabajo que caracterizaría a gran parte de la filosofía analítica del siglo XX, con grandes consecuencias para la filosofía de la ciencia, que desde su comienzo como campo de investigación propiamente constituido dentro de la filosofía, tuvo como primer flanco de problemas aquellos señalados tanto por Frege como por otros científicos con inclinaciones filosóficas que notaron el impacto que los nuevos desarrollos científicos, especialmente en el ámbito de la matemática, significaban para cualquier imagen del mundo que quisiera dar cabida al conocimiento científico.¹⁴ Una posición muy influyen-

¹³A su vez, esta forma en la que Locke concibe a la abstracción habría estado profundamente influenciada por su lectura de la *Lógica de Port-Royal*, aquel tratado que apareció por primera vez en 1662 como suplemento a la Gramática de Port Royal. En aquel texto de lógica, los autores se proponen reconciliar la metafísica y la epistemología cartesianas con la lógica (quizás con más cercanía a lo que hoy llamaríamos una filosofía del lenguaje) aristotélica escolástica que caracterizó a gran parte de las reflexiones en torno al lenguaje en los círculos filosóficos y teológicos desde la re-conformación de un corpus aristotélico en latín hacia finales del siglo XII (lo que, a su vez, coincide con la aparición de las primeras universidades en Occidente). Para Arnauld y Nicole, una *cosa* debe ser “concebida como subsistente por sí misma y como sujeto de todo lo concebido en torno a ella”, mientras que una *manera* de las cosas debe ser “concebida como en la cosa y no pudiendo subsistir sin ella, la determina a ser de una cierta manera y hace que se denomine así”.

¹⁴En la teoría del significado más acabada pensada por Frege, el lenguaje es un medio de expresión de un sentido, siendo el sentido un “intermediario” para la referencia (o representación) del mundo. El lenguaje solo puede expresar el sentido, al tiempo que este mismo puede ser de tres clases, dependiendo de si se refiere a un objeto del mundo (donde el sentido es individual o saturado, expresado por nombre propio), a un concepto o función (cuando se trata de un sentido “incompleto o no saturado” y es expresado por una expresión funcional) o a un valor de verdad (aquí el sentido es un pensamiento completo o saturado, expresado por una oración declarativa). Frege puede llegar a esta concepción relativamente simple gracias al rol que cumple su noción de función, que hereda de su lógica de orden superior, que fue el punto de apoyo para sus trabajos originales para fundamentar la matemática. Los autores de la lógica de Port-Royal también debieron desarrollar algo similar (aunque resultaría con más inconsistencias) para poder hablar de la idea que expresan los términos generales, que no se refieren a atributos sino a colecciones de objetos. Para lograr esto, Arnauld y Nicole substituyen la complicada noción de suposición [*suppositum*] por algo similar a lo que más tarde el mismo Frege capturaría con lo que hoy conocemos como los axiomas de comprensión y

te que intentará eliminar los aspectos metafísicos más controvertidos de la formulación fregeana es la de Bertrand Russell, quien en un sentido similar al de Aristóteles veía en la abstracción una forma de superar el “abismo” de la intuición que lleva de las experiencias a los principios generales desde los cuales luego se pueden lograr nuevas afirmaciones por deducción pura. Como buen logicista intentando acercar algo de la rigurosidad de la lógica y la matemática al problema del conocimiento del mundo externo, Russell consideraba que la abstracción tenía un doble papel que jugar:

apelaremos a cierto principio llamado “principio de abstracción”. Este principio, que también podría llamarse “el principio que prescindir de la abstracción”, y que despeja increíbles acumulaciones de lastre metafísico, fue directamente sugerido por la lógica matemática, y difícilmente podría haberse demostrado o utilizado en la práctica sin su ayuda. [...] Cuando un grupo de objetos tiene ese tipo de similitud que nos inclinamos a atribuir a la posesión de una cualidad común, el principio en cuestión muestra que la pertenencia al grupo servirá para todos los propósitos de la supuesta cualidad común, y que por lo tanto, a menos que se conozca realmente alguna cualidad común, el grupo o clase de objetos similares puede utilizarse para reemplazar la cualidad común, que no necesita suponerse que existe. (Russell, 1914/1922, p. 51)

Esto es, porque pretende eliminar las construcciones metafísicas que se hacen por mal uso de las abstracciones y le otorgan un profundo sentido de realidad a algo que, quizás, no exista.¹⁵ Todo esto está de acuerdo a su filosofía de un atomismo lógico, que pretende hacer lo mismo por los problemas filosóficos y lingüísticos, lo mismo que el atomismo físico, por denominarlo de algún modo, permite a la física: dar una cierta cantidad de elementos básicos y primordiales y *derivar* el resto de las entidades por su composición.

extensión en la teoría ingenua de conjuntos. La comprensión así consiste en el total de atributos que son *esenciales* para una idea, mientras que la extensión incluye todos los sujetos a los que refiere el término. Una forma posible de entender a la computación es términos de conversiones constantes entre extensión e intensión de conjuntos, en donde media una interpretación a base de abstracciones.

¹⁵Aquí Russell introduce un punto interesante y que correctamente atribuye a una idea de Whitehead que concierne a la forma en la que se pueden generar abstracciones a partir una noción débil de similitud, similar a la que opera en la teoría de conjuntos y que, como señalo más adelante, es importante atender por múltiples razones. Russell explica así la manera en la que Whitehead había sugerido cómo construir nociones generales en la geometría “Suponemos que esto se aplica, no sólo a los datos sensoriales, sino a toda la materia que compone el mundo: todo lo que no es una abstracción tiene un tamaño espacio-temporal finito, aunque no podemos descubrir un límite inferior a los tamaños posibles. Pero lo que aparece como un todo indiviso, a menudo se encuentra, bajo la influencia de la atención, dividido en partes contenidas dentro del todo. Así, un dato espacial puede estar contenido dentro de otro, y completamente encerrado por el otro. Esta relación de clausura, con la ayuda de algunas hipótesis muy naturales, nos permitirá definir un “punto” como un cierto conjunto de objetos espaciales; hablando en términos generales, el conjunto consistirá en todos los volúmenes que naturalmente se diría que contienen el punto. (Russell, 1914/1922, p. 51)” El método de abstracción de Whitehead es central incluso en su obra tardía y quizás sea uno de los puntos más intrincados de comprender de forma de acercarse a los problemas filosóficos. Si bien aquí no lo estoy aplicado directamente —probablemente porque estoy muy lejos de haber logrado captar incluso sus aspectos más básicos—, quizás pueda notarse que al menos cierta inspiración whiteheadiana atraviesa esta tesis. (Lawrence, 1950) me ha resultado una buena guía para no perder totalmente de vista el norte de las abstracciones de Whitehead.

De aquí el “atomismo constructivo” y consecuente posibilidad de reducir el conocimiento de los órdenes superiores a esta descomposición plena.

La forma en la que sugiero que debe entenderse el concepto de abstracción no descarta estos aspectos “clásicos” asociados a la abstracción como un proceso de generalización, pero al mismo tiempo incorpora aspectos que se pueden apreciar en la manera en la que se describen las abstracciones que se llevan a cabo en distintas disciplinas que pueden ser agrupadas como ciencias de lo artificial, esto es, en las ciencias cuya finalidad es la de diseñar y crear sistemas complejos. Así, lo que sugiero es que los procesos de abstracción —y otros conceptos implicados por la idea misma de abstracción— son lo que hacen posible la *creación* de sistemas complejos, dentro de los cuales y como caso particular se encuentran las postulaciones teóricas que un agente (él mismo complejo en tanto quizás se trate de una comunidad de agentes que pueden verse como un análogo de un “súper-organismo”) realiza con el fin de conocer (entender, explicar, predecir, modificar) a un fenómeno de la naturaleza y, algo más en general, los procesos de aprendizaje.¹⁶

Las abstracciones así vistas son *encapsulaciones* o *aislaciones* de procesos. Una característica fundamental, que está ligada a su rol en la creación de sistemas complejos tanto naturales como artificiales, es que mediante la encapsulación resultan en una simplificación de su representabilidad y, como consecuencia, un incremento en la capacidad de manipulación para otros sistemas complejos que interactúen con dicha abstracción. Esta forma de complementar la manera clásica antes descrita de entender a la abstracción (en tanto, de hecho, vuelve a aquella un caso particular de esta), tiene sus orígenes más apreciables en la historia de la computación. En particular con la aparición de la preocupación por el diseño de sistemas de software que pudieran estar a la altura del hardware que comenzaba a estar disponible gracias a la denominada segunda generación de la computación electrónica, hacia mediados de la década de 1960. Esto llevó a un desarrollo en paralelo de mejoras en la forma en la que se entendía a la programación misma, la relación de los programas con el hardware que lo implementaba, la forma en la que se podía modelar en dichos programas las acciones y sus consecuencias que podían tener en el mundo físico y especialmente la dificultad intrínseca en trasladar un diseño en una implementación de dicho diseño cuyo comportamiento sea equivalente al diseño pretendido. Aquí hay dos puntos en común que considero que son relevantes para nuestra manera de comprender a los sistemas complejos. Por un lado, se presenta como problema la pregunta por cómo diseñar sistemas que puedan tener un comportamiento robusto y efectivo, tanto bajo incertidumbre sobre la confiabilidad del hardware como los posibles errores introducidos por los diseñadores e implementadores.

¹⁶Esto es, aunque los fenómenos que se pretendan conocer sean “simples” —incluso en los diversos sentidos de esta palabra—, el sistema de soporte sobre el cual se elabora el conocimiento de dichos fenómenos se apoya en un complejo entramado que quizás pueda “escondarse” debajo de una gran capa de abstracciones, pero cuyo *funcionamiento* no puede eliminarse, como puede ser el cerebro humano.

No creo que a esta altura sea una sorpresa la dificultad que presenta representar de manera adecuada el “contrato” que es, en última instancia, la relación semántica o de interpretación entre una expresión simbólica y los observables que son el resultado en el ambiente de la operación realizada como valores de entrada *sobre* el sistema. En computación, una forma de proceder a hacer explícita esta relación es mediante la creación de una clase de modelos sobre el cual se pueda formular un cálculo de procesos a partir de expresiones que representan los estados admisibles para los “objetos” en el modelo (procesos objetivados por una abstracción que permite así facilitar la interacción con ellos), tanto de las condiciones iniciales y finales como de los procesos posibles que hacen a las transformaciones admisibles de uno en otro. Entre otros, este es el núcleo de las propuestas de C.A.R. Hoare y de Edsger W. Dijkstra (Dahl y col., 1972). Esta estrategia es similar a pensar en objetos físicos con estados internos y reglas de interacción o comunicación. Otra manera alternativa de representar el problema que se sugirió fue la de realizar una especificación algebraica en el que los procedimientos que se pueden llevar a cabo sobre el sistema específico y que se tratan como abstractos o como cajas negras, en tanto no se descomponen en estados internos, sino que los pares (acciones, observables) son tomados como axiomas, y de los objetos o las abstracciones simplemente se espera que cumplan con sus especificaciones. Entre otros, proponentes de esta mirada sobre sistemas fueron Bárbara Liskov y Johh Guttag (Liskov & Guttag, 1986; Liskov & Zilles, 1975).

Ninguna es “más correcta” que la otra, simplemente hacen a distintas maneras de lograr lo mismo: resuelven un problema bien definido con observables y métricas de éxito claramente identificables aunque las instanciaciones de esos diseños sean muy distintos. La principal lección epistemológica que pretendo tomar de este análisis es que, desde mi punto de vista, estas dos formas engloban las estrategias fundamentales ya comentadas como procedimientos necesarios a llevar a cabo por una comunidad para conocer un sistema complejo: representaciones múltiples, cuya prueba de equivalencia, parcial en algunos casos, puede tomarse como una abstracción robusta sobre la que construir nuevas representaciones; la confluencia o convergencia de estrategias, que en el capítulo 4 fueron presentadas como las estrategias *bottom-up* al estilo McCulloch-Pitts y las tipo *top-down* sugeridas y empleadas por Turing.¹⁷

El punto clave que pretendo señalar aquí es que lo que logran las abstracciones es, por un lado, disminuir la complejidad organizacional con la que un agente debe lidiar al enfrentarse con un sistema sobre el cual persigue un fin epistémico; mientras que, al mismo tiempo, aumenta la complejidad del comportamiento observable cuando

¹⁷La historia de los modelos de computación muestran también otro claro ejemplo de la convergencia y retroalimentación de estrategias de modelado muy distintas para la determinación de un conjunto de invariantes *empíricos*: la llamada tesis de Church-Turing. Se trata de un caso prototípico en el que el conocimiento sobre una clase de comportamientos se genera por la posibilidad de generar transferencias entre representaciones por una serie de invariantes o comportamientos robustos encontrados gracias a las mismas representaciones.

se tiene en cuenta las capacidades del agente acoplado al sistema que él mismo define. Equivalentemente, la capacidad de acción en términos de las transformaciones posibles del ambiente ahora también incluye la capacidad de alterar los estratos que están “debajo” de las abstracciones, en tanto la disminución de la complejidad es operativa, esto es, no ha sido eliminada sino que mediante la postulación de una interfaz entre el sistema y el ambiente y la posterior especificación de comportamiento observable, dicha complejidad puede aprovecharse de manera robusta sin necesitar acceso a los detalles detrás de la interfaz. Así, de la misma manera en la que agentes epistémicos deben postular niveles e interfaces para modularizar y manejar la complejidad de los fenómenos, ya sea en tanto se pretenden estudiar los fenómenos naturales mediante representaciones simbólicas o se pretendan generar artefactos a partir de operaciones basadas en las representaciones simbólicas mediante un proceso de interpretación, la emergencia del comportamiento complejo en la naturaleza ocurre por razones similares, mediante interfaces de procesos que se vuelven estables por alguna clase de abstracción que les provee de una suerte de identidad en base a la cual otros procesos en la naturaleza pueden interactuar. Procedo ahora a articular estos puntos, o al menos a intentarlo.

7.2.3. Niveles de abstracción (y abstracción de niveles)

Las ecuaciones de Hodgkin y Huxley representan las propiedades del impulso nervioso como un circuito eléctrico, pero los canales y bombas necesarios se construyen a partir de las especificaciones de los genes. Nuestros problemas residen en comprender la parte constructora de la maquinaria, y aquí la célula es el nivel de abstracción adecuado.

Sydney Brenner (2012, p. 461)

Como ya mencioné, el desafío que debe tener toda noción no trivial de nivel es el de poder determinar cuando ocurre un cambio de nivel, o equivalentemente, determinar cuál es la relación que existe entre niveles. Esto, en tanto, es precisamente por lo que debe preocuparse toda reflexión filosófica que se apoye en un concepto de nivel, como es el caso ya comentado de la emergencia, y especialmente lo es si se pretende entenderla como en algún sentido operando en una dirección contraria a la reducción, otro problema que explícitamente se apoya en alguna concepción de nivel o al menos de dos *relata*, de uno de los cuales se podría prescindir en ciertos contextos en virtud de la misma relación de reducción. A su vez, allí se señaló que para que nociones como reducción y emergencia tengan sentido se deben considerar las capacidades (de observación, de inferencia, de acción, etc.) de los agentes involucrados en la descripción de un fenómeno, ya sea de aquellos que se tomen como emergentes o de aquellos en virtud de los cuales se pretendan explicar los emergentes. En cualquier caso, toda descripción se hace, a fin de cuentas, bajo las

restricciones de estas capacidades; asimismo, argumenté allí que en todos los casos las afirmaciones de conocimiento (y fundamentalmente los que tratan de la transferencia de conocimiento entre dominios y que en última instancia caracterizaría tanto a la reducción como al aprendizaje), deben hacerse como argumentos en la práctica, cosa que hasta sucede con las afirmaciones analíticas que, en última instancia, también son relativas a un sistema formal (o un sistema “natural” en el que comunicar conocimiento que sea formalmente regimentado; como sería el caso del lenguaje natural en conjunción con una teoría de conjuntos u otro formalismo que cumpla su misma función, como es propio de la gran mayoría de las pruebas en matemática). Una vez aceptada la pérdida de la certeza provocada por la pérdida del paradigma determinista y de pleno acceso al mundo de los fenómenos tanto naturales como simbólicos, lo mejor a lo que se puede aspirar es a descripciones robustas. Y para lograrlas es necesario proceder mediante una descomposición de representaciones que se puedan probar como suficientemente equivalentes dentro del contexto de una investigación. Es decir, se requiere de un proceso por medio del cual se pueden tomar estos los diversos elementos y las relaciones entre ellos postuladas como si fueran un proceso común en la superficie, al margen de las diferencias de “implementación”.

Recientemente, Luciano Floridi ha recuperado la idea de niveles de abstracción y del gradiente (o conjunto ordenado) que se puede hacer con ellos, ya sea que se aniden o se tomen como disjuntos.

Un nivel de abstracción, NdA, es un conjunto finito pero no vacío de observables. No se asigna ningún orden a los observables, que se espera que sean los bloques de construcción de una teoría caracterizada por su propia definición. Un nivel de abstracción se denomina discreto [respectivamente analógico] si y sólo si todos sus observables son discretos [respectivamente analógicos]; en caso contrario, se denomina híbrido.^{CXLIV} (Floridi & Sanders, 2004, p. 11)

Esta forma en la que define qué es un nivel de abstracción debe recordarnos a la forma en la que Wimsatt se refería a las perspectivas, ese conjunto determinado de variables que se toman para caracterizar cuáles son los observables del sistema que se pretende estudiar. Floridi entiende por “sistema” un concepto fenomenológico (Floridi & Sanders, 2004), y el peso pasa a estar en lo que se entiende por “observable”:

Por observable entendemos una variable tipificada interpretada, es decir, una variable tipificada junto con una declaración de qué característica del sistema considerado representa. Dos observables se consideran iguales si y sólo si sus variables tipificadas son iguales, modelan la misma característica y, en ese contexto, una toma un valor determinado si y sólo si la otra lo hace.^{CXLV} (Floridi & Sanders, 2004, p. 9)

Aquí la dificultad estará en detallar la interpretación que en última instancia conecta al sistema simbólico con el que se opera con el fenómeno del que se pretende dar cuenta.

Si bien a lo largo de esta investigación he usado constantemente los conceptos de descripción, representación y de interpretación también apelando a intuiciones sobre ellos, a diferencia de Floridi no creo que deban ser tomados como primitivos para definir una abstracción. Por el contrario, creo que la dirección es la opuesta y debe procederse de manera recursiva, en tanto es por medio de abstracciones que pueden interpretarse otras abstracciones, atendiendo a la “realizabilidad múltiple” o equivalencia representacional bajo abstracciones que necesariamente debe darse. Esto se logra mediante una codificación de las representaciones que surgen de las acciones que cada abstracción permite a un agente llevar a cabo sobre el sistema que pretende estudiar y cuyas consecuencias puede luego observar en busca de invariantes; lo que luego puede reinterpretarse como una proyección en estados internos del fenómeno estudiado (paradójicamente quizás dándole forma “menos fenomenológica” al conocimiento obtenido).

Floridi atiende a cierto grado de recursividad al definir lo que entiende por «gradiente de abstracción» (Floridi & Sanders, 2004, p. 3), que es el conjunto ordenado de distintos niveles de abstracción, gradiente que en tanto puede ser disjunto (cuando diferentes conjuntos de abstracciones que para un propósito particular se toman como primitivos) o anidados (cuando un nivel de abstracción está formado sobre otros). Creo que esta clasificación debe colapsar bajo la misma idea de nivel de abstracción, en tanto precisamente lo que logra es generar una relación sobre elementos que de otra manera parecerían independientes o disjuntos. Así, lo clave a entender es como la abstracción funciona como una interfaz, que permite acciones simples sobre lo que se “esconde” detrás, pero cuya complejidad, en términos de lo que es capaz de hacer o de comunicar en distintos ambientes, no se elimina.

Floridi trae a colación algunas consecuencias de esto que puede llamarse como la “necesidad interpretativa” de los observables, en lo que se refiere a la indecibilidad:

La consecuencia de permitir que un observable sea indecidible es que se requiere cierto ingenio para demostrar que una implementación cumple con una especificación formulada en términos de sus observables: ningún programa puede lograr esa tarea en general.^{CXLVI} (Floridi & Sanders, 2004, p. 30)

Estoy de acuerdo con parte del diagnóstico, pero creo que las consecuencias son un tanto más fuertes, porque incluso bajo la operación de agentes con ingenio, en tanto se trata de una pregunta empírica, que hasta de hecho aparece en contextos formales, cualquier entidad limitada (humana, colectiva o “artificial”)¹⁸ que se proponga hacer tal cosa nunca puede *no equivocarse eventualmente*. Además, en un límite, hay muchas descripciones equivalentes (de hecho infinitas) de lo que ocurre “ahí abajo”, entre las cuales no se puede decidir cuál es correcta. En dicho límite, la pregunta deja de estar bien formulada. Lo que

¹⁸No ha sido fácil resistir la tentación de colocar las comillas en “humana” en lugar de hacerlo en “artificial”, pero al menos hasta la sección siguiente seguiré más convenciones.

finalmente nos otorga esta formulación sobre la abstracción es el señalamiento de la necesidad de argumentos por robustez, que operan, de hecho, bajo el mismo principio y dan cuenta de que al menos se requiere de un “indeterminismo epistémico”, de la posibilidad de cometer y corregir errores.¹⁹

Podemos preguntarnos entonces qué es lo que determina las *interpretaciones* posibles y fundamentalmente aquellas que consideremos útiles o robustas o “suficientemente buenas”. En última instancia creo que es la comunicabilidad del diseño entre agentes mediante el cual pueden replicar un comportamiento observable, éste último definido como transformaciones sobre un alfabeto.²⁰ Las abstracciones se apoyan en una la simple y al mismo tiempo infinitamente compleja idea de una variable, que ya encontramos como una caja negra. Toda definición de una igualdad crea una abstracción. La manera en la que esto puede generar complejidad es cuando una abstracción puede llevar a que otra abstracción *actúe* de manera distinta luego de acoplarse (piénsese en un regulador, o en una expresión condicional que modifica *comportamientos*). Es a través de este procedimiento que la naturaleza y los seres humanos pueden crear nueva complejidad, y es de esa misma manera que podemos comprender la complejidad que observamos, tanto natural como artificial; distinción que ya empieza a licuarse, en tanto su contorno es tan dependiente de la abstracción elegida como la idea misma de sistema.

7.3. La naturaleza artefactual de los sistemas complejos y su conocimiento

Cuando se estudia un sistema complejo y se elige o postula el nivel de abstracción en el que se va a proceder, en el proceso se crea un gradiente de abstracciones, esto es, de entidades, actividades, o procesos que se explican u observan desde el nivel de abstracción elegido. La *generalidad* de las abstracciones proviene del hecho de que crean una forma de tratar con muchas situaciones o instancias específicas, proporcionando así una forma de manipular varias “micro-configuraciones” y establecer cómo pueden ser trabajadas y relacionadas con otras “macro-configuraciones” *externas*. Esto es lo que ocurre cuando se estudia o propone una *interfaz*, en tanto corresponde a una serie de características que un

¹⁹Podríamos bien aquí recordar por qué Turing y von Neumann, entre otros, no veían en los teoremas de incompletitud de Gödel una prueba de la imposibilidad de una inteligencia artificial por medios mecánicos. Al contrario, lo tomaban como un argumento a favor. Ver, además de lo remarcado en el capítulo 4, (Webb, 1980).

²⁰Este es el problema fundamental que creo que debería perseguir una filosofía de los lenguajes científicos. Dicho sea de paso, aquí estamos frente a otra cara de la pregunta por el significado de los programas de computación cuando tienen términos que trascienden en el ambiente de interpretación interna de su lenguaje y se refieren al mundo físico. Aceptando que se puede pensar a los programas como una prueba en tanto objeto matemático definido *in extenso* y ejecutable, vale traer a colación aquí lo remarcado en una nota anterior sobre el intuicionismo en fundamentos de la matemática y el problema de la irrazonable efectividad de la matemática en ciencias naturales.

observador o diseñador postula como relevante para explicar la aparente comunicación entre dos elementos. Herbert Simon sugería pensar a los artefactos en esta dirección:

Un artefacto puede ser concebido como punto de encuentro —una «interfaz», en términos actuales— entre un entorno «interno», esto es, la materia y la organización del propio artefacto, y un entorno «externo», es decir, el entorno en el que opera.^{CXLVII}
(H. A. Simon, 1996/2006, p. 7)

En esta última sección, propongo explorar estas reflexiones de Simon como una interfaz entre el estudio de la complejidad, el diseño de máquinas como una estrategia heurística para el conocimiento científico y algunas características que atan a los aspectos ontológicos con los epistemológicos de la emergencia.

Simon considera las siguientes como cualidades de lo *artificial*:

1. Los objetos artificiales son sintetizados (aunque no siempre, o no por lo general, con plena premeditación) por seres humanos.
2. pueden imitar las apariencias de los objetos naturales sin tener, en uno o varios aspectos, la realidad de éstos.
3. pueden caracterizarse en términos de funciones, objetivos y adaptación.
4. se discuten a menudo, y en especial mientras se diseñan, tanto en términos imperativos como descriptivos. (H. A. Simon, 1996/2006, p. 6)

Lo primero a señalar es acerca de la distinción entre natural y artificial. Si bien Simon no es completamente explícito, su insistencia en una ciencia de lo artificial y que el mundo que habitamos es mayoritariamente artificial, en tanto regido por lo contingente de lo que *puede ser* (en lugar de lo que *debe ser*), me llevan a proponer una lectura de continuidad entre lo natural y lo artificial. Esto significa que la diferencia es de grados, aunque bajo algunas abstracciones las diferencias pueden tratarse como de tipo. Además, cada nivel de abstracción que se propone o presupone una naturalización en tanto se “substancializan” procesos que en el nuevo nivel de abstracción se toman como invariantes módulo la abstracción.²¹ El nivel mínimo que pueda describirse por modelos efectivos robustos se toma habitualmente, por consenso de la comunidad en ese momento, como “natural”. Pero metodológicamente, en lo que corresponde a una descripción de la manera de obtener conocimiento, debemos aceptar que lo que podemos reconocer en tanto agentes epistémicos son siempre efectos de una abstracción postulada sobre un ambiente sobre la base de las consecuencias detectables de las acciones habilitadas por la abstracción. En conjunción con una descripción en base a funciones, como la del punto 3, Simon sugiere que podemos entender lo que es una computadora: Una computadora es una organización de

²¹En efecto, se trata del resultado de la proyección ontológica descrita anteriormente.

componentes funcionales elementales en la que, con gran aproximación, *sólo la función realizada por esos componentes* es relevante para el comportamiento de todo el sistema. (H. A. Simon, 1996, pp. 17–18. El énfasis es mío)

En su ya clásico pero cada vez más relevante *Vision*, David Marr (1982/2010) propuso una interesante división en niveles (en lo que en los términos de la sección anterior podemos describir como un gradiente de niveles de abstracción) para comprender sistemas complejos. Influenciado por la física estadística, como también la ha sido toda la generación que comenzó ha reflexionar sobre emergencia y complejidad, Marr comenta sobre la necesidad de integrar de manera consistente explicaciones que se originan en distintos niveles para poder domar la tarea de explicar el funcionamiento de sistemas complejos como un todo, puesto que “Casi nunca puede entenderse un sistema complejo de cualquier tipo como una simple extrapolación de las propiedades de sus componentes elementales.” Por el contrario,

Tales efectos se describen en su propio nivel, el de una enorme colección de partículas; el esfuerzo es mostrar que, en principio, las descripciones microscópicas y macroscópicas son consistentes entre sí.

Otra forma de expresar esto, creo, hablar de generar un nuevo nivel de explicación en donde se puedan integrar o articular las explicaciones de diferentes perspectivas.²² Continúa Marr:

Si uno espera lograr una comprensión completa de un sistema tan complicado como un sistema nervioso, un embrión en desarrollo, un conjunto de redes metabólicas, una botella de gas o incluso un gran programa de computadora, entonces se debe estar preparado para contemplar *diferentes tipos de explicación en diferentes niveles de descripción que están vinculados, al menos en principio, en un todo cohesivo, incluso si vincular los niveles en detalle completo no es práctico.* (Marr, 1982/2010, pp. 19–20. El énfasis es mío)

Los tres niveles de explicación que hacen a ese todo cohesivo (término que al menos para Marr parece tener más bien un tono pragmático que consecuencias metafísicas profundas) son:

- El nivel computacional: “la teoría computacional abstracta del dispositivo, en la que el funcionamiento [*performance*] del dispositivo se caracteriza como un mapeo de un tipo de información a otro, se definen con precisión las propiedades abstractas de este mapeo y se demuestra su idoneidad y adecuación a la tarea en cuestión” (Marr, 1982/2010, p. 24);

²²Por esta razón, se suele hablar de que el criterio explicativo para sistemas complejos debe ser *pluralista* (Branca, 2021; S. D. Mitchell, 2012)

- El nivel de representación y del algoritmo: “la elección de la representación de la entrada y la salida y el algoritmo que se utilizará para transformar una en la otra”; (Marr, 1982/2010, pp. 24-25)
- El nivel de la implementación en hardware: “los detalles de cómo se realizan físicamente el algoritmo y la representación, la arquitectura detallada de la computadora, por así decirlo”(Marr, 1982/2010, p. 25)

A medida que subimos en esta jerarquía *epistémica*, nos encontramos que cada abstracción superior puede ser *implementada* de muchas maneras. Efectivamente, esto significa que una de las características de los procesos de abstracción es consistir en una relación de muchos a uno, lo que con también deja ver que bajo una interpretación adecuada, que normalmente dependerá del conocimiento que se tenga sobre las capacidades del receptor, a través de abstracciones las descripciones de un fenómeno o evento pueden ser *comprimidas*.²³ Creo que Marr y Simon están en lo cierto, pero que la jerarquía de abstracciones es todavía más amplia. Marr en particular se detenía en el nivel computacional *del dispositivo*. Esta, a su vez, es una de tantas instancias de una teoría de lo computable, que también debe describirse bajo abstracciones y que puede ser implementada de distintas maneras. Simon y Newell, por ejemplo, también creían que el nivel del conocimiento era *suficiente* para describir el comportamiento inteligente. Newell lo ponía en estos términos:

Como ejemplo relacionado con el presente trabajo, recientemente he dedicado algunos esfuerzos a describir lo que Herb Simon y yo hemos llamado la "hipótesis del sistema de símbolos físicos". Esta hipótesis identifica una clase de sistemas que encarnan la naturaleza esencial de los símbolos y que son la condición necesaria y suficiente para un agente de inteligencia general. Los sistemas de símbolos resultan ser sistemas computacionales universales, vistos desde un ángulo diferente. Para mi objetivo aquí, la característica importante de esta hipótesis es que surgió de la práctica en la IA, del desarrollo de los lenguajes de procesamiento de listas y de Lisp, y de la estructura adoptada en un programa de IA tras otro. En la IA, la práctica nos llevó a una noción adecuada de símbolo. En el catecismo estándar de la ciencia, no es así como se desarrollan las grandes ideas. Las grandes ideas se producen porque los grandes científicos las descubren (o inventan), y las presentan a la comunidad científica para que las pruebe y las elabore. Pero en este caso, los científicos en medio de sus tareas han desarrollado un nuevo concepto científico importante, bajo formas parciales y alternativas. Sólo gradualmente ha adquirido su nombre propio. (Newell, 1982, p. 94)

Hay una interesante reflexión metodológica que se puede extraer de esa cita con respecto a la emergencia (descubrimiento) y convergencia (aceptación) de ideas en una comunidad científica. En este caso, tomando el punto de vista de cómo emergió una idea, se describe como emergiendo bajo distintos rótulos y formas en la búsqueda de la solución a un pro-

²³Recuérdese también lo comentado anteriormente sobre la longitud de las descripciones con referencia a la complejidad de Kolmogorov.

blema particular, pero si se toma a la idea de los creadores como el nivel de abstracción que se analizará sin preguntarse precisamente por su “historia interna”, es simplemente una nueva idea que se introduce en la comunidad para su puesta a prueba y elaboración. De la misma forma, en un nivel de abstracción, todo artefacto puede ser descrito en términos de un sistema de símbolos:

Los sistemas de símbolos son casi los artefactos quintaesenciales, ya que la adaptabilidad al entorno constituye toda su razón de ser. Son sistemas que persiguen objetivos, procesan información, y usualmente están al servicio de sistemas más grandes que los incorporan.^{CXLVIII}(H. A. Simon, 1996/2006, p. 25)

Esto nos deja en un nivel de abstracción todavía más significativo y superior al nivel más abstracto de Marr. Es en base a la elaboración de estas *clases de niveles de abstracción*, que definen formas de *operar* con las que deben poder describirse tanto a los observadores como a los sistemas que se observan. Incluso estos sistemas de símbolos con los que se pueden describir tanto los sistemas que se estudian como las acciones implicadas en su conocimiento, todos capaces de computación universal, deben verse como instancias de computación no determinista, que fundamentalmente requiere de un proceso que puede describirse como de aprendizaje y cuya característica esencial es la de poder cometer errores; y no solo pese a ellos, sino gracias a ellos, poder contribuir al sistema en el que están incorporados. Es a partir de la convergencia *suficiente* de resultados iterados (efectivamente otra abstracción) que, para un propósito específico, el “significado” de los cambios en las estructuras internas puede establecerse y generar un ciclo de retroalimentación. En cuanto entidades con capacidades de cálculo finitas, tanto los sistemas descritos como los agentes que llevan a cabo las descripciones, podrán encontrar descripciones que satisfacen ciertos propósitos, pero cuya optimalidad solo puede asegurarse en los casos más sencillos. Creo que es por esta razón que debemos aceptar que el mundo es emergente. Además, las mismas abstracciones que nos hacen posible conocer lo complejo, en tanto permiten la existencia misma de lo complejo a través de la creación de interfaces, delimitan la cota máxima de lo que nos es posible conocer. La posibilidad de la complejidad y de su conocimiento están, pues, en la simplicidad de las interfaces, que esconden pero no eliminan los detalles de las configuraciones internas:

En el mejor de los mundo posibles —al menos para un diseñador— podemos incluso albergar la esperanza de combinar los dos conjuntos de ventajas descritas que derivan de descomponer un sistema adaptativo en objetivos, ambiente externo y ambiente interno. Podemos aspirar a ser capaces de caracterizar las principales propiedades del sistema y de su comportamiento sin tener que elaborar al detalle ni el ambiente externo ni el interno. Podemos concebir una ciencia de lo artificial que dependa de la simplicidad relativa de la interfaz como fuente primaria de abstracción y generalidad. (H. A. Simon, 1996/2006, p. 10)

Desde mi punto de vista, una ciencia de lo artificial es, a fin de cuentas, una

epistemología, no solo en virtud de la necesidad de que toda explicación requiere de la creación de una novedad (una abstracción o interfaz) en base a la cual los agentes epistémicos puedan homologar situaciones (esto es, tratarlas como semejantes con respecto a los observables), sino también en virtud de que, de la misma forma en la que los fenómenos deben explicarse en base a crear una situación análoga, la formulación de artefactos que simulen la situación misma que corresponde a la generación de descubrimientos podría verse como una explicación de la manera en la que se puede generar conocimiento del mundo. Por esto, la investigación en inteligencia artificial puede verse como una contribución al proyecto de una epistemología naturalizada. No menor aquí es el problema de la dificultad computacional de los procesos subyacentes a las inferencias que se puedan hacer en los distintos niveles de abstracción y la consecuente necesidad de las heurísticas. Simon comenta algo similar en la siguiente comparación entre una estrategia de resolución de problemas altamente efectiva pero cuyas simplificaciones limitan considerablemente el campo de aplicabilidad, diferenciando el campo de la investigación operativa con el dominio de la inteligencia artificial:

Para que los ordenadores puedan encontrar soluciones óptimas con un esfuerzo razonable cuando hay cientos o miles de variables, los potentes algoritmos asociados con la IO [Investigación Operativa] imponen sobre el problema una estructura matemática considerable. El precio que se paga para lograr esta capacidad es deformar el problema real para cumplir con los requisitos computacionales: por ejemplo, reemplazar la función objetivo y las restricciones con aproximaciones lineales para poder utilizar la programación lineal. Por supuesto, la decisión que es óptima para la aproximación simplificada muy pocas veces será óptima en el mundo real, pero la experiencia muestra que a menudo será satisfactoria.

Los métodos alternativos que la IA [Inteligencia Artificial] proporciona, a menudo en forma de búsqueda heurística (búsqueda selectiva a partir de reglas de sentido común), encuentran decisiones «bastantes buenas», *satisficientes*. Los modelos de IA, como los de IO, son sólo aproximaciones del mundo real, aunque muchas veces con más precisión y detalle que los que admiten aquéllos. Pueden hacerlo porque la búsqueda heurística puede desarrollarse en un espacio de problema más complejo y menos estructurado que el que precisan las herramientas de IO. El precio pagado por trabajar con modelos más realistas y menos regulares es que los métodos de IA por lo general sólo obtienen soluciones satisfactorias, no las óptimas. Debemos sopesar la *satisfacción* en un modelo casi realista (IA) contra la optimización en un modelo muy simplificado (IO). A veces se preferirá lo uno, y a veces lo otro. (H. A. Simon, 1996/2006, p. 32. Énfasis en el original)

Aquí el punto es que las heurísticas requieren para poder funcionar como tales de la posibilidad de cometer errores (o de “operativizar” alguna fuente de azar), pero de manera tal que dichos errores puedan verse constreñidos a efectos de generar una computación robusta. La computación determinista, al estilo de la llamada arquitectura de von Neumann, opera bajo precisamente esta abstracción del comportamiento subyacente del hardware,

cuyos detalles pueden dejarse de lado, y muchas abstracciones más pueden diseñarse sobre dicha abstracción original, que solo requiere que existan componentes que cumplan con ciertas especificaciones que hacen a la misma abstracción. El punto es que gracias a esa abstracción se puede lograr una teoría de lo que es posible en ese nivel sin tener en cuenta los detalles de la constitución propia de los niveles inferiores, solo es necesario recurrir a una descripción efectiva y robusta:

Lo importante para nuestra discusión es que los componentes podrían ser tanto neuronas como relés (relevadores), tanto relés como transistores. Las leyes naturales que gobiernan a los relés son bien conocidas, pero las que rigen a las neuronas lo son sólo de manera imperfecta. Poco importa, ya que lo único pertinente a efectos teóricos es que los componentes tengan un nivel específico de fiabilidad [*unreliability*] y que se interconecten de la manera especificada. Este ejemplo muestra que la posibilidad de formular una teoría matemática acerca de un sistema o de simular tal sistema no depende de disponer de una microteoría adecuada o de conocerlas leyes naturales a las que se someten los componentes del sistema. Tal microteoría podría, de hecho, ser simplemente irrelevante. (H. A. Simon, 1996/2006, pp. 21-22)

Más que “irrelevante” quizás sería mejor decir que simplemente es innecesaria en muchos casos en los que, para los propósitos pretendidos, la teoría en nivel de abstracción superior es suficiente; o quizás imposible de obtener, como cuando los métodos de diseño experimental disponibles en una época exceden los requisitos necesarios para que una comunidad pueda hacer el ajuste de retroalimentación necesario para generar una buena teoría robusta de los observables.²⁴ Que no existan errores, o que estos estén controlados y puedan ser explotados como recursos, es una consecuencia de una abstracción; y es de hecho lo que posibilita tomar una serie de signos, de valores, o de acontecimientos como semejantes unos a otros y, al mismo tiempo, como distintos de otros. Es decir, *interpretarlos*, y cambiar un comportamiento o secuencia de eventos en base a tal interpretación. La corrección o contención de errores es, pues, una “semántica mínima”, una forma primordial de creación de significado, con un bucle de retroalimentación en la raíz. Aquello pues que define a una computación no necesariamente debe ocurrir al nivel del software, de hecho el software es una abstracción por la cual se puede tanto aprovechar como controlar el hardware,²⁵ abstracciones que luego de hecho pueden implementarse en hardware optimizado para cumplir la misma función de manera más eficiente (con menos gastos secundario u *overhead*, como suele decirse en inglés). Claro que una mayor

²⁴Esto, sostengo, ocurre en todos los casos de conocimiento empírico, incluso cuando se tratan de afirmaciones para cuya formulación es necesaria una gran cantidad de matemática sofisticada. Al mismo tiempo, me atrevería a decir que lo mismo ocurre en todos aquellos mundos teóricos en los que las consecuencias de los postulados exceden lo que puede contenerse en el sistema formal si es que no se está dispuesto a tolerar inconsistencias o indeterminismos. Pese a ser menos real, los mundos matemáticos no dejan de ser mundos y lo perfectamente cognoscibles en ellos es un sector muy pequeño.

²⁵Podríamos llamar a esto “causalidad descendente” (Ellis y col., 2012), pero en tanto estrictamente es algo que puede darse de igual manera en el mismo nivel de abstracción elegido creo que prefiero mantener el vocabulario de “regulación”, con toda la impronta cibernética que tiene.

eficiencia suele tener el costo de menor flexibilidad en términos de las operaciones totales que el hardware, tomado como caja negra, es capaz de hacer. Este *trade-off* es inevitable, y es precisamente la capacidad de encontrar estos balances entre “fuerzas opuestas” lo que hace a un sistema complejo. Es por esto que parte de la fenomenología que los acompaña en un nivel de abstracción determinado es el de la tendencia a mantenerse en las cercanías de un estado crítico, allí el sistema puede *hacer más*:

Los sistemas dinámicos críticos maximizan el comportamiento correlacionado de las variables en los sistemas de muchas variables. También los sistemas dinámicos críticos parecen maximizar la diversidad de lo que pueden "hacer" a medida que se hacen más grandes. Esto plantea la fascinante pero no comprobada posibilidad de que, debido a la selección natural, la vida logre una maximización del producto del trabajo total realizado multiplicado por la diversidad del trabajo realizado al ser dinámicamente críticos. Entonces, las células serían máximamente eficientes en la realización de la mayor variedad de tareas con el máximo trabajo total realizado, dados los recursos energéticos disponibles.^{CXLIX} (S. A. Kauffman, 2008)

Por esta razón, el estudio de los sistemas complejos es, en parte, el estudio de modelos e implementaciones alternativos de computación. Ni el cerebro ni una computadora digital son una máquina de Turing, pero en una escala de tiempo infinita y para un observador que cuenta con las abstracciones adecuadas para procesar los *outputs* provenientes de ellos, todos (incluyendo el observador o modelador o intérprete) son *operacionalmente equivalentes*. Si los argumentos en principio se aceptan (lo que equivale a aceptar recursos infinitos como tiempo y espacio), ese es un límite impuesto por nuestra forma de conocer. En la práctica, debemos todavía tener en cuenta los límites que surgen tanto de las representaciones como de sus instanciaciones físicas, operando de manera similar, sea que hayan sido diseñadas por nosotros o que para su conocimiento debamos recurrir a pensar en términos de una ingeniería inversa para poder producir un análogo cuyo conjunto de observables pueda ser interpretado como semejante.

Según mi lectura, Simon compartía esta postura empírica y naturalista sobre nuestra manera de conocer y como su posibilidad en última instancia depende de nuestra capacidad de abstraer los detalles de las operaciones internas y postular su equivalencia en un nivel de abstracción determinado en base a las intervenciones que el agente epistémico pueda realizar en el ambiente del sistema definido:

Como ya hay muchos aparatos de este tipo en el mundo que, además, parecen compartir las propiedades que los definen con las de nuestro sistema nervioso central, nada impide que desarrollemos una ciencia natural sobre ellos. Podemos estudiar los ordenadores como estudiaríamos a los conejos o a las ardillas, y descubrir cómo se comportan bajo pautas de estimulación ambiental distintas. En la medida en que su comportamiento refleja mayormente las características funcionales básicas hasta ahora descritas, y que es independiente de los detalles del hardware, es posible cons-

truir una teoría general —y empírica— sobre los mismos. (H. A. Simon, 1996/2006, pp. 22-23)

Y aunque probablemente también compartiese mi tendencia a ver “computadoras salvajes” por doquier en el mundo natural, creo que debería haber ido más lejos todavía en términos de pensar que la computación que dichos sistemas podrían estar implementando era algo más “sucio” y quizás algo más cerca de lo que hacen los cerebros “en un bajo nivel”. En otras palabras, las heurísticas no deben verse como sólo aplicando a restricciones en las búsquedas que se ejecutan sobre representaciones simbólicas de alto nivel, sino que ellas son indispensables para la creación de comportamiento complejo con hardware o implementaciones imperfectas, que pese a la imperfección pueden ser confiables o robustos; y que gracias a la imperfección pueden ser complejos.

Junto con Turing, y si nos es gracias a Turing y a otros cibernetas, von Neumann fue uno de los primeros en reconocer la importancia de la *corrección* de errores como un una forma muy sencilla de crear complejidad y sentido. Un buen complemento, creo yo, a la necesidad de los *errores* que Darwin había visto como necesarios para la creación de variedad. En su “Probabilistic Logics and the Synthesis of Reliable Organisms from Unreliable Components”, von Neumann (1956/1987b) comenta sobre cómo lidiar con los errores para diseñar computación robusta y confiable cuando lo que se encuentra en el ambiente no tiene esas propiedades:

La idea básica de este procedimiento es muy sencilla. En lugar de introducir los datos entrantes en una sola máquina, la misma información se introduce simultáneamente en varias máquinas idénticas, y el resultado que sale de la mayoría de estas máquinas se asume como verdadero. Hay que demostrar que esta técnica puede utilizarse realmente para controlar el error.^{CL} (von Neumann, 1956/1987b, p. 572)

Ese breve párrafo está etiquetado como “argumento heurístico” e inmediatamente a continuación del título “La síntesis de los autómatas”. En cuanto a arquitectura, muy lejos de la arquitectura de la EDVAC y mucho más cerca del cerebro humano. Los dos, sin embargo, capaces de tanto. Cuando leí este pasaje por primera vez, no pensé jamás que allí se escondía toda una visión del mundo, mucho menos una tan compleja. Y mucho menos que apenas juntar los elementos básicos para señalar el camino de su decodificación terminarían en esta investigación, que apenas es una abstracción necesaria para los nuevos emergentes a descubrir. Y mucho menos, que de ese principio llegaría este final, solo para comenzar de nuevo.

7.4. Resumen y conexiones

La discusión filosófica sobre emergencia es extremadamente amplia y diversa, parte de su riqueza yace precisamente en que obliga a poner sobre el tablero muchas piezas de lo

que significa hablar del conocimiento de la naturaleza y de la naturaleza de conocimiento que parecían "resueltas". Por suerte hay buenas guías a la literatura tanto filosófica como científica que ha tratado el tema. En español, destaco el trabajo de Miguel M. Fuentes (2020), al que este capítulo es un pequeño *addendum*. En inglés, pueden consultarse varias compilaciones como (Bedau & Humphreys, 2008; Clayton & Davies, 2008; Corradini & O'Connor, 2010; Gibb y col., 2018).

La reciente publicación de (Brooks y col., 2021) plantea un buen nivel inicial para retomar la discusión de niveles de la naturaleza, que es muy heredera de todos los intentos de fisicalismos no-reductivos, una postura cuya coherencia es realmente difícil de lograr y que cuenta como inspiración (si no es que como modelo a seguir) a la obra filosófica de Whitehead.²⁶

Habitualmente se ve como un problema que nociones como la complejidad y la emergencia "dependan del punto de vista", y luego se proceda a buscar eliminarlas o explicarlas en términos de nociones más básicas o más simples. Creo que, precisamente, hay que proceder en la dirección contraria, abrazar la complejidad e intentar explicar por qué la podemos explicar y entender, y en el proceso intentar comprender qué es lo que está en juego cuando hablamos de estudiar la naturaleza y, al hacerlo, estudiarnos a nosotros mismos. Ian Hacking se expresaba en una dirección similar:

En la naturaleza solo hay complejidad, a la que somos sorprendentemente capaces de analizar. Esto lo hacemos al distinguir en la mente las diferentes leyes. También lo hacemos al presentar, en el laboratorio, fenómenos puros, aislados. (Hacking, 1996, p. 255)

En parte extendiendo el análisis de Hacking tomando algunos insights de la manera en la que gracias a algunas simplicidades teóricas y experimentales de las que somos capaces y que aplicamos para crear artefactos complejos, especialmente a través de la computación, en este capítulo sugerí que la forma en la que la naturaleza crea complejidad puede verse como análoga a la manera en que nosotros también lo hacemos: mediante una simplificación que no implique la eliminación de detalles, sino que ellos simplemente se escondan detrás de una interfaz. Esto genera una abstracción gracias a la cual podemos actuar sobre procesos complejos como si fueran mucho más simples de lo que en realidad son, con las oportunidades y peligros que eso implica; lo que es, después de todo, otra forma de ver qué significa una emergencia. Las abstracciones, en tanto en última instancia requieren de que su interfaz esté implementada en alguna configuración de materia que, fundamentalmente, podría haber estado configurada u organizada de un modo distinto, son mucho más concretas de lo que uno podría esperar; y nos permiten tanto simplificar como comprender, y repetir el proceso.

²⁶Whitehead creía que "La civilización avanza ampliando el número de de operaciones importantes que podemos realizar sin pensar en ellas" (Whitehead, 1911, p. 61). La naturaleza, creo, hace lo mismo.

Conclusiones (y limitaciones)

Esto introduce nuevamente un elemento subjetivo en la descripción de los acontecimientos atómicos, ya que el instrumento de medición ha sido construido por el observador; y debemos recordar que lo que observamos no es la naturaleza en sí misma, sino la naturaleza presentada a nuestro método de investigación

Werner Heisenberg, *Física y filosofía*

Conclusiones

Uno de los objetivos perseguidos a lo largo de esta investigación ha sido la exploración de algunas de las tantas maneras en las que el estudio de los sistemas que hayan sido considerados complejos en una época determinada ha ido modificando la idea misma de conocimiento científico, lo que conlleva también un cambio en qué se considera como complejo en cada momento. En particular, con la selección de autores y temas propuestos y recorridos he intentado señalar la fertilidad científico-filosófica de acercarse a la pregunta por el conocimiento en términos de las clases de máquinas que caracterizaron a una época y las reflexiones que suscitaron. Como vimos, en algunos casos su rol heurístico yacía en utilizar una concepción de máquinas como prueba de la imposibilidad de que una configuración física pueda llevar a cabo o generar un efecto particular, por lo que llevaba a la postulación de la necesidad de otras clases de explicaciones, y en algunos casos la presencia de nuevas entidades de un orden distinto. También hemos podido observar como en algunos científicos que intentaban demostrar la imposibilidad de explicaciones mecánicas muchas veces en su quehacer científico recurrían de manera heurística pensando en términos de cómo un mecanismo construido y diseñado por un ser inteligente podría dar cuenta de fenómenos observados en la naturaleza, muchos de ellos en el reino de lo orgánico. Tanto el organicismo como el emergentismo fueron posiciones que surgieron originalmente por la preocupación de poder llenar el vacío metodológico y conceptual existente en el acercamiento científico a distintos fenómenos que parecían escaparse del dominio de la física, disciplina que siempre tuvo un rol muy peculiar y preponderante

en las reflexiones filosóficas tanto de la naturaleza como de la ciencia en general como manera de hablar de la manera de intentar comprender al mundo. Quizás no tanto de las motivaciones sino más bien de la forma en la que fueron evolucionando estas posiciones, una primera conclusión que podemos extraer es cómo en ellas se dio explícitamente la reflexión acerca de la posibilidad, los límites e incluso la necesidad de poder transferir conocimiento entre disciplinas científicas cuyos objetos o conjunto usual de fenómenos estudiado *a prima facie* parecieran muy distintos, ya sea por la escala o por el substrato que les daba lugar. Tanto la Teoría General de los Sistemas como la revitalización de la reflexión filosófica en torno a la biología como disciplina científica autónoma fueron los primeros centros de gravedad alrededor de los cuales se fue forjando de manera particular esta pregunta por la naturaleza misma de la complejidad, cuyo estudio podía en principio dar luz sobre otras instancias que no fueran únicamente aquella cuya presencia es más notoria: la de la vida. De todas maneras, la preocupación por la naturaleza de lo viviente nunca se iría, aunque sí se seguirá profundizando constantemente, al punto que puede decirse que continúa siendo una de las fronteras del estudio de los sistemas complejos.

La reflexión sobre la emergencia y la organización como características de la complejidad debieron adaptarse —y creo que se beneficiaron profundamente— con la irrupción en la escena de las distintas facetas de la computación. Sin duda una de ellas es la posibilidad de llevar a cabo computaciones en el sentido clásico de cálculos: resoluciones numéricas a las ecuaciones con las que se modelan distintos sistemas y cuya resolución sin métodos automáticos demandaría escalas de tiempo que distan mucho de cualquier cosa que pueda considerarse como humanamente factible. La emergencia de la computación puso en evidencia algo que en retrospectiva puede verse incluso en los orígenes mismos de la ciencia: la necesidad de hacer coincidir preocupaciones teóricas, experimentales y prácticas o ingenieriles (o técnicas, en un sentido amplío). Los ciclos de retroalimentación no solo comienzan a verse como una manera de crear —natural y “artificialmente”— máquinas que puedan regular su propio comportamiento o estados internos de acuerdo a lo que puedan percibir o sentir del medio en el que se encuentren, sino que dichos ciclos de retroalimentación comienzan a permear en las reflexiones acerca de la inherente conexión entre distintas prácticas humanas, al punto que en algunos casos se puede dar la misma explicación para el comportamiento de una célula, de una colonia de insectos, de una ciudad, de sociedad, de cualquier conjunto de elementos que puedan considerarse activos en tanto pueden generar acciones con consecuencias en el comportamiento futuro de otras entidades a las que puede afectar, con las que están *conectadas*.

Es en esta dirección que, en retrospectiva, la Cibernética puede verse como una *disciplina de interfaz* entre los aspectos ingenieriles, lógico-teóricos y biológicos o fisiológicos, que ayudó a catalizar el estudio de los sistemas complejos. Además, en particular la gran mayoría de quienes se han denominado a sí mismos como cibernetas (o cibernéticos), o han sido colocados entre sus filas, han sabido siempre mostrar una preocupación

especial por cómo y qué significa obtener conocimiento, tanto en general como particularmente en sistemas complejos. Nociones que surgen en contextos ingenieriles, como comunicación, información, encriptación, comienzan a ser utilizados como recursos en las explicaciones en torno a la manera en la que se entiende el entender del mundo y el funcionamiento de los sistemas mismos. No es casualidad que las mismas dificultades que encontramos para expresar la relación entre pares tales como dependencia y autonomía o monismos y dualismos aparezcan de la misma manera en nuestras descripciones de los fenómenos que pretendemos explicar al mismo tiempo que lo hacen en nuestras descripciones de las descripciones y sus dinámicas. Otra consecuencia de un naturalismo que pese a no ver ni postular desde el punto de partida ninguna diferencia ontológica última entre “cosas simples” como átomos y supercuerdas, por un lado, y cerebros y sociedades, por otro lado, se enfrenta al desafío de armonizar desiertos metafísicos con los bosques ontológicos que demandan o imponen algunas explicaciones. Nuevamente, creo que es gracias a las contribuciones y puntos de convergencia entre dos disciplinas que *a prima facie* podrían pensarse muy distantes en donde esta tensión encuentra su explicación, no como punto que tiene que resolverse o eliminarse, sino más bien entenderse como una tensión esencial —como gustaba decir a Thomas Kuhn— que posibilita el emerger de complejidades en todos los órdenes: la biología y la computación; disciplinas que ya son ellas, cada una por separado, un punto de interfaz o de encuentro entre muchas otras ramas del conocimiento y órdenes identificados por las prácticas humanas. En ellas es más sencillo de ver y explorar qué implican tanto para la naturaleza como para el conocimiento de la naturaleza y, si se me permite continuar la serie, que es más recursiva que meramente infinita, la naturaleza del conocimiento de la naturaleza. Las máquinas de cálculo y los seres vivos, tomados como ejemplos de sistemas complejos, tienen en común, al menos, tanto una sensibilidad extrema a los contextos en los que se encuentran como al mismo tiempo una increíble robustez para seguir operando en nuevos contextos.

Esta robustez tiene una interpretación computacional, más todavía porque creo que se trata de una interpretación computacional. Paradójicamente, toda robustez se apoya en una fluidez que proviene de la capacidad que tiene un sistema de actuar, en los contextos adecuados, como si fuera otro, al punto de lograr en un ambiente los mismos cambios que generaría el sistema que imita o simula. No sólo es esta la capacidad de la que tienen que dar cuenta de los modelos de computación, es la misma capacidad que tienen que usar para dar cuenta de ella. Quizás sea en la formulación de Turing que esto es más evidente, como nos cuenta Martin Davis:

Se había estado pensando sobre las máquinas calculadoras durante mucho tiempo, desde la época de Leibniz e incluso antes. Antes de Turing, la suposición general era que al tratar con tales máquinas las tres categorías, máquina, programa y datos, eran entidades totalmente separadas. La máquina era un objeto físico; hoy lo llamaríamos hardware. El programa era el plan para realizar un cálculo, quizás plasmado en tar-

jetas perforadas o en las conexiones de los cables en un tablero. Por último, los datos eran la entrada numérica. La máquina universal de Turing demostró que la distinción de estas tres categorías es una ilusión. Una máquina de Turing se concibe inicialmente como una máquina con partes mecánicas, un hardware. Pero su código en la cinta de la máquina universal funciona como un programa, que detalla las instrucciones a la máquina universal necesarias para que se realice el cálculo correspondiente. Por último, la máquina universal, en sus acciones paso a paso, ve los dígitos de un código de máquina como un dato más con el que trabajar. *Esta fluidez entre estos tres conceptos es fundamental para la práctica informática contemporánea. Un programa escrito en un lenguaje de programación moderno es un dato para el intérprete o el compilador que lo manipula para que sus instrucciones puedan ser realmente ejecutadas. De hecho, la propia máquina universal de Turing puede considerarse un intérprete, ya que funciona interpretando quintuplos sucesivos para realizar las tareas que especifican.* (Davis, 2000, 164–165. El énfasis es mío)

Así, ante el esquema de interpretación apropiado, un agente con la capacidad operativa suficiente puede tomar cada una de las estructuras con las que opera y convertir una en otra a medida que sea necesario hacerlo según su esquema y habilitar operaciones sobre la base de diferencias creadas en el *proceso* de la interpretación.

De la misma forma en la que podemos dar modelos de computación alternativos y demostrablemente equivalentes, creo que podemos y necesitamos dar modelos alternativos y equivalentes para los sistemas complejos que pretendamos estudiar; especialmente cuando incluso por más determinista que consideremos al sistema, reconozcamos nuestra capacidad finita para lidiar con ellos. Aunque más evidente en aquellos casos en los que debemos enfrentarnos a las muchas caras que tiene la pregunta por el significado empírico de las operaciones simbólicas, esa interfaz entre dos mundos, creo que el mismo límite aplica a toda las operaciones simbólicas, incluso cuando se las piensa fuera de toda instanciación o como habitantes de su propio mundo ideal.

Aprovecho la mención a Leibniz que hace Davis para recordar un aspecto de la metafísica leibniziana que es, literalmente, inquietante. Incluso en la acción de las máquinas, Leibniz veía vida por todos lados: “Ninguna masa es tan carente de forma o tan pequeña que no contenga en ella algún cuerpo orgánico o máquina de la naturaleza.” Si podíamos detectar la vida en lo profundo, no teníamos razón alguna para afirmar que no había vida allí, simplemente quizás simplemente esas unidades mínimas de vida escapan a la resolución con la que podemos acceder al mundo en un momento determinado, y quizás eso ocurra siempre. Leibniz veía incluso en las más comunes de las máquinas de la época una inquietante similitud con los seres vivos, a cualquier escala:

En alemán se llama “*Unruhe*”,²⁷ es decir, inquietud, al péndulo de un reloj de pared.

²⁷Leibniz escribe los *Nouveaux essais sur l'entendement humain* en francés alrededor de 1704, y son publicados recién por primera vez de manera póstuma en 1765.

Podemos decir que con nuestro cuerpo sucede igual, y que nunca podrá sentirse totalmente a gusto: pues en cuanto se sintiese así, cualquier impresión nueva de los objetos o un pequeño cambio en los órganos, vasos o vísceras, desequilibrará la balanza y le obligará a hacer un pequeño esfuerzo para volver a estar en el estado óptimo; se produce por tanto un combate perpetuo, que equivale, por así decirlo, a la inquietud del reloj, por lo cual dicha denominación es muy de mi agrado. (Leibniz, 1882, p. 153)

“Combates perpetuos” pueden apreciarse como una dinámica constante, con toda la paradoja que refleja esa combinación de palabras, en los sistemas complejos, que incluso se mantiene a medida que cambia la escala y el nivel de abstracción en el que se pretende describir esa dinámica, casi como un fractal. Algo que puede apreciarse, además, en los mismos sistemas diseñados para representar sistemas. La homeostasis es una de las tantas formas de describir los “equilibrios parciales” que implica toda adaptación a un medio que, a su vez, también se encuentra en constante adaptación. Las distintas maneras de comprender la homeostasis y los ciclos de retroalimentación que involucra, permiten uno de los tantos “puentes conceptuales” posibles entre las máquinas y los seres vivos. Dada la ubicuidad de esta estrategia como forma de resolver problemas, creo que hasta se trata de una forma básica de describir los procesos cognitivos. No es accidental que tantos problemas, especialmente los filosóficos, traten de cómo trazar conexiones entre aspectos que aunque muy distintos bajo una perspectiva, bajo otra tienen un núcleo común, no necesariamente por ser todas notas a las notas al pie de conversaciones que alguna vez tuvo Platón. Tanto el conocimiento como el aprendizaje, como una de las tantas maneras de hablar de descubrimiento, tienen, para mí, un centro de gravedad en torno a la manera en la que pueden encontrarse invariantes pese y gracias a los cambios entre representaciones. Esto hace que un núcleo de cualquier aproximación epistemológica deba ser la pregunta por bajo qué condiciones representaciones distintas hablan de un mismo fenómeno, dando lugar así a un punto de encuentro o interfaz entre representaciones; una suerte de realizabilidad múltiple gracias a la cual es posible encontrar invariantes de mayor grado de generalidad. Creo que es en esta dirección que Simon rescataba parcialmente el objetivo o al menos la motivación detrás de una teoría general de sistemas, en términos de la importancia de los «marcos de referencia» con los cuales se describen numerosas situaciones:

Si una teoría general de los sistemas es un objetivo demasiado ambicioso, quizá no sea vano buscar propiedades comunes entre grandes clases de sistemas complejos. Las ideas que reciben el nombre de cibernética constituyen, si no una teoría, al menos un punto de vista que ha resultado fructífero en una amplia gama de aplicaciones. Ha sido muy útil considerar el comportamiento de los sistemas adaptativos en términos de retroalimentación y homeostasis y aplicar a estos conceptos la teoría de la información selectiva. Los conceptos de retroalimentación e información proporcionan *un marco de referencia* para abordar una amplia gama de situaciones, al igual que las ideas de evolución, relativismo, método axiomático y operacionalismo. (H. A. Simon, 1996, pp. 173–174. El énfasis es mío)

Quizás en estos términos puede verse por qué se replican a distintos niveles —como el de lo que ocurre en una comunidad científica— algunas de las explicaciones cuyo objetivo inicial estaba vinculado a un proceso cognitivo individual o incluso a un problema particular dentro de una disciplina. Este apoyo en la construcción de analogías creo que está a la base de la razón por la que gran parte de los avances conceptuales se dieron gracias a cambios de representación que convierten a un problema en otro *similar*; como ya lo planteaban, entre muchos otros, Turing y Ashby, siendo especialmente fructíferas las representaciones en términos de problemas combinatorios y de satisfacción de restricciones, que probarían ser muy fructíferos incluso para el desarrollo de inteligencias artificiales. En el caso de Turing, exploramos aquí cómo el germen de estas ideas ya estaba en el su trabajo sobre números computables de 1936, que de hecho debe verse como un complemento a la forma en la que Gödel tradujo el problema hilbertiano sobre la consistencia y completitud de los sistemas formales. Creo que una de las consecuencias de estos trabajos, y muchos que le siguieron, nos dejan una mirada de la matemática mucho más empírica que formal, algo que especialmente debe ser tenido en cuenta y trabajado por los programas de fundamentación de la matemática y el inquietante “problema” de la irrazonable efectividad de la matemática en ciencias (sin el “naturales” de la expresión original de Eugene Wigner). Efectivamente, aquí hay una pregunta por la posibilidad de las representaciones y de la diferencia que un cambio de ellas puede traer para la resolución de problemas. Nuevamente, Simon lo explicaba en estos términos:

Que la representación marca la diferencia es evidente por una razón diferente. Toda forma de matemática exhibe en sus conclusiones sólo lo que ya está implícito en sus premisas [...]. Por lo tanto, toda derivación matemática puede considerarse simplemente como un cambio de representación que hace evidente lo que antes era cierto pero estaba oscuro. Este punto de vista puede extenderse a toda la resolución de problemas. *Resolver un problema significa simplemente representarlo para hacer transparente la solución.* Si la resolución de problemas pudiera organizarse realmente en estos términos, la cuestión de la representación se convertiría en algo central. Pero aunque no pueda, si esta es una visión demasiado exagerada, una comprensión más profunda de cómo se crean las representaciones y cómo contribuyen a la solución de los problemas se convertirá en un componente esencial en la futura teoría del diseño. (H. A. Simon, 1996, p. 132. El énfasis es mío)

Ahora bien, creo que el problema fundamental va algo más allá de simplemente nuestra capacidad de cambiar entre representaciones, sino más generalmente en términos de la clase de acciones o comportamientos que son posibilitados por los cambios de representaciones, que no son así otra cosa que un medio, aunque muchas veces obtener una representación sea un fin en sí mismo. Diferentes clases de representaciones son usadas para *modelar* comportamientos, tanto dentro y fuera de los sistemas. Simon muy bien señala también esta función de las representaciones, especialmente de las simbólicas, que incluso postulaba como suficientes para describir comportamiento complejo:

Las estructuras de símbolos pueden servir, y de hecho lo hacen, como representaciones internas (por ejemplo, “imágenes mentales”) de los entornos a los que el sistema de símbolos trata de adaptarse. Le permiten modelar ese entorno con mayor o menor verosimilitud [*veridicality*] y con mayor o menor detalle, y, en consecuencia, razonar sobre él. (H. A. Simon, 1996, p. 22)

Pero las estructuras de símbolos, como cualquier otro patrón, requieren de una interpretación y, por tanto, de un sistema que soporta y puede llevar a cabo dicha interpretación que, en última instancia, provocará un comportamiento que puede luego ser interpretado por otro sistema y actuar en consecuencia. No es sino en la noción de computación y en la clase de operaciones que ella habilita donde creo que puede y debe apoyarse una reflexión de las capacidades de los sistemas y, en particular, de las capacidades últimas de los sistemas que pueden representar otros sistemas. Después de todo, es la universalidad en las interpretaciones frente a cambios subyacentes lo que hace a la noción misma de computación. Esto es, lo que caracteriza a las *operaciones* que se puedan hacer con representaciones u objetos cuando se hace explícita la pregunta por las capacidades que surgen de sus interacciones o relaciones en un ambiente determinado que se puede observar. Aquí la fertilidad epistémica de esta clase de máquinas, las máquinas que computan, para comprender nuestra manera de comprender el mundo e intentar llevar a cabo una generalización de lo que significa, en última instancia, conocer. Ada Lovelace fue quizás la primera en reconocer a la computación como la fuente de esta clase de universalidad al describir su estudio del significado de las *acciones* de las que era capaz el Motor Analítico de Babbage:

Al estudiar la acción del motor analítico, encontramos que la naturaleza peculiar e independiente de las consideraciones que en todo análisis matemático pertenecen al *operaciones*, en tanto que se distinguen del *los objetos sobre los que se opera* y del *resultados* de las operaciones realizadas sobre esos objetos, está muy notablemente definida y separada.^{CLI} (Notas de Lovelace en Menabrea, 1843, p. 69. Énfasis en el original)

Aquí la distinción fundamental que hace Lovelace es entre los objetos y las operaciones que sobre ellos se pueden hacer, operaciones que en última instancia deben poder aplicarse a distintas *clases* de objetos, lo que implica una abstracción o marco de referencia bajo la cual objetos distintos sean considerados como semejantes en términos de las operaciones que sobre ellos se pueden llevar a cabo y cuyos resultados o efectos pueden observarse, e incluso luego tomar como *objeto* de nuevas operaciones. Por “operación” Lovelace tomaba una definición general en base a la cual creía que se podía hablar de una ciencia de las operaciones mismas:

Tal vez sea conveniente explicar que por la palabra *operación*, entendemos *cualquier proceso que altere la relación mutua de dos o más cosas*, sea esta relación del tipo que sea. Esta es la definición más general, e incluiría todos los aspectos [*subjects*] del

universo. En la matemática abstracta, por supuesto, las operaciones alteran aquellas relaciones particulares que están involucradas en las consideraciones del número y del espacio, y el *resultado* de las operaciones son aquellos resultados peculiares que corresponden a la naturaleza de los sujetos de la operación. Pero la ciencia de las operaciones, tal como se deriva de la matemática más especialmente, es una ciencia en sí misma, y tiene su propia verdad y valor abstractos; así como la lógica tiene su propia verdad y valor peculiares, independientemente de los temas a los que podamos aplicar sus razonamientos y procesos.^{CLII} (Notas de Lovelace en Menabrea, 1843, p. 69. Énfasis en el original)

La computación no es sino una de las partes esenciales de una ciencia de las operaciones, rol que creo que en última instancia corresponde a una ciencia de los sistemas complejos, en donde estos aspectos *empíricos* de las operaciones, tanto formales o simbólicas como de las naturales interpretadas y formalizadas pueden converger. Las operaciones involucradas en los cambios de representación pueden verse en términos de la capacidad para cambiar una serie de observables entre distintas codificaciones posibles bajo las que encontrar patrones y descripciones “más simples” en base a las cuales permitir nuevas complejidades gracias a las clases de acciones que las nuevas representaciones habilitan en los agentes:

Mediante una “recodificación” adecuada, la redundancia presente, pero no evidente, en la estructura de un sistema complejo puede hacerse patente en muchas ocasiones. La recodificación más común de las descripciones de los sistemas dinámicos consiste en sustituir la descripción de la trayectoria temporal por la descripción de una ley diferencial que genera esa trayectoria. La simplicidad reside en una relación constante entre el estado del sistema en un momento dado y el estado del sistema un tiempo después. (H. A. Simon, 1996, p. 209)

Según mi lectura, aquí Simon nos sugiere que una de las características de las empresas epistémicas yace en buscar una codificación que en alguna medida sean más simples o más cortas con las cuales podamos remplazar un esquema de regularidades observadas y codificadas con un esquema bajo un nuevo esquema. En efecto, creo que parte lo que se logra mediante las abstracciones es poder reemplazar descripciones de estados observados o posibles por una descripción de un proceso cuyo resultado sea el estado observado, lo que implica esencialmente la postulación de un sistema y un ambiente, sistema que se describirá como un proceso con interfaz en un ambiente determinado, el mismo ambiente que hace al sistema que se postula. De la misma forma en la que había dejos positivistas en las reconstrucciones de los cibernéticos, en esta formulación de Simon encuentro dejos de la formulación de la ciencia como “economía” del pensamiento propuesta de varias maneras por Ernst Mach, quien al igual que Simon hacía libre uso en su epistemología de numerosos “principios” de la biología. Pero la influencia de la cibernética, de la computación y de las ciencias cognitivas en general le permiten a Simon introducir un elemento que considero crucial a la hora de hablar de la posibilidad de llevar a cabo las operaciones

involucradas en los cambios de representaciones: su costo, o el precio que debe pagar en términos de algún recurso fundamental el agente o la comunidad de agentes que intenten implementar y llevar a cabo dicho cambio de esquema de codificación. Un punto al que llega Simon tras reflexionar sobre el tipo de agentes con racionalidad plena que era (y es todavía) usual encontrar a la hora de describir agentes económicos:

Una imagen verídica de los actores y de las instituciones económicas debe incorporar los límites de procesamiento de la información establecidos por su entorno interno. La imagen también debe dar cabida tanto a la racionalidad consciente de los responsables de la toma de decisiones económicas como a los procesos evolutivos no planificados, pero adaptativos, que han moldeado las instituciones económicas. (H. A. Simon, 1996, p. 49)

Creo que exactamente lo mismo debe pensarse a la hora de describir cualquier clase de “agentes epistémicos” o sistemas que pretendan obtener descripciones o representaciones de fenómenos, y que en todos los casos debe pensarse en términos de las capacidades de acción o de manipulación que los agentes tienen sobre el mundo y sobre las mismas representaciones que de él se formen. Bajo la restricción de estos recursos, abstraídos aquí en términos del poder de cálculo disponible, es que los agentes pueden proceder a una búsqueda de representaciones posibles, proceso que podrá ser descrito en términos de evolución y optimización local. Las «búsquedas culturales» de las que hablaba Turing, el Homeostato de Ashby probando múltiples combinaciones de las configuraciones internas, las neuronas de un cerebro humano ajustando sus conexiones o incluso una proteína plegándose a medida que disminuye la energía de una configuración inicial, pueden todos verse como procesos de búsquedas restringidas, todos sistemas complejos que resuelven un “problema” impuesto por el ambiente en el que se encuentran y al que buscan adaptarse. Precisamente es lo mismo que deben hacer los agentes epistémicos que buscan enfrentarse a un sistema complejo para explicar su comportamiento:

La resolución de problemas suele describirse como una búsqueda a través de un vasto laberinto de posibilidades, un laberinto que describe el entorno. El éxito en la resolución de problemas implica buscar en el laberinto de forma selectiva y reducirlo a proporciones manejables. (H. A. Simon, 1996, p. 54)

Esto es, en resumen, lo que puede hacer una abstracción y lo que caracteriza a un sistema complejo, ya sea uno en la naturaleza, el conjunto de modelos que un agente epistémico pretenda construir para dar cuenta de tal sistema, o aquellos artefactos en cuyo diseño los objetivos de una futura implementación hayan modulado las búsquedas que llevaron a crearlo. Bajo un ambiente o representación, un estado particular puede ser un error, pero si no se toma un punto de vista determinista, como creo que no se puede hacer por la misma naturaleza de los sistemas involucrados y por las capacidades finitas de los agentes pretendiendo llevar a cabo las explicaciones, estamos necesariamente frente a un universo

de más y más posibilidades, al menos mientras los sistemas puedan seguir siendo forzados por la energía disponible y usarla como medio para distinguirse del ambiente y disminuir la tendencia a la máxima entropía que el sistema como un todo necesariamente presenta. Es bajo la actividad de una abstracción que una serie de estados que podrían considerarse como distintos o como errores, pueden ser tomados como semejantes. Esta es una forma primordial de disminución de la complejidad y, por tanto, de la cantidad de combinaciones posibles que deberían probarse en una búsqueda exhaustiva de combinaciones por fuerza bruta. Las abstracciones son, por tanto, esencialmente heurísticas; creaciones de interfaces sobre las cuales se puede crear más complejidad sin importar los detalles microscópicos, siempre y cuando las “implementaciones” subyacentes sean lo suficientemente robustas. Aunque, de nuevo, tomarlas como suficientemente robustas —y darle cierta materialidad al “como si”— es parte del proceso de abstracción, encapsulación que puede convertir la clase en la que se agrupan los estados y procesos que se captan en un nivel particular en otra clase. Esta es la manera en la que podemos detectar las redundancias en nuestras descripciones de las observaciones de un sistema para intentar simplificarlas o llevarlas a otro ambiente:

Si una estructura compleja es completamente no redundante —si ningún aspecto de su estructura puede deducirse de otro—, entonces es su propia descripción más simple. Podemos exhibirla, pero no podemos describirla mediante una estructura más simple. Las estructuras jerárquicas de las que hemos hablado tienen un alto grado de redundancia, por lo que a menudo pueden describirse en términos económicos. (H. A. Simon, 1996, p. 209)

El punto crucial a destacar es que las estructuras jerárquicas que se detecten son siempre resultado de una proyección epistémica, y esto es de hecho lo que nos permite, en cuanto somos agentes con capacidades limitadas, restringir la descripción a una interfaz de un subsistema en un ambiente particular, que luego podrá integrarse en un modelo “más completo” —aunque nunca totalmente completo o perfecto—. Esto significa que la manera de detectar las redundancias implica reconocer que solo se detectarán aquellas que puedan ser observadas luego de las intervenciones que se hagan sobre el sistema. Todo invariante es relativo a la serie de transformaciones o acciones que se tomen como posibles, incluyendo la detectabilidad de sus efectos. Describir a un objeto, o a un proceso tomado como un objeto, en términos de las transformaciones que no le generan cambios, es precisamente generar una abstracción sobre la cual se puede tratar con el objeto sin importar los detalles de su estructura interna, detalles que quizás no puedan ser conocidos si ya se han alcanzado los límites prácticos. Las abstracciones crean las interfaces mediante las cuales se puede interactuar con un sistema complejo, y es la manera en que esta clase de sistemas interactúa entre sí.

Por lo tanto, constantemente debemos tratar a elementos complejos *como si* fueran unidades elementales. Como consecuencia de tratarlos de tal modo es que se vuelven

pasibles de interacciones más allá de qué es precisamente la forma en la que están implementadas. Esta es en parte la razón por la que constantemente pueden sorprendernos y dar lugar a novedades radicales.²⁸ Novedades que en muchos casos deberá ser atendida por una nueva disciplina científica, que tenga como dependencia las abstracciones de las otras disciplinas con las que puede interactuar, pero que las usará para crear su propia forma de dar cuenta o de explicar los fenómenos que le atañen. La nueva ciencia bien puede tener el mismo título y simplemente ser una rama nueva, en términos de atractores locales que se forman, aunque quizás con el tiempo los atractores se ganen un nombre propio, en términos del valor que tenga el tratamiento de la novedad para los otros tantos agentes involucrados. Para Simon, la novedad radical era signo de descubrimiento genuino: “La prueba de que algo se ha descubierto es que ha emergido algo nuevo que no podía predecirse con certeza y que lo nuevo tiene valor o interés de algún tipo. (H. A. Simon, 1996, p. 106)” Los valores sin duda son un recurso heurístico que pueden ser empleados durante las complejas operaciones de búsquedas culturales que están involucradas en cualquier intento de explicar la complejidad y la novedad creciente de los mundos que habitamos, en los que las conexiones entre agentes epistémicos “individuales” es la manera en la que se puede lidiar con o disminuir una forma de complejidad, operativizándola bajo una abstracción, de manera de luego, gracias a las nuevas capacidades adquiridas en ese ambiente, poder crear nuevas complejidades. No es, por tanto, sorprendente que tantas preguntas filosóficas en torno a la complejidad versen de alguna u otra manera sobre nuestra capacidad de transferir conocimiento entre dominios muy distintos. Gran parte de la tarea de la ciencia de los sistemas complejos es precisamente la de funcionar como una interfaz entre disciplinas, quizás una tarea tan filosófica como la de tener que replicar el funcionamiento de un agente que es capaz de resolver problemas. Los estudios de la complejidad se vuelven así un punto de encuentro entre las representaciones, técnicas y problemas de distintas disciplinas; por lo tanto, lo es también de límites de cada una de ellas, y debe constantemente poner a prueba la validez del conocimiento tras la transferencia de dominio o de situación. Resolver el problema de lo que es, paradójicamente, requiere resolver

²⁸Me es imposible usar y pensar en novedades radicales sin recordar el uso que hacía Dijkstra de esta expresión, muy consciente del sentido de anti-reducción que tiene: “Es la forma más común de intentar hacer frente a la novedad: mediante metáforas y analogías intentamos vincular lo nuevo con lo viejo, lo novedoso con lo familiar. En el caso de un cambio suficientemente lento y gradual, funciona razonablemente bien; en el caso de una discontinuidad brusca, sin embargo, el método se rompe: aunque lo glorifiquemos con el nombre de “sentido común”, nuestra experiencia pasada ya no es relevante, las analogías se vuelven demasiado superficiales y las metáforas se vuelven más engañosas que iluminadoras. Esta es la situación característica de la novedad “radical”. Enfrentarse a la novedad radical requiere un método ortogonal. Hay que considerar el propio pasado, las experiencias recogidas y los hábitos formados en él como un desafortunado accidente de la historia, y hay que acercarse a la novedad radical con la mente en blanco, negándose conscientemente a intentar relacionarla con lo que ya es familiar, porque lo familiar es irremediablemente inadecuado. Hay que enfrentarse, con una especie de desdoblamiento de la personalidad, a la novedad radical como un tema disociado en sí mismo. Enfrentarse a una novedad radical equivale a crear y aprender una nueva lengua extranjera que no se puede traducir a la lengua materna. (Cualquiera que haya aprendido mecánica cuántica sabe de lo que hablo). (Dijkstra, 1989, p. 1398)”

un problema mucho más difícil e inagotable: el de lo que puede ser. Algo todavía más difícil cuando se incorpora el rol que el azar juega tanto en la creación de complejidad como en nuestra búsqueda de métodos eficientes aunque propensos a errores. Los errores son el precio a pagar por hacer posible lo imposible, como nos enseñan tanto la naturaleza como la historia del conocimiento.

Si se la toma desde el nivel de abstracción adecuado, esta forma de presentar lo que logra un método de optimización puede aplicarse tanto a un agente resolviendo un juego de ajedrez (recordemos la exposición de Turing al respecto), la operación del Homeostato de Ashby, la evolución de una especie, la actividad colectiva de la ciencia, entre muchas otras dinámicas:

La lógica de los métodos de optimización puede esbozarse como sigue: El “entorno interno” del problema de diseño está representado por un conjunto de alternativas de acción dadas. Las alternativas pueden darse in extenso: lo más habitual es que se especifiquen en términos de variables de control que tienen dominios definidos. El “entorno exterior” está representado por un conjunto de parámetros, que pueden conocerse con certeza o sólo en términos de una distribución de probabilidad. Los objetivos de adaptación del entorno interior al exterior se definen mediante una función de utilidad, generalmente escalar, de las variables de control y los parámetros del entorno, tal vez complementada por una serie de restricciones (desigualdades, por ejemplo, entre funciones de las variables de control y los parámetros del entorno). El problema de optimización consiste en encontrar un conjunto admisible de valores de las variables de control, compatibles con las restricciones, que maximicen la función de utilidad para los valores dados de los parámetros ambientales. (H. A. Simon, 1996, p. 116)

El desafío es reemplazar la aquí muy abstracta función de utilidad por una implementación que pueda efectivamente cumplir con las restricciones del problema y que en última instancia pueda vincular el ambiente o las operaciones o configuraciones internas de manera tal que los efectos en el ambiente dejen al sistema como un todo en un estado global que pueda detectarse como adecuado, al menos instantáneamente. Esencialmente, lo que debe poder hacer un buen diseño. Ahora bien, en los sistemas complejos, esto da lugar a un efecto cascada en el que todos los sistemas involucrados en el ecosistema se afectan mutuamente, lo que hacen que solo un sistema complejo pueda ser instancia de esa función de utilidad, ella misma en constante cambio.

Una descripción global de lo que ocurre en esta clase de ecosistema o sistema de sistemas deberá proceder a partir de la postulación de barreras internas y externas, descomponiendo a los subsistemas y tratándolos con respecto a las operaciones que pueden hacer en el ambiente postulado, aunque atendiendo a que los estados que se postulen, en cuanto abstracciones o encapsulaciones de procesos subyacentes que buscan ser descriptos, son dinámicos y la relación entre estados define una *metadinámica*; una auto-

imposición de restricciones que conllevará la necesidad de una multiplicidad de modelos alternativos y equivalentes de lo que se busca describir, solo cuyos contextos podrán ser usados para determinar cuál se adecúa más al objetivo que se persigue, cuyo éxito relativo luego sentará precedente para que sea usado como punto de apoyo de otra estrategia en busca de nuevos modelos. Debemos, pues, aprender a explicar y transferir conocimiento entre dominios para poder crear descripciones robustas ante los mismos errores que necesariamente tendrán dichas descripciones. Debemos aprender a explicar sobre la base de poder dar cuenta, más allá de las dudas razonables del caso, que nuestros modelos satisfacen los requisitos impuestos por el problema epistémico al que nos enfrentamos, atentos a las limitaciones de toda empresa epistémica. Sea que estemos intentando predecir el comportamiento futuro de la atmósfera o intervenir sobre una economía ya en marcha, lo que estamos haciendo en última instancia es restringir variedades por medio de una función de selección, función que ella misma muy probablemente haya surgido de la misma manera, siendo una entre tantas otras posibles:

Cuando llegamos al diseño de sistemas tan complejos como las ciudades, o los edificios, o las economías, debemos renunciar al objetivo de crear sistemas que optimicen alguna función de utilidad hipotética, y debemos considerar si las diferencias de estilo del tipo que acabo de describir no representan variantes muy deseables en el proceso de diseño, en lugar de alternativas que deben evaluarse como "mejores" o "peores". La variedad, dentro de los límites de las restricciones satisfactorias, puede ser un fin deseable en sí mismo, entre otras razones, porque nos permite atribuir valor a la búsqueda, así como a su salida, llegar a considerar el proceso de diseño como una actividad valiosa en sí misma para quienes participan en él. (H. A. Simon, 1996, p. 130)

Las restricciones hacen fundamentalmente a una función de interpretación por medio de la cual se pueden tomar algunas de las consecuencias de la variedad, lo importante es que exista la suficiente complejidad subyacente para poder lograr el equivalente a un almacenamiento de los resultados de la interpretación. Dinámicas o comportamientos observables cada vez más complejos pueden resultar del aprovechamiento de distintas estructuras internas y externas como formas de memoria según la cual actuar en base a distintas historias de variedad almacenadas. La estabilidad o la robustez de un sistema puede lograrse así, paradójicamente, gracias a la inestabilidad en un nivel inferior. Todo ciclo, de hecho, es un proceso metaestable, estabilidad que no puede detectarse si solamente se toma el punto de vista de una de sus etapas. Los ciclos de retroalimentación son abstracciones hechas a base de abstracciones, de allí su capacidad para generar metaestabilidades. La manera en la que creo que mejor se puede hablar de esta clase de procesos es en términos de la capacidad de computar con errores o de computación robusta. El aspecto fundamental es el de la corrección de errores, lo que implica poder capturar de alguna manera una diferencia entre un comportamiento o estado obtenido y el que se esperaba.²⁹ Otra forma de

²⁹Lo que puede interpretarse también en términos de Simon como análisis de medios y fines. (Al margen

ver el mismo fenómeno es en términos de las diferencias que surgen por lo que indica una regla global y las reglas locales, muchas de las cuales pueden existir gracias a ser producto de abstracciones que generan ese espacio interior donde el sistema puede, al menos por momentos, diferenciarse del medio, afectarlo y ser afectado. La abstracción es lo que le permite corregir errores, en tanto literalmente funciona como una barrera de contención, como una condición de contorno.

El punto fundamental que quiero señalar es que la obtención de conocimiento de un sistema complejo es un proceso de conocimiento de procesos; esto es, el sistema complejo que se pretende estudiar no es meramente un sistema y un ambiente determinado por la interfaz postulada entre ellos, sino que, en su lugar, es un conjunto de sistemas y ambientes, cada uno acoplado al otro, al cual un observador se le acopla, efectivamente creando un nuevo conjunto de conjuntos de sistemas. Este *metaconjunto* no puede ser descrito de manera acabada a base de las propiedades de los “objetos” o elementos de esos conjuntos básicos junto con una descripción de las transformaciones o reglas que mapean los estados que el sistema genera en el ambiente y que el observador puede determinar. El observador debe verse como una parte activa y constitutivamente acoplada al sistema que pretende conocer, acople según el cual podrá determinar algunos de los procesos que se desencadenan en la tríada <sistema, ambiente, observador> y del cual se podrán extraer descripciones elementales que serán ellas mismas tomadas como <sistema> en una nueva tríada <sistema, ambiente, observador>. A su vez, para cada tríada <sistema, ambiente, observador>, habrá dos descripciones elementales que deben ponerse en consonancia, cada una producto de distintos procedimientos de generación de conocimiento para el sistema: las dos estrategias generales introducidas en el capítulo 4 y que hacen al tipo de ingeniería inversa que es necesario para replicar en un medio alternativo un proceso que pueda generar observables que, bajo la codificación correcta pueden decirse equivalentes:

- La postulación de un sistema formal cuyos elementos básicos son producto de una interpretación de lo observable en donde las reglas de transformación del fenómeno son reemplazadas por alguna clase de inferencia que permite construir nuevas expresiones sobre cómo podría comportarse el sistema visto como un todo (la estrategia tipo Turing).
- La exploración de lo que la combinación de elementos básicos disponibles puede hacer y que bajo un modelo de acción por parte del observador es capaz de determinarse como comportamiento del sistema (la estrategia tipo McCulloch-Pitts).

Aquí nuevamente se puede destacar la similitud en términos de un diseño ingenieril, en donde operan la misma clase de restricciones: elementos u objetos básicos deben acoplarse

de su ubicuidad como práctica cognitiva, la expresión “corregir errores” captura gran parte de toda actividad en la que estén involucrados artefactos, especialmente los que computan, y más especialmente si son programables.)

entre sí para lograr una nueva propiedad (i.e. una clase de comportamiento) que *instancie* una serie de especificaciones de lo que *debe* hacer sobre la base de lo que las partes *pueden* hacer. La abstracción es el medio por el cual un procedimiento puede volverse un objeto en el ambiente de un agente y ser, por tanto, tomado como algo sobre lo que se puede actuar. Las abstracciones son las interfaces entre modos distintos de representar, de la equivalencia última entre la extensión y la intensión:

Estos dos modos de aprehender las estructuras son la urdimbre y la trama de nuestra experiencia. Las imágenes, los planos, la mayoría de los diagramas y las fórmulas estructurales químicas son descripciones de estado. Las recetas, las ecuaciones diferenciales y las ecuaciones de las reacciones químicas son descripciones de procesos. Las primeras caracterizan el mundo tal y como se percibe; proporcionan los criterios para identificar los objetos, a menudo modelando los propios objetos. Las segundas caracterizan el mundo tal y como se actúa sobre él; proporcionan los medios para producir o generar objetos con las características deseadas. *La distinción entre el mundo percibido y el mundo actuado define la condición básica para la supervivencia de los organismos adaptativos. El organismo debe desarrollar correlaciones entre los objetivos en el mundo percibido y las acciones en el mundo del proceso.* Cuando se hacen conscientes y se verbalizan, estas correlaciones corresponden a lo que solemos llamar análisis de medios y fines. Dado un estado de cosas deseado y un estado de cosas existente, la tarea de un organismo adaptativo es encontrar la diferencia entre estos dos estados y luego encontrar el proceso correlativo que borraría la diferencia. (H. A. Simon, 1996, p. 210. El énfasis es mío)

Lo mismo ocurre en el diseño de modelos para sistemas complejos: modelos simples deben integrarse para satisfacer los requisitos –las especificaciones– que el modelador impone en base a una métrica de su performance y de lo que puede observar y describir, tanto en la naturaleza como en la descripción que está generando para ella. Otra analogía está operando en mi manea de entender este proceso cíclico de generación de descripciones: las expresiones de un modelo obtenidas con la primera estrategia se evalúan (esto es, se interpretan) con respecto a procedimientos extraídos de la segunda estrategia, que debieron también ser formulados en términos de una interpretación de lo observable. No creo que sea un círculo vicioso, todo lo contrario, como suele ocurrir con los círculos recursivos. He aquí parte de la razón de la fertilidad epistémica de la analogía con las capacidades de los artefactos que podemos construir, ya que al hacerlo analogamos nuestras capacidades para resolver problemas con las de la naturaleza, de la que somos parte. Este quizás es el punto en el que se pueda ver parte de la importancia de los distintos proyectos de inteligencia artificial para una naturalización de la epistemología –y tantas otras preguntas filosóficas–: si bien en sentido estricto no se puede reducir conocimiento de alto nivel –como puede ser algo procedimental como las reglas del ajedrez o cómo conducir un automóvil– dicho conocimiento sí puede implementarse en un sistema físico que un observador puede identificar como una instancia en operación de las reglas cuando ve las clases de acciones o transformaciones en el ambiente de las que es capaz del sistema.

Quizás, dada nuestra capacidad finita para describir, analogar y generalizar situaciones, no podamos llegar a explicaciones más sencillas que la de replicar los mismos procesos de descubrimiento y de generación de conocimiento. Esto es algo que también aprendí en mis lecturas de von Neumann, al encontrar este pasaje en el que intenta describir las dificultades a las que podríamos tener que enfrentarnos al intentar averiguar cómo es que podemos hacer analogías visuales, un problema que todavía desafía a la comunidad de las ciencias cognitivas:

Todo esto, sin embargo, constituye sólo un pequeño fragmento del concepto más general de la identificación de entidades geométricas análogas. Esto, a su vez, es sólo una pieza microscópica del concepto general de analogía. Nadie intentaría describir y definir en un margen de espacio práctico el concepto general de analogía que domina nuestra interpretación de la visión. No hay ninguna base para decir si tal empresa requeriría miles o millones o un número totalmente impráctico de volúmenes. Ahora bien, es perfectamente posible que la forma más sencilla y única práctica de decir realmente lo que constituye una analogía visual consista en dar una descripción de las conexiones del cerebro visual. Estamos tratando aquí con partes de la lógica con las que no tenemos prácticamente ninguna experiencia anterior. El orden de complejidad está fuera de toda proporción con cualquier cosa que hayamos conocido. No tenemos derecho a suponer que las notaciones y los procedimientos lógicos utilizados en el pasado sean adecuados para esta parte del problema. No es en absoluto seguro que en este ámbito un objeto real no constituya la descripción más simple de sí mismo, es decir, que cualquier intento de describirlo por el método literario o lógico-formal habitual pueda conducir a algo menos manejable y más complicado. De hecho, algunos resultados de la lógica moderna tenderían a indicar que hay que esperar fenómenos de este tipo cuando se trata de entidades realmente complicadas. Por tanto, no es en absoluto improbable que sea inútil buscar un concepto lógico preciso, es decir, una descripción verbal precisa, de la “analogía visual”. Es posible que el propio patrón de conexión del cerebro visual sea la expresión o definición lógica más sencilla de este principio.^{CLIII} (von Neumann, 1987a, p. 414)

Las analogías, no solamente las geométricas o visuales, son una forma primordial de nuestra manera de lidiar con el mundo fenoménico realizando abstracciones que nos permiten trasladar conocimiento sobre la base del marco de referencia en el que podemos describir una situación, marco que a su vez se define por el tipo de acciones que habilita sobre los “objetos” que se formulan en ese marco. En los términos que han sido desarrollados en esta investigación, esta capacidad de los agentes epistémicos y sus límites para describir alguna clase de regularidad en los patrones observables y poder clasificarlos como semejantes es el rol que tienen las abstracciones en tanto resultado de una proyección epistémica. En otras palabras, central a la posibilidad de la abstracción como un punto de encuentro que resuelve la tensión entre la emergencia y la reducción está en pensar en términos de que lo que las abstracciones permiten a un observador es *implementarlas* basándose en el conocimiento que tenga del ambiente o bien al menos reconocer instancias de las im-

plementaciones, precisamente lo que creo que ocurre en el caso de las analogías. En ellas también es central la noción de error o de diferencia con un estado de cosas que se conoce y que se puede describir, aunque probablemente no en términos de razones suficientes y necesarias para replicarla. Esto se debe a que en todos estos casos hay una proyección sobre los estados de posibilidad subyacentes en las que algunas diferencias de estado se toman como no importantes en el marco de referencia que se ha tomado. Así, una semántica puede verse como una restricción de lo que *debe* operar en un nivel más bajo, pero lo importante es notar que la semántica misma puede ser definida por lo que consideremos como el nivel más bajo en un sistema; aunque bien puede ser externa, de la misma manera en la que el ambiente constriñe las posibilidades funcionales de una estructura determinada. Es este acoplamiento funcional entre un ambiente y un sistema, compuesto él mismo de subsistemas, lo que hace a la noción misma de sistema. De la misma manera en que las encapsulaciones funcionales que logran las abstracciones pueden mejorar significativamente la forma en la que un sistema procesa y almacena lo que describimos como información, la manera en que entendemos a los sistemas complejos, en tanto en cierto sentido requiere la creación de un sistema con las mismas capacidades de acción, también requiere de poder formular abstracciones. Las idealizaciones y linealizaciones que se hacen al modelar son unas tantas de las formas en las que se crean abstracciones que podrán ser luego implementadas de muchas maneras a efectos de generar los observables cuyos grados de error puedan ser expresados con respecto a los observables codificados del sistema bajo estudio. La reducción de *complejidad epistémica*, es lo que le permite al agente generar mayor complejidad en el ambiente en el que se encuentra gracias a las intervenciones y estados tanto internos como externos que habilita. Esto es tan cierto de nosotros seres humanos como de una célula.

Ya sea interpretados como productos de nuestras implementaciones artefactuales o aquellos que encontramos en la naturaleza —una distinción más operativa que ontológica—, los sistemas complejos presentan una realizabilidad múltiple con respecto a la prácticamente infinita manera en que sus partes pueden combinarse. Pero esa infinita configurabilidad está constreñida y hacen a principios organizativos que, cual ciclo de retroalimentación, regulan las posibilidades del nivel “inferior”. Esta corrección de errores es lo que hace que los fenómenos emergentes sean tanto posibles como insensibles a los cambios en las micro-configuraciones.

Los fenómenos físicos emergentes regulados por principios organizativos superiores tienen una propiedad, a saber, su insensibilidad a lo microscópico, que es directamente relevante para la enorme pregunta de qué es cognoscible en el sentido más profundo del término. (Laughlin & Pines, 2000, p. 29)

La contraparte epistémica de la realizabilidad múltiple es la noción de robustez, y lo que hace tanto posible que podamos postular la idea de una realizabilidad múltiple como que

podamos conocer cómo funcionan los sistemas complejos y cómo podemos diseñarlos, y luego incluso usar nuestros artefactos para explicar su comportamiento. También se trata de una manera de corregir errores y de generar abstracciones, de poder decir que pese a las diferencias que puedan existir tanto en los procesos subyacentes de lo que se estudia como en las condiciones de posibilidad de las afirmaciones que se hacen en distintos niveles de abstracción, ciertos aspectos de los sistemas son invariantes pese a todos nuestros esfuerzos de perturbarlo. Sobre esos invariantes, relativos a nuestras capacidades en tanto agentes epistémicos, partes y co-creadores constantes de los mundos naturales y artificiales que habitamos, es que podemos apoyarnos para hablar del conocimiento de esos mismos mundos.

Simon solía decir que, si nos apurábamos, todavía estamos a tiempo de seguir avanzando por el camino que Turing nos señaló (ver epígrafe en p. 141). Si nos apuramos más todavía, quizás estemos a tiempo de ver que ese camino también lleva al mismo lugar que nos señaló von Neumann:

Así, la lógica de los autómatas se diferenciará del actual sistema de lógica formal en dos aspectos relevantes. 1. La longitud real de las “cadenas de razonamiento”, es decir, de las cadenas de operaciones, tendrá que ser considerada. 2. Las operaciones de la lógica (silogismos, conjunciones, disyunciones, negaciones, etc., es decir, en la terminología habitual de los autómatas, diversas formas de acciones de compuertas, coincidencias, anticonincidencias, bloqueos, etc.) tendrán que ser tratadas por procedimientos que permitan excepciones (disfunciones) con probabilidades bajas pero no nulas. Todo ello conducirá a teorías mucho menos rígidas de naturaleza todo o nada que la lógica formal pasada y presente. Tendrán un carácter mucho menos combinatorio y mucho más analítico. De hecho, hay numerosos indicios que hacen pensar que este nuevo sistema de lógica formal se acercará a otra disciplina poco vinculada en el pasado con la lógica. Se trata de la termodinámica, principalmente en la forma que recibió de Boltzmann, y que es la parte de la física teórica que más se acerca en algunos de sus aspectos a la manipulación y medición de la información.^{CLIV} (von Neumann, 1987a, p. 407)

Limitaciones (o lo que queda(ría) por hacer)

Los biólogos sólo se plantean tres preguntas sobre un organismo vivo: ¿cómo funciona? ¿Cómo está construido? ¿Y cómo ha llegado a ser así? Son problemas plasmados en los campos clásicos de la fisiología, la embriología y la evolución. Y en el centro de todo están las cintas que contienen las descripciones para construir estas máquinas especiales de Turing.

Sydney Brenner (2012, p. 461)

Quizás la más grande limitación de este trabajo esté, no tan paradójicamente, en la misma idea de limitación que ha funcionado de guía. Si bien hemos explorado cómo una concepción de lo posible se ha articulado de diversas maneras en las prácticas filosófico-científicas habitualmente con respecto a una noción de máquina, un adecuado tratamiento de los límites de las capacidades de los agentes epistémicos desde una mirada naturalizada debe atender con mayor precisión el interjuego constante entre la capacidad de nuestros sistemas representacionales y las capacidades mismas del mundo. Creo que una de las maneras más fructíferas de explorar el camino señalado por von Neumann con su afirmación acerca de la longitud de las operaciones o cadenas de razonamiento es por medio de la exploración de la conexión no siempre explicitada entre los resultados de imposibilidad en lógica y matemática y los límites impuestos por la naturaleza del mundo físico. En primera medida, creo que esto requiere atacar las consecuencias filosóficas de los resultados logrados —y de las preguntas abiertas— en torno a la complejidad computacional (esto es, la dificultad algorítmica de los problemas) y el costo termodinámico de las operaciones.

Esto también abre el camino para un tratamiento mucho más adecuado del concepto de información, que cada vez más tiene un rol explicativo particular en los estudios sobre sistemas complejos. Aquí apenas he indicado a dónde se encontraría el iceberg, por lo que queda mucho que tratar. El marco conceptual de referencia de los niveles de abstracción, en conexión con una idea de información naturaliza en términos del tipo de acciones que el reconocimiento de patrones en un ambiente puede habilitar, sugieren una vía para atender problemas relacionados con el de la emergencia que suelen ser puestos en términos de “causalidad descendente”, cuya exploración más fructífera considero que puede hacerse en términos de una clase muy particular de patrones que habilitan comportamientos: los programas de computación. A su vez, las distintas maneras disponibles de representar tanto a los programas en su estado estático como en su dinámica o ejecución pueden resultar muy iluminadores para los filósofos que pretendan dar cuenta de las distintas clases de representaciones del mundo que somos capaces de formular.

A su vez, nuestra capacidad para recrear por medios artificiales comportamientos del mundo —núcleo de nuestra capacidad de conocer el mundo, como he intentado

señalar en las páginas anteriores— presenta una novedad radical con la que estudiar sistemas complejos en tanto quizás en un futuro estemos en condiciones de crear agentes epistémicos que hagan que la comunidad científica se vuelva mucho más eficiente en su capacidad para resolver problemas de lo que lo es en la actualidad. A su vez, creo que esta mirada puede resultar fructífera para analizar problemas clásicos como los de la racionalidad, la creatividad y el progreso científicos.

Quizás una de las consecuencias más importantes para la filosofía provenientes del estudio de la complejidad está en la clase de metafísica que el nuevo conocimiento posibilita y demanda. North Alfred Whitehead fue sin duda uno de los pioneros en proponer una metafísica de procesos que pudiera responder a la transformación de la imagen del mundo iniciada por los avances científicos. En esta imagen, la misma idea de lo material y estable pierde el rol de fundamental y pasa a ser una consecuencia de un proceso de síntesis constante mucho más cercana a lo que ocurre en un organismo vivo; razón por la cual los organicistas y emergentistas en general se han apoyado —no siempre de manera explícita— en una metafísica de procesos. Estos aspectos deben ponerse en consonancia con las características de los lenguajes —tanto formales como informales— con los que se habla del mundo, otro punto en el que la relación entre la filosofía de la computación y la filosofía de la ciencia tiene, creo, mucho lugar para fortalecerse.

Por último, quizás la limitación más significativa provenga de la necesidad de reconocer las limitaciones que su humanidad le traen al agente epistémico que escribió esta selección —un tanto creativa— de palabras, elegidas quizás no tan cuidadosamente del universo de combinaciones posibles. Por suerte, todavía quedan muchos errores para seguir corrigiendo en la búsqueda de sentido.

Citas en idioma original

rif-TLF/m/n/10.95 I. Es wird so weit kommen, dass die mechanische und atomistische Vorstellungsart in guten Köpfen ganz verdrängt und alle Phänomen als dynamisch und chemische erscheinen und so das göttliche Leben der Natur immer mehr bestätigen werden.

0.95 II. “Ce n’est pas l’action qui est vitale et d’essence particulière, c’est le mécanisme qui est spécifique, particulier, sans être d’un ordre distinct. La doctrine que je professe pourrait être appelée *le vitalisme physique*; je crois qu’elle est l’expression la plus complète de la vérité scientifique.”

0.95 III. Parte enfatizada de la cita: *Die theoretische Biologie ist daher berechtigt, von einem allgemeinen Gesetze der Maschinenstruktur der Organismen zu sprechen.*

0.95 IV. Última oración: “”als wenn man eine Maschine in den Händen hätte

0.95 V. Une maison est une machine-à-habiter.

0.95 VI. “Driesch succeeded in proving that the germ cell does not possess a trace of machine-like structure, but consists throughout of equivalent parts. With that fell the dogma that the organism is only a machine. Even if life occurs in the fully organized creature in a machine-like way, the organization of a structureless germ into a complicated structure is a power sui generis, which is found only in living things and stands without analogy. [...] It is not to be denied that the vitalists are the victors all along the line. After having put an end to Darwinism, they have seized upon the entire field of the production of animal form, and now threaten the last positions of their opponents.”

0.95 VII.

Cybernetics, too, is a “theory of machines”, but it treats, not things but *ways of behaving*. It does not ask “what is this thing?” but “*what does it do?*” [...]. It is thus essentially functional and behaviouristic.

Cybernetics started by being closely associated in many ways with physics, but it depends in no essential way on the laws of physics or on the properties of matter. Cybernetics deals with all forms of behaviour in so far as they are regular, or determinate, or reproducible. The materiality is irrelevant, and so is the holding or not of the ordinary laws of physics. [...] *The truths of cybernetics are not conditional on their*

being derived from some other branch of science. Cybernetics has its own foundations. (Ashby, 1958, p. 1. Énfasis en el original)

0 VIII. “The theory of the Black Box is merely the theory of real objects or systems, when close attention is given to the question, relating object and observer, about what information comes from the object, and how it is obtained. Thus the theory of the Black Box is simply the study of the relations between the experimenter and his environment, when special attention is given to the flow of information” (Ashby, 1956, p. 110).

0.95 IX. “A better demonstration can be given by a machine, built so that we know its nature exactly and on which we can observe just what will happen in various conditions. (We can describe it either as ‘a machine to do our thinking for us’ or, more respectably, as ‘an analogue computer’.) One was built and called the ‘Homeostat’.(Ashby, 1952, p. 97)”

0.95 X.

The Analytical Engine has no pretensions whatever to *originate* anything. It can do whatever *we know how to order it* to perform. It can follow analysis; but it has no power of *anticipating* any analytical relations or truths. Its province is to assist us to making *available* what we are already acquainted with. (Lovelace, en Menabrea, 1843, p. 689. Énfasis en el original)

0.95 XI.

The result is that in Ashby’s machine, as in Darwin’s nature, we have the appearance of a purposefulness in a system which is not purposefully constructed simply because purposelessness is in its very nature transitory. Of course, in the long run, the great trivial purpose of maximum entropy will appear to be the most enduring of all. But in the intermediate stages an organism or a society of organisms will tend to dally longer in those modes of activity in which the different parts work together, according to a more or less meaningful pattern. (Wiener, 1951/1989, p. 38)

0.95 XII.

I believe that Ashby’s brilliant idea of the unpurposeful random mechanism which seeks for its own purpose through a process of learning is not only one of the great philosophical contributions of the present day, but will lead to highly useful technical developments in the task of automatization. Not only can we build purpose into machines, but in an overwhelming majority of cases a machine designed to avoid certain pitfalls of breakdown will look for purposes which it can fulfill. (Wiener, 1951/1989, p. 38)

0.95 XIII. “Information is a name for the content of what is exchanged with the outer world as we adjust to it, and make our adjustment felt upon it. The process of receiving and of using information is the process of our adjusting to the contingencies of the outer environment, and of our living effectively within that environment(Wiener,

1951/1989, pp. 17-18).”

0.95 XIV. “In our age, when people look for explanations, the tendency more and more is to conceive of any and every situation that we are trying to understand by analogy with a machine.”

0.95 XV.

The metaphor to which I devote this chapter is one in which the organism is seen as message. Organism is opposed to chaos, to disintegration, to death, as message is to noise. To describe an organism, we do not try to specify each molecule in it, and catalogue it bit by bit, but rather to answer certain questions about it which reveal its pattern: a pattern which is more significant and less probable as the organism becomes, so to speak, more fully an organism. (Wiener, 1951/1989, p. 95)

0.95 XVI.

The point of view taken here is that science (as represented by the observer’s discoveries) is not immediately concerned with discovering what the system “really” is, but with *co-ordinating the various observers’ discoveries*, each of which is only a portion, or an aspect, of the whole truth. (Ashby, 1956, p. 107. El énfasis es mío)

0.95 XVII.

A “machine” is essentially a system whose behaviour is sufficiently law-abiding or repetitive for us to be able to make some prediction about what it will do (...). If a prediction can be made, the prediction may be in one of a variety of forms. Of one machine we may be able to predict its next state—we then say it is “determinate” (...). Of another machine we may be unable to predict its next state, but we may be able to predict that, if the conditions are repeated many times, *the frequencies* of the various states will be found to have certain values. (...) We can therefore consider a new class of absolute system: it is one whose states change with time not by a single-valued transformation but by a matrix of transition probabilities. For it to remain the *same* absolute system the values of the *probabilities* must be unchanging. (Ashby, 1956, p. 225. Énfasis en el original)

0.95 XVIII.

The same point of view may be applied to the brain, and we can see how one part of a brain can show towards another part the objective behavioural relationship of designer to machine. We can begin to see how one part—a basal structure perhaps—can act as “designer” towards a part it dominates, towards a neural network, say. (Ashby, 1956, p. 255)

Conclusiones

0.95 XIX. "...there is no property of an organization that is good in any absolute sense; all are relative to some given environment, or to some given set of threats and disturbances, or to some given set of problems. (Ashby, 1962, p. 266)"

0.95 XX. "The work of Dr. W. Ross Ashby is probably the greatest modern contribution to this subject insofar as it concerns the analogies between living organisms and machines.(Wiener, 1951/1989, p. 48)"

0.95 XXI.

General systems research and cybernetics have developed side by side since their emergence, and a considerable cross-fertilization has occurred between them. Perhaps the most important person in this cross-fertilization was W. Ross Ashby, whose profound contributions to various issues of cybernetics were consistently formulated and dealt with as systems problems. (Klir, 2013, p. 49)

0.95 XXII.

There are different opinions about the relationship between general systems research and cybernetics. In one opinion, which seems to have become predominant within systems movement, cybernetics is a subarea of general systems research that focuses on the study of information processes in systems, particularly communication and control. I fully share this opinion [...] since I consider all properties and problems connected with the notion of information as fundamentally systemhood properties and problems. Indeed, I cannot conceive of the possibility to conceptualize information without any reference to a system of some sort. (Klir, 2013, p. 49)

0.95 XXIII.

[M]achines with feedback are not subject to the oft-repeated dictum that machines must act blindly and cannot correct their errors. Such a statement is true of machines without feedback, but not of machines in general (S. 8/11).

Once it is appreciated that feedback can be used to correct any deviation we like, it is easy to understand that there is no limit to the complexity of goal-seeking behaviour which may occur in machines quite devoid of any 'vital' factor. (Ashby, 1952, p. 55)

0.95 XXIV.

[W]e saw that selection can be amplified. Now "problem solving" is largely, perhaps entirely, a matter of appropriate selection. Take, for instance, any popular book of problems and puzzles. Almost every one can be reduced to the form: out of a certain set, indicate one element. Thus of all possible numbers of apples that John might have in his sack we are asked to find a certain one; or of all possible pencil lines drawn through a given pattern of dots, a certain one is wanted; or of all possible

distributions of letters into a given set of spaces, a certain one is wanted. It is, in fact, difficult to think of a problem, either playful or serious, that does not ultimately require an appropriate selection as necessary and sufficient for its solution. (Ashby, 1956, p. 272)

0.95 XXV.

[I]t is not impossible that what is commonly referred to as “intellectual power” may be equivalent to “power of appropriate selection”. Indeed, if a talking Black Box were to show high power of appropriate selection in such matters—so that, when given difficult problems it persistently gave correct answers—we could hardly deny that it was showing the *behavioral* equivalent of “high intelligence”.

If this is so, and as we know that power of selection can be amplified, it seems to follow that intellectual power, like physical power, can be amplified. Let no one say that it cannot be done, for the gene-patterns do it every time they form a brain that grows up to be something better than the gene-pattern could have specified in detail. What is new is that we can now do it synthetically, consciously, deliberately. (Ashby, 1956, p. 272)

0.95 XXVI. “If we hurry, we can catch up to Turing on the path he pointed out to us so many years ago.”

0.95 XXVII. We may now construct a machine to do the work of this computer.

0.95 XXVIII.

Computing is normally done by writing certain symbols on paper. We may suppose this paper is divided into squares like a child’s arithmetic book. In elementary arithmetic the two-dimensional character of the paper is sometimes used. But such a use is always avoidable, and I think that it will be agreed that the two-dimensional character of paper is no essential of computation. I assume then that the computation is carried out on one-dimensional paper, i.e. on a tape divided into squares. I shall also suppose that the number of symbols which may be printed is finite. [...] The behaviour of the computer at any moment is determined by the symbols which he is observing, and his “state of mind” at that moment. (Cooper & van Leeuwen, 2013; A. Turing, 1936, p. 33)

0 XXIX. “The idea behind digital computers may be explained by saying that these machines are intended to carry out any operations which could be done by a human computer. The human computer is supposed to be following fixed rules; he has no authority to deviate from them in any detail. We may suppose that these rules are supplied in a book, which is altered whenever he is put on to a new job. He has also an unlimited supply of paper on which he does his calculations” (Turing, 1950, en Cooper & van Leeuwen, 2013, p. 554).

0.95 XXX. This is only a foretaste of what is to come, and only the shadow of what is going to be. We have to have some experience with the machine before we really know its capabilities [...] I do not see why it should

not enter any one of the fields normally covered by the human intellect, and eventually compete on equal terms.

0.95 XXXI.

For demonstration purposes it is best to replace the machine by a paper model. We replace each wheel by a strip of squared paper 52 squares by 5 squares. (p. 7)

The machine itself is represented by a sheet of paper with slots to hold the “wheels”. (p. 7)

Before trying to explain the actual methods used in finding the connections of a machine it will be well to shew the kind of phenomena on which the solution depends. (p. 20)

Suppose that one was left alone with an enigma for half an hour, the lid being locked down and the *Umkehrwalz* not moveable, what data would it be best to take down, and how would one use the data afterwards in order to find out the connections of the machine? Can one in this way find out all about the connections? (p. 24)

Presumably the method of solution will depend on taking hypotheses about parts of the keys and drawing what conclusions one can, hoping to get either a confirmation or a contradiction. (p. 97)

When we look at the Bombe in this way we see that it would be natural to modify it so as to make this idea fit even better. We have not so far allowed for lengthy chains of deductions; the possible deductions stop as soon as one comes back to the central letter. There is however no reason why, when from on hypothesis about the Stecker value of central letter we have deduced that the central letter must have another Stecker value, we should not go on and draw further conclusions from this second Stecker value. At first sight this seems quite useless, but, as all the deductions are reversible, it is actually very useful, for all the conclusions that can be drawn will then be false, and those that remain will stand out clearly as possible correct hypotheses. (p. 107)

In our original description of the Bombe we thought of it as a method of looking for characteristics of a crib which are independent of Stecker, but in the last section we thought of it more as a machine for making Stecker deductions. This last way of looking at it has obviously great possibilities, and so we will start fresh with this idea. (A. M. Turing, 1940, p. 107)

0.95 XXXII.

We might say that the clock enables us to introduce a discreteness into time, so that time for some purposes can be regarded as a succession of instants instead of a continuous flow. A digital machine must essentially deal with discrete objects, and in the case of the ACE this is made possible by the use of a clock. All other digital computing machines except for human and other brains that I know of do the same. One can think up ways of avoiding it, but they are very awkward. (Cooper & van Leeuwen, 2013, Turing 1947, p. 489)

0.95 XXXIII.

Let us now return to the analogy of the theoretical computing machines with an infinite tape. It can be shown that a single special machine of that type can be made to do the work of all. It could in fact be made to work as a *model* of any other machine. (Cooper & van Leeuwen, 2013, Turing 1947, p. 490. El énfasis es mío)

0 XXXIV.

The intolerable labour and fatiguing monotony of a continued repetition of similar arithmetical calculations, first excited the desire, and afterwards suggested the idea, of a machine, which, by the aid of gravity or any other moving power, should become a substitute for one of the lowest operations of human intellect.(Babbage & Babbage, 2010, p. 212. Carta a Humphry Davy, 3 de julio de 1822.)

0.95 XXXV. One way that's kind of a fun analogy to try to get some idea of what we're doing here to try to understand nature is to imagine that the gods are playing some great game like chess. Let's say a chess game. And you don't know the rules of the game, but you're allowed to look at the board from time to time, in a little corner, perhaps. And from these observations, you try to figure out what the rules are of the game, what [are] the rules of the pieces moving.

0.95 XXXVI.

Instead of searching through values of the original variable n one searches through values of something else. In practice when solving problems of the above kind *one will probably apply some very complex 'transformation' of the original problem, involving searching through various variables, some more analogous to the original one, some more like a 'search through all proofs'*. Further research into intelligence of machinery will probably be very greatly concerned with 'searches' of this kind. We may perhaps call such searches 'intellectual searches'. They might very briefly be defined as 'searches carried out by brains for combinations with particular properties'.(Cooper & van Leeuwen, 2013, Turing 1948, p. 515. El énfasis es mío.).

0.95 XXXVII.

It may be of interest to mention two other kinds of search in this connection. There is the genetical or evolutionary search by which a combination of genes is looked for, the criterion being survival value. The remarkable success of this search confirms to some extent the idea that intellectual activity consists mainly of various kinds of search.(Cooper & van Leeuwen, 2013, Turing 1948, p. 515.).

0.95 XXXVIII.

The remaining form of search is what I should like to call the 'cultural search'. As

I have mentioned, the isolated man does not develop any intellectual power. It is necessary for him to be immersed in an environment of other men, whose techniques he absorbs during the first twenty years of his life. He may then perhaps do a little research of his own and make a very few discoveries which are passed on to other men. *From this point of view the search for new techniques must be regarded as carried out by the human community as a whole, rather than by individuals.* (Cooper & van Leeuwen, 2013, Turing 1948, p. 515. El énfasis es mío.)

. (Cooper & van Leeuwen, 2013, Turing 1948, p. 515. El énfasis es mío.)

0.95 XXXIX.

If one can explain quite unambiguously in English, with the aid of mathematical symbols required, how a calculation is to be done, then it is always possible to programme any digital computer to do that calculation, provided the storage capacity is adequate. (Turing, 1953; Cooper & van Leeuwen, 2013, p. 628)

0.95 XL. The present report gives a fairly complete account of the proposed calculator. It is recommended however that it be read in conjunction with J. von Neumann's 'Report on the EDVAC'

0.95 XLI.

Wenn wir die Tatsachen eines bestimmten mehr oder minder umfassenden Wissensgebietes zusammenstellen, so bemerken wir bald, daß diese Tatsachen einer Ordnung fähig sind. Diese Ordnung erfolgt jedesmal mit Hilfe eines gewissen *Fachwerkes von Begriffen* in der Weise, daß dem einzelnen Gegenstände des Wissensgebietes ein Begriff dieses Fachwerkes und jeder Tatsache innerhalb des Wissensgebietes eine logische Beziehung zwischen den Begriffen entspricht. Das Fachwerk der Begriffe ist nichts Anderes als die *Theorie* des Wissensgebietes.

(Hilbert, 1917, p. 405)

0.95 XLII.

Ich glaube: Alles, was Gegenstand des wissenschaftlichen Denkens überhaupt sein kann, verfällt, sobald es zur Bildung einer Theorie reif ist, der axiomatischen Methode und damit mittelbar der Mathematik. Durch Vordringen zu immer tieferliegender Schichten von Axiomen im vorhin dargelegten Sinne gewinnen wir auch in das Wesen des wissenschaftlichen Denkens selbst immer tiefere Einblicke und werden uns der Einheit unseres Wissens immer mehr bewußt. In dem Zeichen der axiomatischen Methode erscheint die Mathematik berufen zu einer führenden Rolle in der Wissenschaft überhaupt. (Hilbert, 1917, p. 415)

0.95 XLIII.

To begin, we must emphasize a statement which I am sure you have heard before, but which must be repeated again and again. It is that the sciences do not try to explain, they hardly even try to interpret, they mainly make models. By a model is meant a mathematical construct which, with the addition of certain verbal interpretations, describes observed phenomena. The justification of such a mathematical construct is solely and precisely that it is expected to work - that is, correctly to describe phenomena from a reasonably wide area. Furthermore, it must satisfy certain esthetic criteria - that is, in relation to how much it describes, it must be rather simple.

(von Neumann, 1955, p. 158)

0.95 XLIV. Die folgenden Betrachtungen sind unabhängig von den besonderen Regeln des Schachspiels und gelten prinzipiell ebensogut für alle ähnlichen Verstandesspiele, in denen zwei Gegner unter Ausschluss des Zufalls gegeneinander spielen; es soll aber der Bestimmtheit wegen hier jeweilig auf das Schach als das bekannteste aller derartigen Spiele exemplifiziert werden. Auch handelt es sich nicht um irgend eine Methode des praktischen Spiels, sondern lediglich um die Beantwortung der Frage: kann der Wert einer beliebigen während des Spiels möglichen Position für eine der spielenden Parteien sowie der bestmögliche Zug mathematisch-objektiv bestimmt oder wenigstens definiert werden, ohne dass auf solche mehr subjektiv-psychologischen wie die des „vollkommenen Spielers“ und dergleichen Bezug genommen zu werden brauchte? [...] Ob aber eine solche Beurteilung der Position auch in anderen Fällen, wo die genaue Durchführung der Analyse in der unübersehbaren Komplikation der möglichen Fortsetzungen ein praktisch unüberwindliches Hindernis findet, wenigstens theoretisch denkbar ist und überhaupt einen Sinn hat, scheint mir doch der Untersuchung wert zu sein [...] Die im folgenden zur Lösung des Problems verwendete Methode ist der „Mengenlehre“ und dem „logischen Kalkül“ entnommen und erweist die Fruchtbarkeit dieser mathematischen Disziplinen in einem Falle, wo es sich fast ausschliesslich um endliche Gesamtheiten handelt. (Zermelo, 1913, p. 501)

0.95 XLV.

After much consideration I selected for my test the contrivance of a machine that should be able to play a game of purely intellectual skill successfully ; such as tit-tat-to, drafts, chess, &c. I endeavoured to ascertain the opinions of persons in every class of life and of all ages, whether they thought it required human reason to play games of skill. The almost constant answer was in the affirmative. Some supported this view of the case by observing, that if it were otherwise, then an automaton could play such games. A few of those who had considerable acquaintance with mathematical science allowed the possibility of machinery being capable of such work; but they most stoutly denied the possibility of contriving such machinery on account of the myriads of combinations which even the simplest games included. On the first part of my inquiry I soon arrived at a demonstration that every game of skill is susceptible of being played by an automaton. (Babbage, 1864, pp. 465-466)

(Babbage, 1864, pp. 465-466)

0.95 XLVI.

As soon as an Analytical Engine exists, it will necessarily guide the future course of the science. Whenever any result is sought by its aid, the question will then arise—By what course of calculation can these results be arrived at by the machine in the shortest time? (Babbage, 1864, p. 137)

0.95 XLVII.

But one point must be made clear: neither of us conceives the formal equivalence to be a factual explanation. *Per contra!*—we regard facilitation and extinction as dependent upon continuous changes in threshold related to electrical and chemical variables, such as after-potentials and ionic concentrations; and learning as an enduring change which can survive sleep, anaesthesia, convulsions and coma. *The importance of the formal equivalence lies in this: that the alterations actually underlying facilitation, extinction and learning in no way affect the conclusions which follow from the formal treatment of the activity of nervous nets*, and the relations of the corresponding propositions remain those of the logic of propositions. (McCulloch & Pitts, 1943, 117. El énfasis es mío.)

0.95 XLVIII.

Causality, which requires description of states and a law of necessary connection relating them, has appeared in several forms in several sciences, but never, except in statistics, has it been as irreciprocal as in this theory. Specification for any one time of afferent stimulation and of the activity of all constituent neurons, each an "all-or-none" affair, determines the state. Specification of the nervous net provides the law of necessary connection whereby one can compute from the description of any state that of the succeeding state, but the inclusion of disjunctive relations prevents complete determination of the one before. Moreover, the regenerative activity of Constituent circles renders reference indefinite as to time past. Thus our knowledge of the world, including ourselves, is incomplete as to space and indefinite as to time. This ignorance, implicit in all our brains, is the counterpart of the abstraction which renders our knowledge useful. The role of brains in determining the epistemic relations of our theories to our observations and of these to the facts is all too clear, for it is apparent that every idea and every sensation is realized by activity within that net, and by no such activity are the actual afferents fully determined. (McCulloch & Pitts, 1943, pp. 129-131)

0.95 XLIX.

What seems worth emphasizing to me is, however, that after the great positive contribution of Turing-cum-Pitts-and-McCulloch is assimilated, the situation is rather worse than before. Indeed, these authors have demonstrated in absolute and hopeless generality, that anything and everything Brouwerian can be done by an appropriate mechanism, and specifically by a neural mechanism—and that even one, definite

mechanism can be "universal." *Inverting the argument: Nothing that we may know or learn about the functioning of the organism can give, without "microscopic", cytological work any clues regarding the further details of the neural mechanism. . . . I think you will feel with me the type of frustration that I am trying to express.* (Von Neumann a Wiener, 29 de noviembre de 1946 (J. V. Neumann, 2005, 278. El énfasis es mío.))

0.95 L.

I feel that we have to turn to simpler systems. It is a fallacy, if one argues, that because the neuron is a cell (indeed part of its individual insulating wrapping is multicellular), we must consider multicellular organisms only. The cell is clearly an excellent "standard component", highly flexible and suited to differentiation in form and in function, and the higher organisms use it freely. But its self-reproductivity indicates that it has in itself some of the decisive attributes of the integrated organisms- and some cells (e.g. the leukocytes) are self-contained, complete beings. *This in itself should make one suspicious in selecting the cells as the basic "undefined" concepts of an axiomatism.* (Von Neumann a Wiener, 29 de noviembre de 1946 (J. V. Neumann, 2005, p. 279. El énfasis es mío.))

0.95 LI.

Consider, in any field of technology, the state of affairs which is characterized by the development of highly complex "standard components", which are at the same time individualized, well suited to mass production, and (in spite of their "standard" character) well suited to purposive differentiation. This is clearly a late, highly developed style, and not the ideal one for a first approach of an outsider to the subject, for an effort towards understanding. *For the purpose of understanding the subject, it is much better to study an earlier phase of its evolution, preceding the development of this high standardization - with differentiation. I.e. to study a phase in which these "elegant" components do not yet appear.* This is especially true, if there is reason to suspect already in that archaic stage mechanisms (or organisms) which exhibit the most specific traits of the simplest representatives of the above mentioned "late" stage. (Von Neumann a Wiener, 29 de noviembre de 1946 (J. V. Neumann, 2005, pp. 280–281. El énfasis es mío.))

0.95 LII.

Consequently a "true" understanding of these organisms may be the first relevant step forward and possibly the greatest step that may at all be required. I would, however, put on "true" understanding the most stringent interpretation possible: That is, *understanding the organism in the exacting sense in which one may want to understand a detailed drawing of a machine - i.e. finding out where every individual nut and bolt is located*, etc. (Von Neumann a Wiener, 29 de noviembre de 1946 (J. V. Neumann, 2005, pp. 280–281. El énfasis es mío.))

0.95 LIII.

one can really talk of "mechanical elements", each of which may comprise 10 atoms or more. Thus the organism in question consists of six million atoms, but probably only of a few hundred thousand "mechanical elements". I suppose (without having done it) that if one counted rigorously the number of "elements" in a locomotive, one might also wind up in the high ten thousands. Consequently this is a degree of complexity which is not necessarily beyond human endurance. (Von Neumann a Wiener, 29 de noviembre de 1946 (J. V. Neumann, 2005, p. 280))

0 LIV.

It always bothers me that, according to the laws as we understand them today, it takes a computing machine an infinite number of logical operations to figure out what goes on in no matter how tiny a region of space, and no matter how tiny a region of time. How can all that be going on in that tiny space? Why should it take an infinite amount of logic to figure out what one tiny piece of space/time is going to do? So I have often made the hypothesis that ultimately physics will not require a mathematical statement, that in the end the machinery will be revealed, and the laws will turn out to be simple, like the chequer board with all its apparent complexities (Feynman, 1967, pp. 57–58).

0.95 LV. A mechanism for a behavior is a complex system that produces that behavior by the interaction of a number of parts, where the interaction between parts can be characterized by direct, invariant, change-relating generalizations. (Glennan, 2002, p. 334)

0.95 LVI.

I'm going to describe both the work of McCulloch and Pitts and the work of Turing, because they reflect two very important ways to get at the subject: the synthetic way, and the integral way. McCulloch and Pitts described structures which are built up from very simple elements, so that all you have to define axiomatically are the elements, and then their combination can be extremely complex. Turing started by axiomatically describing what the whole automaton is supposed to be, without telling what its elements are, just by describing how it's supposed to function. (von Neumann, 1966, p. 43)

0.95 LVII.

all these are very crude steps in the direction of a systematic theory of automata. They represent, in addition, only one particular direction. *This is, as I indicated before, the direction towards forming a rigorous concept of what constitutes "complication."* They illustrate that "complication" on its lower levels is probably degenerative, that is, that every automaton that can produce other automata will only be able to pro-

duce less complicated ones. There is, however, a certain minimum level where this degenerative characteristic ceases to be universal. At this point automata which can reproduce themselves, or even construct higher entities, become possible. *This fact, that complication, as well as organization, below a certain minimum level is degenerative, and beyond that level can become self-supporting and even increasing, will clearly play an important role in any future theory of the subject.* (von Neumann, 1987a, pp. 421. Los énfasis son míos)

0.95 LVIII.

There is a concept which will be quite useful here, of which we have a certain intuitive idea, but which is vague, unscientific, and imperfect. This concept clearly belongs to the subject of information, and quasi-thermodynamical considerations are relevant to it. *I know no adequate name for it, but it is best described by calling it "complication." It is effectivity in complication, or the potentiality to do things. I am not thinking about how involved the object is, but how involved its purposive actions are.* In this sense, an object is of the highest degree of complexity if it can do very difficult and involved things. (von Neumann, 1966, p. 78. El énfasis es mío)

0.95 LIX.

He felt that there are qualitatively new principles involved in systems of great complexity and searched for these principles in the phenomenon of self-reproduction, which clearly depends on complexity. It is also to be expected that because of the close relation of self-reproduction to self-repair, results on self-reproduction would help solve the reliability problem. (Burks, en J. Neumann & Burks, 1966, p. 20)

0.95 LX.

the state of a really big system does not at all have to have the symmetry of the laws that govern it; in fact, it usually has less symmetry. The outstanding example this is the crystal: Built from a substrat of atoms and space according to laws which express the perfect homogeneity of space, the crystal suddenly and unpredictably displays *an entirely new and very beautiful symmetry.* The general rule, however, even in the case of the crystal, is that *the large system is less symmetrical than the underlying struture would suggest:* Symmetrical as it is, a crystal is less symmetrical than perfect homogeneity. (Anderson, 1972, p. 395. Los énfasis son míos)

0.95 LXI.

I have long felt that the concept of equilibrium itself and the methods which we employ in pure analysis, have a clear meaning only when confined to the analysis of the action of a single person, and that we are really passing into a different sphere and silently introducing a new element of altogether different character when we apply it

to the explanation of the interactions of a number of different individuals.(von Hayek, 1937, p. 35)

0.95 LXII.

I am certain there are many who regard with impatience and distrust the whole tendency, which is inherent in all modern equilibrium analysis, to turn economics into a branch of pure logic, a set of self-evident propositions which, like mathematics or geometry, are subject to no other test but internal consistency. But it seems that if only this process is carried far enough it carries its own remedy with it. In distilling from our reasoning about the facts of economic life those parts which are truly *a priori*, we not only isolate one element of our reasoning as a sort of pure logic of choice in all its purity, but we also isolate, and emphasize the importance of, another element which has been too much neglected. My criticism of the recent tendencies to make economic theory more and more formal is not that they have gone too far, but that they have not yet been carried far enough to complete the isolation of this branch of logic and to restore to its rightful place the investigation of causal processes, using formal economic theory as a tool in the same way as mathematics.(von Hayek, 1937, p. 35)

2 LXIII. “It is an order in which things behave in the same way because they mean the same thing to man (von Hayek, 1952/1979, p. 40)”.

0.95 LXIV.

All the paradigms of culturally evolved institutions, morals, exchange, and money refer to such practices whose benefits transcend the individuals who practice them in the particular instances. The result is that whole groups may be helped by them to expand into what I shall call extended orders, through the effects of practices of which the individuals are not aware. Such practices can lead to the formation of orderly structures far exceeding the perception of those whose actions produce them. They make possible the adaptation of such actions to unknown circumstances and lead to the formation of an indefinitely expansible order which can develop only through group selection, that is, a selection of groups for common attributes possessed by them. (F. A. v. (A. Hayek, 1984, p. 319)

0.95 LXV.

Where, however, we have to deal with patterns for the development of which there has been no biological reason, we shall first have to invent the pattern before we can discover its presence in the phenomena—or before we shall be able to test its applicability to what we observe. A theory will always define only a kind (or class) of patterns, and the particular manifestation of the pattern to be expected will depend on the particular manifestation of the pattern to be expected will depend on the

particular circumstances (the “initial and marginal conditions” to which . . . we shall refer as “data”). How much in fact we shall be able to predict will depend on how many of those data we can ascertain. (F. A. Hayek, 1964/1994, p. 56)

0.95 LXVI.

The distinction between simplicity and complexity raises considerable philosophical difficulties when applied to statements. But there seems to exist a fairly easy and adequate way to measure the degree of complexity of different kinds of abstract patterns. The minimum number of elements of which an instance of the pattern must consist in order to exhibit all the characteristic attributes of the class of patterns in question appears to provide an unambiguous criterion. (F. A. Hayek, 1964/1994, p. 56)

0.95 LXVII.

The “emergence” of “new” patterns as a result of the increase in the number of elements between which simple relations exist means that this larger structure as a whole will possess certain general or abstract features which will recur independently of the particular values of the individual data, so long as the general structure . . . is preserved. Such “wholes,” defined in terms of certain general properties of their structure, will constitute distinctive objects of explanation for a theory, even though such a theory may be merely a particular way of fitting together statements about the relations between the individual elements.(F. A. Hayek, 1964/1994, p. 57)

2 LXVIII.

The fact is that in studies of complex phenomena the general patterns are all that is characteristic of those persistent wholes which are the main object of our interest, because a number of enduring structures have this general pattern in common and nothing else. (F. A. Hayek, 1964, p. 63)

0.95 LXIX.

Profound order is being discovered in large, complex, and apparently random systems. I believe that this emergent order underlies not only the origin of life itself, but much of the order seen in organisms today. So, too, do many of my colleagues, who are starting to find overlapping evidence of such emergent order in all different kinds of complex systems. (S. Kauffman, 1996, p. 12)

0.95 LXX.

We have here in a nutshell the way in which a series of independent initiatives are organised to a joint achievement by mutually adjusting themselves at every succes-

sive stage to the situation created by all the others who are acting likewise. Such self-coordination of independent initiatives leads to a joint result which is unpremeditated by any of those who bring it about. Their coordination is guided as by ‘an invisible hand’ towards the joint discovery of a hidden system of things. (Polanyi, 1962/2000, p. 2)

0 LXXI. “Analogous to the role played by natural selection in evolutionary biology is the role played by rationality in the sciences of human behavior. If we know of a business organization only that it is a profit-maximizing system, we can often predict how its behavior will change if we change its environment how it will alter its prices if a sales tax is levied on its products. We can sometimes make this prediction and economists do make it repeatedly without detailed assumptions about the adaptive mechanism, the decision-making apparatus that constitutes the inner environment of the business firm” (H. A. Simon, 1996, p. 8).

0 LXXII. “Man is not to do more harm than good in his efforts to improve the social order, he will have to learn that in this, *as in all other fields where essential complexity of an organized kind prevails*, he cannot acquire the full knowledge which would make mastery of the events possible. He will therefore have to use what knowledge he can achieve, not to shape the results as the craftsman shapes his handiwork, but rather to cultivate a growth by *providing the appropriate environment*, in the manner in which the gardener does this for his plants. . . . The recognition of the insuperable limits to his knowledge ought indeed to teach the student of society a lesson of humility which should guard him against becoming an accomplice in men’s fatal striving to control society—a striving which makes him not only a tyrant over his fellows, but which may well make him the destroyer of a civilization *which no brain has designed but which has grown from the free efforts of millions of individuals*” (F. A. v. (A. Hayek, 1974, Los énsasis son míos).

0.95 LXXIII.

The opening up of new markets, foreign or domestic, and the organizational development from the craft shop to such concerns as U.S. Steel illustrate the same process of industrial mutation—if I may use that biological term—that incessantly revolutionizes the economic structure from within, incessantly destroying the old one, incessantly creating a new one. This process of Creative Destruction is the essential fact about capitalism. (Schumpeter, 1942/2014, p. 82)

0.95 LXXIV.

from the fact that an economic system is evolving, one cannot conclude that it has reached or is likely to reach a position that bears any resemblance to the equilibria found in the theory of perfect competition. Each species in the ecosystem is adapting to an environment of other species evolving simultaneously with it. The evolution and future of such systems can only be understood from a knowledge of their histories. (H. A. Simon, 1996, p. 47)

2 LXXV. “any change in a system that produces a more or less permanent change in its capacity for adapting to its environment” (H. A. Simon, 1996, p. 100).

0.95 LXXXVI. A *designed* thing, then, is either a living thing or a part of a living thing, or the artifact of a living thing, organized in any case in aid of this battle against disorder

0.95 LXXXVII.

Thus the first advantage of dividing outer from inner environment in studying an adaptive or artificial system is that we can often predict behavior from knowledge of the system's goals and its outer environment, with only minimal assumptions about the inner environment. An instant corollary is that we often find quite different inner environments accomplishing identical or similar goals in identical or similar outer environments —airplanes and birds, dolphins and tuna fish, weight-driven clocks and battery-driven clocks, electrical relays and transistors. (H. A. Simon, 1996, p. 8)

0.95 LXXXVIII.

A generalization of the argument made here for the separability of "outer" from "inner" environment shows that we should expect to find this separability, to a greater or lesser degree, in all large and complex systems, whether they are artificial or natural. In its generalized form it is an argument that all nature will be organized in "levels". (H. A. Simon, 1996, p. 7)

2 LXXXIX. "complexity frequently takes the form of hierarchy and that hierarchic systems have some common properties independent of their specific content" (H. A. Simon, 1996, p. 184).

0.95 LXXX. "the whole is more than the sum of the parts in the weak but important pragmatic sense that, given the properties of the parts and the laws of their interaction, *it is not a trivial matter* to infer the properties of the whole" (El énfasis es mío H. A. Simon, 1996, p. 184).

0.95 LXXXI.

The claim is that the potential for rapid evolution exists in any complex system that consists of a set of stable subsystems, each operating nearly independently of the detailed processes going on within the other subsystems, hence influenced mainly by the net inputs and outputs of the other subsystems. If the near-decomposability condition is met, the efficiency of one component (hence its contribution to the organism's fitness) does not depend on the detailed structure of other components. (H. A. Simon, 1996, p. 193)

0.95 LXXXII.

There is one important difference between the physical and biological hierarchies, on the one hand, and social hierarchies, on the other. Most physical and biological hierarchies are described in spatial terms. We detect the organelles in a cell in the

way we detect the raisins in a cake they are "visibly" differentiated substructures localized spatially in the larger structure. On the other hand, we propose to identify social hierarchies not by observing who lives close to whom but by observing who interacts with whom. These two points of view can be reconciled by defining hierarchy in terms of intensity of interaction, but observing that in most biological and physical systems relatively intense interaction implies relative spatial propinquity. (H. A. Simon, 1996, p. 187)

0.95 LXXXIII.

Hierarchic systems are, as we have seen, often nearly decomposable. Hence only aggregative properties of their parts enter into the description of the interactions of those parts. A generalization of the notion of near decomposability might be called the "empty world hypothesis" most things are only weakly connected with most other things; for a tolerable description of reality only a tiny fraction of all possible interactions needs to be taken into account. (H. A. Simon, 1996, p. 209)

2 LXXXIV. "Case must be that one generation then should be as many living as now. To do this & to have many species in same genus (as is) requires extinction."

2 LXXXV. "Case must be that one generation then should be as many living as now. To do this & to have many species in same genus (as is) requires extinction."

0 LXXXVI. "Our evolution model illustrates the butterfly effect for a complex system. Any small change of any event will sooner or later affect everything in the system. If the initial event caused a large avalanche, the effect will take place sooner rather than later. We believe that the effect that we have described is the real butterfly effect, in contrast to the one found in simple chaotic systems that have no relevance to evolution or any other complex system" (Bak, 1996, p. 159)

0.95 LXXXVII.

The criticality in our theory is fundamentally different from the critical point at phase transitions in equilibrium statistical mechanics which can be reached only by tuning of a parameter, for instance the temperature. The critical point in the dynamical systems studied here is an attractor reached by starting far from equilibrium: The scaling properties of the attractor are insensitive to the parameters of the model. This robustness is essential in our explaining that no fine tuning is necessary to generate $1/f$ noise (and fractal structures) in nature. (Bak y col., 1987, p. 381)

0.95 LXXXVIII.

We shall argue that self-organized criticality (SOC) underlies the widespread appearance of contingency and complexity in nature. In particular, the statistics of large-scale behavior obeys fundamental laws of nature, even though the individual events

themselves are unique. These fundamental laws are "universal" and describe many different types of systems. (Bak & Paczuski, 1995, p. 6689)

0.95 LXXXIX.

Without the concept of universality we would be in bad shape. There would be no fundamental "emergent" laws of nature to discover, only a big mess. Of course, we have to demonstrate that our models are robust, or insensitive to changes, in order to justify our original intuition. If, unfortunately, it turns out that they are not, we are back to the messy situation where detailed engineering-type models of the highly complex phenomena is the only possible approach –the weatherman's approach. (Bak, 1996, p. 45)

0.95 XC.

Why is it that the concept of punctuated equilibrium is so important for our understanding of nature? Maybe the phenomenon illustrates better than anything else the criticality of a complex system. Systems with punctuated equilibria combine features of frozen, ordered systems, with those of chaotic, disordered systems. Systems can remember the past because of the long periods of stasis allowing them to preserve what they have learned through history, mimicking the behavior of frozen systems; they can evolve because of the intermittent bursts of activity. (Bak, 1996, p. 143)

0 XCI.

The idea of self-organized criticality seems to me to be, not the right and unique solution to these and other similar problems, but to have paradigmatic value, as the kind of generalization which will characterize the next stage of physics. Physics in the 20th century solved the problems of constructing hierarchical levels which obeyed clear-cut generalizations within themselves: atomic and molecular theory, nuclear physics, quantum chromodynamics, electroweak theory, quantum many-body theory, classical hydrodynamics, molecular biology, [etc.]. In the 21st century one revolution which can take place is the construction of generalizations which jump and jumble the hierarchies, or generalizations which allow scale-free or scale-transcending phenomena. The paradigm for the first is broken symmetry, for the second self-organized criticality. Another paradigm is the theory of distributions of Levy flights, applied to economics by Solomon et al. (Anderson, 2011, p. 112)

0.95 XCII.

With the combined use of markets and administrative hierarchies, the human species has enormously increased its capabilities for specialization and division of work. It would be too much to attribute the vast growth and spread of human populations to such mechanisms alone modern medicine and modern technology have had so-

nothing to do with it too but the (perhaps temporary) dominance of our species over the globe today is witness to the augmentation of human reason applied to *local, not global*, concerns that has been made possible by these social artifacts. (H. A. Simon, 1996, p. 43. El énfasis es mío)

0.95 XCIII.

One way of considering the decomposition, but acknowledging that the interrelations among the components cannot be ignored completely, is to think of the design process as involving, first, the generation of alternatives and, then, the testing of these alternatives against a whole array of requirements and constraints. There need not be merely a single generate-test cycle, but there can be a whole nested series of such cycles. The generators implicitly define the decomposition of the design problem, and the tests guarantee that important indirect consequences will be noticed and weighed. Alternative decompositions correspond to different ways of dividing the responsibilities for the final design between generators and tests. (H. A. Simon, 1996, pp. 128-129)

0.95 XCIV.

No sharp line divides learning things that are already known to others from learning things that are new to the world. What constitutes novelty depends on what knowledge is already in the mind of the problem solver and what help is received from the environment in adding to this knowledge. We should expect, therefore, that processes very similar to those employed in learning systems can be used to construct systems that discover new knowledge. (H. A. Simon, 1996, p. 105)

0.95 XCV.

Looking back into the history of biology, it appears that wherever a phenomenon resembles learning, an instructive theory was first proposed to account for the underlying mechanisms. In every case, this was later replaced by a selective theory. Thus the species were thought to have developed by learning or by adaptation of individuals to the environment, until Darwin showed this to have been a selective process. Resistance of bacteria to antibacterial agents was thought to be acquired by adaptation, until Luria and Delbrück showed the mechanism to be a selective one. Adaptive enzymes were shown by Monod and his school to be inducible enzymes arising through the selection of pre-existing genes. Finally, antibody formation that was thought to be based on instruction by the antigen is now found to result from the selection of already existing patterns. It thus remains to be asked if learning by the central nervous system might not also be a selective process; i.e., perhaps learning is not learning either. (Jerne, 1967/1994, p. 282)

0 XCVI. "When we examine the sources from which the problem-solving system, or the evolving system, as the

case may be, derives its selectivity, we discover that selectivity can always be equated with some kind of feedback of information from the environment”(H. A. Simon, 1996, p. 195).

0.95 XCVII.

Central to their description are the goals that link the inner to the outer system. The inner system is an organization of natural phenomena capable of attaining the goals in some range of environments, but ordinarily there will be many functionally equivalent natural systems capable of doing this. (H. A. Simon, 1996, pp. 10-11)

0.95 XCVIII.

The outer environment determines the conditions for goal attainment. If the inner system is properly designed, it will be adapted to the outer environment, so that its behavior will be determined in large part by the behavior of the latter, exactly as in the case of "economic man." To predict how it will behave, we need only ask, "*How would a rationally designed system behave under these circumstances?*" The behavior takes on the shape of the task environment.(H. A. Simon, 1996, pp. 11-12. El énfasis es mío)

0.95 XCIX.

It is often said that all the conditions for the first production of a living organism are now present, which could ever have been present.— But if (& oh what a big if) we could conceive in some warm little pond with all sorts of ammonia & phosphoric salts,—light, heat, electricity &c present, that a protein compound was chemically formed, ready to undergo still more complex changes, at the present day such matter wd be instantly devoured, or absorbed, which would not have been the case before living creatures were formed.— (Darwin a Hooker, 1º de febrero de 1871) (Darwin, 1871)

0.95 C.

The emphasis on equilibrium must nevertheless accommodate the obvious fact that evolution continues to occur. There is no trace in the fossil record that the formation and extinction of species have ceased or even slowed down, and rates of morphological change within evolutionary lines remain high, even in the most recent fossil horizons. If evolution and adaptation continue to occur, how can the world be in a steady state? The answer given is that the environment is constantly changing, always decaying with respect to the current adaptation of species. In this view the continued evolution of organisms is simply keeping up with the moving, worsening environment, but nothing is happening globally. The environment worsens because resources are used up, because competitors, predators, and prey evolve, and because any change makes previous adaptations obsolete. No species can ever be perfectly

adapted because each is tracking a moving target, but all extant species are close to their optima. Species become extinct if they evolve too slowly to track the moving environment or disperse too slowly to keep up geographically with their preferred environment. In this way modern evolutionary theory solves the apparent contradiction between the observation of continued evolution and the ideological demand that the assemblage of organisms be stable and optimal. (Lewontin & Levins, 1985, p. 25)

0.95 CI.

There exists, and has existed for a long time, a large body of evidence that demonstrates that the ontogeny of an organism is the consequence of a unique interaction between the genes it carries, the temporal sequence of external environments through which it passes during its life, and random events of molecular interactions within individual cells. It is these interactions that must be incorporated into any proper account of how an organism is formed. (Lewontin; 2002, pp. 17-18)

0 CII. “The organism is determined neither by its genes nor by its environment nor even by the interaction between them, but bears a significant mark of random processes. The organism does not compute itself from the information in its genes nor even from the information in the genes and the sequence of environments. The metaphor of computation is just a trendy form of Descartes’s metaphor of the machine. Like any metaphor, it catches some aspect of the truth but leads us astray if we take it too seriously. (Lewontin; 2002, p. xx)”

0.95 CIII.

I have attempted to form a judgment as to the conditions for evolution based on the statistical consequences of Mendelian heredity. The most general conclusion is that evolution depends on a certain balance among its factors. There must be gene mutation, but an excessive rate gives an array of freaks, not evolution; there must be selection, but too severe a process destroys the field of variability, and thus the basis for further advance; prevalence of local inbreeding within a species has extremely important evolutionary consequences, but too close inbreeding leads merely to extinction. A certain amount of crossbreeding is favorable but not too much. *In this dependence on balance the species is like a living organism. At all levels of organization life depends on the maintenance of a certain balance among its factors.* (Wright, 1932, p. 365. El énfasis es mío)

2 CIV. “Catalytic function in combination with various feedback mechanisms causing certain selfenhancing growth properties of the system. (Eigen, 1971, p. 471)”

0.95 CV.

A combination of complementary instruction with catalytic coupling will lead to non-

linear selection behavior. We have to find the simplest way of coupling the functions of nucleic acids and proteins in order to reproduce a type of evolutionary behavior which can lead to the structure and functions of the living cell. We should not pretend to explain the historical path of evolution. All we can try to do is to state the minimum prerequisites and obtain some insight into/the physical principles of the evolutionary process. Independent of its particular structure, the system has to utilize the code-forming properties of nucleic acids as well as the catalytic capabilities of proteins. It thus requires the nucleation of a translation machinery. (Eigen, 1971, p. 503)

0.95 CVI.

The molecular hypercycle as proposed by Eigen and elaborated by Eigen and Schuster is a system in which autocatalytic replicators also heterocatalytically aid each other's *replication* so that replication of each member is catalyzed by at least one other member.(Szathmáry, 2013, p. 1)

0.95 CVII.

The nucleotide sequence of ³²P-RNA from Q β beta phage clones was sampled by two-dimensional polyacrylamide gel electrophoresis of the RNAase T1-resistant oligonucleotides (T1 fingerprinting). About 15 % of the clones derived from a multiply passaged Q beta population showed fingerprint patterns which deviated from that of the RNA from the total population. All deviations examined could be attributed to one and, less frequently, to two or more nucleotide transitions. . . . We propose that a Q beta phage population is in a dynamic equilibrium, with viable mutants arising at a high rate . . . on the one hand, and being strongly selected against on the other. *The genome of Q beta phage cannot be described as a defined unique structure, but rather as a weighted average of a large number of different individual sequences.* (Domingo y col., 1978, Abstract. El énfasis es mio.)

0.95 CVIII.

In looking at Nature, it is most necessary to keep the foregoing considerations always in mind—never to forget that every single organic being around us may be said to be striving to the utmost to increase in numbers; that each lives by a struggle at some period of its life; that heavy destruction inevitably falls either on the young or old, during each generation or at recurrent intervals. Lighten any check, mitigate the destruction ever so little, and the number of the species will almost instantaneously increase to any amount. The face of Nature may be compared to a yielding surface, with ten thousand sharp wedges packed close together and driven inwards by incessant blows, sometimes one wedge being struck, and then another with greater force. (Darwin, 1859, pp. 66-67)

0.95 CIX.

A corollary of the highest importance may be deduced from the foregoing remarks, namely, that the structure of every organic being is related, in the most essential yet often hidden manner, to that of all other organic beings, with which it comes into competition for food or residence, or from which it has to escape, or on which it preys. (Darwin, 1859, p. 77)

0.95 CX.

Following the fundamental method of physicomathematical sciences, we do not attempt a mathematical description of a concrete cell, in all its complexity. We start with a study of highly idealized systems, which at first may not even have any counterpart in real nature. This point must be particularly emphasized. The objection may be raised against such an approach, because systems have no connection to reality; and therefore any conclusions drawn about such idealized systems cannot be applied to real ones. Yet this is exactly what has been, and always is, done in physics. The physicist goes on studying mathematically, in detail, such nonreal things as “material points,” “absolutely rigid bodies” “ideal fluids,” and so on. *There are no such things as those in nature.* Yet the physicist not only studies them but applies his conclusions to real things. And behold! Such an application leads to practical results—at least within certain limits. This is because within these limits the real things have common properties with the fictitious idealized ones! Only a superman could grasp mathematically at once the complexity of a real thing. We ordinary mortals must be more modest and approach reality asymptotically, by gradual approximation. (Rashevsky, 1938/1960, p. 1 Énfasis en el original)

2 CXI. “No mathematical method can be useful for any problem if it involves much calculation. (Turing, 1954; Cooper & van Leeuwen, 2013, p. 323).”

0.95 CXII.

In this section a mathematical model of the growing embryo will be described. This model will be a simplification and an idealization, and consequently a falsification. It is to be hoped that the features retained for discussion are those of greatest importance in the present state of knowledge. (Cooper & van Leeuwen, 2013; A. M. Turing, 1952, p. 689)

0.95 CXIII.

The systems actually to be considered consist therefore of masses of tissues which are not growing, but within which certain substances are reacting chemically, and through which they are diffusing. These substances will be called morphogens, the word being intended to convey the idea of a form producer. *It is not intended to have*

any very exact meaning, but is simply the kind of substance concerned in this theory. The evocators of Waddington provide a good example of morphogens (Waddington 1940). These evocators diffusing into a tissue somehow persuade it to develop along different lines from those which would have been followed in its absence. (Cooper & van Leeuwen, 2013; A. M. Turing, 1952, p. 690. El énfasis es mío)

(Cooper & van Leeuwen, 2013; A. M. Turing, 1952, p. 690. El énfasis es mío)

0.95 CXIV.

There is a fallacy in this argument. It was assumed that the deviations from spherical symmetry in the blastula could be ignored because it makes no particular difference what form of asymmetry there is. It is, however, important that there are some deviations, for the system may reach a state of instability in which these irregularities, or certain components of them, tend to grow. If this happens a new and stable equilibrium is usually reached, with the symmetry entirely gone. The variety of such new equilibria will normally not be so great as the variety of irregularities giving rise to them. (Cooper & van Leeuwen, 2013; A. M. Turing, 1952, p. 693)

0.95 CXV.

The system was supposed to be initially in a stable homogeneous condition, but disturbed slightly from this state by some influences unspecified, such as Brownian movement or the effects of neighbouring structures or slight irregularities of form. It was supposed also that slow changes are taking place in the reaction rates (or, possibly, the diffusibilities) of the two or three morphogens under consideration. These might, for instance, be due to changes of concentration of other morphogens acting in the role of catalyst or of fuel supply, or to a concurrent growth of the cells, or a change of temperature. Such changes are supposed ultimately to bring the system out of the stable state. The phenomena when the system is just unstable were the particular subject of the inquiry. (Cooper & van Leeuwen, 2013; A. M. Turing, 1952, p. 717)

0.95 CXVI.

In order to make the problem mathematically tractable it was necessary to assume that the system never deviated very far from the original homogeneous condition. This assumption was called the 'linearity assumption' because it permitted the replacement of the general reaction rate functions by linear ones. This linearity assumption is a serious one. Its justification lies in the fact that the patterns produced in the early stages when it is valid may be expected to have strong qualitative similarity to those prevailing in the later stages when it is not. (Cooper & van Leeuwen, 2013; A. M. Turing, 1952, p. 717)

0 CXVII. "Another good example is the phenomenon of turbulence in the viscous case, where one suddenly discovers that the really important solutions to a problem which has very high symmetry do not possess that symmetry. From a heuristic point of view, the important thing is not to find the simplest solution of the problem, but rather to analyze statistically certain large families of solutions which have nothing in common with each other except certain statistical traits" (J. Neumann & Burks, 1966, p. 34).

0.95 CXVIII.

The classification of kinds of emergence assumes a distinction between a micro level and a macro level, and the issue is to specify what it is for the macro to emerge from the micro. We might be interested in how an individual cell in an organism emerges out of various biomolecules and their chemical interactions, or we might be interested in how an organism emerges out of various cells and their biological interactions. As this example shows, a macro level in one context might be a micro level in another; the macro/micro distinction is context dependent and shifts with our interests. In addition, a nested hierarchy of successively greater macro levels gives rise to multiple levels of emergence. Any final theory of emergence must clarify what such levels are and how they are related. (Bedau, 2008, p. 157. El énfasis es mío)

0.95 CXIX.

In other words, natural organisms are constructed to make errors as inconspicuous, as harmless, as possible. Artificial automata are designed to make errors as conspicuous, as disastrous, as possible. The rationale of this difference is not far to seek. Natural organisms are sufficiently well conceived to be able to operate even when malfunctions have set in. They can operate in spite of malfunctions, and their subsequent tendency is to remove these malfunctions. An artificial automaton could certainly be designed so as to be able to operate normally in spite of a limited number of malfunctions in certain limited areas. Any malfunction, however, represents a considerable risk that some generally degenerating process has already set in within the machine. It is, therefore, necessary to intervene immediately, because a machine which has begun to malfunction has only rarely a tendency to restore itself, and will more probably go from bad to worse. All of this comes back to one thing. With our artificial automata we are moving much more in the dark than nature appears to be with its organisms. We are, and apparently, at least at present, have to be, much more "scared" by the occurrence of an isolated error and by the malfunction which must be behind it. Our behavior is clearly that of overcaution, generated by ignorance. (von Neumann, 1956, p. 412)

0.95 CXX.

The discrete nature of cellular automata allows a direct and powerful analogy between cellular automata and digital computers to be drawn. The initial configuration for a cellular automaton corresponds to the "program" and "initial data" for a computation. "Processing" occurs through the time evolution of a cellular automaton, and

the "results" of the computation are given by the configurations obtained. Whereas typical digital electronic computers process data serially, a few bits at a time, cellular automata process a large (or infinite) number of bits in parallel. (Wolfram, 1984b, p. vii)

0.95 CXXI.

This paper has given evidence that simple cellular automata can reproduce the essential features of thermodynamic and hydrodynamic behaviour. These models make contact with results in dynamical systems theory and computation theory. They should also yield efficient practical simulations, particularly on parallel-processing computers. Cellular automata can potentially reproduce behaviour conventionally described by partial differential equations in many other systems whose intrinsic dynamics involves many degrees of freedom with no large disparity in scales. (Salem & Wolfram, 1985, p. 3)

0.95 CXXII.

There is one important difference between ordinary logic and the automata which represent it. Time never occurs in logic, but every network or nervous system has a definite time lag between the input signal and the output response. *A definite temporal sequence is always inherent in the operation of such a real system.* This is not entirely a disadvantage. For example, it prevents the occurrence of various kinds of more or less vicious circles (related to 'non-constructivity,' 'impredicativity' and the like) which represent a major class of dangers in modern logical systems (von Neumann, 1956/1987b, p. 554. El énfasis es mío)

0.95 CXXIII.

There is an equivalence between logical principles and their embodiment in a neural network, and while in the simpler cases the principles might furnish a simplified expression of the network, it is quite possible that in cases of extreme complexity the reverse is true. (von Neumann, 1987a, p. 414)

0.95 CXXIV.

More generally, the perspective on cognition that emerges from neuroanatomy and neurophysiology holds out an entirely novel conception of the brain's fundamental mode of representation. The proposed new unit of representation is the pattern of activation levels across a large population of neurons (not the internal sentence in some "language of thought"). And the new perspective holds out a correlatively novel conception of the brain's fundamental mode of computation as well. Specifically, the new unit of computation is the transformation of one activation pattern into a second activation pattern by forcing it through the vast matrix of synaptic connections that

one neuronal population projects to another population (not the manipulation of sentences according to "syntactic rules"). (Churchland, 2005, p. 47)

0.95 CXXV.

The ability to communicate across fields the common ground comes from the fact that all who use computers in complex ways are using computers to design or to participate in the process of design. Consequently we as designers, or as designers of design processes, have had to be explicit as never before about what is involved in creating a design and what takes place while the creation is going on. (H. A. Simon, 1996, p. 137)

0.95 CXXVI.

The real subjects of the new intellectual free trade among the many cultures are our own thought processes, our processes of judging, deciding, choosing, and creating. We are importing and exporting from one intellectual discipline to another ideas about how a serially organized information-processing system like a human being or a computer, or a complex of men and women and computers in organized cooperation solves problems and achieves goals in outer environments of great complexity. (H. A. Simon, 1996, pp. 137-138)

0.95 CXXVII.

With such an unending exfoliation of law-levels, our knowledge of the world's lawful order becomes self-potentiating and new combinations can always spring up to exploit the interrelations among old disciplines. Given chemistry and biology we can develop biochemistry; given mathematics and astronomy, we can develop the mathematics of astronomical relationships. On every such front, new insights into lawful processes can be expected. And it is clear that such an infinite proliferation of laws would also serve to block any prospect of completing science. There is accordingly no need to suppose that the physical complexity of nature need be unlimited for nature to have an unlimited cognitive depth. After all, the prime task of science lies in discovering the levels of lawful order of nature, and the ongoing law-complexity of nature suffices for our present purposes of providing for potentially endless discovery. (Rescher, 1998, p. 46)

0.95 CXXVIII.

A few observations ought to be added here about the obvious significance of our conclusions for assessing the various kinds of "reductionism." In the sense of the first of the distinctions which we have repeatedly made—in the sense of general description—the assertion that biological or mental phenomena are "nothing but" certain complexes of physical events, or that they are certain classes of structures of such

events, these claims are probably defensible. But in the second sense—specific prediction—which alone would justify the more ambitious claims made for reductionism, they are completely unjustified. *A full reduction would be achieved only if we were able to substitute for a description of events in biological or mental terms a description in physical terms which included an exhaustive enumeration of all the physical circumstances which constitute a necessary and sufficient condition of the biological or mental phenomena in question.* In fact such attempts always consist—and can consist only—in the illustrative enumeration of classes of events, usually with an added “etc.,” which might produce the phenomenon in question. Such “etc.- reductions” are not reductions which enable us to dispense with the biological or mental entities, or to substitute for them a statement of physical events, but are mere explanations of the general character of the kind of order or pattern whose specific manifestations we know only through our concrete experience of them. (F. A. Hayek, 1964, p. 65. El énfasis es mío)

0.95 CXXIX.

The nature and plausibility of mechanistic models is also influenced by characteristics of human thinking, especially by the proclivity of humans to trace operations in a linear or step-by-step fashion. This is especially evident when we consider the forms of organization possible. Many machines are simple, consisting of only a handful of parts that interact minimally or in a linear way. In these machines we can trace and describe the events occurring straightforwardly, relating first what is done by one component, then how this affects the next. Such machines induce little cognitive strain. Some machines, however, are much more complex: one component may affect and be affected by several others, with a cascading effect; or there may be significant feedback from “later” to “earlier” stages. In the latter case, what is functionally dependent becomes unclear. Interaction among components becomes critical. Mechanisms of this latter kind are complex systems. In the extreme they are integrated systems. In such cases, attempting to understand the operation of the entire machine by following the activities in each component in a brute force manner is liable to be futile. (Bechtel & Richardson, 1993/2010, p. 18)

0.95 CXXX.

Science is the systematic classification of Experience. It postulates unity of Existence with great varieties in the Modes of Existence; assuming that there is one Matter everywhere the same, under great diversities in the complications of its elements. The distinction of Modes is not less indispensable than the identification of the elements. These Modes range themselves under three supreme heads: Force, Life, Mind. Under the first, range the general properties exhibited by all substances; under the second, the general properties exhibited by organized substances; under the third, the general properties exhibited by organized animal substances. The first class is subdivided into Physics, celestial and terrestrial, and Chemistry. Physics treats of substances which move as masses, or which vibrate and rotate as molecules, without

undergoing any appreciable change of structural integrity; they show changes of position and state, without corresponding changes in their elements. Chemistry treats of substances which undergo molecular changes of composition destructive of their integrity. (Lewes, 1877, pp. 4-5)

0.95 CXXXI.

The second class, while exhibiting both physical and chemical properties, is markedly distinguished by the addition of properties called vital. Their peculiarity consists in this: they undergo molecular changes of composition and decomposition which are simultaneous, and by this simultaneity preserve their integrity of structure. They change their state, and their elements, yet preserve their unity, and even when differentiating continue specific. Unlike all other bodies, the organized are born, grow, develop, and decay, through a prescribed series of graduated evolutions, each stage being the indispensable condition of its successor, no stage ever appearing except in its serial order. (Lewes, 1877, p. 5)

0.95 CXXXII.

The patient labors of many observers (how patient only those can conceive who have made such observations!) have detected something of this wondrous history, and enabled the mind to picture some of the incessant separations and reunions, chemical and morphological. Each stage of evolution presents itself as the consequence of a preceding stage, at once an emergence and a continuance; so that no transposition of stages is possible; each has its appointed place in the series. (Lewes, 1877, pp. 212-213)

0.95 CXXXIII.

The various sciences in their serial development develop the whole art of Method. Mathematics develops abstraction, deduction, and definition; Astronomy abstraction, deduction, and observation; Physics adds experiment; Chemistry adds nomenclature; Biology adds classification, and for the first time brings into prominence the important notion of conditions of existence, and the variation of phenomena under varying conditions: so that the relation of the organism to its medium is one never to be left out of sight. In Biology also clearly emerges for the first time what I regard as the true notion of causality, namely, the procession of causes,—the combination of factors in the product, and not an *ab extra* determination of the product. In Vitality and Sensibility we are made aware that the causes are in and not outside the organism; that the organic effect is the organic cause in operation; that there is autonomy but no autocracy; the effect issues as a resultant of the co-operating conditions. In Sociology, finally, we see brought into prominence the historical conditions of existence. From the due appreciation of the conditions of existence, material and historical, we seize the true significance of the principle of Relativity. (Lewes, 1877, p. 5. Énfasis en el original)

0.95 CXXXIV.

Mind, though descended on its physical side from lower forms of existence, is, when it comes, a new quality in the world, and no more ceases to be original because in certain respects it is resolvable into physical motions, than colour disappears because it is resolvable into vibrations. (S. Alexander, 1914, p. 26)

0.95 CXXXV.

Empirical things or existents are . . . groupings within Space-Time, that is, they are complexes of pure events or motions in various degrees of complexity. Such finites have all the categorial characters, that is, all the fundamental features which flow from the nature of any space-time ... as in the course of Time new complexity of motions comes into existence, a new quality emerges . . . The case which we are using as a clue is the emergence of the quality of consciousness from a lower level of complexity which is vital. (S. Alexander, 1920, v. 2, p. 45)

0.95 CXXXVI.

The higher quality emerges from the lower level of existence and has its roots therein, but it emerges therefrom, and it does not belong to that level, but constitutes its possessor a new order of existent with its special laws of behaviour. (S. Alexander, 1920, v. 2, p. 46)

0.95 CXXXVII.

It is thus a certain constellation or complex or collocation of physico-chemical processes which behaves vitally, and the presence of such constellations which makes the structure to which they belong an organism. To call it an organism is but to mark the fact that its behaviour, its response to stimulation, is, owing to the constellation, of a character different from those which physics and chemistry are ordinarily concerned with, and in this sense something new with an appropriate quality, that of life. *At the same time, this new method of behaviour is also physico-chemical and may be exhibited without remainder in physico-chemical terms, provided only the nature of the constellation is known.* [...] Until that constellation is known, what is specially vital may elude the piecemeal application of the methods of physics and chemistry [...]. If the study of life is not one with a peculiar subject-matter, though that subject-matter is resolvable without residue into physico-chemical processes, then we should be compelled ultimately to declare [...] psychology to be a department of physiology, and physiology of physics and chemistry [...]. (S. Alexander, 1920, v. 2, pp. 62–63. El énfasis es mío)

0.95 CXXXVIII.

Put in abstract terms the emergent theory asserts that there are certain wholes, composed (say) of constituents, A, B and C in a relation R to each other; that all wholes composed of constituents of the same kind as A, B and C in relations of the same kind as R have certain characteristic properties; that A, B and C are capable of occurring in other kinds of complex where the relation is not of the same kind as R; and that the characteristic properties of the whole R(A;B;C) cannot, even in theory, be deduced from the most complete knowledge of the properties of A, B and C in isolation or in other wholes which are not of the form R(A;B;C). (Broad, 1925, p. 61)

0.95 CXXXIX.

There is nothing, so far as I can see, mysterious or unscientific about a trans-ordinal law or about the notion of ultimate characteristics of a given order. A trans-ordinal law is as good a law as any other; and, once it has been discovered, it can be used like any other to suggest experiments, to make predictions, and to give us practical control over external objects. The only peculiarity of it is that we must wait till we meet with an actual instance of an object of the higher order before we can discover such a law; and that we cannot possibly deduce it beforehand from any combination of laws which we have discovered by observing aggregates of a lower order. (Broad, 1925, p. 79)

0.95 CXL.

The essential idea is that in the so-called N – infinity limit of large systems (on our own, macroscopic scale) it is not only convenient but essential to realize that matter will undergo mathematical sharp, singular “phase transitions” to states in which the microscopic symmetries, and even the microscopic equations of motion, are in a sense violated. The symmetry leaves behind as its expression only certain characteristic behaviors, for instance, long-wavelength vibrations, of which the familiar example is sound waves; or the unusual macroscopic conduction phenomena of the superconductor; or, in a very deep analogy, the very rigidity of crystal lattices, and thus of most solid matter. There is, of course, no question of the system’s really violating, as opposed to breaking, the symmetry of space and time, but because its parts find it energetically more favorable to maintain certain fixed relationships with each other the symmetry allows only the body as a whole to respond to external forces. (Anderson, 1972, p. 395)

0.95 CXLI. “If this view is right, systems theory must become based on methods of simplification, and will be founded, essentially, on the science of simplification. . . . The systems theorist of the future, I suggest, must be an expert in how to simplify. (Ashby, 1964/2013, p. 594)”

0.95 CXLII.

As we succeed in broadening and deepening our knowledge theoretical and empi-

rical about computers, we discover that in large part their behavior is governed by simple general laws, that what appeared as complexity in the computer program was to a considerable extent complexity of the environment to which the program was seeking to adapt its behavior. (H. A. Simon, 1996, p. 21)

0.95 CXLIII.

In levels of mechanisms, the relata are behaving mechanisms at higher levels and their components at lower levels. [...] The interlevel relationship is as follows: X's Φ -ing is at a lower mechanistic level than Ψ -ing if and only if X's Φ -ing is a component in the mechanism for S's Ψ -ing. Lower level components are organized together to form higher-level components. (Craver, 2007, p. 189)

0.95 CXLIV.

A level of abstraction, LoA, is a finite but non-empty set of observables. No order is assigned to the observables, which are expected to be the building blocks in a theory characterised by their very definition. A LoA is called discrete [respectively analogue] if and only if all its observables are discrete [respectively analogue]; otherwise it is called hybrid. (Floridi & Sanders, 2004, p. 11)

0.95 CXLV.

By an observable we mean an interpreted typed variable, that is, a typed variable together with a statement of what feature of the system under consideration it represents. Two observables are regarded as equal if and only if their typed variables are equal, they model the same feature and, in that context, one takes a given value if and only if the other does. (Floridi & Sanders, 2004, p. 9)

0.95 CXLVI.

The consequence of allowing an observable to be undecidable is that some ingenuity is required to prove that an implementation meets a specification phrased in terms of its observables: no program can possibly achieve that task in general. (Floridi & Sanders, 2004, p. 30)

0.95 CXLVII.

An artifact can be thought of as a meeting point an "interface" in today's terms between an "inner" environment, the substance and organization of the artifact itself, and an "outer" environment, the surroundings in which it operates. (H. A. Simon, 1996, p. 6)

0.95 CXLVIII.

Symbol systems are almost the quintessential artifacts, for adaptivity to an environment is their whole *raison d'être*. They are goal-seeking, information-processing systems, usually enlisted in the service of the larger systems in which they are incorporated. (H. A. Simon, 1996, p. 22)

0.95 CXLIX.

Critical dynamical systems maximize the correlated behavior of variables in systems of many variables. Also critical dynamical systems appear to maximize the diversity of what they can “do” as they become larger. This raises the fascinating but unproven possibility that, due to natural selection, life achieves a maximization of the product of total work done multiplied by the diversity of work done by being dynamically critical. Then cells would be maximally efficient in carrying out the widest variety of tasks with the maximum total work accomplished, given energy resources available. (S. A. Kauffman, 2008)

0.95 CL.

The basic idea in this procedure is very simple. Instead of running the incoming data into a single machine, the same information is simultaneously fed into a number of identical machines, and the result that comes out of a majority of these machines is assumed to be true. It must be shown that this technique can really be used to control error. (von Neumann, 1956/1987b, p. 572)

0.95 CLI.

In studying the action of the Analytical Engine, we find that the peculiar and independent nature of the considerations which in all mathematical analysis belong to *operations*, as distinguished from *the objects operated upon* and from the *results* of the operations performed upon those objects, is very strikingly defined and separated. (Notas de Lovelace en Menabrea, 1843, p. 69. Énfasis en el original)

0.95 CLII.

It may be desirable to explain, that by the word *operation*, we mean *any process which alters the mutual relation of two or more things*, be this relation of what kind it may. This is the most general definition, and would include all subjects in the universe. In abstract mathematics, of course, operations alter those particular relations which are involved in the considerations of number and space, and the *results* of operations are those peculiar results which correspond to the nature of the subjects of operation. But the science of operations, as derived from mathematics more especially, is a science of itself, and has its own abstract truth and value; just as logic has its own peculiar

truth and value, independently of the subjects to which we may apply its reasonings and processes. (Notas de Lovelace en Menabrea, 1843, p. 69. Énfasis en el original)

0.95 CLIII.

All of this, however, constitutes only a small fragment of the more general concept of identification of analogous geometrical entities. This, in turn, is only a microscopic piece of the general concept of analogy. Nobody would attempt to describe and define within any practical amount of space the general concept of analogy which dominates our interpretation of vision. There is no basis for saying whether such an enterprise would require thousands or millions or altogether impractical numbers of volumes. Now it is perfectly possible that the simplest and only practical way actually to say what constitutes a visual analogy consists in giving a description of the connections of the visual brain. We are dealing here with parts of logics with which we have practically no past experience. The order of complexity is out of all proportion to anything we have ever known. We have no right to assume that the logical notations and procedures used in the past are suited to this part of the subject. It is not at all certain that in this domain a real object might not constitute the simplest description of itself, that is, any attempt to describe it by the usual literary or formal-logical method may lead to something less manageable and more involved. In fact, some results in modern logic would tend to indicate that phenomena like this have to be expected when we come to really complicated entities. It is, therefore, not at all unlikely that it is futile to look for a precise logical concept, that is, for a precise verbal description, of "visual analogy." It is possible that the connection pattern of the visual brain itself is the simplest logical expression or definition of this principle. (von Neumann, 1987a, p. 414)

0.95 CLIV.

Thus the logic of automata will differ from the present system of formal logic in two relevant respects. 1. The actual length of "chains of reasoning," that is, of the chains of operations, will have to be considered. 2. The operations of logic (syllogisms, conjunctions, disjunctions, negations, etc., that is, in the terminology that is customary for automata, various forms of gating, coincidence, anti-coincidence, blocking, etc., actions) will all have to be treated by procedures which allow exceptions (malfunctions) with low but non-zero probabilities. All of this will lead to theories which are much less rigidly of an all-or-none nature than past and present formal logic. They will be of a much less combinatorial, and much more analytical, character. In fact, there are numerous indications to make us believe that this new system of formal logic will move closer to another discipline which has been little linked in the past with logic. This is thermodynamics, primarily in the form it was received from Boltzmann, and is that part of theoretical physics which comes nearest in some of its aspects to manipulating and measuring information. (von Neumann, 1987a, p. 407)

Referencias

- Abelson, H., Sussman, G. J. & Sussman, J. (1996, 1 de septiembre). *Structure and Interpretation of Computer Programs - 2nd Edition* (2nd ed.). The MIT Press.
- Abraham, T. H. (2002). (Physio)logical circuits: The intellectual origins of the McCulloch–Pitts neural networks. *Journal of the History of the Behavioral Sciences*, 38(1), 3-25. <https://doi.org/10/cb36t9>
_eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/jhbs.1094>
- Ackley, D. H. (2013). Beyond Efficiency. *Communications of the ACM*, 56(10), 38-40. <https://doi.org/10.1145/2505340>
- Ackley, D. H., Hinton, G. E. & Sejnowski, T. J. (1985). A learning algorithm for boltzmann machines. *Cognitive Science*, 9(1), 147-169. [https://doi.org/10.1016/S0364-0213\(85\)80012-4](https://doi.org/10.1016/S0364-0213(85)80012-4)
- Ackley, D. H. & Williams, L. R. (2011). Homeostatic Architectures for Robust Spatial Computing. *2011 Fifth IEEE Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems Workshops*, 91-96. <https://doi.org/10.1109/SASOW.2011.18>
- Alexander, J. M. (2021). Evolutionary Game Theory. En E. N. Zalta (Ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Summer 2021). Metaphysics Research Lab, Stanford University. <https://plato.stanford.edu/archives/sum2021/entries/game-evolutionary/>
- Alexander, S. (1914). *The basis of realism*. Oxford university press. <http://archive.org/details/basisofrealism00alexrich>
- Alexander, S. (1920). *Space, time, and deity: The Gifford lectures at Glasgow, 1916-1918*. Macmillan and Co., Limited. <http://archive.org/details/spacetime deity00alex>
- Alon, U. (2019). *An Introduction to Systems Biology: Design Principles of Biological Circuits* (Second edition). CRC Press.
- Anderson, P. W. (1972). More Is Different. *Science*, 177(4047), 393-396. <https://doi.org/10/c7tv4m>
- Anderson, P. W. (2011, septiembre). *More and Different: Notes from a Thoughtful Curmudgeon*. WORLD SCIENTIFIC. <https://doi.org/10.1142/8141>
- Andrew Cameron, R. & Davidson, E. H. (2007). A basal deuterostome genome viewed as a natural experiment. *Gene*, 406(1), 1-7. <https://doi.org/10/bn97cr>

- Ansari, A., Berendzen, J., Bowne, S. F., Frauenfelder, H., Iben, I. E., Sauke, T. B., Shyamsunder, E. & Young, R. D. (1985). Protein states and proteinquakes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 82(15), 5000-5004. <https://doi.org/10.1073/pnas.82.15.5000>
- Antoine-Mahut, D. (2016). *Descartes Treatise on Man and Its Reception*. Springer Berlin Heidelberg.
- Appel, K. & Haken, W. (1977). Every Planar Map Is Four Colorable. Part I: Discharging. *Illinois Journal of Mathematics*, 21(3). <https://doi.org/10/gns9nv>
- Ashby, W. R. (1949). The Electronic Brain [magazine]. *Radio Electronics, Special Television Number*, 77-80.
- Ashby, W. R. (1952). *Design for a Brain*. London: Chapman & Hall.
- Ashby, W. R. (1956). *An Introduction to Cybernetics*. New York: J. Wiley.
- Ashby, W. R. (1960). *Introducción a La Cibernética* (J. Santos, Trad.; 1.^a ed.). Nueva Visión. (Fecha inicial de publicación 1956)
- Ashby, W. R. (1962). Principles of the Self-Organizing System. En H. V. Foerster & G. W. Z. Jr (Eds.), *Principles of Self-Organization: Transactions of the University of Illinois Symposium* (pp. 255-278). Pergamon Press.
- Ashby, W. R. (1965). *Proyecto para un cerebro: El origen del comportamiento adaptivo* (V. Sánchez de Zavala, Trad.). Tecnos. (Fecha inicial de publicación 1960)
- Ashby, W. R. (1981, diciembre). Analisis of the system to be modeled. *Mechanisms of Intelligence: Ashby's Writings on Cybernetics* (pp. 335-355). Intersystems Publications. (Fecha inicial de publicación 1970)
- Ashby, W. R. (2013, 21 de noviembre). Introductory remarks at panel discussion. En G. J. Klir (Ed.), *Facets of Systems Science* (pp. 591-594). Springer Science & Business Media. (Fecha inicial de publicación 1964)
- Aspray, W. (, University Of Colorado Boulder). (1990). *John von neumann and the origins of modern computing*. OCLC: 1026774263.
- Axelrod, R. (1984). *The Evolution Of Cooperation*. Basic Books.
- Babbage, C. (1864). *Passages from the Life of a Philosopher*. <http://archive.org/details/passagesfromlife03char>
- Babbage, C. & Babbage, H. P. (2010). *Babbage's Calculating Engines Being a Collection of Papers Relating to them ; their History and Construction*. Cambridge University Press OCLC: 939048842.
- Bäck, A. (2014). *Aristotle's Theory of Abstraction* (Vol. 73). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-04759-1>
- Bak, P. & Paczuski, M. (1995). Complexity, contingency, and criticality. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 92(15), 6689-6696. <http://www.pnas.org/content/92/15/6689>

- Bak, P. (1996). *How nature works: The science of self-organized criticality* (1. softcover printing). Copernicus
 OCLC: 246588332.
- Bak, P., Tang, C. & Wiesenfeld, K. (1987). Self-Organized Criticality: An Explanation of the 1/f Noise. *Physical Review Letters*, 59(4), 381-384. <https://doi.org/10/bh9v3d>
- Bakshi, U. A. (2020, 1 de diciembre). *Control System Theory*. Technical Publications.
- Barabási, A.-L. (2016). *Network Science*. Cambridge University Press
 OCLC: ocn910772793.
- Bechtel, W. & Bollhagen, A. (2021). Active biological mechanisms: Transforming energy into motion in molecular motors. *Synthese*, 199(5), 12705-12729. <https://doi.org/10/gpcc4x>
- Bechtel, W. & Richardson, R. C. (2010, 6 de agosto). *Discovering complexity: Decomposition and localization as strategies in scientific research* (Reissue edition). The MIT Press. (Fecha inicial de publicación 1993)
- Bedau, M. A. (2008, 28 de marzo). Downward Causation and Autonomy in Weak Emergence. En M. A. Bedau & P. Humphreys (Eds.), *Emergence: Contemporary Readings in Philosophy and Science* (1.ª ed., pp. 155-188). A Bradford Book.
- Bedau, M. A. & Humphreys, P. (Eds.). (2008, 28 de marzo). *Emergence: Contemporary Readings in Philosophy and Science* (1.ª ed.). A Bradford Book.
- Bergson, H. (1963). La evolución creadora. *Obras escogidas* (pp. 433-755). Aguilar. <http://archive.org/details/bergson-henri.-la-evolucion-creadora-1963> (Fecha inicial de publicación 1907)
- Berlekamp, E. R., Conway, J. H. & Guy, R. K. (1982). *Winning Ways, for Your Mathematical Plays*. Academic Press.
- Bernard, C. (1879). *Leçons sur les phénomènes de la vie, communs aux animaux et aux végétaux* (Vol. 2). <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k6299009p>
- Bernard, C. (2005). *Introducción al estudio de la medicina experimental*. Grupo Planeta (GBS). (Fecha inicial de publicación 1865)
- Bertalanffy, L. (1955). General System Theory. *Main Currents in Modern Thought*, 11(4), 75-83. https://archive.org/details/sim_main-currents-in-modern-thought_1955-03_11_4/mode/2up
- Bichat, X. (1809). *Physiological researches upon life and death*. Smith & Maxwell. (Fecha inicial de publicación 1800)
- Boccara, N. (2010). *Modeling complex systems* (2. ed., softcover reprint of the hardcover 2. ed. 2010). Springer
 OCLC: 700441595.
- Branca, M. I. (2021). *Alcances y Límites de La Explicación Mecanicista En Psicología Cognitiva y Neurociencia*. Facultad de Psicología, Univesidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina.
- Brenner, S. (2012). Life's code script. *Nature*, 482(7386), 461-461. <https://doi.org/10/gns9f9>

- Brentari, C. (2015, 18 de febrero). *Jakob von Uexküll: The Discovery of the Umwelt between Biosemiotics and Theoretical Biology* (2015 edition). Springer.
- Broad, C. D. (1925). *The mind and its place in nature*. Routledge And Kegan Paul Ltd. <http://archive.org/details/dli.bengal.10689.8832>
- Brooks, D. S., DiFrisco, J. & Wimsatt, W. C. (2021, 24 de agosto). *Levels of Organization in the Biological Sciences*. MIT Press.
- Burr, H. S. & Northrop, F. S. C. (1939). Evidence for the Existence of an Electro-Dynamic Field in Living Organisms. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 25(6), 284-288. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1077770/>
- Butterfield, J. (2014, 1 de enero). *Reduction, Emergence, and Renormalization*. The Journal of Philosophy. <https://doi.org/10.5840/jphil201411111>
- Butterfield, J. & Bouatta, N. (2015). Renormalization for Philosophers. En T. Bigaj & C. Wüthrich (Eds.), *Metaphysics in Contemporary Physics* (pp. 437-485). Brill.
- Cadwallader, T. C. (1975). Peirce as an Experimental Psychologist. *Transactions of the Charles S. Peirce Society*, 11(3), 167-186. <https://www.jstor.org/stable/40319739>
- Campbell-Kelly, M., Campbell-Kelly, P. E. o. C. S. M., Croarken, M., Croarken, V. F. D. o. C. S. M., Flood, G. P. o. G. R., Flood, R. & Robson, E. (2003, 2 de octubre). *The History of Mathematical Tables: From Sumer to Spreadsheets*. OUP Oxford.
- Carnap, R. (1995). *The Unity of science* (M. Black, Trad.; Repr. of the 1934 ed). Thoemmes. (Fecha inicial de publicación 1934)
- Carnota, R. & Rodriguez, R. O. (2015, 1 de noviembre). Fulgor y Ocaso de CEUNS. Una apuesta a la tecnología nacional en el Sur de Argentina. En L. G. R. Leal & R. Carnota (Eds.), *Historias de las TIC en América Latina y el Caribe: Inicios, desarrollos y rupturas* (pp. 127-146). Fundación Telefónica.
- Cartwright, N. (1983). *How the Laws of Nature Lie*. Oxford: Oxford University Press.
- Cartwright, N. (1999). *The Dappled World: A Study of the Boundaries of Science*. Cambridge University Press.
- Cassini, A. & Redmond, J. (2021). *Models and Idealizations in Science: Artifactual and Fictional Approaches*
OCLC: 1256409526.
- Chaitin, G. J. (2007). *Thinking about Gödel and Turing: Essays on Complexity 1970-2007*. World Scientific.
- Churchland, P. M. (2005). Functionalism at Forty: A Critical Retrospective. *The Journal of Philosophy*, 102(1), 33-50. <https://doi.org/10/f3f9zn>
- Clausius, R. (1850). Ueber die bewegende Kraft der Wärme und die Gesetze, welche sich daraus für die Wärmelehre selbst ableiten lassen. *Annalen der Physik*, 155(4), 500-524. <https://doi.org/10/b9tjn3>
_eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/andp.18501550403>

- Clayton, P. & Davies, P. (2008, 15 de mayo). *The Re-Emergence of Emergence*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199544318.001.0001>
- Codd, E. F. (1968). *Cellular automata*. Academic Press
OCLC: 299844930.
- Coiffard, B., Diallo, A. B., Mezouar, S., Leone, M. & Mege, J.-L. (2021). A Tangled Three-some: Circadian Rhythm, Body Temperature Variations, and the Immune System. *Biology*, 10(1), 65. <https://doi.org/10/ghxjf5>
- Colquhoun, D. & Sakmann, B. (1998). From Muscle Endplate to Brain Synapses: A Short History of Synapses and Agonist-Activated Ion Channels. *Neuron*, 20(3), 381-387. <https://doi.org/10/cwwptj>
- Conant, R. C. & Ashby, W. R. (1970). Every Good Regulator of a System Must Be a Model of That System. *International Journal of Systems Science*, 1(2), 89-97. <https://doi.org/10/bbgr9b>
- Cooper, S. B. & van Leeuwen, J. (Eds.). (2013, 17 de mayo). *Alan Turing: His Work and Impact* (1 edition). Elsevier Science.
- Corradini, A. & O'Connor, T. (Eds.). (2010). *Emergence in science and philosophy*. Routledge
OCLC: 845648150.
- Costanzo, M., Baryshnikova, A., Bellay, J., Kim, Y., Spear, E. D., Sevier, C. S., Ding, H., Koh, J. L., Toufighi, K., Mostafavi, S., Prinz, J., St. Onge, R. P., VanderSluis, B., Makhnevych, T., Vizeacoumar, F. J., Alizadeh, S., Bahr, S., Brost, R. L., Chen, Y., ... Boone, C. (2010). The Genetic Landscape of a Cell. *Science (New York, N.Y.)*, 327(5964), 425-431. <https://doi.org/10/bvs256>
- Craver, C. F. (2007, 7 de junio). *Explaining the Brain: Mechanisms and the Mosaic Unity of Neuroscience*. Clarendon Press.
- Cuffaro, M. E. & Fletcher, S. C. (2018). *Physical Perspectives on Computation, Computational Perspectives on Physics*. Cambridge University Press.
- Culotta, C. A. (1972). Respiration and the Lavoisier Tradition: Theory and Modification, 1777-1850. *Transactions of the American Philosophical Society*, 62(3), 3-41. <https://doi.org/10/cxzgxp>
- Dahl, O. J., Dijkstra, E. W. & Hoare, C. A. R. (Eds.). (1972). *Structured Programming*. Academic Press Ltd.
- D'Andrea, A. C. (2019). *Filosofía de La Ciencia Computacional: Análisis Histórico-Conceptual de La Noción de Computación* (Tesis de Doctorado en Filosofía). Universidad Nacional de Córdoba.
- Darden, L. (2016). Reductionism in Biology. *eLS* (pp. 1-7). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0003356.pub2>
_eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9780470015902.a0003356.pub2>
- Darwin, C. (1859). *On the Origin of Species*. John Murray, Albemarle St.
- Darwin, C. (1871, 1 de febrero). *Carta a Joseph Dalton Hooker*. <https://www.darwinproject.ac.uk/letter/DCP-LETT-7471.xml>

- Davidson, D. (1980). Mental Events. *Essays on Actions and Events* (pp. 201-224). Clarendon Press. (Fecha inicial de publicación 1970)
- Davidson, E. H., Rast, J. P., Oliveri, P., Ransick, A., Calestani, C., Yuh, C.-H., Minokawa, T., Amore, G., Hinman, V., Arenas-Mena, C., Otim, O., Brown, C. T., Livi, C. B., Lee, P. Y., Revilla, R., Rust, A. G., jun Pan, Z., Schilstra, M. J., Clarke, P. J. C., ... Bolouri, H. (2002). A Genomic Regulatory Network for Development. *Science*, 295(5560), 1669-1678. <https://doi.org/10/bkd3vn>
- Davis, M. (2000). *The Universal Computer: The Road from Leibniz to Turing*. Norton.
- Dennett, D. C. (1989, 6 de marzo). *The Intentional Stance*. MIT Press.
- Dennett, D. C. (1996, 26 de septiembre). *Darwin's Dangerous Idea: Evolution and the Meanings of Life*. Penguin Books Limited.
- Denning, P. J. & Tedre, M. (2019). *Computational Thinking*. The MIT Press.
- Derrida, B. & Flyvbjerg, H. (1986). Multivalley structure in Kauffman's model: Analogy with spin glasses. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 19(16), L1003-L1008. <https://doi.org/10.1088/0305-4470/19/16/010>
- Derrida, B. & Stauffer, D. (1986). Phase Transitions in Two-Dimensional Kauffman Cellular Automata. *Europhysics Letters (EPL)*, 2(10), 739-745. <https://doi.org/2020031214213306>
- Descartes, R. (1637). *Discours de la méthode pour bien conduire sa raison et chercher la vérité dans les sciences , plus La dioptrique, Les météores et La géométrie qui sont des essais de cette méthode*. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b86069594>
- Descartes, R. (1664). *Le Monde de M. Descartes, ou le Traité de la lumière et des autres principaux objets des sens*. M. Bobin et N. Le Gras.
- Descartes, R. (1980). *Tratado del hombre* (G. Quintas, Trad.). Editora Nacional. (Fecha inicial de publicación 1664)
- Deutsch, A. & Dormann, S. (2017). *Cellular Automaton Modeling of Biological Pattern Formation: Characterization, Examples, and Analysis*
OCLC: 1030605907.
- Dijksterhuis, E. J. (1969). *The mechanization of the world picture*. Oxford University Press. (Fecha inicial de publicación 1950)
- Dijkstra, E. W. (1989). On the Cruelty of Really Teaching Computing Science. *Communications of the ACM*, 32(12), 1398-1404.
- Dirac, P. A. M. (1929). Quantum Mechanics of Many-Electron Systems. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 123(792), 714-733. <https://doi.org/10.1098/rspa.1929.0094>
- Domingo, E., Sabo, D., Taniguchi, T. & Weissmann, C. (1978). Nucleotide sequence heterogeneity of an RNA phage population. *Cell*, 13(4), 735-744. <https://doi.org/10/ffmxkx>
- Doyle, D. A., Cabral, J. M., Pfuetzner, R. A., Kuo, A., Gulbis, J. M., Cohen, S. L., Chait, B. T. & MacKinnon, R. (1998). The Structure of the Potassium Channel: Molecular Basis of K⁺ Conduction and Selectivity. *Science*, 280(5360), 69-77. <https://doi.org/10/ff8wqd>
- Dretske, F. (1981). *Knowledge and the Flow of Information*. MIT Press.

- Driesch, H. (1908). *The science and philosophy of the organism*. London A. and C. Black. <http://archive.org/details/thescienceandphi02drieuoft>
- Dueñas-Díez, M. & Pérez-Mercader, J. (2019). How Chemistry Computes: Language Recognition by Non-Biochemical Chemical Automata. From Finite Automata to Turing Machines. *iScience*, 19, 514-526. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2019.08.007>
- Duhem, P. (2003, 22 de abril). *La teoría física: su objetivo y su estructura* (M. P. Irazazábal, Trad.; Edición: 1). Herder Editorial. (Fecha inicial de publicación 1906)
- Dumas, H. S. (2014, abril). *The KAM Story: A Friendly Introduction to the Content, History, and Significance of Classical Kolmogorov–Arnold–Moser Theory*. WORLD SCIENTIFIC. <https://doi.org/10.1142/8955>
- Dupuy, J.-P. (2009, 29 de mayo). *On the Origins of Cognitive Science: The Mechanization of the Mind*. Mit Press.
- Duwell, A. (2021). *Physics and computation*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009104975>
- Dyson, F. (2013). A Walk through Johnny von Neumann’s Garden. *Notices of the AMs*, 60(2). <http://www.ams.org/notices/201302/rnoti-p154.pdf>
- Easley, D. & Kleinberg, J. (2010, 19 de julio). *Networks, Crowds, and Markets: Reasoning about a Highly Connected World*. Cambridge University Press.
- Eckert, W. J. (1940). *Punched Card Methods in Scientific Computation*. Thomas J. Watson Astronomical Computing Bureau, Columbia University.
- Edlund, J. A. & Adami, C. (2004). Evolution of Robustness in Digital Organisms. *Artificial Life*, 10(2), 167-179. <https://doi.org/10/b5zq3w>
- Eigen, M. (1971). Selforganization of matter and the evolution of biological macromolecules. *Die Naturwissenschaften*, 58(10), 465-523. <https://doi.org/10/bgk3gm>
- Eigen, M. & Schuster, P. (1979). *The hypercycle: A principle of natural self-organization*.
- Einstein, A. (1918). Motive des Forschens [Principles of research]. *Zu Max Plancks sechzigstem Geburtstag. Ansprachen, gehalten am 26. April 1918 in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, 29-32.
- Ellis, G. F. R., Noble, D. & O’Connor, T. (2012). Top-down Causation: An Integrating Theme within and across the Sciences? *Interface Focus*, 2(1), 1-3. <https://doi.org/10/bnz7vm>
- Elsasser, W. M. (1958). *The physical foundation of biology an analytical study*. Pergamon Press. <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780080090924>
OCLC: 1151216948
- Escher, M. C. (1948, febrero). *Drawing Hands*. <https://mcescher.com/gallery/back-in-holland/>
- Farley, B. & Clark, W. (1954). Simulation of Self-Organizing Systems by Digital Computer. *Transactions of the IRE Professional Group on Information Theory*, 4(4), 76-84. <https://doi.org/10/dv77qx>

- Farmer, D., Toffoli, T. & Wolfram, S. (Eds.). (1984). *Cellular Automata: Proceedings of an Interdisciplinary Workshop, Los Alamos, New Mexico 87545, USA, March 7-11, 1983*. North-Holland Physics Pub. ; Sole distributors for the USA and Canada, Elsevier Science Pub. Co.
- Farmer, J. D., Kauffman, S. A. & Packard, N. H. (1986). Autocatalytic Replication of Polymers. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 22(1-3), 50-67. <https://doi.org/10/ffzwm9>
- Farmer, J. D. & Packard, N. H. (1986). Evolution, games, and learning: Models for adaptation in machines and nature. An introduction to the Proceedings of the CNLS Conference, Los Alamos, May 1985. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 22(1), vii-xii. <https://doi.org/10/dvw7jk>
- Feigenbaum, M. J. (1978). Quantitative Universality for a Class of Nonlinear Transformations. *Journal of statistical physics*, 19(1), 25-52. <https://doi.org/10/fb92pj>
- Feigenbaum, M. J. (1979). The universal metric properties of nonlinear transformations. *Journal of Statistical Physics*, 21(6), 669-706. <https://doi.org/10/c9zmfh>
- Feynman, R. P. (1967). *The Character of Physical Law* (Vol. 66). MIT press.
- Figueras, J.-L., Haro, A. & Luque, A. (2017). Rigorous computer-assisted application of KAM theory: A modern approach. *Foundations of Computational Mathematics*, 17(5), 1123-1193. <https://doi.org/10/gb4mw4>
- Fine, A. (1993). Fictionalism. *Midwest Studies in Philosophy*, 18(1), 1-18. <https://doi.org/10/frz4mn>
- Floridi, L. & Sanders, J. W. (2004). The Method of Abstraction. *Yearbook of the artificial. Nature, culture and technology. Models in contemporary sciences*, 177-220.
- Fodor, J. A. (1974). Special Sciences (Or: The Disunity of Science as a Working Hypothesis). *Synthese*, 28(2), 97-115. <https://doi.org/10/fsx24c>
- Fraser, D. (2020). The development of renormalization group methods for particle physics: Formal analogies between classical statistical mechanics and quantum field theory. *Synthese*, 197(7), 3027-3063. <https://doi.org/10/gns9kh>
- Fuentes, M. (2020, 2 de agosto). *Dinámica científica y medidas de complejidad*. SADAF.
- Fuentes, M. A., Lavín, C., Contreras-Huerta, L. S., Miguel, H. & Rosales Jubal, E. (2014). Stochastic Model Predicts Evolving Preferences in the Iowa Gambling Task. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 8. <https://doi.org/10.3389/fncom.2014.00167>
- Fuentes, M. A. (2015). METHODS AND METHODOLOGIES OF COMPLEX SYSTEMS1. *Modeling Complex Systems for Public Policies*.
- Fuentes, M. A. & Miguel, H. (2016). Paisajes dinámicos en la modelización de la comunicación y el aprendizaje. <https://doi.org/10/gns9hp>
- Fukushima, K. (1975). Cognitron: A self-organizing multilayered neural network. *Biological Cybernetics*, 20(3-4), 121-136. <https://doi.org/10/dvmvqp>
- Fukushima, K. (1980). Neocognitron: A self-organizing neural network model for a mechanism of pattern recognition unaffected by shift in position. *Biological Cybernetics*, 36(4), 193-202. <https://doi.org/10/fhrjjv>

- Furber, S. (2016). Large-scale neuromorphic computing systems. *Journal of Neural Engineering*, 13(5), 051001. <https://doi.org/10.1088/1741-2560/13/5/051001>
- Fuseya, Y., Katsuno, H., Behnia, K. & Kapitulnik, A. (2021). Nanoscale Turing patterns in a bismuth monolayer. *Nature Physics*, 17(9), 1031-1036. <https://doi.org/10.1038/s41567-021-01288-y>
- Galison, P. (1996). Computer Simulations and the Trading Zone. En P. Galison & D. J. Stump (Eds.), *The Disunity of Science: Boundaries, Contexts, and Power* (pp. 118-157). Stanford University Press.
- Galison, P. (1999). Trading Zone: Coordinating Action and Belief (1998 Abridgment). En M. Biagioli (Ed.), *The Science Studies Reader* (pp. 137-160). Routledge.
- Gelfert, A. (2016). *How to Do Science with Models: A Philosophical Primer*. Springer.
- Gelfert, A. (2018). Models in Search of Targets: Exploratory Modelling and the Case of Turing Patterns. En A. Christian, D. Hommen, N. Retzlaff & G. Schurz (Eds.), *Philosophy of Science: Between the Natural Sciences, the Social Sciences, and the Humanities* (pp. 245-269). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72577-2_14
- German, J. (s.f.). *History | Santa Fe Institute*. <https://www.santafe.edu/about/history>
- Gibb, S., Hendry, R. & Lancaster, T. (2018). *The Routledge Handbook of Philosophy of Emergence*. Routledge.
- Giloi, W. (April-June/1997). Konrad Zuse's Plankalkül: The First High-Level, "Non von Neumann" Programming Language. *IEEE Annals of the History of Computing*, 19(2), 17-24. <https://doi.org/10/b5fgqx>
- Glennan, S. (2002). Rethinking Mechanistic Explanation. *Philosophy of Science*, 69(S3), S342-S353. <https://doi.org/10/cv3rvs>
- Glennan, S. (2017). *The New Mechanical Philosophy*. Oxford University Press.
- Gödel, K. (1946). Remarks Before the Princeton Bicentennial Conference on Problems in Mathematics. En S. Feferman, J. Dawson & S. Kleene (Eds.), *Kurt Gödel: Collected Works Vol. Ii* (pp. 150-153). Oxford University Press.
- Gol'danskiĭ, V. I., Krupianskiĭ, I. F. & Flerov, V. N. (1983). [Tunneling between quasi-degenerate conformational states and the low-temperature thermal capacity of biopolymers. A glass-like protein model]. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 272(4), 978-981.
- Goldstine, H. & von Neumann, J. (1963). On the Principles of Large-Scale Computing Machines. En W. Aspray & A. W. Burks (Eds.), *Papers of John von Neumann on Computing and Computer Theory*. MIT Press. (Fecha inicial de publicación 1945)
- Gontier, N. (2016). Symbiogenesis, History Of. En R. Kliman (Ed.), *Encyclopedia of Evolutionary Biology* (pp. 261-271).
- Gould, S. J., Lewontin, R. C., Maynard Smith, J. & Holliday, R. (1979). The Spandrels of San Marco and the Panglossian Paradigm: A Critique of the Adaptationist Programme.

- Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences*, 205(1161), 581-598. <https://doi.org/10/fgb62p>
- Gould, S. J. & Vrba, E. S. (1982). Exaptation: A Missing Term in the Science of Form. *Paleobiology*, 8(1), 4-15. <https://doi.org/10/gcjqmc>
- Green, S., Erban, M., Scholl, R., Jones, N., Brigandt, I. & Bechtel, W. (2018). Network Analyses in Systems Biology: New Strategies for Dealing with Biological Complexity. *Synthese*, 195(4), 1751-1777. <https://doi.org/10/ghtbh9>
- Grier, D. A. (2005). *When Computers Were Human*. Princeton University Press.
- Grodzins, M. (1957). Metropolitan Segregation. *Scientific American*, 197(4), 33-41. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican1057-33>
- Hacking, I. (1983). *Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science*. Cambridge University Press.
- Hacking, I. (1996). *Representar e intervenir*. Paidós Mexicana
OCLC: 1097220742.
- Harbecke, J. & Shagrir, O. (2019). The role of the environment in computational explanations. *European Journal for Philosophy of Science*, 9(3), 37. <https://doi.org/10/gmvhmm>
- Hardy, G. H. (2019). *An Annotated Mathematician's Apology*. http://archive.org/details/hardy_annotated (Fecha inicial de publicación 1940)
- Harrington, A. (2009). *Reenchanted science: Holism in German culture from Wilhelm II to Hitler* (2. print, and 1. paperback print, [Nachdr.]). Princeton Univ. Press
OCLC: 554237489.
- Hartmann, S. (2001). Effective Field Theories, Reductionism and Scientific Explanation. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 32(2), 267-304. <https://doi.org/10/dwq9nx>
- Hatfield, G. (2008). Animals. En J. Broughton & J. Carriero (Eds.), *Companion to Descartes* (pp. 404-425). Blackwell.
- Hatfield, G. (2012). Mechanizing the Sensitive Soul. En G. Manning (Ed.), *Matter and Form in Early Modern Science and Philosophy* (pp. 151-86). Brill.
- Hatfield, G. C. (1991). *The Natural and the Normative: Theories of Spatial Perception from Kant to Helmholtz*. MIT Press.
- Hawkins, S. L. (2011). William James, Gustav Fechner, and Early Psychophysics. *Frontiers in Physiology*, 2, 68. <https://doi.org/10/brftnm>
- Hayek, F. A. (1964). The Theory of Complex Phenomena. En M. Bunge (Ed.), *The Critical Approach to Science and Philosophy: Essays in Honor of Karl R. Popper*. The Free Press of Glencoe, Inc.
- Hayek, F. A. (1994). The Theory of Complex Phenomena. En M. Martin & L. C. McIntyre (Eds.), *Readings in the Philosophy of Social Science* (pp. 55-70). MIT Press. (Fecha inicial de publicación 1964)

- Hayek, F. A. v. (A. (1974). *The pretence of knowledge*. NobelPrize.org. <https://www.nobelprize.org/prizes/economic-sciences/1974/hayek/lecture/>
- Hayek, F. A. v. (A. (1984). The origins and effects of our morals: A problem for science. En Internet Archive (**typecollaborator**), *The essence of Hayek* (pp. 318-330). Stanford, Calif. : Hoover Institution Press, Stanford University. <http://archive.org/details/essenceofhayek0000haye>
- Heidelberger, M. (2004). *Nature from within: Gustav Theodor Fechner and his psychophysical worldview*. University of Pittsburgh Press.
- Heims, S. J. (1980, 1 de octubre). *John Von Neumann and Norbert Wiener: From Mathematics to the Technologies of Life and Death* (1st Edition edition). MIT Press.
- Herken, R. (1988). *The Universal Turing machine: A half-century survey*. Oxford University Press.
- Hertz, J., Krogh, A. & Palmer, R. G. (1991). *Introduction to the theory of neural computation*. Addison-Wesley Pub. Co.
- Hesse, M. B. (1961). *Forces and Fields: The Concept of Action at a Distance in the History of Physics*. Dover Publications.
- Hesse, M. B. (1964). Analogy and Confirmation Theory. *Philosophy of Science*, 31(4), 319-327. <https://doi.org/10/btqbw6>
- Hesse, M. B. (1965). Models and Analogies in Science. *British Journal for the Philosophy of Science*, 16(62).
- Hesse, M. B. (1966). *Models and Analogies in Science*. Ind.
- Hilbert, D. (1917). Axiomatisches Denken. *Mathematische Annalen*, 78(1-4), 405-415. <https://doi.org/10/d4hz3n>
- Hinton, G. E. & Sejnowski, T. J. (1983). Optimal Perceptual Inference. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 448, 448-453.
- Hodges, A. (1988). Alan Turing and the Turing Machine. En R. Herken (Ed.), *The Universal Turing machine: A half-century survey* (pp. 3-16). Oxford University Press.
- Hodges, A. (2004). Alan Turing: The Logical and Physical Basis of Computing. <https://doi.org/10/gns9gg>
- Hodges, A. & Hofstadter, D. R. (2014). *Alan Turing: The Enigma: The Book That Inspired the Film The Imitation Game*. Princeton University Press
OCLC: ocn881139563.
- Hodgkin, A. L. & Huxley, A. F. (1952). Currents carried by sodium and potassium ions through the membrane of the giant axon of *Loligo*. *The Journal of Physiology*, 116(4), 449-472. <https://doi.org/10/cqfx>
- Hoekstra, A. G., Kroc, J. & Sloot, P. M. A. (2010, 3 de junio). *Simulating Complex Systems by Cellular Automata*. Springer.
- Holland, J. H. (1995). *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity*. Addison Wesley.
- Holland, J. H. (1998). *Emergence: From Chaos to Order*. Oxford Univ. Press
OCLC: 40543653.

- Holmes, F. L. (1986). Claude Bernard, The "Milieu Intérieur", and Regulatory Physiology. *History and Philosophy of the Life Sciences*, 8(1), 3-25. <http://www.jstor.org/stable/23328847>
- Hopfield, J. J. (1982). Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 79(8), 2554-2558. <http://www.pnas.org/content/79/8/2554>
- Hoyningen-Huene, P. (2019). Reducción y emergencia (A. A. Ilcic, Trad.). *Epistemología e Historia de la Ciencia*, 3(2), 112-132. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/afjor/article/view/24120> (Fecha inicial de publicación 2007)
- Hubel, D. H. & Wiesel, T. N. (1959). Receptive fields of single neurones in the cat's striate cortex. *The Journal of Physiology*, 148, 574-591. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1959.sp006308>
- Hubel, D. H. & Wiesel, T. N. (1962). Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex. *The Journal of Physiology*, 160, 106-154. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1962.sp006837>
- Huggett, N. & Weingard, R. (1995). The renormalisation group and effective field theories. *Synthese*, 102(1), 171-194. <https://doi.org/10/d4k5bz>
- Hume, D. (1956). *An enquiry concerning human understanding*. A Gateway Edition. <http://archive.org/details/ezquiryconcernin010881mbp> (Fecha inicial de publicación 1748)
- Humphreys, P. (1990). Computer Simulations. *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, 1990, 497-506. <https://doi.org/10/gns9g4>
- Humphreys, P. (1997). Emergence, Not Supervenience. *Philosophy of Science*, 64, 337-345. <https://doi.org/10/c4ff4j>
- Humphreys, P. (2004). *Extending ourselves: Computational science, empiricism, and scientific method*. Oxford University Press.
- Humphreys, P. (2016). *Emergence: A Philosophical Account*. Oxford University Press.
- Hutchison, C. A., Chuang, R.-Y., Noskov, V. N., Assad-Garcia, N., Deerinck, T. J., Ellisman, M. H., Gill, J., Kannan, K., Karas, B. J., Ma, L., Pelletier, J. F., Qi, Z.-Q., Richter, R. A., Strychalski, E. A., Sun, L., Suzuki, Y., Tsvetanova, B., Wise, K. S., Smith, H. O., ... Venter, J. C. (2016). Design and Synthesis of a Minimal Bacterial Genome. *Science*, 351(6280), aad6253. <https://doi.org/10.1126/science.aad6253>
- Huxley, J. S. (1924). Constant Differential Growth-Ratios and their Significance. *Nature*, 114(2877), 895-896. <https://doi.org/10/bn52tw>
Bandiera_abtest: a Cg_type: Nature Research Journals Primary_atype: Research
- Huxley, T. (1874). On the Hypothesis That Animals Are Automata, and Its History. *Fortnightly Review*, 95, 555-80.
- Ilachinski, A. (2001). *Cellular Automata: A discrete universe*. World Scientific Publishing Company. <http://public.ebookcentral.proquest.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=5227771>
OCLC: 1020696897

- Ilcic, A. & García, P. (2020). Estrategias de modelización en Alan Turing: términos y conceptos de máquina. *Tópicos, Revista de Filosofía*, (58), 135-155. <https://doi.org/10/gns9k8>
- Ilcic, A. A. (2015). *Más Cerca Del Jaguar Que Del Quark: (Algunas) Implicaciones Filosóficas de Ciertos Sistemas Complejos* (Tesis de Licenciatura en Filosofía). Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina.
- Ilcic, A. A. (2018). El peso de la herencia: Bichat, Bernard y el “nuevo” mecanicismo. *Epistemología e Historia de la Ciencia*, 2(2), 51-69. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/afjor/article/view/18647>
- Ilcic, A. A. & Reynoso, J. (2018). Hacia Una Articulación de Modelos: El Caso de Big Data. En S. Chibeni, L. Zaterka, J. Ahumada & D. Letzen (Eds.), *Filosofía e Historia de La Ciencia En El Cono Sur* (pp. 181-192). Editorial de la Universidad Nacional de Córdoba.
- James, W. (1912). *Essays in Radical Empiricism*. Longmans, Green, and Company.
- Jennings, H. S. (1909). The work of J. von Uexkuell on the physiology of movements and behavior. *Journal of Comparative Neurology and Psychology*, 19(3), 313-336. <https://doi.org/10/d9bs4b>
- Jerne, N. K. (1994). Antibodies and Learning: Selection Versus Instruction. En H. Gutfreund & G. Toulouse (Eds.), *Biology and Computation: A Physicist's Choice* (pp. 278-283). World Scientific. (Fecha inicial de publicación 1967)
- Jumper, J., Evans, R., Pritzel, A., Green, T., Figurnov, M., Ronneberger, O., Tunyasuvunakool, K., Bates, R., Žídek, A., Potapenko, A., Bridgland, A., Meyer, C., Kohl, S. A. A., Ballard, A. J., Cowie, A., Romera-Paredes, B., Nikolov, S., Jain, R., Adler, J., ... Hassabis, D. (2021). Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold. *Nature*, 596(7873), 583-589. <https://doi.org/10/gk7nfp>
 Bandiera_abtest: a Cc_license_type: cc_by Cg_type: Nature Research Journals Primary_atype: Research Subject_term: Computational biophysics;Machine learning;Protein structure predictions;Structural biology Subject_term_id: computational-biophysics;machine-learning;protein-structure-predictions;structural-biology
- Junker, T. (1991). Heinrich Georg Bronn Und Die Entstehung Der Arten. *Sudhoffs Archiv*, 75(2), 180-208. <https://www.jstor.org/stable/20777346>
- Kadanoff, L. P. (1966). Scaling laws for ising models near T c. *Physics Physique Fizika*, 2(6), 263-272. <https://doi.org/10.1103/PhysicsPhysiqueFizika.2.263>
- Kauffman, S. (1996, 21 de noviembre). *At Home in the Universe: The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity* (Reprint). Oxford University Press, USA.
- Kauffman, S. & Levin, S. (1987). Towards a general theory of adaptive walks on rugged landscapes. *Journal of Theoretical Biology*, 128(1), 11-45. <https://doi.org/10/cfx8dg>
- Kauffman, S. A. (1993, 10 de junio). *The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution* (1st edition). Oxford University Press.
- Kauffman, S. A. (2000, 26 de octubre). *Investigations*. Oxford University Press.

- Kauffman, S. A. (2008). *Reinventing the Sacred: A New View of Science, Reason and Religion*. Basic Books
 OCLC: ocn191023778.
- Kauffman, S. A. (2019). *A World beyond Physics: The Emergence and Evolution of Life*. Oxford University Press.
- Kilpatrick, H. E. (2001). Complexity, spontaneous order, and Friedrich Hayek: Are spontaneous order and complexity essentially the same thing? *Complexity*, 6(4), 16-20. <https://doi.org/10/c894ng>
 _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/cplx.1035>
- Kim, J. (1999). Making sense of emergence. *Philosophical Studies*, 95(1), 3-36. <https://doi.org/10.1023/A:1004563122154>
- Klir, G. J. (2013, 21 de noviembre). *Facets of Systems Science*. Springer Science & Business Media.
- Knuth, D. E. (1985). Algorithmic Thinking and Mathematical Thinking. *The American Mathematical Monthly*, 92(3), 170. <https://doi.org/10/btc3jt>
- Knuth, D. E. (1984). Literate Programming. *The computer journal*, 27(2), 97-111. <https://doi.org/10.1093/comjnl/27.2.97>
- Knuth, D. E. (1997). *The Art of Computer Programming* (3rd ed). Addison-Wesley. (Fecha inicial de publicación 1973)
- Knuuttila, T. (2011). Modelling and Representing: An Artefactual Approach to Model-Based Representation. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 42(2), 262-271. <https://doi.org/10/d4994f>
- Kondo, S. & Miura, T. (2010). Reaction-Diffusion Model as a Framework for Understanding Biological Pattern Formation. *Science*, 329(5999), 1616-1620. <https://doi.org/10/bhd5cf>
- Krauss, G. (2014). *Biochemistry of Signal Transduction and Regulation*. Wiley-VCH. <https://doi.org/10.1002/9783527667475>
 OCLC: 870087288
- Kriegman, S., Blackiston, D., Levin, M. & Bongard, J. (2020). A scalable pipeline for designing reconfigurable organisms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(4), 1853-1859. <https://doi.org/10.1073/pnas.1910837117>
- Lamberti, P. W. & Rodríguez, V. R. (2007). Desarrollo Del Modelo Matemático de Hodgkin y Huxley En Neurociencias. *Electroneurobiología*, 15(7), 31-60.
- Lanford, O. E. (1982). A computer-assisted proof of the Feigenbaum conjectures. *Bulletin of the American Mathematical Society*, 6(3), 427-434. <https://doi.org/10/cxmfv6>
- Langton, C. G. (1990). Computation at the Edge of Chaos: Phase Transitions and Emergent Computation. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 42(1-3), 12-37. <https://doi.org/10/c4st4r>
- Langton, C. G. (1986). Studying Artificial Life with Cellular Automata. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 22(1-3), 120-149. <https://doi.org/10/dbcqcq>

- Laplace, P. S. (1812). *Théorie analytique des probabilités*. Paris, Ve. Courcier. <http://archive.org/details/thorieanalytiqu01lapgoog>
- Laughlin, R. B. & Pines, D. (2000). The Theory of Everything. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(1), 28-31. <https://doi.org/10/dwf8s6>
- Laughlin, R. B. (2005). *A Different Universe: Reinventing Physics from the Bottom Down*. Basic Books.
- Lawler, D. (2020). Los estándares como artefactos. *Filosofia Unisinos / Unisinos Journal of Philosophy*, 21(1), 24-35. <https://doi.org/10.4013/fsu.2020.211.03>
- Lawrence, N. (1950). Whitehead's Method of Extensive Abstraction. *Philosophy of Science*, 17(2), 142-163. <https://doi.org/10.1086/287075>
- LeCun, Y., Bengio, Y. & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436-444. <https://doi.org/10/bmqp>
- Lecun, Y., Boser, B., Denker, J. S., Henderson, D., Howard, R. E., Hubbard, W. & Jackel, L. (1989). Backpropagation applied to handwritten zip code recognition. *Neural Computation*, 1(4), 541-551. <https://doi.org/10.1162/neco.1989.1.4.541>
- Leibniz, G. W. (1882). *Die philosophischen Schriften* (C. Gerhardt, Ed.; Vol. 5). [Darmstadt] Georg Olms Verlagsbuchhandlung. <http://archive.org/details/diephilosophisc03gerhgoog>
- Levin, M. (2003). Bioelectromagnetics in morphogenesis. *Bioelectromagnetics*, 24(5), 295-315. <https://doi.org/10/bvnwr6>
_eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/bem.10104>
- Lewes, G. H. (1877). *The physical basis of mind ... Being the second series of Problems of life and mind* (Vol. 3). Trübner & co. <http://archive.org/details/physicalbasisofm00lewerich>
- Lewin, R. (1993). *Complexity: Life at the Edge of Chaos* (1st Collier Books ed). Collier Books ; Maxwell Macmillan Canada ; Maxwell Macmillan International.
- Lewis, D. (1969). *Convention: A Philosophical Study*. Harvard University Press.
- Lewontin; R. (2002). *The Triple Helix: Gene, Organism, and Environment by Richard Lewontin* (1 edition). Harvard University Press.
- Lewontin, R. C. & Levins, R. (1985). *The dialectical biologist*. Cambridge, Mass. : Harvard University Press. <http://archive.org/details/dialecticalbiolo0000levi>
- Lillian, P. E., Meyes, R. & Meisen, T. (2018, 13 de diciembre). *Ablation of a Robot's Brain: Neural Networks Under a Knife*. <http://arxiv.org/abs/1812.05687>
- Liow, L. H., Van Valen, L. & Stenseth, N. C. (2011). Red Queen: From populations to taxa and communities. *Trends in Ecology & Evolution*, 26(7), 349-358. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2011.03.016>
- Liskov, B. & Guttag, J. (1986). *Abstraction and Specification in Program Development*. MIT Press ; McGraw-Hill.
- Liskov, B. & Zilles, S. (1975). Specification Techniques for Data Abstractions. *IEEE Transactions on Software Engineering*. <https://doi.org/10/crbw3t>
- Lotka, A. J. (1925). *Elements of Physical Biology*. Williams and Wilkins Company. <http://archive.org/details/elementsofphysic017171mbp>

- Lotze, R. H. (1856). *Mikrokosmos: Ideen zur Naturgeschichte und Geschichte der Menschheit : Versuch einer Anthropologie*. S. Hirzel.
- Mach, E. (1948). *Conocimiento y error*. Espasa Calpe. (Fecha inicial de publicación 1905)
- Machamer, P., Darden, L. & Craver, C. F. (2000). Thinking About Mechanisms. *Philosophy of Science*, 67(1), 1-25. <https://doi.org/10.1086/392759>
- Mainzer, K. (2013, 9 de marzo). *Thinking in Complexity: The Complex Dynamics of Matter, Mind, and Mankind*. Springer Science & Business Media.
- Margenau, H. (1935). Methodology of Modern Physics. *Philosophy of Science*, 2(1), 48-72. <https://doi.org/10/c93krx>
- Margulis, L. (1970). *Origin of Eukaryotic Cells: Evidence and Research Implications for a Theory of the Origin and Evolution of Microbial, Plant, and Animal Cells on the Precambrian Earth*. Yale University Press.
- Marr, D. (2010). *Vision: A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information*. MIT Press. (Fecha inicial de publicación 1982)
OCLC: ocn472791457
- Maturana, H. R. & Varela, F. J. (1972). *De máquinas y seres vivos: autopoiesis, la organización de lo vivo*. Editorial Universitaria : Lumen
OCLC: 1089602996.
- Maxwell, J. C. (1868). I. On Governors. *Proceedings of the Royal Society of London*, (16), 270-283.
- Mayr, E. (1982). *The Growth of Biological Thought: Diversity, Evolution, and Inheritance*. Harvard Univ. Pr.
- Mayr, E. (1988). *Toward a new philosophy of biology: Observations of an evolutionist*. Harvard University Press.
- Mayr, E. (1996). The Autonomy of Biology: The Position of Biology Among the Sciences. *The Quarterly Review of Biology*, 71(1), 97-106. <https://doi.org/10/dvn4dd>
- Mayr, E. (1997). *This Is Biology: The Science of the Living World*. Harvard University Press.
- Mayr, E. (2004). The Autonomy of Biology. *Ludus Vitalis*, 12(21), 15-27.
- Mayr, O. (1970). *The origins of feedback control*. Cambridge, M.I.T. Press. http://archive.org/details/TheOrigins_00_Mayr
- Mayr, O. (1971). Maxwell and the Origins of Cybernetics. *Isis*, 62(4), 425-444. <https://doi.org/10/bpdzvn>
- McCulloch, W. S. & Pitts, W. (1943). A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity. *The bulletin of mathematical biophysics*, 5(4), 115-133. <https://doi.org/10/djsbj6>
- McMullin, E. (1985). Galilean Idealization. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 16(3), 247-273. <https://doi.org/10/b6fm57>
- Mead, C. A. (2002, 26 de julio). *Collective Electrodynamics: Quantum Foundations of Electromagnetism*. MIT Press.

- Menabrea, L. F. (1843). *Sketch of the Analytical Engine invented by Charles Babbage ... with notes by the translator. Extracted from the 'Scientific Memoirs,' etc. [The translator's notes signed: A.L.L. ie. Augusta Ada King, Countess Lovelace.]* (A. Lovelace, Trad.). R. & J. E. Taylor.
- Mettrie, J. O. d. L. (1748). *L' Homme Machine*. Luzac.
- Mill, J. S. (1917). *Sistema de Lógica Inductiva y Deductiva* (E. Ovejero y Maury, Trad.). Daniel Jorro, editor. (Fecha inicial de publicación 1843)
- Miller, J. H. & Page, S. E. (2007). *Complex adaptive systems: An introduction to computational models of social life*. Princeton Univ. Press
OCLC: 237124880.
- Minsky, M. (1988, 15 de marzo). *The Society of Mind*. Simon & Schuster.
- Minsky, M. (2006). *The Emotion Machine: Commonsense Thinking, Artificial Intelligence, and the Future of the Human Mind*. Simon & Schuster
OCLC: ocm70122576.
- Minsky, M. (2007, 13 de noviembre). *The Emotion Machine: Commonsense Thinking, Artificial Intelligence, and the Future of the Human Mind*. Simon & Schuster.
- Minsky, M. & Papert, S. (1988). *Perceptrons: An Introduction to Computational Geometry* (Expanded ed). MIT Press. (Fecha inicial de publicación 1969)
- MIT Endicott House. (2018, 21 de marzo). *The Physics of Computation Conference*. MIT Endicott House. <https://mitendicotthouse.org/physics-computation-conference/>
- Mitchell, M. (2011, 1 de septiembre). *Complexity: A Guided Tour*. Oxford University Press, USA.
- Mitchell, S. D. (2012). *Unsimple Truths: Science, Complexity, and Policy*. University of Chicago Press.
- Morgan, M. S. & Morrison, M. (Eds.). (1999). *Models as Mediators: Perspectives on Natural and Social Sciences*. Cambridge University Press.
- Moulines, C. U. (1976). Los fundamentos metodológicos de la filosofía natural de Isaac Newton. *Revista de filosofía DIÁNOIA*, 22(22), 27-43. <https://doi.org/10/gn248n>
- Moulines, C. U. (1984). Ontological reduction in the natural sciences. En W. Balzer, D. A. Pearce & H.-J. Schmidt (Eds.), *Reduction in Science: Structure, Examples, Philosophical Problems*. Springer Netherlands. <http://public.ebookcentral.proquest.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=3107853>
OCLC: 851387813
- Nagel, E. (1961). *La estructura de la ciencia: problemas de la lógica de la investigación científica*. Paidós
OCLC: 40962753.
- Nagel, E. (2006). *La estructura de la ciencia: problemas de la lógica de la investigación científica*. Paidós. (Fecha inicial de publicación 1961)
OCLC: 40962753

- Narasimhan, T. N. (2009). The Dichotomous History of Diffusion. *Physics Today*, 62(7), 48-53. <https://doi.org/10/frjnx7>
- Needham, J. (1928). *Man a machine: In answer to a romantical and unscientific treatise written by Sig. Eugenio Rignano & entitled "Man not a machine"*. W. W. Norton
Open Library ID: OL6721298M.
- Needham, J. (1943). *Time: The refreshing river (essays and addresses, 1932-1942)*. New York, The Macmillan Company. <http://archive.org/details/timerefreshingri00need>
- Neumann, J., John von & Burks, A. W. (1966). *Theory of self-reproducing automata*. Urbana, University of Illinois Press. http://archive.org/details/theoryofselfrepr00vonn_0
- Neumann, J. V. (2005). *John von Neumann: Selected Letters* (M. Rédei, Ed.). American Mathematical Soc.
- Newell, A. (1982). The Knowledge Level. *Artificial intelligence*, 18(1), 87-127. <https://doi.org/10/bf45w5>
- Newman, M. E. J. (2011). *Complex Systems: A Survey*. <http://arxiv.org/abs/1112.1440>
- Newman, M. (2018, 4 de julio). *Networks*. Oxford University Press.
- Newman, M. E. (2003). The Structure and Function of Complex Networks. *SIAM review*, 45(2), 167-256. <https://doi.org/10/fcssjm>
- Nicolis, G. & Nicolis, C. (2012, marzo). *Foundations of Complex Systems: Emergence, Information and Prediction* (2.^a ed.). WORLD SCIENTIFIC. <http://www.worldscientific.com/worldscibooks/10.1142/8260>
- Nicolis, G. & Prigogine, I. (1977, 13 de mayo). *Self-Organization in Nonequilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order Through Fluctuations*. Wiley.
- Nishimori, H. (2001). *Statistical Physics of Spin Glasses and Information Processing: An Introduction*. Oxford University Press
OCLC: ocm47063323.
- Oppenheim, P. & Putnam, H. (1958). Unity of science as a working hypothesis. <http://conservancy.umn.edu/handle/11299/184622>
Accepted: 2017-02-24T17:49:44Z
- Packard, N. H. (1988). Adaptation toward the Edge of Chaos. *Dynamic patterns in complex systems*, 212, 293-301.
- Pantalone, M. (2013). *Historia y epistemología de los sistemas adaptativos complejos*. Facultad de Filosofía y Humanidades, Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina.
- Pesavento, U. (1995). An Implementation of von Neumann's Self-Reproducing Machine. *Artificial Life*, 2(4), 337-354. <https://doi.org/10/brhznk>
- Peterson, E. L. (2016). *The Life Organic: The Theoretical Biology Club and the Roots of Epigenetics*. University of Pittsburgh Press.
- Petri, C. A. & Reising, W. (2008). Petri net. *Scholarpedia*, 3(4), 6477. <https://doi.org/10.4249/scholarpedia.6477>

- Phillips, D. C. (1971). James, Dewey, and the Reflex Arc. *Journal of the History of Ideas*, 32(4), 555-568. <https://doi.org/10/d9vwfj>
- Physics of computation. (1982). *International Journal of Theoretical Physics*, 21(5), 431-431. <https://doi.org/10.1007/BF02650243>
- Piccinini, G. (2004). The First Computational Theory of Mind and Brain: A Close Look at McCulloch and Pitts's "Logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity". *Synthese*, 141(2), 175-215. <https://doi.org/10/cf7225>
- Pickering, A. (2009). Psychiatry, synthetic brains and cybernetics in the work of W. Ross Ashby. *International Journal of General Systems*, 38(2), 213-230. <https://doi.org/10/bh3bhv>
- Pickering, A. (2010). *The cybernetic brain: Sketches of another future*. University of Chicago Press
OCLC: 401714409.
- Pines, D. (Ed.). (1988). *Emerging Syntheses in Science: Proceedings of the Founding Workshops of the Santa Fe Institute, Santa Fe, New Mexico*. Addison-Wesley.
- Poelwijk, F. J., Socolich, M. & Ranganathan, R. (2019). Learning the Pattern of Epistasis Linking Genotype and Phenotype in a Protein. *Nature Communications*, 10, 4213. <https://doi.org/10/gf9vhf>
- Polanyi, M. (2000). The Republic of Science: Its Political and Economic Theory. *Minerva*, 38(1), 1-21. <https://doi.org/10/c6hbch> (Fecha inicial de publicación 1962)
- Popper, K. (1981). Obituary: Joseph Henry Woodger. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 32(3), 328-330. <https://doi.org/10/cv3v75>
- Pouvreau, D. & Drack, M. (2007). On the History of Ludwig von Bertalanffy's "General Systemology", and on Its Relationship to Cybernetics: Part I: Elements on the Origins and Genesis of Ludwig von Bertalanffy's "General Systemology". *International Journal of General Systems*, 36(3), 281-337. <https://doi.org/10/d7j8rq>
- Putnam, H. (1960). Minds and Machines. *Dimensions of Mind* (pp. 57-80). New York University Press.
- Putnam, H. (1967). The Mental Life of Some Machines. En H.-N. Castaneda (Ed.), *Intentionality, Minds and Perception*. Wayne State University Press.
- Rashevsky, N. (1933). Outline of a physico-mathematical theory of excitation and inhibition. *Protoplasma*, 20(1), 42-56. <https://doi.org/10/fbk5x5>
- Rashevsky, N. (1934). Foundations of Mathematical Biophysics. *Philosophy of Science*, 1(2), 176-196. <https://doi.org/10/ct293z>
- Rashevsky, N. (1936). Mathematical biophysics and psychology. *Psychometrika*, 1(1), 1-26. <https://doi.org/10.1007/BF02287920>
- Rashevsky, N. (1940). *Advances and Applications of Mathematical Biology*. University of Chicago Press.
- Rashevsky, N. (1959). *Mathematical biology of social behavior*. [Chicago] University of Chicago Press. <http://archive.org/details/mathematicalbiol0000rash>

- Rashevsky, N. (1960). *Mathematical biophysics; physico-mathematical foundations of biology* (3rd). Dover Publications. http://archive.org/details/mathematicalbiop0000rash_y3q7 (Fecha inicial de publicación 1938)
- Reinke, J. (1901). *Einleitung in die theoretische Biologie*. Berlin, Paetel. <http://archive.org/details/einleitungindie00reingoog>
- Rendell, P. (2016). *Turing machine universality of the game of life*. Springer.
- Rescher, N. (1998). *Complexity: A Philosophical Overview*. Transaction Publishers.
- Resnik, M. D. (1981). Mathematics as a Science of Patterns: Ontology and Reference. *Noûs*, 15(4), 529-550. <https://doi.org/10/fbjp32>
- Resnik, M. D. (1982). Mathematics as a Science of Patterns: Epistemology. *Noûs*, 16(1), 95-105. <https://doi.org/10/dqzjrw>
- Resnik, M. D. (1997). *Mathematics as a Science of Patterns*. Clarendon Press.
- Richards, R. J. (2014). *The Tragic Sense of Life Ernst Haeckel and the Struggle over Evolutionary Thought*
OCLC: 1004837101.
- Rocklin, G. J., Chidyausiku, T. M., Goreshnik, I., Ford, A., Houliston, S., Lemak, A., Carter, L., Ravichandran, R., Mulligan, V. K., Chevalier, A., Arrowsmith, C. H. & Baker, D. (2017). Global Analysis of Protein Folding Using Massively Parallel Design, Synthesis, and Testing. *Science*, 357(6347), 168-175. <https://doi.org/10.1126/science.aan0693>
- Rodríguez, V. (2015). Representaciones de Las Formas En Los Seres Vivos: La Evolución de Los Modelos. En V. Rodríguez, M. Velasco & P. García (Eds.), *Epistemología y Prácticas Científicas*. Imprenta de la FFyH, UNC.
- Rojas, R., Göktekin, C., Friedland, G., Krüger, M., Scharf, L., Kuniß, D. & Langmack, O. (2004). Konrad Zuses Plankalkül – Seine Genese und eine moderne Implementierung. En H. D. Hellige (Ed.), *Geschichten der Informatik: Visionen, Paradigmen, Leitmotive* (pp. 215-235). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-18631-8_9
- Rorty, R. M. (1991). *Objectivity, Relativism, and Truth: Philosophical Papers* (Vol. 1). Cambridge University Press.
- Rosen, R. (1968). Turing's morphogens, two-factor systems and active transport. *The bulletin of mathematical biophysics*, 30(3), 493-499. <https://doi.org/10/czxbd4>
- Rosen, R. (1978). Review of: "SELF-ORGANIZATION IN NONEQUILIBRIUM SYSTEMS", by G. Nicolis and I. Prigogine, John Wiley, New York, 1977, 491 pp. *International Journal of General Systems*, 4(4), 266-269. <https://doi.org/10.1080/03081077808960692>
- Rosenblatt, F. (1957). *The Perceptron, a Perceiving and Recognizing Automaton* (N.º 85-460-1). Cornell Aeronautical Laboratory Report.
- Rosenblueth, A. & Wiener, N. (1945). The Role of Models in Science. *Philosophy of Science*, 12(4), 316-321. <https://doi.org/10/fjzxx9>
- Rosenblueth, A., Wiener, N. & Bigelow, J. (1943). Behavior, Purpose and Teleology. *Philosophy of Science*, 10(1), 18-24. <https://doi.org/10/d89qrd>

- Rothenberg, E. V. (2016). Eric Davidson: Steps to a gene regulatory network for development. *Developmental Biology*, 412, S7-S19. <https://doi.org/10/f8j3pr>
- Roux, W. (1888). Beiträge Zur Entwicklungsmechanik Des Embryo. *Archiv für pathologische Anatomie und Physiologie und für klinische Medizin*, 114(2), 246-291.
- Rumelhart, D. E., Hinton, G. E. & Williams, R. J. (1986). Learning Representations by Back-Propagating Errors. *nature*, 323(6088), 533. <https://doi.org/10/cvjdpc>
- Russell, B. (1922). *Our knowledge of the external world: As a field for scientific method in philosophy*. George Allen & Unwin. (Fecha inicial de publicación 1914)
- Sagan (Margulis), L. (1967). On the origin of mitosing cells. *Journal of Theoretical Biology*, 14(3), 225-IN6. <https://doi.org/10/dvg2mt>
- Salam, A., Dirac, P. A. M. & Heisenberg, W. (1990). *Unification of Fundamental Forces: The First of the 1988 Dirac Memorial Lectures* (J. Evans & G. Watts, Eds.). Cambridge University Press.
- Salem, J. B. & Wolfram, S. (1985). *Thermodynamics and Hydrodynamics with Cellular Automata*. PRE-29057.
- Salvatico, L. (2006). *Depurando el mecanicismo moderno. Análisis de filosofías naturales del siglo XVII a partir de una noción teórica*. Editorial Brujas.
- Samuel, A. L. (1959). Some Studies in Machine Learning Using the Game of Checkers. *IBM Journal of research and development*, 3(3), 210-229. <https://doi.org/10/c4vp2x>
- Samuels, W. J. (2011, 12 de septiembre). *Erasing the Invisible Hand: Essays on an Elusive and Misused Concept in Economics*. Cambridge University Press.
- Samuelson, L. (1998). *Evolutionary games and equilibrium selection* (1. paperback ed). MIT Press.
- Scerri, E. R. & McIntyre, L. C. (Eds.). (2014). *Philosophy of Chemistry: Growth of a New Discipline*. Springer Berlin Heidelberg.
- Schelling, T. C. (1969). Models of Segregation. *American Economic Review*, 59(2), 488-493. <https://ideas.repec.org/a/aea/aecrev/v59y1969i2p488-93.html>
- Schelling, T. C. (1971). Dynamic Models of Segregation. *The Journal of Mathematical Sociology*, 1(2), 143-186. <https://doi.org/10.1080/0022250X.1971.9989794>
_eprint: <https://doi.org/10.1080/0022250X.1971.9989794>
- Schelling, T. C. (1980). *The strategy of conflict*. Harvard Univ. Press. (Fecha inicial de publicación 1960)
- Schiff, J. L. (2011, 18 de octubre). *Cellular Automata: A Discrete View of the World*. John Wiley & Sons.
- Schmitter, A. M. (2008). How to Engineer a Human Being: Passions and Functional Explanation in Descartes. En J. Broughton & J. Carriero (Eds.), *A Companion to Descartes* (pp. 426-444). Blackwell.
- Schrödinger, E. (2013). *¿Qué es la vida?* Tusquets. (Fecha inicial de publicación 1943)

- Schuh, C. P. (2007, 20 de septiembre). *Mineralogy & Crystallography: On the History of these Sciences through 1919*. Curtis Schuh. http://archive.org/details/History_Mineralogy_2007
- Schumpeter, J. A. (2014). *Capitalism, socialism, and democracy*. OCLC: 944521105.
- Schwarzenbach, D. (2012). The success story of crystallography. *Acta Crystallographica Section A: Foundations of Crystallography*, 68(1), 57-67. <https://doi.org/10.1107/S0108767311030303>
- Scott, A. C. (2007). *The Nonlinear Universe*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Sejnowski, T. J. (2018). *The Deep Learning Revolution*. The MIT Press.
- Senior, A. W., Evans, R., Jumper, J., Kirkpatrick, J., Sifre, L., Green, T., Qin, C., Židek, A., Nelson, A. W. R., Bridgland, A., Penedones, H., Petersen, S., Simonyan, K., Crossan, S., Kohli, P., Jones, D. T., Silver, D., Kavukcuoglu, K. & Hassabis, D. (2020). Improved protein structure prediction using potentials from deep learning. *Nature*, 577(7792), 706-710. <https://doi.org/10/ggjfcc>
- Shagrir, O. (2005, 24 de enero). The Rise and Fall of Computational Functionalism. En Y. Ben-Menahem (Ed.), *Hilary Putnam* (1.^a ed., pp. 220-250). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511614187.009>
- Shalizi, C. R. (2003, 9 de julio). *Methods and Techniques of Complex Systems Science: An Overview*. <http://arxiv.org/abs/nlin/0307015>
- Shannon, C. E. (1949). Communication Theory of Secrecy Systems*. *Bell System Technical Journal*, 28(4), 656-715. <https://doi.org/10/gfpb53>
_eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/j.1538-7305.1949.tb00928.x>
- Sheth, R., Marcon, L., Bastida, M. F., Junco, M., Quintana, L., Dahn, R., Kmita, M., Sharpe, J. & Ros, M. A. (2012). Hox Genes Regulate Digit Patterning by Controlling the Wavelength of a Turing-Type Mechanism. *Science (New York, N.Y.)*, 338(6113), 1476. <https://doi.org/10.1126/science.1226804>
- Simon, H. (1962). The Architecture of Complexity. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 106, 467-482.
- Simon, H. A. (1955). On a Class of Skew Distribution Functions. *Biometrika*, 425-440. <http://www.jstor.org/stable/2333389>
- Simon, H. A. (1996). *The Sciences of the Artificial* (3rd ed). MIT Press.
- Simon, H. A. (2006). *Las ciencias de lo artificial* (3ra). COMARES. (Fecha inicial de publicación 1996)
OCLC: 83983151
- Sinha, N. K. (2008). *Control Systems*. New Age International.
- Smith, A. (1994). *La riqueza de las naciones* (C. Rodríguez Braun, Ed.). Alianza. (Fecha inicial de publicación 1776)
OCLC: 757630146

- Smith, J. M. & Price, G. R. (1973). The Logic of Animal Conflict. *Nature*, 246(5427), 15-18. <https://doi.org/10/b4sgxs>
- Smolensky, P. (1990). Tensor product variable binding and the representation of symbolic structures in connectionist systems. *Artificial Intelligence*, 46(1), 159-216. [https://doi.org/10.1016/0004-3702\(90\)90007-M](https://doi.org/10.1016/0004-3702(90)90007-M)
- Smolensky, P. & Legendre, G. (2006). *The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar*. MIT Press
 OCLC: ocm61478849.
- Smolin, L. (1996, 3 de diciembre). *Galactic Disks as Reaction-Diffusion Systems*. <http://arxiv.org/abs/astro-ph/9612033>
- Sodergren, E., Weinstock, G. M., Davidson, E. H., Cameron, R. A., Gibbs, R. A., Angerer, R. C., Angerer, L. M., Arnone, M. I., Burgess, D. R., Burke, R. D., Coffman, J. A., Dean, M., Elphick, M. R., Etensohn, C. A., Foltz, K. R., Hamdoun, A., Hynes, R. O., Klein, W. H., Marzluff, W., ... Wright, R. (2006). The Genome of the Sea Urchin *Strongylocentrotus Purpuratus*. *Science*, 314(5801), 941-952. <https://doi.org/10/dwdsbm>
- Stein, D. L. & Newman, C. M. (2013). *Spin Glasses and Complexity*. Princeton University Press.
- Strogatz, S. H. (1994). *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering*. Westview Press.
- Suárez, M. (2009). *Fictions in science: Philosophical essays on modeling and idealization*. Routledge.
- Swart, E. R. (1980). The Philosophical Implications of the Four-Color Problem. *The American Mathematical Monthly*, 87(9), 697-707. <https://doi.org/10/bmx2hh>
- Szathmáry, E. (2013). On the Propagation of a Conceptual Error Concerning Hypercycles and Cooperation. *Journal of Systems Chemistry*, 4(1), 1. <https://doi.org/10.1186/1759-2208-4-1>
- Tan, Z., Chen, S., Peng, X., Zhang, L. & Gao, C. (2018). Polyamide Membranes with Nanoscale Turing Structures for Water Purification. *Science*, 360(6388), 518-521. <https://doi.org/10.1126/science.aar6308>
- Teller, P. (1980). Computer Proof. *The Journal of Philosophy*, 77(12), 797. <https://doi.org/10/dvbrgh>
- Thom, R. (1975). *Structural stability and morphogenesis: An outline of a general theory of models* (2. pr). Benjamin/Cummings.
- Thompson, D. W. (1917). *On growth and form*. Cambridge [Eng.] University press. <http://archive.org/details/ongrowthform1917thom>
- Thornburg, Z. R., Bianchi, D. M., Brier, T. A., Gilbert, B. R., Earnest, T. M., Melo, M. C. R., Safronova, N., Sáenz, J. P., Cook, A. T., Wise, K. S., Hutchison, C. A., Smith, H. O., Glass, J. I. & Luthey-Schulten, Z. (2022). Fundamental behaviors emerge from si-

- mutations of a living minimal cell. *Cell*, 185(2), 345-360.e28. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2021.12.025>
- Tranquillo, J. V. (2019). *An Introduction to Complex Systems: Making Sense of a Changing World*. Springer International Publishing. <https://www.springer.com/la/book/9783030025885>
- Turing, A. M. (1952). The Chemical Basis of Morphogenesis. *Philosophical transactions of the Royal Society of London Series B, Biological sciences*, B 237(641), 37-72. <http://turing.ecs.soton.ac.uk/browse.php/B/22>
- Turing, A. (1936). On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem. *Proceedings of the London Mathematical Society*, 42, 230-265.
- Turing, A. M. (1940). *The Prof's Book: Turing's Treatise on the Enigma*. <http://archive.org/details/hw-25-3>
- Turing, A. M. (1947). Lecture to the London Mathematical Society on 20 February 1947. *MD COMPUTING*, 12, 390-390.
- Turing, A. M. (1948). *Intelligent Machinery* (Report Written by Alan Turing for the National Physical Laboratory).
- Turing, A. M. (1950). Computing Machinery and Intelligence. *Mind*, 59, 433-60. <https://doi.org/10/b262dj>
- Turing, A. M., Saunders, P. T. & Turing, A. M. (1992). *Morphogenesis*. North-Holland ; Distributors for the U.S. and Canada], Elsevier Science Pub. Co.
- Tymoczko, T. (1979). The Four-color Problem and Its Philosophical Significance. *The Journal of Philosophy*, 76(2), 57-83. <https://doi.org/10/fn3rvq>
- Umpleby, S. A. (2000). *Definitions - American Society for Cybernetics*. <https://asc-cybernetics.org/definitions/>
- Vaihinger, H. (1922). *Die Philosophie des Als Ob*. <http://archive.org/details/DiePhilosophieDesAlsOb>
- Van Valen, L. (1973). A New Evolutionary Law. *Evol theory*, 1, 1-30.
- Venturelli, A. N. (2016). Historia y Epistemología de la Cibernética Temprana: El Caso del Homeostato. *Revista Argentina de Ciencias del Comportamiento (RACC)*, 8(2), 124-133. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5612649>
- Verkhatsky, A. & Parpura, V. (2014). History of Electrophysiology and the Patch Clamp. *Methods in molecular biology (Clifton, N.J.)*, 1183, 1-19. <https://doi.org/10/gns9nn>
- Vinković, D. & Kirman, A. (2006). A physical analogue of the Schelling model. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(51), 19261-19265. <https://doi.org/10/dbknw7>
- Von Bertalanffy, L. (1968). *General System Theory: Foundations, Development, Applications* (Vol. 55). George Braziller New York. http://gelenk-doktor.de/pdfs/7st_2g_59e899f2e39fa54da3440e4df0f1af92.pdf
- von Bertalanffy, L. (1940). Der Organismus als physikalisches System betrachtet. *Naturwissenschaften*, 28(33), 521-531. <https://doi.org/10/bsqjrw>

- von Bertalanffy, L. (1976). *Teoría general de los sistemas: fundamentos, desarrollo, aplicaciones* (J. Almela, Trad.). Fondo de Cultura Económica. (Fecha inicial de publicación 1968)
- von Hayek, F. A. (1937). Economics and Knowledge. *Economica*, 4(13), 33-54. <https://doi.org/10.2307/2548786>
- von Hayek, F. A. (1979). *The Counter-Revolution of Science: Studies on the Abuse of Reason* (2d ed). Liberty Press. (Fecha inicial de publicación 1952)
- von Neumann, J. (1947). The Mathematician. En M. Adler (Ed.), *The Works of the Mind* (pp. 180-196). University of Chicago Press.
- von Neumann, J. (1951). The General and Logical Theory of Automata. En L. A. Jeffress (Ed.), *Cerebral Mechanisms in Behavior: The Hixon Symposium* (pp. 1-41). John Wiley & Sons, Inc.
- von Neumann, J. (1955). Method in the Physical Sciences. En L. Leary (Ed.), *The Unity Of Knowledge* (pp. 157-164). Doubleday & Company, Inc.
- von Neumann, J. (1956). Probabilistic Logics and the Synthesis of Reliable Organisms from Unreliable Components.
- von Neumann, J. (1966). *Theory of Self-Reproducing Automata* (A. W. Burks, Ed.). University of Illinois Press. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1102024>
- von Neumann, J. (1987a). The general and logical theory of automata. En W. Aspray & A. W. Burks (Eds.), *Papers of John von Neumann on computing and computer theory* (pp. 391-431). MIT Press. <http://archive.org/details/papersofjohnvonn00vonn>
- von Neumann, J. (1987b). Probabilistic logics and the synthesis of reliable organisms from unreliable components. En W. Aspray & A. W. Burks (Eds.), *Papers of John von Neumann on computing and computer theory* (pp. 553-602). MIT Press. <http://archive.org/details/papersofjohnvonn00vonn> (Fecha inicial de publicación 1956)
- von Neumann, J. (1993). First Draft of a Report on the EDVAC. *IEEE Annals of the History of Computing*, 15(4), 28-75. <http://dlib.computer.org/an/books/an1993/pdf/a4027.pdf;%20http://www.computer.org/annals/an1993/a4027abs.htm>
- von Neumann, J. & Morgenstern, O. (1944). *Theory of Games and Economic Behavior*. pub-PRINCETON.
- von Uexküll, J. (1905). *Leitfaden in das Studium der experimentellen Biologie der Wassertiere*. Wiesbaden : J. F. Bergmann. <http://archive.org/details/leitfadenindasst00uexk>
- von Uexküll, J. (1907). Studien Über Den Tonus V. Die Libellen. *Zeitschrift für Biologie*, 50, 168-202.
- von Uexküll, J. (1908). Die Neuen Fragen in Der Experimentellen Biologie. *Scientia*, 2(4), 72.
- von Uexküll, J. (1909). *Umwelt und Innenwelt der Tiere [microform]*. Berlin : J. Springer. <http://archive.org/details/umweltundinnenwe00uexk>
- von Uexküll, J. (1913). *Bausteine zu einer biologischen Weltanschauung : gesammelte Aufsätze*. München : F. Bruckmann U.=G. <http://archive.org/details/bausteinezueiner00uexk>

- von Uexküll, J. (1928). *Theoretische Biologie*. <http://library.wur.nl/WebQuery/clc/229247>
(Fecha inicial de publicación 1920)
- Waddington, C. H. (1940). *Organisers & Genes*. The University Press.
- Walhout, M., Vidal, M. & Dekker, J. (2012, 31 de diciembre). *Handbook of Systems Biology: Concepts and Insights*. Academic Press.
- Walker, S. I., Davies, P. C. W. & Ellis, G. F. R. (Eds.). (2017, 10 de abril). *From Matter to Life: Information and Causality* (Edición: 1). Cambridge University Press.
- Wang, H. (1965). Games, Logic, and Computers. *Scientific American*, 213(5), 98-106.
- Weaver, W. (1948). Science and Complexity. *American scientist*, 36(4), 536. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18882675>
- Webb, J. (1980). *Mechanism, Mentalism and Metamathematics An Essay on Finitism*. Springer Netherlands. <http://public.eblib.com/choice/PublicFullRecord.aspx?p=6557409>
OCLC: 1255230863
- Webster, N. & Howe, H. (1828). *An american dictionary of the english language*. New York : S. Converse. <http://archive.org/details/americandictionary01websrich>
- Weisberg, M. (2013). *Simulation and Similarity: Using Models to Understand the World*. Oxford University Press.
- West, G. (2017, 16 de mayo). *Scale: The Universal Laws of Growth, Innovation, Sustainability, and the Pace of Life in Organisms, Cities, Economies, and Companies*. Penguin Press.
- Whitehead, A. N. (1911). *An Introduction to Mathematics, by A. N. Whitehead*. Williams & Northgate.
- Whitesides, G. M. & Grzybowski, B. (2002). Self-Assembly at All Scales. *Science*, 295(5564), 2418-2421. <https://doi.org/10/dfqg8b>
- Wiener, N. (1954). *The Human Use of Human Beings: Cybernetics and Society*. Avon Books.
- Wiener, N. (1961). *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine* (Vol. 25). MIT press.
- Wiener, N. (1989). *The Human Use of Human Beings: Cybernetics and Society*. Free Association Books. (Fecha inicial de publicación 1951)
OCLC: 636885811
- Wimsatt, W. C. (1998). La emergencia como no-agregatividad y los sesgos reduccionistas. En A. B. Echeverría & S. Martínez (Eds.), *Historia y explicación en biología* (pp. 385-418). Fondo de Cultura Económica.
- Wimsatt, W. C. (2000). Emergence as Non-Aggregativity and the Biases of Reductionisms. *Foundations of Science*, 5(3), 269-297. <https://doi.org/10/bd6sfz>
- Wimsatt, W. C. (2007). *Re-engineering philosophy for limited beings: Piecewise approximations to reality*. Harvard University Press.
- Wolfram, S. (1984a). Cellular automata as models of complexity. *Nature*, 311(5985), 419-424. <https://doi.org/10/chwrn9>
Bandiera_abtest: a Cg_type: Nature Research Journals Primary_atype: Reviews

- Wolfram, S. (1984b). Preface. En D. Farmer, T. Toffoli & S. Wolfram (Eds.), *Cellular Automata: Proceedings of an Interdisciplinary Workshop, Los Alamos, New Mexico 87545, USA, March 7-11, 1983*. North-Holland Physics Pub. ; Sole distributors for the USA and Canada, Elsevier Science Pub. Co.
- Wolfram, S. (2002). *A New Kind of Science* (Vol. 5). Wolfram media Champaign. <http://austms.org.au/Jobs/Reviews2.html>
- Wright, S. (1932). The Roles of Mutation, Inbreeding, Crossbreeding, and Selection in Evolution.
- Yule, G. U. (1925). II.—A Mathematical Theory of Evolution, Based on the Conclusions of Dr. J. C. Willis, F. R. S. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Containing Papers of a Biological Character*, 213(402-410), 21-87. <https://doi.org/10/dqgtqj>
- Zapotecatl, J. L., Rosenblueth, D. A. & Gershenson, C. (2017). Deliberative Self-Organizing Traffic Lights with Elementary Cellular Automata. *Complexity*, 2017, e7691370. <https://doi.org/10.1155/2017/7691370>
- Zermelo, E. (1913). Über Eine Anwendung Der Mengenlehre Auf Die Theorie Des Schachspiels. *Proceedings of the Fifth International Congress of Mathematicians*, 2, 501-504.
- Zimorski, V., Ku, C., Martin, W. F. & Gould, S. B. (2014). Endosymbiotic theory for organelle origins. *Current Opinion in Microbiology*, 22, 38-48. <https://doi.org/10/f6wms5>



Universidad Nacional de Córdoba
2022 - Las Malvinas son argentinas

**Hoja Adicional de Firmas
Informe Gráfico**

Número:

Referencia: Tesis - Ilcic, Andrés

El documento fue importado por el sistema GEDO con un total de 478 pagina/s.