

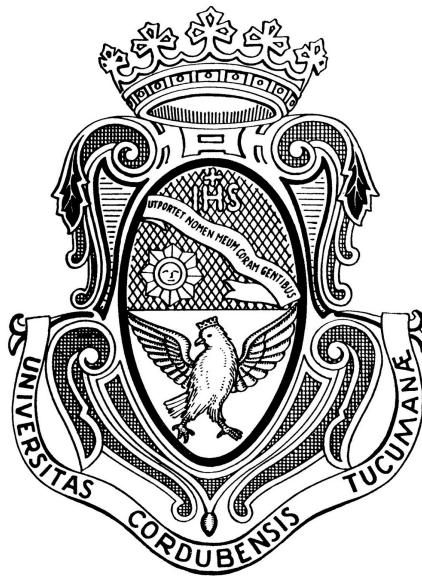
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

TESIS DOCTORAL

Aprendizaje de conceptos en Termodinámica: cómo y cuándo

Autor:
Juan VELASCO

Directora:
Dra. Laura BUTELER



En cumplimiento con los requisitos para la obtención del grado de Doctor en Física

Facultad de Matemática, Astronomía, Física y
Computación

22 de marzo de 2020



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

Resumen

Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación

Aprendizaje de conceptos en Termodinámica: cómo y cuándo

Juan VELASCO

La enseñanza de la Física ha presentado y presenta grandes desafíos como campo de investigación. Entre tantos podemos identificar la constante búsqueda e intención de la comunidad de entender los mecanismos de aprendizaje que desarrollan las personas a la hora de abordar conceptos de Física. En tiempos modernos, se suma a esto las oportunidades que ofrece la tecnología, en particular las simulaciones computacionales, para potenciar los procesos de aprendizaje. A pesar de los avances en este sentido, poco se sabe aún acerca del aprendizaje de conceptos asistido por estas herramientas.

En esta tesis doctoral se estudian mecanismos de aprendizaje de conceptos en termodinámica en estudiantes universitarios de la Licenciatura en Física y del Profesorado en Física. Se abordaron dos contextos particulares: desarrollo conceptual colectivo y desarrollo conceptual asistido por simulaciones computacionales para el caso de fenómenos térmicos. Más concretamente, se intenta develar qué características de las simulaciones y de las interacciones de a pares intervienen, cómo lo hacen y cuando, en los cambios conceptuales experimentados por esos estudiantes durante la resolución de problemas.

Los resultados permiten teorizar en dos sentidos. En primera instancia, se desarrolla una extensión teórica en el campo del desarrollo conceptual, en particular de la Teoría de Clases de Coordinación, hacia entornos de progresos conceptuales colectivos. Se identifican y proponen mecanismos para estudiar cómo el conocimiento se desarrolla como una construcción compartida colectivamente. En segunda instancia, se desarrollan aportes teóricos para procesos de cambio conceptual asistidos por simulaciones computacionales. Se proponen mecanismos para identificar diferentes clases de interacción y trabajo con estas herramientas. A partir de los diversos estudios se identifican algunas implicancias para la enseñanza de conceptos en Física en entornos colectivos y en entornos asistidos por simulaciones computacionales.

*Abstract***Learning concepts in thermodynamics: how and when**

Physics education has presented and still presents great challenges as a field of research. Among so many we can identify the constant search and intention of the community to understand the learning mechanisms that people develop when dealing with physics concepts. In modern times, this is compounded by the opportunities offered by technology, particularly computer simulations, to enhance learning processes. In spite of the advances in this sense, little is known yet about the learning of concepts assisted by these tools.

In this doctoral thesis we study mechanisms of learning concepts in thermodynamics in university students of the Physics Degree. Two particular contexts were approached: collective conceptual development and conceptual development assisted by computational simulations for the case of thermal phenomena. More specifically, it is tried to reveal which characteristics of the simulations and of the interactions of pairs intervene, how they do it and when, in the conceptual changes experienced by those students during the resolution of problems.

The results allow us to theorize in two ways. Firstly, a theoretical extension is developed in the field of conceptual development, in particular of Coordination Class Theory, towards environments of collective conceptual progress. Mechanisms are identified and proposed to study how knowledge is developed as a collectively shared construction. Secondly, theoretical contributions are developed for processes of conceptual change assisted by computer simulations. Mechanisms are proposed to identify different kinds of interaction and work with these tools. From the different studies, some implications are identified for the teaching of concepts in Physics in collective environments and in environments assisted by computer simulations.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Motivación y Relevancia de la tesis	2
1.2. Estructura de la tesis	3
2. Estado del Arte en Aprendizaje de Conceptos	5
2.1. Cambio Conceptual en Física	6
2.1.1. Las ideas de los estudiantes como en Teorías en la Historia de la Ciencia	6
2.1.2. La Teoría-Teoría	7
2.1.3. Conocimiento de los estudiantes como una colección de Primitivos	8
2.2. Tensión Sociocultural - Cognición-Individual	9
Enfoque Cognitivista	10
Enfoque Sociocultural	11
Acercamiento de posiciones	12
2.3. Aprendizaje de Conceptos mediado por simulaciones computacionales	12
2.3.1. Revisión	13
2.3.2. Resultados: Estado del Arte	14
Diseño	14
Proceso	17
Impacto	18
2.4. Conclusiones del Estado del Arte	22
2.4.1. Sobre investigación en cambio conceptual	22
2.4.2. Sobre simulaciones en aprendizaje de conceptos	22
2.5. Problema de Investigación	23
3. Marco Teórico	25
3.1. Teoría de Clases de Coordinación (TCC)	26
Estructura y procesos de una Clase de Coordinación	28
3.1.1. Ejemplo: caso concreto de TCC en Física	30
3.2. Antecedentes de TCC en Física	34
3.3. TCC en entornos colectivos	35
4. Metodología	37
4.1. Metodologías en investigación en educación en ciencias	37
4.2. Microgenetic Learning Analysis	40
4.3. Registros y Análisis	41
4.3.1. Entrevista Clínica	41
5. Resultados	49
5.1. Proyecciones desalineadas: una oportunidad de aprendizaje	49
5.1.1. El estudio	50
5.1.2. Análisis desde la TCC	51

Fragmento 1 - Una proyección desalineada: "El proceso es isotérmico y adiabático"	51
Fragmento 2: Re-proyectando la clase: "La temperatura del gas permanece constante"	52
5.1.3. Discusión	54
5.2. Construcción conceptual compartida: co-construcción de una clase de coordinación	56
5.2.1. Metodología y Contexto del estudio	57
Consigna Presentada-Problema	57
5.2.2. Resultados y Análisis	58
Clase de Coordinación	58
Tipos de co-construcción	59
Fragmento 1: "La entropía del gas aumenta después del ciclo"	61
Determinación de Co-construcción	62
Tipo de Co-construcción	62
Fragmento 2: "La entropía del gas decrece luego del ciclo"	64
Determinación de Co-construcción	66
Fragmento 3: "La entropía del gas aumenta durante el proceso irreversible y disminuye en el reversible"	66
Determinación de Co-construcción	68
Tipo de co-construcción	69
Fragmento 4: "La entropía del entorno aumenta, y lo hace durante la compresión reversible"	69
Determinación de co-construcción	72
Tipo de Co-construcción	72
5.2.3. Discusión	73
5.3. Desarrollo Conceptual mediado por Simulaciones	76
5.3.1. Análisis Preliminar	78
5.3.2. Simulación	80
Modelo del programa	82
Desarrollo Conceptual mediado por la simulación	83
Interacción Extractiva	86
Interacción Integrada	88
Interacción Proyectiva	91
5.3.3. Discusión	93
6. Conclusiones	95
6.1. Perspectivas	97
A. Interactividad: Videograph	99
B. Código Simulación	103
Bibliografía	113

Índice de figuras

2.1. Posiciones epistemológicas de las teorías de aprendizaje. (Alexander, 2007)	10
2.2. Distribución de artículos según la categoría	15
3.1. Estructura de una proyección.	31
3.2. Desarrollo de una clase de coordinación.	31
3.3. Extracciones.	32
3.4. Proyección de la Clase Empuje	33
3.5. Otra proyección de la clase Empuje	33
4.1. Problema 1	44
4.2. Problema 2	45
4.3. Problema 3	45
4.4. Problema 4	45
5.1. Síntesis del desarrollo conceptual durante fragmento 1.	52
5.2. Síntesis de la proyección de la clase durante fragmento 1 y 2.	54
5.3. Esquema de la proyección de la clase durante el fragmento 1. En azul las contribuciones de la estudiante F, en rojo las de D.	63
5.4. Intervenciones de las estudiantes durante el fragmento 1.	64
5.5. Diagrama de la clase durante el fragmento 2.	67
5.6. Intervenciones durante el fragmento 2.	67
5.7. Diagrama de articulación durante el tercer fragmento. El resaltado lila es utilizado para representar las contribuciones o cambios propuestos por ambas estudiantes.	70
5.8. Intervenciones durante el tercer fragmento.	70
5.9. Desarrollo de la clase durante el fragmento IV. En azul las contribuciones de la estudiante F, en rojo las de D y en púrpura las de ambas.	72
5.10. Tipo de intervenciones durante el fragmento IV	73
5.11. Esquema de construcción de idealización de reservorio	80
5.12. Animación incluida en la simulación.	81
5.13. Representación gráfica de la temperatura y la entropía de los reservorios en función de los ciclos. Rojo para el reservorio T1 y azul para el reservorio T2.	81
5.14. Captura de pantalla de la simulación diseñada.	82
5.15. Diagrama P-V de un ciclo de Carnot.	83
5.16. Problema de reservorios presentado a los estudiantes. P4	84
5.17. Representaciones iniciales de los estudiantes del grupo G4	86
5.18. Situación inicial de los estudiantes en la entrevista. Identifican información de la situación y las relacionan con constructos teóricos pero abstractos sin lograr identificar el fenómeno.	87
5.19. Situación inicial de los estudiantes en la entrevista. La abstracción los desvincula del fenómeno.	87

5.20. Representación de los estudiantes	89
5.21. Esquema de estudiantes en interacción integrada con simulación.	90
5.22. Desarrollo de la clase durante el fragmento S_2	91
A.1. Interacción durante el fragmento 1.	100
A.2. Interacción durante el fragmento 2.	100
A.3. Interacción durante el fragmento 3.	100
A.4. Interacción durante el fragmento 4.	100

Capítulo 1

Introducción

Todos los países del mundo, desde los más desarrollados hasta los más postergados, proponen como cimientos de la construcción de su patria (al menos declarativamente) a la Educación. Desde hace tiempo, la educación se ha tornado un valor esencial en la construcción del tejido social y el desarrollo social. Esto no sólo se reduce a las nuevas demandas orientadas al conocimiento provenientes de la evolución del mercado de trabajo. El saber ha sido y es uno de los pilares de la libertad y soberanía de los pueblos y parte fundamental de la batalla contra la desigualdad.

Desde hace tiempo, la Educación no sólo es parte de las políticas públicas de los estados sino que también se volvió objeto de estudio para la comunidad científica. Junto con su desarrollo, este campo comenzó a constituir diversas líneas de investigación, donde una de las más trascendentes para el área estuvo orientada a entender cómo las personas construyen conocimiento. El desarrollo de teorías del aprendizaje permitió modelar y explicar diversos mecanismos que se ponen en juego a la hora de aprender, lo cual alentó el desarrollo de innumerables estrategias de enseñanza y propuestas de mejora.

Junto con el crecimiento de la investigación en educación, se formó, consolidó y desarrolló el campo de la investigación en educación en Física (PER, por sus siglas en inglés, Physics Education Research) dedicado específicamente al estudio del aprendizaje y la enseñanza en el contexto particular de esta disciplina. Este campo, de alrededor de unos 40 años, aborda diversas líneas de interés para la investigación: aprendizaje conceptual, resolución de problemas, currículum e instrucción, evaluación, discurso, saber docente, entre otros tantos. A pesar de que se ha desarrollado una vasta cantidad de conocimiento en relación a la enseñanza y al aprendizaje de la física, mucho queda por entender aún de estos complejos fenómenos (Dockett y Mestre, 2014).

A partir de identificar problemas «conceptuales» en los estudiantes universitarios graduados, la comunidad orientó esfuerzos en un área que cobró el nombre de Cambio Conceptual. Esta línea de investigación se dedicó especialmente a estudiar qué características tiene la estructura de conocimiento de estudiantes y cómo esta estructura puede ser modificada. Años de desarrollo produjeron mucho conocimiento, pero así también muchas discusiones que incluso aún continúan latentes en estos días.

En los últimos tiempos, la investigación en aprendizaje de la física se vio interpelada y atravesada por el desarrollo y uso de la tecnología en secuencias instruccionales. La aparición de nuevas representaciones, como por ejemplo las simulaciones computacionales, crecieron exponencialmente lo que generó diferentes y novedosas oportunidades de aprendizaje. Muchas investigaciones se dedicaron a entender las potencialidades de estas nuevas herramientas y los efectos de aplicarlas en instancias de aprendizaje. Una notable cantidad de trabajos en este sentido mostraron efectos positivos en desempeños de estudiantes (Smetana y Bell, 2012).

Si bien ha sido ampliamente demostrado que el uso de tecnología y, en particular las simulaciones computacionales, presentan amplias potencialidades para mejorar el aprendizaje de estudiantes en física, aún poco se sabe acerca de cómo estas herramientas intervienen en los mecanismos del proceso de aprendizaje (Velasco y Buteler, 2017). A pesar de algunos aportes que se realizaron desde teorías de cambio conceptual, el campo presenta diversas vacancias y preguntas sin abordar en este sentido.

La presente tesis de Doctorado pretende contribuir a la comprensión y modelado de desarrollo conceptual en física en entornos colectivos y mediados por simulaciones computacionales. La misma se orienta a develar cómo y cuándo las interacciones entre pares y las simulaciones intervienen en el proceso de cambio conceptual mientras personas aprenden conceptos en el campo de la termodinámica.

1.1. Motivación y Relevancia de la tesis

Existen dos grandes motivaciones que impulsaron la realización de esta tesis doctoral en esta área y en esta unidad académica, la Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación.

La motivación primaria para abocar los estudios en este campo tiene que ver con uno de los problemas macro más importantes que tiene la Universidad Nacional de Córdoba: la deserción. Entre 7 y 8 de cada 10 estudiantes comienzan sus estudios en esta universidad y no logran completarlos. El 50% de esta deserción ocurre en primer año¹. Algunos estudios mostraron que se trata de un fenómeno complejo y de causas múltiples, entre las que se encuentra la enseñanza.

Si uno indaga en la enseñanza en las aulas de las universidades de hoy y compara con las de 20, 30 o 40 años atrás no son muchos los cambios que se pueden encontrar. En algunos casos, ninguno. En los peores, se puede encontrar hasta las mismas guías de ejercicio de aquel entonces. En principio se podría decir que no existen pruebas para afirmar como algo malo que esto sea así. No habría motivos fuertes para pensar que no es bueno replicar los formatos de 30 o 40 años atrás en estos tiempos.

Sin embargo, sí existe un buen motivo para pensar que las prácticas educativas están desactualizadas. En los últimos 40 años el volumen de investigación en educación en general, y en educación en ciencias en particular, ha crecido de manera abrumadora. Difícilmente existan revisiones que puedan honrar todo lo producido (Dockett y Mestre, 2014). De hecho, las concepciones sobre cómo las personas aprenden han cambiado drásticamente desde los años 70 a este tiempo.

La pregunta natural ante este panorama es ¿por qué no han evolucionado las prácticas de enseñanza en consonancia con los desarrollos de la investigación educativa? No vamos a desarrollar esta pregunta en este escrito, el análisis es profundo y presenta seguramente muchas variables y causas. Pero sí consideramos que esta desvinculación entre investigación y aulas puede empezar a tratarse a través del desarrollo de investigaciones en este campo en las unidades académicas de la universidad. Existe poco desarrollo de investigaciones en el campo de la enseñanza de la física para el caso de FaMAF, y esta tesis podría ser un insumo más para establecer vínculo entre investigación y prácticas.

¹Maccagno, A., Mangeaud, A., Somazzi, C., Esbry, N. (2017). «La deserción estudiantil en el primer año de la universidad». Copicentro. Córdoba, Argentina.

Es importante aclarar que no vamos a abordar el problema de la deserción en la universidad, ni mucho menos vamos a resolverlo. Se trata de un problema macro con muchas aristas que no trataremos aquí. Pero sí es posible afirmar que impulsa una de las motivaciones más primitivas en la propuesta de trabajo de esta tesis.

La segunda gran motivación que nos alienta a abocarnos a este campo, en particular al desarrollo conceptual, tiene que ver con las características ya particulares de los estudiantes de FaMAF. Si bien esta unidad académica es de prestigio y cuenta con docentes de altísimo nivel académico, sondeos informales y formales muestran aspectos similares a los relevados en estudios previos en otras universidades. No importa cuán brillante sea el estudiante, ni que calificación haya obtenido, ni siquiera incluso que haya completado sus estudios, existen ideas previas simples del mundo cotidiano y también de conceptos específicos que prevalecen transparentes a la instrucción. Aparentemente la enseñanza no está centrada en muchos casos en las ideas de los estudiantes, sino más bien luce orientada al dominio del formalismo matemático.

Esta realidad constituye una gran motivación para estudiar qué ocurre y cómo se desarrolla el cambio conceptual (o no) en el formato más típico empleado de manera natural a lo largo del aprendizaje de las materias de esta unidad académica: la resolución de problemas en pequeños grupos.

En este sentido, el desarrollo de las tecnologías de la comunicación y la información abrieron un espectro de oportunidades. La investigación educativa contribuyó a demostrar la efectividad de diversas herramientas tecnológicas en la enseñanza de las ciencias. Sin embargo aún presenta desafíos en términos de profundizar de qué manera estas herramientas se inmiscuyen en el proceso de aprendizaje.

1.2. Estructura de la tesis

Esta tesis está estructurada en seis capítulos. El capítulo 2 está destinado a la descripción detallada del estado del arte en el campo de la investigación en enseñanza de la física en el área del desarrollo conceptual y el aprendizaje mediado por simulaciones. En consonancia con lo reportado hasta el momento por la literatura, se presenta el problema de investigación abordado en esta tesis.

En el tercer capítulo se exponen en profundidad los enfoques teóricos implementados a lo largo de toda la tesis. Por un lado, se presentan las características salientes de los abordajes cognitivista-individual instanciado en la Teoría de Clases de Coordinación (TCC) utilizada en este trabajo para el modelado del desarrollo conceptual. Por otro lado, se describen los aspectos más relevantes para esta tesis de las teorías de aprendizaje desde el abordaje sociocultural utilizadas en diálogo y consonancia con la TCC.

En el cuarto capítulo se detallan los fundamentos teóricos de la implementación de metodologías interpretativas y entrevistas clínicas para entender el desarrollo conceptual de estudiantes de física. Se exploran las ventajas y desventajas de estos marcos, como así también los alcances y limitaciones de los denominados estudios de caso. Por último, se describe en líneas generales los estudios realizados durante este trabajo.

En el quinto capítulo se exponen en tres instancias los trabajos realizados. En primer lugar, se presenta un estudio de abordaje de dificultades conceptuales identificadas en el contexto de transformaciones termodinámicas. En segundo lugar, un estudio profundo del desarrollo conceptual en entorno colectivo que presentan

estudiantes de física a la hora de abordar situaciones donde se instancien conceptos de termodinámica, en particular entropía. En tercer lugar, a partir de estudios preliminares se desarrolla una simulación computacional para atender dificultades de modelización para el caso de reservorios termodinámicos. Se exponen los resultados encontrados a raíz de entrevistas clínicas con la implementación de simulaciones.

Finalmente, en el sexto capítulo se discuten las conclusiones de la investigación y se proponen nuevos horizontes y perspectivas futuras.

Capítulo 2

Estado del Arte en Aprendizaje de Conceptos

A finales de los años 80, un estudio realizado en la universidad de Harvard se hizo muy popular. El proyecto denominado *A Private Universe* (Sadler, Schneps y Woll, 1989), realizó pruebas en estudiantes recién egresados de esta universidad. El trabajo consistió en realizarle dos sencillas preguntas a una muestra de 25 estudiantes de la población de egresados: ¿cuál es la causa de las estaciones? y ¿cuál es la causa de las fases de la luna? Sorprendentemente, 23 de los 25 estudiantes tuvieron dificultades para abordar estas preguntas, donde las respuestas típicas fueron que las estaciones se deben a la cercanía al sol y las fases con la sombra de la Tierra sobre la Luna.

A pesar de haber sido instruidos en física y temas afines a movimientos planetarios, los estudiantes exhibieron explicaciones totalmente inesperadas para egresados de una prestigiosa universidad. Es así, que este proyecto exhibió de manera contundente lo que numerosos artículos de investigación habían afirmado durante toda la década: incluso los estudiantes más brillantes no están aprendiendo lo que los educadores creen de su propia enseñanza.

La investigación en enseñanza de las ciencias reportó en la literatura durante años que incluso después de profundas instancias de instrucción en física, los estudiantes presentaban dificultades conceptuales con las ideas más básicas, por ejemplo en el campo de mecánica y con simples aplicaciones de la Primera y Segunda Ley de Newton (Champagne, Klopfer y Anderson, 1980; Clement, 1982; Trowbridge y McDermott, 1980). Incluso se crearon algunos cuestionarios como el denominado *Force Conceptual Inventory* para que docentes pudieran identificar estos hallazgos a lo largo de sus clases.

A raíz de estos fenómenos comenzó una transformación en el campo de la educación en ciencias para promover lo que se denominó el *cambio conceptual*. Si bien es un campo con muchas controversias y visiones encontradas, como veremos más adelante, hubo un gran acuerdo en algunos fenómenos básicos; a) los estudiantes exhiben dificultades con preguntas de tipo cualitativas incluso aquellos que pueden resolver problemas cuantitativos estándar y b) las respuestas incorrectas a esas preguntas pueden agruparse en algunas pocas alternativas.

La investigación a lo largo de los años 80 mostró que los estudiantes atravesaban su instrucción habiendo memorizado hechos y algoritmos, pero con su comprensión conceptual esencialmente sin cambios. Muchos estudios se orientaron a describir y reportar cuáles eran las ideas que los estudiantes presentaban antes de la instrucción y que se mantenían sin grandes alteraciones después de ella, haciéndolos construir explicaciones incorrectas o incompletas de los fenómenos. Estas ideas

fueron denominadas de diversas formas, como *concepciones alternativas*, *teorías intuitivas*, *marcos alternativos* o *teoría ingenua*. Sin embargo el término *misconception* fue el más utilizado en la comunidad.

El interés de la comunidad para que los estudiantes logren transformar sus *misconceptions* y orientar la enseñanza hacia una que favorezca el *cambio conceptual*, trajo nuevos interrogantes. ¿Cuáles son las concepciones de los estudiantes inicialmente y cómo estas cambian o pueden cambiarse? ¿Cómo se desarrolla el cambio conceptual?

2.1. Cambio Conceptual en Física

En la búsqueda de entender y describir la naturaleza de las concepciones de los estudiantes y cómo estas pueden ser modificadas, tres corrientes distintas se desarrollaron en el campo del cambio conceptual. Estas líneas se diferencian principalmente en cómo modelan la estructura de las ideas de los estudiantes. Dentro de la vasta cantidad de trabajos se han definido distintas formas de abordar las concepciones del aprendiz, con una gran cantidad de evidencia empírica dentro de cada corriente, conduciendo a la coexistencia de estas líneas durante años hasta la actualidad. Más aún, no existe aún una teoría ampliamente aceptada, bien articulada y testada de cambio conceptual (diSessa, 2014). En cambio, este campo aún está compuesto de múltiples perspectivas con consensos, disensos y controversias.

Como se mencionó anteriormente las principales diferencias entre las tres corrientes más importantes desarrolladas en el campo del cambio conceptual yacen en cómo se modela la estructura de las ideas de los estudiantes. Fundamentalmente estas corresponden con el nivel de coherencia que presentan estas ideas entre sí. A continuación se describen aspectos centrales de las tres corrientes.

2.1.1. Las ideas de los estudiantes como en Teorías en la Historia de la Ciencia

A finales de los años 70 y a principios de los 80, la tendencia estuvo en considerar las concepciones de los estudiantes de manera similar a las teorías antiguas en la historia de la ciencia. Dentro de esta perspectiva, estas concepciones tienen una consistencia y coherencia mutua profunda, a nivel de teoría y de características similares a las desarrolladas por las personas de la ciencia en tiempos pasados. De esta manera, las concepciones de los estudiantes tienen parangones con la historia de la ciencia. Por ejemplo, el caso de la idea de calor como sustancia almacenada en los cuerpos reportadas por varios estudios en estudiantes puede tener analogías o compartir características con la concepción de calórico.

De esta forma, la estructura de las ideas previas de los estudiantes son consideradas sofisticados marcos teóricos consistentes a través de los cuales analizan y piensan el mundo. Desde esta visión, el cambio conceptual involucra una fuerte reestructuración de un marco teórico a otro, algo análogo a las revoluciones teóricas planteadas en la historia de la ciencia (Kuhn, 1970).

Quienes defendieron esta visión plantearon algunos requerimientos para que el cambio conceptual pudiera tener lugar (Posner y col., 1982; Strike y Posner, 1985). En primer lugar, tiene que haber insatisfacción con la teoría existente. Al igual que los científicos, uno no se convence de otra teoría hasta que no encuentra a la existente inadecuada. En este sentido los estudiantes deben experimentar problemas con sus concepciones previas para cambiarlas. En segundo lugar, la nueva teoría

debe ser vista como inteligible (capaz de ser entendida), plausible (con potencial para ser una teoría verdadera) y fructífera (con mayores posibilidades que la vieja).

Esta visión del cambio conceptual de los estudiantes proveyó un esquema organizativo de la investigación en educación y algunos cambios importantes. En primera instancia, los errores de los estudiantes dejaron de ser visto sólo como errores para pasar a ser emponderados y valorados diferentes, como teorías alternativas para la interpretación de fenómenos. A su vez, esto ayudó a dar sentido a la «resistencia» que exhibían a cambiar sus ideas por nuevas. Estos aspectos guiaron muchas de las secuencias instruccionales diseñadas en su momento, las cuales pasaron a considerar lo que los estudiantes «pensaban» o «traían».

A pesar de los buenos avances de los diseños para la época, investigaciones siguientes comenzaron a mostrar algunas fragilidades de esta concepción de las ideas previas. Strike y Posner (1992) mostraron que esta visión sobrestimaba el aspecto racional de los estudiantes (a nivel científico) y, sobretodo, que estos no actuaban de la misma forma en todas las circunstancias. A partir de allí, diversos estudios demostraron que los aprendices no son típicamente sistemáticos, sino que son contextuales (Huffman y Heller, 1995; Strike y Posner, 1992; Smith III, Disessa y Roschelle, 1994).

Junto con estos indicios aparecieron nuevos argumentos para desestimar algunos de estos aspectos de esta visión. Las estrategias diseñadas estuvieron fuertemente orientadas a confrontar las ideas previas de los estudiantes. A raíz de esto se llevaron a cabo estudios donde también se encontraron evidencias de que una visión errónea de física se estaba gestando. Nociones de disciplina «anti-intuitiva» se desarrollaron a partir de estas estrategias donde muchos estudiantes no esperaban que la física tuviera sentido (Redish, Saul y Steinberg, 1998).

2.1.2. La Teoría-Teoría

En paralelo a la propuesta anterior se desarrolló una visión cognitivista sobre las ideas de los estudiantes. La misma es denominada como *Teoría-Teoría* y, si bien presenta algún punto en común con la anterior, en este contexto se considera que los estudiantes estructuran sus ideas como teorías pero en el sentido de coherencia y organización de sus presuposiciones. Este desarrollo estuvo basado en numerosos estudios psicológicos de las teorías tempranas de los niños, adolescentes y adultos. En estos usos, el término «teoría» denota algún nivel de coherencia psicológica, la cual puede ser incluso hasta en un nivel inconsciente o implícito (a diferencia de la coherencia científica que es consciente y abierta a escrutinio). Los exponentes de esta visión sostienen que los estudiantes construyen y organizan modelos en situaciones específicas (Vosniadou, 1994).

Entonces, ¿qué implica el cambio conceptual en esta visión? Una vez que los estudiantes construyen un modelo propio con características generativas, exhibe cierta consistencia en algunos dominios. Las concepciones de los estudiantes están compuestas por elementos como presuposiciones implícitas, observaciones, aspectos metaconceptuales, etc. Esta estructura implica y predice que los estudiantes van a recurrir a su marco construido para una variedad de situaciones de manera consistente. El cambio conceptual en este sentido implica reformular los modelos que los estudiantes tienen de situaciones específicas. Dada la consistencia exhibida (Ioannides y Vosniadou, 2002), modificar estos modelos no es tarea simple y es por eso la evidencia encontrada de la persistencia de ideas previas incluso después de instrucción.

Sin embargo, a pesar de la consistencia reportada por autores de esta visión, desarrollos posteriores encontraron resultados desafiantes en donde sus datos exhibieron sustancialmente menor consistencia en sus ideas en diferentes contextos. Estos resultados impulsaron una reformulación de los modelos acerca de la estructuración de ideas de los estudiantes (diSessa, 2014).

2.1.3. Conocimiento de los estudiantes como una colección de Primitivos

A comienzos de los años 90, una nueva propuesta se desarrolló a partir del trabajo de diSessa y colegas (diSessa, 1993). En lugar de considerar el conocimiento intuitivo de los estudiantes como teorías intuitivas a ser confrontadas, superadas, reemplazadas, diSessa lo entiende en términos fragmentados en bloques cognitivos a los cuales llamó «primitivos fenomenológicos» o «p-prims». Se trata de «fenomenológicos» en el sentido que son mínimas abstracciones de la experiencia; cercanos a la experiencia cotidiana. Y son «primitivos» en el sentido de cómo son utilizados por las personas, en su estructura cognitiva muy cercanos a elementos mínimos de memoria, evocados como un todo, un elemento indivisible. Se trata de las estructuras mentales «atómicas» y aisladas que uno puede encontrar.

Estos p-prims funcionan siendo activados o señalados por elementos circunstanciales del contexto. Esto es un aspecto clave que lo diferencia de la visión de «teorías intuitivas» (presentados en las subsecciones anteriores) ya que cualquier p-prim puede ser activado o no. Esta estructura da lugar a la numerosamente reportada «contextualidad» observada en las respuestas de los estudiantes en los estudios. Una gran variedad de estudios empíricos fortalecieron los fundamentos de esta visión, en particular, para el aprendizaje de conceptos en Física.

Es importante resaltar que esta corriente no rechaza la robustez de los razonamientos que los estudiantes pueden exhibir. Esto puede leerse como representar al conocimiento físico intuitivo aleatoriamente incoherente. Por el contrario, la sistematicidad de los razonamientos son ampliamente discutidos (diSessa y Sherin, 1998; diSessa, Gillespie y Esterly, 2004) pero no como una estructura almacenada en el sistema de conocimiento sino como una dinámica contextual compleja.

Desde esta visión el cambio conceptual requiere el agregado y desarrollo de nuevos primitivos fenomenológicos, mecanismos de activación, reorganización de estos mismos y lectura de contexto. La Teoría de Clases de Coordinación representa una de las principales exponentes en esta visión y con gran aplicabilidad al aprendizaje de conceptos en física. Ha tenido una amplia variedad de casos aplicados en la descripción de aprendizaje en el contexto de conceptos en física.

Los estudios que describiremos en esta tesis se enmarcan en esta línea de cambio conceptual. En el próximo capítulo extenderemos los detalles de la Teoría de Clases de Coordinación, sus antecedentes en la descripción de procesos de aprendizaje en física y las principales motivaciones para elegir este marco para los trabajos realizados en cambio conceptual.

Hasta aquí hemos descrito de modo general una rama de una de las vertientes principales del aprendizaje. Esta rama que hemos presentado en estas secciones está estrechamente vinculada con una concepción individual del aprendizaje. Esta vertiente entiende el proceso de aprendizaje como un fenómeno que ocurre principalmente en el individuo, en especial, en la mente y que está relacionado con las formas en las que el conocimiento es representado en ella.

Sin embargo, esta concepción no solamente que no es la única sino que existe una corriente con rasgos diametralmente opuestos a la presentada. Una larga tradición en investigación en educación propone una visión del aprendizaje donde

este proceso no se instancia de manera individual sino que lo hace en la interacción entre miembros de una comunidad de práctica. Esta vertiente se denomina *sociocultural* y se desarrolló de manera paralela a la *individual*.

Desde un comienzo, estas corrientes estuvieron tensionadas mutuamente por sus profundas diferencias a la hora de concebir el aprendizaje. En los últimos quince años, existieron intentos de diálogo entre ambas corrientes. A continuación describiremos la naturaleza de estas tensiones y el estado actual de la búsqueda de diálogo entre los enfoques sociocultural e individual.

2.2. Tensión Sociocultural - Cognición-Individual

El proceso de aprendizaje es complejo y en los últimos 40 años se ha producido un profundo debate sobre qué es el aprendizaje y qué implica. Históricamente hubo dos enfoques bien diferentes, e igualmente importantes, del fenómeno del aprendizaje: el enfoque sociocultural y el cognitivista-individual. Como mencionamos anteriormente los estudios realizados en esta tesis se encuentran anclados principalmente en el paradigma cognitivista individual. Aún así es importante hacer mención de estas discusiones ya que la motivación de algunos de los trabajos que se presentarán está puesta en intentar construir puntos de encuentro entre estas corrientes.

Estos enfoques tienen muchas diferencias entre sí. Principalmente, parten de diferentes concepciones de lo que es el aprendizaje. Para el enfoque sociocultural, el aprendizaje se entiende mejor como los cambios en las prácticas, centrándose en las similitudes y diferencias entre las prácticas en las diferentes actividades humanas y en cómo se adoptan y adaptan las prácticas. En cambio, para el enfoque cognitivista-individual, entender el aprendizaje significa centrarse en cómo se representa el conocimiento en la mente y cómo se adquieren y modifican las representaciones mentales (diSessa, Sherin y Levin, 2016). Estas diferencias influyen en el tipo de preguntas de investigación, en los aspectos metodológicos y en el alcance de los resultados obtenidos. En otras palabras, cada enfoque tiene diferentes cosas que decir sobre el aprendizaje.

En definitiva, el aspecto fundamental donde estos enfoques se enfrentan y se diferencian está en la concepción de dónde proviene el conocimiento y en dónde reside. En estas dimensiones se ve interpelado el ensamble de teorías del aprendizaje desarrollados hasta estos tiempos donde se pueden encapsular dentro de estas etiquetas de cognición y socioculturalismo (Alexander, 1996). Por ejemplo, cuando se habla de cognitivism se enmarcan las propuestas teóricas como el constructivismo radical (Von Glasersfeld, 1991), teoría del procesamiento de la información (Simon, 1979), constructivismo cognitivo (Piaget, 1926) o cuando se menciona socioculturalismo abarca propuestas como socioconstructivismo (Vygotsky, 1987), cognición situada (Greeno y Sande, 2007) o antropología cultural (Lave, Wenger y col., 1991).

Estas dimensiones que definen diferencias epistemológicas importantes entre estos dos enfoques también permiten distinguir cierta amplitud en el espectro de las concepciones que plantean las teorías del aprendizaje respecto al conocimiento. Como propone Alexander (2007), es posible encontrar el ensamble de teorías distribuidas en distintas posiciones epistemológicas. Como se observa en la figura 2.1, existen posiciones radicales donde, por ejemplo, se establece una supremacía de la mente del individuo como constructor de conocimiento y repositorio. En contraposición, otros marcos ubican al conocimiento (fuente y locación) dentro del contexto social inmediato y las respectivas interacciones humanas.

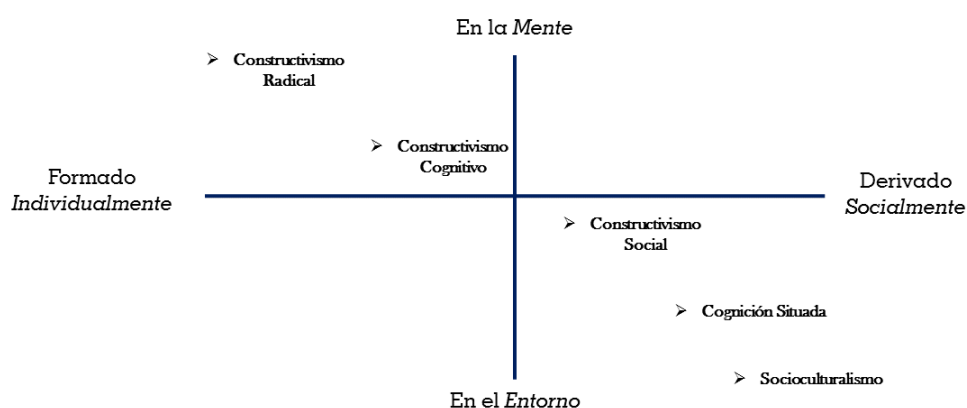


FIGURA 2.1: Posiciones epistemológicas de las teorías de aprendizaje.
(Alexander, 2007)

En las secciones siguientes describiremos brevemente los aspectos más importantes de cada enfoque (aunque profundizaremos más adelante en el cognitivista). Expondremos resumidamente los argumentos que plantea la literatura respecto a la búsqueda de diálogo entre las corrientes y las razones para desarrollar estudios en este sentido.

Enfoque Cognitivista

Si bien en la sección anterior hemos desarrollado con cierto detalle las principales corrientes dentro del cambio conceptual desde una concepción cognitivista, haremos una descripción de tipo general respecto de qué abarca este enfoque en términos macro.

El cognitivismo asume que los individuos construyen conocimiento a partir de las experiencias cotidianas. El foco de las principales líneas de investigación ha estado en el paso de las representaciones naïve a representaciones aceptadas de un fenómeno o evento. Todas las tradiciones cognitivistas se han preocupado en entender el cambio en la estructura cognitiva personal a través de diferentes contextos.

De acuerdo a los desarrollos psicológicos en esta línea, el desarrollo del individuo yace en el cambio en la estructura conceptual vinculado a un dominio. Modificar el dominio del conocimiento lleva a la reestructuración y la construcción de representaciones más sofisticadas. Esquemas (Rumelhart, 1984), teorías de dominio específico (Carey, 1985), modelos mentales (Johnson-Laird, 1983), y categorías ontológicas (Chi, Slotta y De Leeuw, 1994), son algunas de las representaciones que fueron utilizadas para caracterizar la estructura de las concepciones personales. Como hemos mencionado, variadas propuestas intentaron explicar cómo ocurre el cambio en estas estructuras.

Dado que ya hemos descrito las líneas de cambio conceptual, resaltaremos un evento importante en la historia del cognitivismo que fue destacable en la literatura. Se trata del artículo de 1993 de Pintrich, Marx y Boyle, donde proponen que factores afectivos, motivacionales y situacionales a menudo afectan la reestructuración del conocimiento. Este trabajo resultó bisagra en el sentido que obligó a las líneas cognitivistas a esforzarse para considerar estas variables no-cognitivas en la descripción de procesos de cognición (Pintrich, Marx y Boyle, 1993).

Es posible afirmar, que esta contribución resultó ser una de las críticas más importantes a la línea cognitivista que forzó a buscar y encontrar motivaciones para extender los constructos teóricos y tal vez, encontrar respuestas en su contraparte, el enfoque sociocultural.

Enfoque Sociocultural

El Enfoque Sociocultural tiene sus raíces en el trabajo de Vygotsky, según el cual no se espera que los estudiantes hagan un progreso lineal hacia la pericia; más bien, se espera que prueben las palabras y las prácticas, a menudo ensayando términos y comportamientos antes de que hayan aceptado o entendido completamente su significado (Vygotsky, 1987; Wertsch y col., 2007; Daane y col., 2018). El conocimiento no es una entidad en la cabeza de las personas, el cual puede ser adquirido, enriquecido o cambiado, más bien es una actividad que no puede ser separada del contexto en el cual toma lugar. Así, el aprendiz no adquiere conocimiento desde el exterior, sino que participa en actividades que están distribuidas entre los individuos, artefactos y herramientas de la comunidad de práctica (Mason, 2007).

La participación dentro de una comunidad toma una atención central en esta concepción del aprendizaje. Desde este punto de vista participativo, el aprendizaje se indica por los cambios en el discurso y el comportamiento de una persona. Los cambios en el compromiso del discurso, la participación, las argumentaciones, las preguntas, las decisiones, los gestos, entre otros, dan cuenta del proceso de aprendizaje.

Más aún, las unidades de análisis ya no son los individuos, sino la actividad colectiva y situada construida por los individuos. Los investigadores de esta línea conducen los análisis focalizando en la interacción entre individuos a través de la participación y la comunicación a lo largo del tiempo.

Una de las pioneras en la adopción de estas ideas fue Lemke en 1990, cuando propuso que el aprendizaje de la ciencia significa aprender a hablar de ciencia, a utilizar un lenguaje conceptual especializado, a actuar como miembro de la comunidad de personas que lo hacen (Lemke, 1990). Desde este punto de vista, el aprendizaje se produce a través de la negociación del significado del discurso. En este sentido se ha desarrollado mucho contenido, vinculando aprendizaje y análisis del discurso (para una profunda revisión ver Baudino Quiroga y col., 2019).

El cambio conceptual entendido en el enfoque sociocultural tiene tres elementos importantes a considerar. El primero es que el cambio no es considerado como modificaciones en la estructura conceptual sino como modificaciones en cómo estas estructuras se insertan en la participación. En segundo lugar, un concepto no es una entidad mental sino que es parte de una práctica social (Mason, 2007). Los conceptos son herramientas discursivas que utilizan las personas para pensar intramentalmente y comunicar intermentalmente (Säljö, 1999). Tercero y último, estas herramientas no se transfieren entre tareas o actividades como un todo sino que se instancian de forma totalmente contextual.

Sin duda, la naturaleza de la propuesta sociocultural permite describir entornos de aprendizaje similares a los de aula real. Más aún, este enfoque teórico contempla la complejidad del fenómeno de aprendizaje considerando las dinámicas interactivas no como algo complementario sino como el evento central donde ocurre el aprendizaje.

Sin embargo, es importante notar que este enfoque también expuso debilidades o desventajas como marco teórico. En este sentido, algunos críticos señalaron las

limitaciones en la precisión de las descripciones del procesos de aprendizaje en términos de estructura individual.

Los desafíos entre soculturalismo y cognitivismo se enfocaron así en intentar complementar virtudes y limitaciones para describir el complejo fenómeno social del aprendizaje.

Acercamiento de posiciones

A lo largo de la historia, se desarrollaron tensiones y puntos de contacto entre estos enfoques. En cuanto a estos últimos, ambos enfoques comparten un compromiso con el conocimiento y la práctica. Además, algunos aspectos metodológicos, como la grabación en vídeo, formaban parte de esta empresa compartida. Pero, además, a lo largo de los años se han acumulado importantes tensiones. Éstas están relacionadas con los diferentes escenarios de investigación y las obligadas selecciones de los estudios, lo que significa que es realmente difícil abordar este tipo de fenómenos complejos sin centrarse en un aspecto particular y que requiere diferentes configuraciones de los fenómenos de aprendizaje (diSessa, Sherin y Levin, 2016).

Muchos investigadores consideran que construir puentes entre ambos enfoques es importante y fructífero (diSessa, Sherin y Levin, 2016; Mason, 2007), y que es una tarea difícil pero factible (Mason, 2007). De hecho, se han hecho algunos intentos en el pasado reciente. Por ejemplo, Greeno y Van de Sande introdujeron el concepto de comprensión perspectiva para dar cuenta de la cognición desde un marco anclado en el enfoque sociocultural (Greeno y Sande, 2007). Barth-Cohen y Withmann, anclados en un enfoque cognitivista, aplicaron la Teoría de la Coordinación de Clases al aprendizaje colectivo de clases y grupos (Barth-Cohen y Wittmann, 2017).

Pero, ¿cuál es la verdadera utopía de este diálogo? Si bien no es tan simple de responder esta pregunta, existe una respuesta muy intuitiva a esto. El gran anhelo es encontrar un constructo teórico que nos permita modelar el aprendizaje en todas sus dimensiones y con toda su complejidad. Dadas las virtudes y las debilidades de los intentos de modelados, la comunidad apunta a buscar y desarrollar formas de integrar miradas de un fenómeno tan complejo como importante como es el aprendizaje.

2.3. Aprendizaje de Conceptos mediado por simulaciones computacionales

El contenido de esta sección corresponde al artículo publicado en la revista Enseñanza de las Ciencias titulado "Computational Simulations in Physics Education: a critical review of the literature". (Velasco y Buteler, 2017)

El desarrollo de la tecnología en los últimos tiempos impactó de manera directa en la vida cotidiana de las personas. No queda exenta de esta revolución, la educación y menos aún la enseñanza de la física. Numerosas herramientas didácticas han surgido gracias a los avances tecnológicos. Entre una de las más destacadas se encuentran las simulaciones computacionales: representaciones de algún fenómeno o actividad a través de la cual un usuario aprende interactuando (Alessi y Trollip, 2001).

Con el transcurrir del tiempo, la cantidad de simulaciones desarrolladas aumentó exponencialmente, como así también su uso y aplicación en las clases de física de todo el mundo. Acompañando este crecimiento, la comunidad de investigadores en enseñanza de la física se preocuparon por estudiar aquellos beneficios y aportes que podían tener estos programas en el aprendizaje. Desde la década de los 80, diversos artículos fueron publicados en el intento de iluminar este nuevo campo de la enseñanza de la física (Rivers y Vockell, 1987; Wilson y Redish, 1989; Redish, 1993; De Jong y Van Joolingen, 1998). Durante las últimas dos décadas esta área fue foco de numerosas publicaciones, denotando la intensa actividad sobre estos nuevos desafíos producidos por la tecnología.

Es así que en este campo puede encontrarse una extensa variedad de investigaciones orientadas a responder las principales preguntas acerca de la relación entre las simulaciones computacionales y el desarrollo del aprendizaje. Para quienes se introducen en el área, la extensión del conocimiento en este campo puede resultar poco iluminadora a la hora de identificar los principales avances como así también los interrogantes sin respuesta aún. Afortunadamente, se han desarrollado diversas compilaciones de artículos en los últimos tiempos, que permiten una visión general para iniciarse en el área (Lee y col., 2011; Smetana y Bell, 2012). A pesar de las valiosas contribuciones de las investigaciones, existen resultados disímiles y las compilaciones no terminan de ser lo suficientemente iluminadoras.

De esta manera, no resulta una tarea simple poder identificar las cuestiones anteriormente mencionadas. Por este motivo, a continuación se presenta una revisión de las investigaciones publicadas en los últimos años con el objetivo de enfatizar en los puntos de consenso y disenso encontrados en los resultados y conclusiones de los autores, identificando los acuerdos generales y destacando los núcleos de discusión. El objetivo de esta presentación es describir los principales desafíos que afronta el área en tiempos actuales y las demandas más importantes de la comunidad.

2.3.1. Revisión

Con el fin de responder a los objetivos de esta revisión, se realiza entonces una búsqueda bibliográfica limitada en tiempo y en revistas, como así también en extensos de congresos. La misma contiene cerca de 50 artículos publicados desde el año 1999 hasta el 2015. La intención de estas características es enfatizar en el estado actual del campo cubriendo las principales fuentes afines de publicación.

Es importante destacar que, si bien esta revisión intenta ser amplia y completa en lo que respecta al campo de las simulaciones, lejos está de poder lograr ese objetivo siendo muy probable que valiosos artículos y contribuciones estén quedando fuera de la presentación. Sin embargo, su extensión posiblemente le permite ser una muestra representativa que oriente a quienes se están iniciando en esta área.

La metodología de búsqueda de los artículos estuvo sistematizada mediante los buscadores de cada una de las revistas. Se analizaron los trabajos que resultaban de buscar mediante las siguientes palabras claves: simulaciones computacionales, enseñanza de la física.

Dentro del universo de artículos analizados es posible identificar tres grupos de trabajos bien diferenciados los cuales fueron denominados: de *diseño*, de *impacto* y de *proceso*.

Diseño

Los trabajos de Diseño son aquellos artículos destinados a estudiar aspectos de la configuración y creación de una simulación. Los objetivos en estos trabajos están orientados a obtener información acerca de las simulaciones en sí mismas y de sus características que podrían tener beneficios para la enseñanza. Los resultados de estos trabajos permiten definir características para el diseño de programas, en lo que confiere a interfaz y funcionalidades.

Proceso

Otro tipo de trabajos son los abocados al estudio del proceso de aprendizaje de conceptos físicos mediado por simulaciones. La dinámica de estos artículos se centra en estudiar detalladamente el proceso por el cual un estudiante aprende un concepto y la intervención del programa durante el mismo. En este tipo de investigaciones, el foco no está en la simulación per se sino en su rol como herramienta para el aprendizaje de conceptos.

Impacto

Los artículos de Impacto se tratan de estudios centrados en probar o analizar el impacto de las simulaciones como herramienta instruccional en comparación con otras. Estas investigaciones se caracterizan por lo general en utilizar una metodología antes y después, fijando como control una secuencia “tradicional” y de esta forma, realizar un estudio comparativo. Los resultados se centran en mostrar las mejoras o no en el desempeño, tras la aplicación de una secuencia en la que se utiliza simulaciones.

2.3.2. Resultados: Estado del Arte

Los resultados obtenidos de la revisión arrojaron una distribución desigual a lo largo de las tres categorías (ver figura 2.2). La bibliografía está orientada en mayor medida a verificar el impacto de las simulaciones frente a otras herramientas de enseñanza, mientras que en menor medida a estudiar minuciosamente la intervención de los programas en el proceso de aprendizaje.

Este estudio está orientado a resaltar aquellos núcleos de consenso que se pueden encontrar en la bibliografía, como así también, los puntos de disenso y discusión latentes en la comunidad de enseñanza de la física respecto a este campo. Por ello, en cada una de las categorías se amplía una discusión acerca de los resultados encontrados por los diversos trabajos, esperando que resulte esclarecedor sobre el estado de este campo. A continuación, se detalla el análisis para cada una de las tres secciones correspondientes a las categorías definidas.

Diseño

El crecimiento de la tecnología en los últimos años produjo un gran desarrollo de simulaciones computacionales con fines instruccionales. Los avances también permitieron crear programas cada vez más complejos y sofisticados en lo que a su diseño y funcionalidad respecta. Es así, que el diseño comenzó a formar parte de un nuevo campo para los investigadores y, porque no también, para los desarrolladores. Focalizados en detectar las características de las simulaciones que mejoraban las prestaciones para los usuarios, diversos trabajos se llevaron adelante.

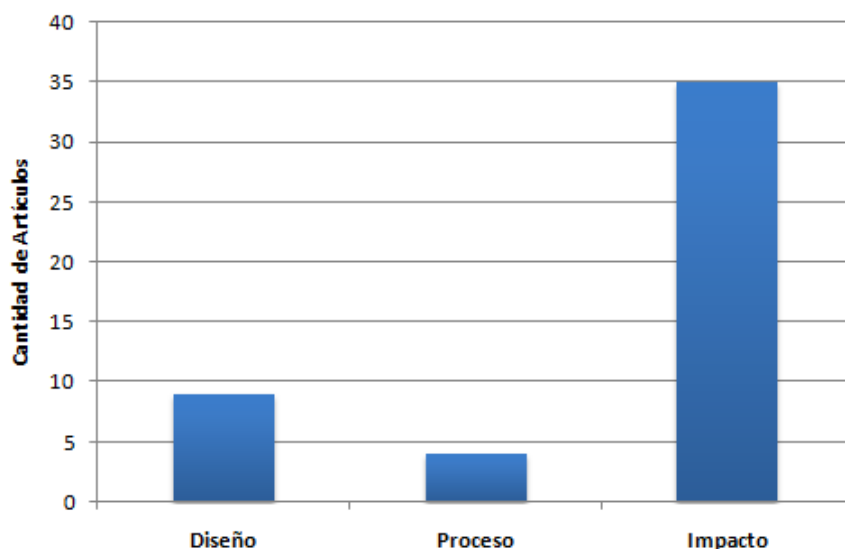


FIGURA 2.2: Distribución de artículos según la categoría

Las investigaciones en este campo muestran un fuerte núcleo de consenso generalizado; el uso de las simulaciones como herramientas instruccionales es sensible a sus características de diseño, como la interactividad, el nivel de animación, el realismo, la distribución de leyendas, la complejidad de la representación, entre otros. Dentro de este núcleo, es posible identificar algunos puntos de consenso y disenso entre los resultados y conclusiones encontradas en la bibliografía por parte de diferentes autores. Se enfatizan tres focos de interés: la interactividad, el realismo y la complejidad.

Interactividad

En primer lugar es importante definir qué se entiende por interactividad en el caso de las simulaciones. El término está asociado a la relación usuario-programa en un sentido amplio, contemplando las posibilidades del mismo de intervenir, cambiar parámetros, condiciones, modelos, etc. Los programas educativos pueden tener distintos niveles de interactividad, con animaciones puramente demostrativas en los niveles bajos o múltiples opciones y controles para niveles más altos. En este sentido, la bibliografía plantea una misma visión; niveles altos de interactividad afectan de mejor manera los resultados de estudiantes en test que los niveles bajos (Adams, Paulson y Wieman, 2008; Podolefsky y col., 2010; Podolefsky, Perkins y Adams, 2009; Perkins y col., 2012). Algunos autores sostienen que la interactividad es lo que hace útil a una simulación. La interacción permite que el usuario le asigne un significado a los programas permitiendo entre otras cosas la conexión de las animaciones con el fenómeno físico (Adams, Paulson y Wieman, 2008). Más aún, las simulaciones orientadas a la “recolección de datos” automática y su análisis en forma de gráfico son cuestionadas por algunos estudios, los cuales consideran esencial que las simulaciones sean interactivas, ya que posibilitan contemplar las representaciones erróneas de los usuarios, confrontar ideas y promover la reconstrucción de nuevas representaciones (Métoui y Trudel, 2013).

Realismo

Las animaciones, dibujos y esquemas presentes en el cúmulo de simulaciones

desarrolladas, se muestran en una amplia variedad de sofisticación. Se encuentran aquellas que hacen un fuerte hincapié en el detalle, tanto en el gráfico como en la modelización, es decir, con un alto nivel de realismo, como también aquellas que son más esquemáticas, sin tanto detalle y con más énfasis en la simplificación del modelo físico (Jara y col., 2012; Couture, 2004). Dado este panorama en los desarrolladores, surge una pregunta natural: ¿cuáles favorecen el aprendizaje y en qué contexto? La bibliografía responde parte de este interrogante, pero no de manera completa.

Martínez y col. (2011) estudian la relación entre el realismo que presentan las simulaciones y el desempeño en el tópicó aberraciones de óptica. Mediante pretest y postest comparan tres grupos de estudiantes que se instruyen de tres maneras diferentes: simulaciones con alto nivel de realismo, simulaciones esquemáticas y exposiciones tradicionales. Los resultados muestran un mejor desempeño en el grupo con alto nivel de realismo respecto de los otros. Si bien es importante destacar la iluminación de estos resultados para este campo, resulta natural preguntarse los alcances de los mismos, la generabilidad y la extendibilidad a otros contextos.

Estos autores no son los únicos en abocarse a este tema. Couture (2004) presenta un estudio de caso del proceso de diseño de un laboratorio virtual bajo lo que denominan «principio de realismo». Investiga la credibilidad de la simulación entre potenciales usuarios. Mediante entrevistas y cuestionarios analizan las características que aportan, o no, a la credibilidad de la simulación. Los resultados muestran que ciertas características provenientes del principio de realismo utilizado contribuyen a la verosimilitud y credibilidad, mientras que otras no.

Se trata de un campo en donde existen muchas preguntas sin responder. No son muchos los trabajos dedicados a esto, por lo que preguntas acerca del contexto, la relación entre el nivel del aprendiz y el realismo, la visualización del modelo en la complejidad, entre otras, continúan sin respuesta.

Complejidad

Dado el núcleo de consenso mencionado anteriormente, tiene sentido pensar que las simulaciones deben presentar un diseño intuitivo, de manera que el estudiante pueda explorarla y descubrirla. Las investigaciones en este sentido presentan un acuerdo (Adams, Paulson y Wieman, 2008; Paul, Podolefsky y Perkins, 2013). Sin embargo, este hecho presenta un punto conflictivo en algún sentido. Como se describió anteriormente, la bibliografía sugiere promover la interactividad, el control de parámetros, del modelo, etc. (Adams, Paulson y Wieman, 2008) por un lado, y en algún sentido también el realismo (Martínez y col., 2011). Pero el punto es: ¿la interactividad y/o el realismo afectan la complejidad de la simulación, sumando elementos que al fin de cuentas reste en el diseño intuitivo de la misma?

Posiblemente el análisis de la complejidad de la simulación conlleve a una discusión fuertemente relacionada con los dos focos anteriormente discutidos. Tanto la interactividad como el realismo, pueden ser factores que resten al diseño intuitivo. El primero por el agregado de funcionalidades, cuadros de texto, representaciones, etc., mientras que el segundo por la carga de la representación en la visualización del modelo.

Existe un antecedente de un modelo para caracterizar la complejidad de una simulación. Podolefsky y col. (2010) diseñan un modelo para cuantificar la complejidad de una simulación. En su modelo proponen contener dos aspectos: por un lado la complejidad de la simulación en sí misma, y por otro lado la prioridad de conocimiento establecida por el usuario (un factor influyente en la complejidad

de los programas). El modelo da cuenta de la complejidad mediante el número de controles y las interacciones entre los elementos de la simulación, y también a través de cómo se ajusta con las prioridades de conocimiento del usuario. Resultados preliminares parecen fundamentar la utilidad del modelo.

A pesar de la existencia de este modelo, la bibliografía está lejos de ser vasta en mecanismos para caracterizar la complejidad, como así también en estudios sobre la influencia de la misma en procesos de aprendizaje y su relación con otros aspectos de las simulaciones.

Síntesis

En este panorama, es importante enfatizar una cuestión transversal a todos los puntos. La indagación bibliográfica revela que estas características de las simulaciones siempre deben contemplar el contexto de su aplicación, principalmente el usuario. Las investigaciones muestran la necesidad de adaptaciones de las simulaciones para diferentes contextos, lo cual habla de las dificultades que se encuentran para extender los resultados y concluir en generalizaciones. Aunque resulta natural, y hasta una tendencia de las investigaciones promover ciertas regularidades, aparentemente no sería el caso para este campo, al menos con la base empírica de la actualidad.

En resumen, las publicaciones de los últimos 15 años referidas al diseño de simulaciones recomiendan que los mismos estén orientados a promover la interactividad y el realismo. No parece estar claro en qué medida estos factores afectan la complejidad de la simulación, lo que iría en desmedro de la intuitividad que debe caracterizar a la misma. Si resulta común el diseño de los programas de manera iterativa, siendo éste un ciclo retroalimentado entre el desarrollador y los usuarios.

Proceso

En la revisión de artículos en este campo, es posible distinguir un grupo de artículos orientados a estudiar de manera más detallada el proceso de aprendizaje mediado por simulaciones, con énfasis en el proceso. Se trata de artículos que realizan análisis de tipo microgenético (cambios de pequeña magnitud en procesos psicológicos), utilizando entrevistas clínicas durante y/o a posteriori de la actividad planteada a los sujetos participantes y estudiando la evolución de la comprensión en pequeñas etapas y con grupos reducidos en número. Si bien estos tipos de estudios no abundan, es importante destacar algunos resultados identificados en la bibliografía debido a sus importantes contribuciones a la hora de entender el aprendizaje mediante programas didácticos.

Los estudios en este campo se orientan al análisis del desarrollo conceptual a través de las representaciones computacionales. El principal consenso que es posible hallar en los resultados de los trabajos, es que la interacción de los estudiantes con las diversas características de este tipo de representaciones favorece el desarrollo conceptual (Parnafes, 2007; Sengupta, Krinks y Clark, 2015; Tao, 2004; Tao y Gunstone, 1999).

Es posible encontrar diversas características de la interacción con las simulaciones que promueven el desarrollo conceptual. La naturaleza dinámica de las simulaciones apoyan la visualización y experimentación con aspectos del fenómeno estudiado. Este tipo de representaciones contrasta con la complejidad visual del mundo físico, permitiendo focalizar en aspectos específicos de manera simple y

accesible (Tao, 2004). Así también, ayudan a los estudiantes a promover su razonamiento intuitivo acerca del mundo físico iluminando las fronteras de los contextos de sus conocimientos previos si se cuenta con una interacción que involucre los conceptos relevantes de la situación (Sengupta, Krinks y Clark, 2015).

Las múltiples visualizaciones hacen explícitas inconsistencias conceptuales, lo cual promueve en los estudiantes una búsqueda de coherencia conceptual. El control de parámetros y condiciones contribuye a los progresos conceptuales de los estudiantes, como así también las animaciones que permiten un puente entre el mundo dinámico real y las representaciones virtuales. Una herramienta valiosa que presentan las simulaciones es la facultad de transformar eventos temporales de fenómenos físicos en espaciales. Una representación espacial de un evento temporal permite focalizar características específicas una y otra vez, como así también la misma característica en diferentes contextos (Parnafes, 2007).

A pesar de los trabajos que sostienen los aportes de las simulaciones al cambio conceptual, tanto en la actualidad como en bibliografía más antigua, algunos resultados muestran que la simulación en sí misma no es suficiente para promover el cambio conceptual sino que se necesita que los estudiantes reflexionen sobre sus concepciones y las reconstruyan (Tao y Gunstone, 1999).

En cuanto a metodología respecta, los autores dedicados a este campo destacan el análisis microgenético como una herramienta efectiva para observar las estructuras de conocimiento y la evolución de los pensamientos de los estudiantes (Sengupta, Krinks y Clark, 2015).

Síntesis

En resumen, estos trabajos iluminan parte del proceso de aprendizaje mediado por simulaciones. Se encuentran específicas relaciones entre determinadas características de las representaciones y el desarrollo conceptual, siempre vinculado a un contexto particular. Según la bibliografía, algunos aspectos de los programas favorecen la comprensión para algunos entornos particulares. Resulta natural pensar en las limitaciones de estudios microgenéticos orientados a estos procesos en lo que a extensibilidad respecta, sin embargo sus aportes son muy constructivos a la hora de intentar entender en detalle lo que ocurre en el aprendizaje cuando se utiliza una simulación como herramienta instruccional.

Impacto

Sin duda uno de los principales focos de la investigación en enseñanza de la física en este campo, estuvo en la comparación de esta herramienta respecto a otras para evaluar su impacto en el momento del aprendizaje. Es así, que diversos estudios comparativos se desarrollaron en los últimos tiempos, en particular en esta orientación. Es notable cómo esta categoría destaca en cantidad y diversidad de estudios. El auge de los desarrolladores de programas, se vio acompañado por una fuerte intención de evaluar los mismos frente a otras opciones instruccionales.

La revisión permite, como en otras categorías, detectar un núcleo de consenso generalizado entre los autores; las simulaciones computacionales resultan más efectivas como herramienta instruccional que varias de las “tradicionales” (Chang y col., 2008; Freitas, 2006; Finkelstein y col., 2005; Keller y col., 2006; Keller y col., 2007; Podolefsky y col., 2010; Ronen y Eliahu, 2000; Smetana y Bell, 2012; Stern, Barnea y Shauli, 2008; Zacharia, 2005; Zacharia y Anderson, 2003; Zacharia, 2007). Más

allá de esta concordancia en los resultados de las investigaciones, resulta imprescindible considerar los contextos en que los mismos se obtuvieron. Con la misma dinámica que en secciones anteriores, se plantean algunos focos de discusión encontrados en la bibliografía: soporte, beneficios y laboratorio.

Soporte

La bibliografía denota un profundo acuerdo en que las simulaciones en sí mismas no tienen ninguna funcionalidad, sino que deben estar enmarcadas en una secuencia didáctica y que su aporte corresponde con el de una herramienta. Sin embargo, la profundización en este tema despierta diversos interrogantes: ¿de qué manera deben estar guiadas las actividades con estos programas? ¿Qué estructura debe acompañar a las simulaciones para optimizar sus beneficios? ¿Cuán rígidas deben ser las instrucciones para los usuarios? En el marco de estos interrogantes diversas investigaciones se desarrollaron en el último tiempo buscando dar respuestas.

Chamberlain y col. (2014) desarrollaron una investigación que pretende dar cuenta en qué medida el nivel de orientación de las actividades propuestas para una simulación (en este caso, de química) afecta la interacción del estudiante con la misma. El experimento que utilizaron cuenta con una simulación a la cual expusieron a tres grupos de estudiantes. Posterior a una sesión de instrucción, los tres grupos realizaron tres tipos de actividades con la simulación las cuales diferían en el nivel de orientación. Durante estas actividades que realizaron en pequeños grupos, los investigadores tomaron tres clases de registros: interactividad con la simulación, notas de clase y diagrama de reproducción (una semana después se solicitó a los estudiantes que dibujaran un esquema de los aspectos que recordaran de la simulación). Estos registros serían posteriormente contrastados con las características centrales de la simulación. Los resultados muestran que mientras menos conducidas están las actividades hay una mayor interactividad y exploración de la simulación en general (esto se hace analizando cuántas características de la simulación intervinieron en la interacción y el tiempo de interacción).

En conclusión, los autores exponen que estudiantes provistos con una simulación interactiva y una mínima orientación en una clase, interactúan con la simulación y atienden a las principales características de la misma. Más aún, actividades fuertemente guiadas disminuyen significativamente la interacción de los estudiantes y la exploración de la simulación, limitando a estos a focalizar sólo en las características mencionadas en las instrucciones (Chamberlain y col., 2014).

En otro trabajo en este campo, Adams y col. (2008) investigan la relación entre la exploración de una simulación por parte de un estudiante y el soporte que recibe. El experimento consistió en un serie de entrevistas que realizaron a estudiantes mientras interactuaban con simulaciones. Se distribuyeron distintos tipos de actividades exploratorias en relación al nivel de orientación: sin instrucción, preguntas orientadoras, guía orientadora y fuertemente orientada. Del análisis de las entrevistas los autores concluyen que bajos niveles de orientación promueven la exploración de los estudiantes de las simulaciones donde ganan visión física a partir de sus propias preguntas.

En vista de estos artículos, se puede observar cierta correspondencia en sus conclusiones indicando que niveles bajos de orientación favorecen a optimizar los beneficios de las simulaciones como la exploración, la interactividad, las discusiones, entre otras. Tiene sentido pensar entonces que, a pesar del gran consenso en que la simulación debe estar acompañada por instrucción, la intervención no

debe ser fuertemente estructurada ya que minimiza las ventajas de esta herramienta. Ahora, resulta natural preguntarse: ¿cuándo una instrucción tiene “bajo nivel de orientación”? ó ¿cómo caracterizarla? Teniendo estas respuestas, posiblemente exista mejores condiciones para identificar el nivel óptimo de orientación, y más aún, que contemple también las circunstancias de contexto. En los últimos años, se detectan intentos de desarrollar guías orientadoras que contribuyan con esta causa (Olde y Jong, 2006; Zhang y col., 2004; Fund, 2007; Rehn y col., 2013).

Beneficios

Como se ha mencionado anteriormente, son numerosos los trabajos que destacan diversos beneficios de las simulaciones como herramienta para enseñar (Chang y col., 2008; Smetana y Bell, 2012; Keller y col., 2006; Steinberg, 2000; Bozkurt e Ilik, 2010; Blake y Scanlon, 2007; Schulze y col., 2000; Alvarez, 2010; Alzugaray, Massa y Moreira, 2014; Andrés, Pesa y Meneses, 2006; López Ríos, Veit y Araujo, 2011; Sánchez, 2007; Sánchez-Sánchez, 2013; Clark y Jorde, 2004). En este apartado se intenta describir los principales beneficios destacados por la bibliografía.

Numerosos artículos destacan un mejor desempeño de estudiantes instruidos mediante simulaciones computacionales en comparación con otras secuencias. Los resultados muestran que los estudiantes mejoran sus desempeños en test conceptuales suministrados después de ser instruidos mediante simulaciones en tópicos como óptica geométrica (Chang y col., 2008; Chirino, Rodríguez y Rodríguez, 2015), oscilaciones (Swaak y De Jong, 2001), circuitos de corriente directa (Keller y col., 2006; Ronen y Eliahu, 2000; Swaak y De Jong, 2001), péndulo y difracción (Blake y Scanlon, 2007), campo electromagnético (Alvarez, 2010; García Barneto y Bolívar Raya, 2014), ondas mecánicas (Andrés, Pesa y Meneses, 2006) y cinemática (Steinberg, 2000). Los programas contribuyen a una realimentación constructiva ayudando a los estudiantes a identificar y corregir sus concepciones alternativas (Ronen y Eliahu, 2000). También en la formación de profesores, el uso de programas computacionales afecta positivamente la calidad y la naturaleza de las explicaciones en relación a fenómenos térmicos, mecánicos y ondulatorios (Zacharia, 2005). En menor medida se encuentran estudios que, tras un experimento de las mismas características, no encuentran diferencias significativas entre estudiantes instruidos mediante simulaciones y estudiantes instruidos con un conjunto de actividades en lápiz y papel (Steinberg, 2000; Hsu y Thomas, 2002).

Otros autores lograron obtener beneficios integrando un modelo a la visualización de la sensación térmica. Clark y Jorde (2004) exploran si es posible facilitar la comprensión de estudiantes y asimilación del equilibrio térmico mediante la revisión de sus ideas apoyadas experimentalmente acerca de por qué los objetos se sienten térmicamente en la forma que lo hacen. Los autores hipotetizan que integrando un modelo táctil en una visualización existente de equilibrio térmico no sólo ayudará a los estudiantes a revisar su comprensión acerca de la sensación del tacto, sino que también los ayudará a conectar estas ideas revisadas para incrementar su comprensión acerca del equilibrio térmico. Mediante pretest y postest, sumando algunas entrevistas, obtuvieron mejoras significativas para quienes habían integrado el modelo.

Es posible destacar dos aspectos importantes comunes en estos artículos. Por un lado, el consenso generalizado en que las simulaciones mejoran el rendimiento de estudiantes en física. Por otro lado, es importante notar que estas investigaciones comparten una metodología común, caracterizada por la realización de pruebas antes y después de secuencias didácticas diferentes para grupos que son comparados.

Si bien los resultados muestran un contundente acuerdo respecto a que las simulaciones otorgan beneficios para el aprendizaje, la metodología no permite identificar en profundidad cuáles son, en qué contextos, para qué circunstancias, cómo lo hacen, etc.

Laboratorio

Resulta natural notar que las simulaciones otorgan beneficios como herramienta instruccional en cuanto a practicidad respecta. En algunas ocasiones, los experimentos de laboratorio requieren de espacio, tiempo, materiales, etc. que dificulta la posibilidad de ser llevados a cabo, como así también la visualización de ciertos fenómenos debido a su configuración o tamaño. En este sentido, los programas aparecen como una alternativa que podría ser favorable ante estas circunstancias (Zacharia, Olympiou y Papaevripidou, 2008). Sin embargo, es importante no dejar de preguntarse ¿las simulaciones son realmente una alternativa favorable para resolver estas cuestiones? ¿qué beneficios presenta por sobre el laboratorio real? ¿qué aspectos del real no pueden ser reemplazados por programas? Entre el sinfín de preguntas que existen alrededor de esta discusión, la comunidad de investigadores ha comenzado, en este último tiempo, a ofrecer algunas respuestas.

Finkelstein y col. (2005) comparan dos grupos de estudiantes que realizan un laboratorio: uno real y el otro virtual. Mediante test conceptual y medición de tiempo de tareas entre otros, arriban a la conclusión de que el laboratorio virtual es más eficiente que el real para el aprendizaje de conceptos en electricidad. En otros estudios, Zacharia (2007) y Zacharia y col. (2008) demuestran que una secuencia instruccional con entornos virtuales y reales produce mejores desempeños de los alumnos que entornos exclusivamente reales.

La bibliografía señala que para determinados contextos, las simulaciones ofrecen posibilidades para favorecer el aprendizaje y beneficios en practicidad y viabilidad, que incluso pueden ser superadoras de la experiencia real. Sin embargo, la metodología de estas investigaciones no permite realizar inferencias más precisas sobre estos resultados.

Síntesis

Se pueden destacar los siguientes núcleos de consenso en la comunidad de investigadores respecto a esta categoría:

- Las simulaciones en sí mismas no tienen ninguna funcionalidad, sino que por el contrario deben ser incluidas como herramientas en una secuencia que debe contar con una guía instruccional que soporte la actividad con las mismas. Este soporte no debe ser fuertemente estructurado, sino que debe ser lo suficientemente flexible para guiar al estudiante en un marco de libertad de exploración e interacción que maximice los beneficios de esta herramienta.
- Las simulaciones afectan positivamente en los desempeños de estudiantes en pruebas conceptuales en comparación con otras herramientas “tradicionales” o que no incluyan a las mismas. Si bien hay trabajos que no encuentran diferencias significativas tras la utilización de esta herramienta en una secuencia didáctica, son pocos en comparación con los mencionados anteriormente. No

se encontraron trabajos que concluyan en una influencia negativa de los programas en el aprendizaje de estudiantes. A pesar que los resultados muestran un contundente acuerdo respecto a que las simulaciones otorgan beneficios para el aprendizaje, la metodología no permite identificar en profundidad cuáles son, en qué contextos, para qué circunstancias ni cómo lo hacen.

- Entornos virtuales, o virtuales combinados con reales favorecen el desempeño de estudiantes en test conceptuales en comparación con ambientes de laboratorio reales exclusivamente. Las metodologías presentadas en las investigaciones de esta categoría se caracterizan por ser del tipo antes y después. Si bien los resultados de las mismas aportan e iluminan este campo de conocimiento, como así también, gestan y fomentan nuevas preguntas, no ofrecen respuestas respecto al proceso de aprendizaje en sí mismo mediado por simulaciones.

2.4. Conclusiones del Estado del Arte

Del análisis del estado del arte en relación al cambio conceptual y al aprendizaje de conceptos mediado por simulaciones es posible encontrar diversas oportunidades y desafíos para abordar. Presentamos en las dos siguientes subsecciones las principales conclusiones de la situación en la que se encuentra el área.

2.4.1. Sobre investigación en cambio conceptual

Lo reportado en la literatura por la comunidad de investigadores refleja de forma clara cuál es el desafío que enfrenta el área en los últimos tiempos en relación al aprendizaje de conceptos. En este sentido, la necesidad de una descripción completa del proceso de aprendizaje impulsó a las corrientes sociocultural y cognitivista a comenzar a buscar puntos de encuentro entre sus propuestas.

Desde el lado sociocultural, elevar el nivel de detalle en la descripción de las estructuras de conocimiento e interacción, mientras que en el lado cognitivista involucrar en sus descripciones aspectos que exceden lo netamente cognitivo como las motivaciones, lo afectivo, lo social, entre otros.

Dada la naturaleza de las diferencias entre ambos paradigmas, integrar descripciones o acercar posiciones es reportado como un desafío difícil de cumplir, pero no imposible. En tiempos recientes se comenzaron a desarrollar los primeros intentos de diálogo entre las propuestas, con varios formatos y estilos de aproximación de los marcos.

2.4.2. Sobre simulaciones en aprendizaje de conceptos

De la revisión se lograron identificar los principales núcleos de consenso, como así también los de disenso y fuentes de discusión. Resulta importante enfatizar dos aspectos encontrados: por un lado el acuerdo generalizado de las investigaciones en encontrar a las simulaciones como una herramienta con numerosas virtudes a la hora de enseñar física; por el otro la escasez de estudios focalizados en el proceso de aprendizaje a través de simulaciones. A pesar de ser un campo extenso en cuanto a cantidad de artículos, son pocos aquellos dedicados a iluminar de manera más profunda este proceso lo que permitiría identificar con mayor precisión qué aspectos de las simulaciones son beneficiosos para el aprendizaje, en qué contexto, para qué objetivos, entre otros.

Contemplando el estado actual del área de las simulaciones computacionales en la enseñanza de la física, no cabe duda que las simulaciones presentan características que pueden favorecer el aprendizaje. Sin embargo, analizando los artículos y en particular las metodologías, resulta inmediato notar una fuerte tendencia a estudiar el impacto del uso de programas por sobre todas las cosas. En una primera impresión, se podría pensar que gran parte de los trabajos tienden a responder la pregunta ¿Qué ocurre si se utiliza una simulación para enseñar física? Esto no debe entenderse como un defecto, ni una virtud sino como una realidad de este campo en la actualidad.

Sin embargo, en vista de que la comunidad reconoce a las simulaciones como una herramienta para la enseñanza y el aprendizaje de conceptos en física, resultaría natural estudiar sus características, cómo cada una de ellas interactúan en el proceso, qué contextos potencian sus funcionalidades, qué soluciones puede brindar para superar dificultades de aprendizaje, etc., es decir, analizar cómo es la herramienta y cómo utilizarla a lo largo del proceso aprendizaje. De esta manera, se podría contar con conocimiento para decidir cuándo, cómo, dónde y para qué usar una simulación a la hora de enseñar física. Si bien se cuenta con trabajos orientados en este sentido, sería oportuno que este campo continúe el crecimiento en esta dirección para contar con respuestas más certeras y precisas.

La investigación en enseñanza de la física presenta un panorama poco explorado en esta dirección, donde las preguntas son más profundas, exigen más detalle, pero las respuestas pierden generalidad. Se pretende en esta investigación, profundizar en el estudio del proceso de aprendizaje de conceptos en física mediado por simulaciones computacionales.

En el campo de la enseñanza de la física la concepción de aprendizaje de conceptos no es unívoca. Existen distintas corrientes sobre cómo concebir el aprendizaje. En el capítulo siguiente se profundizará en la exposición de la corriente que marcará los estudios de esta tesis denominada Cambio Conceptual. A partir de los desafíos mencionados en este capítulo y en el siguiente definiremos la pregunta de investigación.

2.5. Problema de Investigación

Atendiendo los grandes desafíos de estos tiempos en la conjunción de teorías de cognición individual y abordajes socioculturales, estudiaremos el desarrollo conceptual en entornos colectivos. Desde la Teoría de Clases de Coordinación, enfoque anclado en la cognición individual, pretendemos analizar la evolución de la estructura de conocimiento instanciada en entornos colectivos pequeños con el fin de contribuir en la actual búsqueda de teorías comunes para dominios individuales y colectivos.

Como se menciona en la sección anterior, el campo de investigación de aprendizaje mediado por simulaciones computacionales ha sido largamente explorado pero aún presenta desafíos. En particular, una de las grandes demandas aún presentes pasa por entender cómo estas herramientas forman parte o no del proceso de construcción del conocimiento.

En esta tesis se pretende estudiar el proceso de aprendizaje de conceptos de Física mediados por simulaciones computacionales en entornos colectivos. Específicamente, investigaremos cómo esta herramienta interviene en cada instancia del desarrollo conceptual en el campo de la física. Se busca conocer qué mecanismos

activa, cuáles no, de qué manera asiste al aprendiz, en qué momentos, qué características del programa intervienen en cada etapa del proceso de cambio conceptual, entre otros.

De esta manera, en los capítulos siguientes abordaremos la pregunta:

¿Cómo se desarrolla el cambio conceptual mediante la interacción entre pares y con simulaciones computacionales durante la resolución de problemas de Física?

Capítulo 3

Marco Teórico

Hasta aquí hemos desarrollado las principales motivaciones del surgimiento del cambio conceptual como campo de investigación y sus principales líneas o corrientes que se desarrollaron desde su nacimiento hasta este tiempo. En esta sección se presenta el modelo de conceptos que será utilizado para estudiar procesos de cambio conceptual en los estudios de esta tesis. Recordemos que la principal motivación de esta tesis es entender estos procesos de cambio conceptual durante la interacción de estudiantes con simulaciones computacionales. Como vimos anteriormente, existen diversas corrientes dentro de este campo. Dentro de las mismas, nos hemos centrado en el modelo de cambio conceptual de conocimiento en piezas, en particular en una teoría denominada Clases de Coordinación.

Esta teoría propone un modelo de conceptos, en principio aplicable para conceptos de diversas áreas aunque en la práctica ha sido implementado principalmente en el campo de la física y, en menor medida en el de la matemática. Como hemos mencionado en diversas ocasiones hasta aquí, este modelo no es el único presentado en la literatura. Todo lo contrario. Existen diversos modelos de estructura conceptual. Por lo tanto la pregunta natural que surge es qué nos lleva a elegir esta teoría.

En primer lugar es importante definir qué expectativas se tienen de un modelo de conceptos o, en otras palabras, qué esperamos de un modelo de conceptos. En principio es posible definir al menos cuatro aspectos (diSessa y Sherin, 1998):

- *Estándar de qué cuenta como concepto:* Lo más básico corresponde con poder determinar qué es un concepto y qué no. Parece trivial en principio, pero no lo es. Dado esto, se espera que a partir del modelo sea posible determinar qué es saber un concepto y, en igual importancia, qué es no saber un concepto.
- *Dar cuenta de diferentes tipos de conceptos:* un modelo articulado debe permitirnos encontrar diferentes parámetros en la naturaleza de diferentes conceptos, o llevarnos a la comprensión cualitativa de los diferentes tipos de conceptos.
- *Descripción teórica de los procesos del concepto en uso y en cambio conceptual:* deberíamos poder entender cómo opera un concepto y qué modificaciones sufre como entidad durante el desarrollo del aprendizaje.
- *Tiempo real de proceso:* se espera que el modelo nos permita dar cuenta en tiempo real de cómo se está desarrollando la estructura conceptual. Esto es, no sólo dar cuenta del estado inicial y final, sino de poder entender cómo el concepto trabaja, se desarrolla y evoluciona en el tiempo.

La Teoría de Clases de Coordinación irrumpió en el año 1998 como un constructo teórico que impulsó a atender la necesidad de describir de manera más precisa qué ocurre durante el proceso de aprendizaje de conceptos. Durante esa década,

los modelos teóricos para estudiar cambio conceptual enfatizaban fuertemente la descripción de los estados inicial y final del aprendiz, sin analizar en detalle cómo los conceptos trabajan y evolucionan. La TCC se desarrolló desde un comienzo con el fin de romper con esa dinámica y focalizar en la evolución temporal de la estructura de un concepto.

Esta característica de la TCC se corresponde con una de las principales motivaciones para su elección como marco de análisis. La naturaleza de la propuesta, que describiremos en profundidad en la próxima sección, apunta específicamente a la descripción en detalle del proceso más allá de los estados iniciales y finales. Este insumo permite entender cuestiones más profundas y complejas vinculadas con el aprendizaje.

Otra de las grandes motivaciones que impulsó la propuesta de la TCC y también su elección para los estudios de esta tesis está relacionada con el nivel de detalle en la descripción del proceso. La teoría propone una estructura para analizar a nivel de *grano fino* la evolución de los elementos cognitivos y su respectiva organización.

Este modelo no incluye un simple recuento de elementos de unidades de estructuras mentales asociados con un concepto. Es decir, rompe con las propuestas previas de un concepto como un pequeño número de estructuras mentales conectadas. Por el contrario, lo que describe es una estructura de conocimiento. Este enfoque de estructura de conocimiento es lo que permite analizar el desempeño en tiempo real en términos de elementos particulares de un sistema. Una consecuencia de esta visión, es que los límites de cualquier concepto se vuelven difusos a medida que se involucran diversas partes del sistema. Esto quiere decir que tener o no tener un concepto no es o será tan claro en estos términos, sino que más bien implicará descripciones de formas específicas en que el sistema de concepto de un aprendiz se comporte más como uno de experto.

El modelo propone específicamente una descripción principalmente en términos de desempeño. Si bien la propuesta tiene intentos de proveer una descripción estructural de las partes de un sistema, el foco está orientado a entender cómo funciona el sistema. Esto en realidad se propone para mejorar la conexión con los datos empíricos (diSessa y Sherin, 1998).

La *Teoría de Clases de Coordinación* involucra una clase de conceptos que son de importancia en el aprendizaje de las ciencias, y muy pertinentes en el de la física en particular. Definiremos qué es una clase de coordinación, qué elementos la componen y qué funciones realiza y cumple.

3.1. Teoría de Clases de Coordinación (TCC)

Las clases de coordinación corresponden con el conjunto de formas sistemáticas conectadas de obtener información del mundo (diSessa y Sherin, 1998). La motivación de la idea reside en el hecho de que «mirar cosas» en el mundo -es decir, conseguir información de él - es una actividad cognitiva compleja. Lo que pretende describir el modelo es qué subyace detrás de la habilidad de «ver cosas».

Se trata de la estructura de elementos cognitivos que, de acuerdo a cada situación específica, son organizados para obtener información del mundo. La función central de una clase de coordinación es permitir a las personas leer una particular clase de información dentro de una variedad de situaciones en las que el concepto es útil en el mundo real (Levrini y diSessa, 2008). La información relevante que define a una clase se extiende en cualquier dominio; en física, por ejemplo, puede ser

la magnitud y dirección de una fuerza, la conservación de una cantidad, la distancia entre dos puntos en el espacio-tiempo, etc. En este sentido, «tener» un concepto es en esencia ser capaz de identificar la información que define el concepto en un apropiado rango de situaciones. Decimos "tener" entre comillas porque desde esta visión no existe una discretización en el hecho de tener o no un concepto, sino más bien es un continuo de desarrollo donde se expande la diversidad de situaciones en donde la información distintiva se reconoce.

El trabajo principal de una clase de coordinación es trascender la diversidad y riqueza de la variedad de contextos y situaciones donde se realiza y se vuelve posible la lectura o adquisición de cierta clase particular de información. Esta información puede ser, por ejemplo, identificar los atributos que definen el concepto en cuestión en contextos variados. La clase de coordinación incluye las estrategias de selección de la atención y las estrategias de integración de observaciones.

En términos de diSessa y Sherin (1998), la coordinación tiene un doble significado. En primer lugar, se refiere al hecho, dentro de una situación dada, de las múltiples observaciones que necesitan ser coordinadas para determinar una información necesaria. Esta versión de coordinación es descrita tal vez más precisamente como integración. En segundo lugar, se refiere al hecho de la realización de la misma información a través de contextos y situaciones variadas. Este sentido es entendido como invariancia.

Expondremos un ejemplo de los mismos autores para entender algunos aspectos de la clase. Imaginemos que conocemos a una persona y pensemos que queremos tener información de su personalidad. Supongamos que queremos saber si se trata de una persona confiable o si es agresiva, etc. Para determinar su personalidad buscaremos diversas fuentes de información. La escucharemos, la miraremos, focalizaremos en aspectos particulares, y en otros, no. Prestaremos atención a sus palabras, su tono, o tal vez focalizaremos en las sensaciones que nos genera con la mirada o la voz. Es importante notar cuántas fuentes de información sutiles y/o evidentes entran en juego. Eventualmente coordinaremos el conjunto de extracciones de información de la personalidad, integraremos las diversas observaciones y haremos razonamientos basados en la causalidad psicológica.

Las claves disponibles para determinar la personalidad de esta persona dependerán fuertemente del contexto. No accederemos a los mismos elementos en un espacio informal que en uno formal. En general, tendremos cosas en común entre las situaciones y cosas que no son comunes entre las situaciones. Bien aquí yace lo que se denomina la coordinación de conocimiento: es el conjunto de estrategias para identificar la misma información en diferentes contextos. Esta analogía en determinar la personalidad de una persona ilustra esta idea de una red de estrategias sistematizadas y conectadas para obtener cierta clase de información, lo cual es la esencia de las clases de coordinación.

Ahora bien, ¿cómo se aplica esto en el aprendizaje de conceptos en física? Ya asimilada la idea de sistematicidad de la información a través de contextos, podemos decir que el objetivo de una clase de coordinación en física es obtener información de la entidad a través de situaciones diversas. Esta información puede ser una magnitud, una característica de la entidad o la naturaleza de un proceso. Por ejemplo, pensemos en el caso de la clase de coordinación de Entropía (que en particular, es el concepto utilizado en uno de los estudios). Imaginemos que tenemos una expansión adiabática reversible de un gas ideal y queremos determinar qué ocurre con la entropía del gas, si aumenta, disminuye o no cambia.

Para ello, identificaremos características del proceso, por ejemplo, que es reversible, que se expande el volumen, que es adiabático, que el gas es ideal, etc. Leemos información del contexto y haremos inferencias: pensaremos en la definición matemática, o en la relación entre reversibilidad y entropía, o en la representación microscópica, o en la macroscópica, o en la idea de desorden, etc. Buscaremos causalidades para determinar información de la situación.

Ahora imaginemos que pensamos en una expansión isotérmica reversible. En este nuevo contexto reconoceremos aspectos similares y aspectos diferentes. Los coordinaremos y alinearemos para determinar la misma (o similar) información en esta nueva situación. Coordinaremos entonces la clase entropía. De esto se trata, de obtener información del mundo (en este caso esta magnitud) reconociendo y elaborando estrategias a través de contextos y situaciones variadas.

Estructura y procesos de una Clase de Coordinación

Definida qué es una clase de coordinación, expondremos cómo es su estructura y qué procesos realiza. La estructura de cómo está organizada la clase de coordinación se denomina *arquitectura de la clase* y fundamentalmente tiene dos tipos de elementos que la componen: las *estrategias de lectura* y la *red inferencial*. Estos dos elementos hacen referencia al hecho de que las personas no obtienen información directa y de forma transparente del mundo, sino que el mecanismo que predomina es *observar e inferir*. Los autores de la teoría enfatizan estas dos actividades fuertes de las personas que tienen que ver con la percepción y la inferencia.

Estrategias de Lectura (Extacciones)

Las estrategias de lectura (denominadas *extracciones* en versiones más modernas de la teoría) son las formas en que las personas focalizan su atención y obtienen alguna información relacionada con el mundo real. Son lecturas de algún aspecto del mundo. Estas lecturas tienen dos desempeños primarios que son la integración y la invariancia. Es decir, es reconocer información y además, el proceso de coordinación de diferentes fuentes de información de una situación y a través de contextos.

En el contexto de conceptos de física, las extracciones corresponden con aquella información contextual que la persona lee de la situación en términos del fenómeno que intenta abordar. Puede tratarse de la lectura de alguna cantidad física, algún atributo del concepto o alguna condición de la situación.

La pregunta natural que surge es cómo se infieren estas estrategias de lectura en el desarrollo conceptual en el caso de física. Bien, principalmente se realiza a través del análisis de las verbalizaciones que realizan las personas entrevistadas. A partir del discurso, es posible interpretar aquellos elementos de la clase de coordinación. Esto se profundizará en el capítulo metodología. A continuación mostramos un extracto, a modo de ejemplo (*S_{ejemplo}*), de una verbalización durante la resolución de un problema para el caso de entropía de manera que se puede identificar cómo opera la estructura.

S_{ejemplo}

1. M: Bueno este proceso es reversible, por lo que la entropía del universo no cambia.
2. N: Fijate que no intercambia calor..

3. N: Ojo..acá el proceso de A a B es irreversible... De aquí para allá [de A a B] la entropía del gas aumenta, y de aquí para allá [de B a A] se mantiene constante...Por lo tanto, aumentó

En este fragmento pequeño extraído de uno de los estudios realizados en esta tesis ocurren algunas extracciones claras. En términos generales el problema es predecir la entropía en una expansión libre de un gas. Notemos que estos estudiantes, M y N, extraen información del enunciado que describe el tipo de situación que están pensando. En el turno 1, por ejemplo, M «extrae» como información del contexto que el proceso es reversible. Podríamos decir, que esto corresponde con una estrategia de lectura. Su estructura cognitiva lo habilitó a realizar esta lectura de información de este contexto. El estudiante N realiza una extracción distinta de la situación. Identifica que la expansión libre es un proceso irreversible y además lee una información contextual como es que el gas no intercambia calor. Estas lecturas son distintas a las realizadas por M y tiene que ver con sus diferentes condiciones o estrategias de lectura de cada uno. El criterio operacional se puede observar en el cuadro 3.1.

CUADRO 3.1: Definiciones operacionales de Extracciones.

Elemento	Criterio Operacional	Ejemplo
Extracción	-Refiere a aspectos específicos de los objetos -Son leídos directamente del contexto -No involucra abstracciones	-Este proceso es reversible -No intercambia calor

Red Inferencial o red causal

La red inferencial (a veces denominada también red causal) es el conjunto total de inferencias que uno puede utilizar para obtener o inferir una información particular en cuestión a partir de la información obtenida de las estrategias de lectura. El ensamble de estrategias de razonamientos que determinan cuándo y cómo algunas observaciones se relacionan con la información en cuestión (por ejemplo, la determinación de una cantidad) es lo que llamaremos red inferencial.

Este elemento de la clase de coordinación también es posible de inferir a partir de verbalizaciones y análisis de las dinámicas discursivas durante la interacción entre estudiantes. Si volvemos al ejemplo del extracto, es posible inferir claramente una inferencia que realizan los estudiantes para reconocer información distintiva del fenómeno. Por ejemplo, en el primer turno el estudiante M deduce que la entropía del universo no cambia ya que el sistema realiza un proceso reversible. El proceso es identificar información de la situación (expresada la percepción - extracción) e inferir nueva a partir de la estructura de la clase (red inferencial). El criterio operacional se puede observar en el cuadro 5.1.

Proyección de una Clase

CUADRO 3.2: Definiciones operacionales de una red inferencial.

Elemento	Criterio Operacional	Ejemplo
Red Inferencial	-Involucra conceptos abstractos o leyes físicas - La cadena inferencial es orientada a producir información distintiva	-Es reversible, entonces la entropía no cambia

La teoría presume que «trabajar un concepto» es tratar de lograr utilizarlo en diferentes situaciones. Cada aplicación particular del concepto en un contexto específico es denominado *proyección de la clase*. Diremos que una proyección es la colección de extracciones e inferencias a partir de las cuales se obtiene información distintiva del mundo (ver figura 3.1). Definimos una proyección *alineada* a aquella que se corresponde con el conocimiento normativo (es decir, el científico) y usaremos el término *desalineada* para aquella proyección que no lo haga. El problema de alineamiento tiene que ver con la capacidad de reconocer la misma información distintiva a través de diferentes proyecciones. Se trata de la estabilidad de la clase de coordinación para los diferentes contextos. La experticia en un concepto se desarrolla en la medida que se amplía el rango de contextos y situaciones donde se es capaz de proyectar la clase de coordinación. En este sentido, al rango de aplicación se le denomina expansión (en inglés, *span*) de la clase. Un contexto donde no es posible proyectar la clase de manera alineada se dice que se encuentra fuera del *span*. El desarrollo conceptual reside su atención entonces en extender el *span* de manera consistente. Por ejemplo, una estudiante podría ser capaz de determinar el valor de campo eléctrico para cuatro cargas puntuales pero no implica que sea capaz de hacerlo para el contexto de un anillo de carga uniforme. De esto se trata el problema de *span*.

Un proceso importante y fuertemente involucrado en el desarrollo conceptual es el denominado como *articulación*. Se trata de la instancia de reconocimiento de similitudes y diferencias entre diferentes proyecciones. Mostraremos en los estudios que es un proceso realizado a menudo en el abordaje de situaciones problemáticas. En particular, implica lograr identificar qué características presenta cada proyección y reconocer en las similitudes y diferencias las oportunidades para alinearlas entre sí. Se trata de un proceso de tipo metacognitivo, es decir, de reflexión sobre lo pensado.

Dentro de este modelo de concepto, resta definir específicamente el lugar del cambio conceptual. Se definen dos procesos genéricos que involucra la construcción de una clase de coordinación: *incorporación* y *desplazamiento*. La incorporación es la integración de elementos de conceptualizaciones previas o nuevas para la codificación parcial actual del nuevo concepto. El desplazamiento es el proceso de descarte de elementos de conceptualizaciones previas que inicialmente pueden ser inapropiadas para la funcionalidad de la clase en ese contexto (ver figura 3.2).

3.1.1. Ejemplo: caso concreto de TCC en Física

Expondremos de forma simple y breve un ejemplo para graficar algunos de los elementos propuestos por la teoría. El objetivo es ilustrar algunos conceptos del modelo de clases de coordinación. Supongamos que se presenta una situación de flotación ante una persona como se muestra la figura 3.3. En una primera instancia el individuo podríamos decir que extrae información de la situación. En este caso,

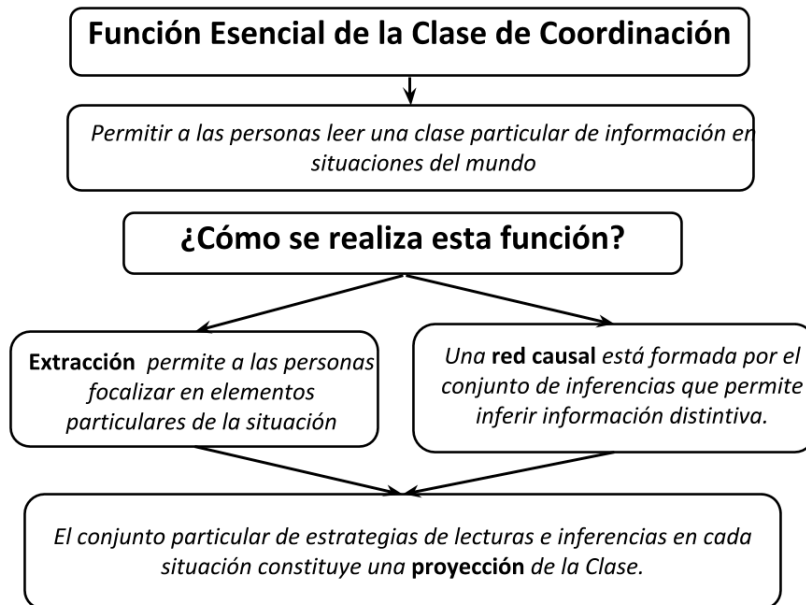


FIGURA 3.1: Estructura de una proyección.

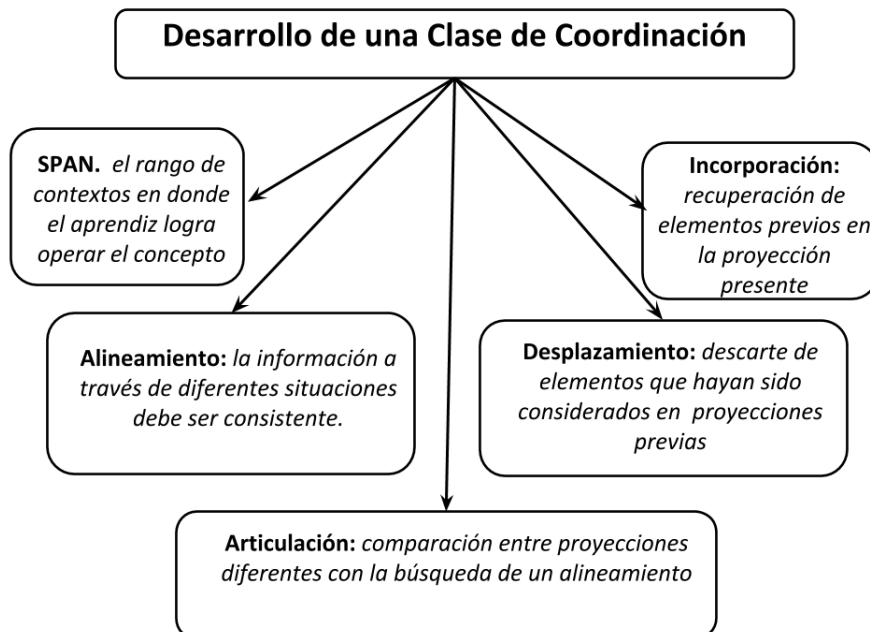


FIGURA 3.2: Desarrollo de una clase de coordinación.

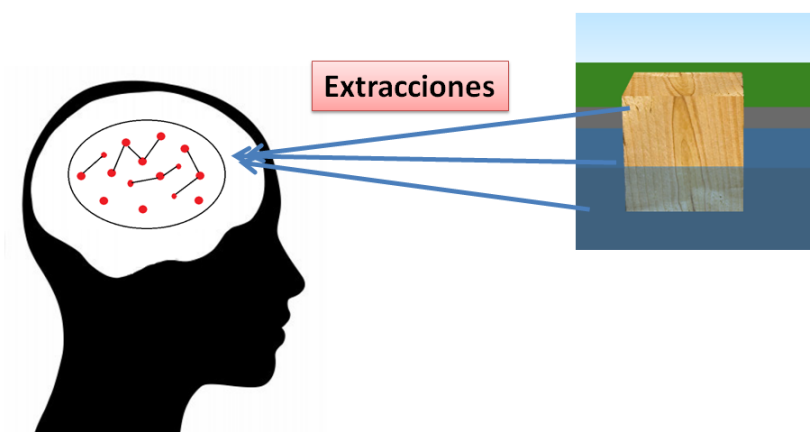


FIGURA 3.3: Extracciones.

sus *extracciones* podrían ser identificar que el cuerpo es de madera, que tiene una parte sumergida y otra no, que el líquido parece ser agua, la masa si se indicara, entre otras. Toda información del contexto y de la situación donde la persona focalice su atención serán las estrategias de lectura o extracciones.

Estas extracciones activarán o no determinados *primitivos fenomenológicos* (aquellas unidades de razonamiento provenientes de la experiencia cotidiana que mencionamos en capítulo anterior) que por ejemplo puede ser el estado de equilibrio. A partir de estas extracciones y de los elementos de conocimiento previos se desarrollarán inferencias, es decir relaciones nuevas que tal vez no se encontraban explícitas en el fenómeno. Estas pueden ser conexiones que permiten inferir nueva información, como por ejemplo que la densidad del bloque es menor que la del fluido, que si el bloque está en equilibrio hay un balance de fuerzas, entre otras. Lógicamente que puede haber inferencias incorrectas también como activarse p-primos que no favorezca el abordaje del problema.

A partir del conjunto de extracciones y de inferencias, se construye lo que se denomina proyección y que corresponde con la aplicación de la clase en un determinado contexto. En este caso podría tratarse de la determinación de la fuerza de empuje en la situación presentada (figura 3.4). También podría presentarse un cambio de contexto o situación, donde se recorrería un camino similar y se completaría otra proyección (figura 3.5). Es importante notar que las condiciones son otras, que el material del bloque es otro, que no flota, que el empuje no es igual al peso en este caso, etc. Las extracciones serán diferentes, las inferencias algunas serán similares a las anteriores y otras serán nuevas, y finalmente se completará una nueva proyección. En este sentido, «tener» un concepto desde esta teoría es ser capaz de proyectar de forma alineada en diferentes situaciones la clase. Dada que la variedad de situaciones no es finita, el término «tener» dentro de la TCC no tiene lugar dada la naturaleza de la propuesta. Reconocer similitudes y diferencias entre las proyecciones es lo que se denomina *articulación*.

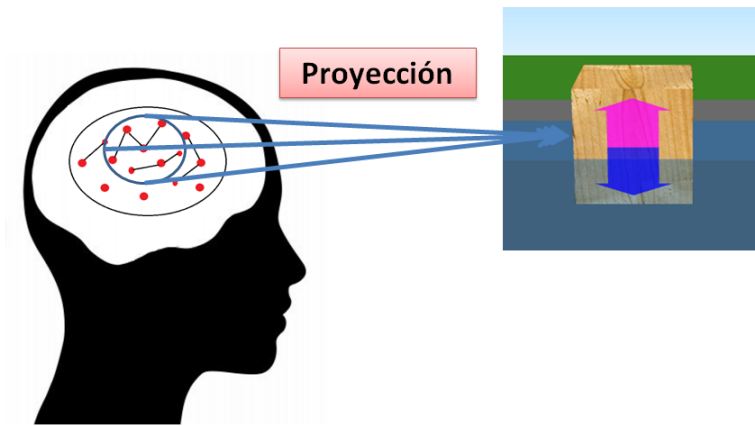


FIGURA 3.4: Proyección de la Clase Empuje

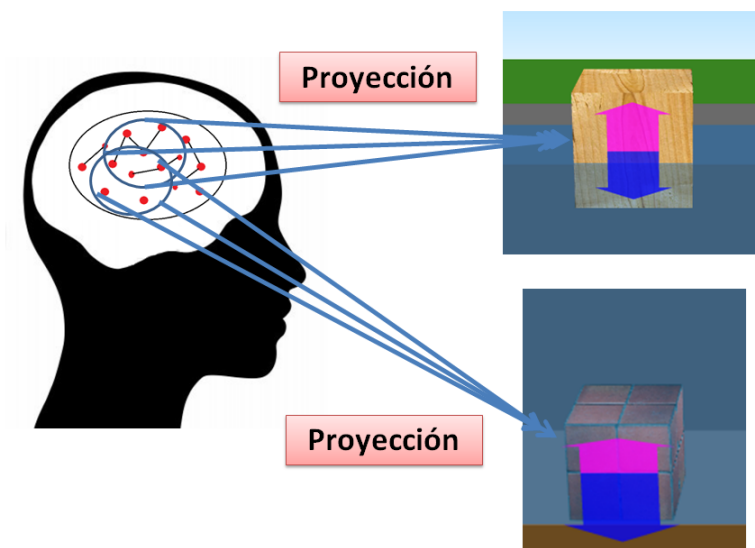


FIGURA 3.5: Otra proyección de la clase Empuje

3.2. Antecedentes de TCC en Física

La elección de este marco estuvo motivada por diversos factores. En primer lugar porque la TCC nace como una propuesta de agregar precisión a la descripción de los procesos de cambio conceptual. Se trata de uno de los marcos que hace particular hincapié en el nivel de detalle en la descripción del desarrollo conceptual. En segundo lugar, este marco cuenta con una amplia historia en su aplicación para describir aprendizaje de conceptos y, en particular, se trata de un marco que ha sido utilizado en numerosas ocasiones para el caso de conceptos en física. Esto ha sido para un amplio espectro de contextos y de conceptos que van desde los típicos de la mecánica hasta conceptos complejos como los de tiempo propio en relatividad especial (Thaden-Koch, Dufresne y Mestre, 2006; Wagner, 2006; Levrini y diSessa, 2008; Buteler y Coleoni, 2016; Parnafes, 2007; Sengupta, Krinks y Clark, 2015).

Este marco se desarrolla por diSessa y Sherin (1998) a partir de evidencia empírica en el caso de un estudiante coordinando el concepto de fuerza durante una situación de resolución de problema. Witmann (2002) utilizó la teoría de la clase de coordinación para entender el razonamiento de los estudiantes en la física de ondas durante la resolución de problemas. Reportó casos en los que los recursos de razonamiento de los estudiantes estaban vinculados de manera inapropiada a modelos de ondas similares a los objetos. También modeló diferentes tipos de cambio conceptual

Wagner (2006) abordó el problema de la transferencia y contribuyó con detalles del desarrollo conceptual durante las tareas de resolución de problemas. El análisis se orientó a una estudiante universitaria, a lo largo de ocho entrevistas. Desde el comienzo de estas sesiones de entrevistas, se consideraron varios problemas de probabilidad y ella los percibió como diferentes. La autora mostró cómo esta estudiante modificó su capacidad para reconocer información en situaciones de contextos diversos, y cómo así llegó a abordarlos como problemas similares.

Thaden-Koch y col. (2006) entrevistaron a los estudiantes individualmente, y en cada entrevista presentaron una serie de simulaciones para el movimiento de una pelota a lo largo de una pista en línea recta. Se pidió a los estudiantes que juzgaran el realismo de los movimientos simulados. El análisis reporta elementos de las clases de coordinación (estrategias de lectura y red causal) útiles para comprender los procesos de toma de decisiones de los estudiantes.

Levrini y diSessa (2008) también llevaron a cabo un análisis detallado, que implicaba el concepto de tiempo propio. Mostraron cómo los datos podían ser entendidos por medio de la Teoría de la Clase de Coordinación y cómo este enfoque resaltaba el proceso de comparar, contrastar y conciliar los puntos de vista conceptuales de los estudiantes. Reportan estudiantes alineando articuladamente la clase tiempo propio de diferentes maneras. Propusieron extensiones a la teoría (específicamente, el proceso de «articulación de una clase»), destacando el papel de las definiciones y mostrando instancias en las que los estudiantes consideran las nuevas situaciones como iguales o relacionadas de alguna manera con otras situaciones o contextos previamente considerados.

Buteler y Coleoni (2016) revelaron cómo el desarrollo conceptual tuvo lugar durante la resolución de problemas para el caso de flotabilidad. En particular, mostraron el papel de los recursos epistémicos dentro de este desarrollo. En un entorno de entrevistas en grupos pequeños, identificaron cómo funcionan estos recursos durante el desarrollo de la clase en el contexto de la resolución de un problema.

Los recursos computacionales también se incluyeron en el análisis conceptual

detallado. En 2007, Parnafes estudió cómo las ideas de los estudiantes sobre la frecuencia y la velocidad evolucionaron a través del uso de representaciones computacionales durante la resolución de problemas. Fue capaz de entender el papel de este tipo de recursos como un apoyo para el aprendizaje conceptual. El entorno de la simulación permitió a los estudiantes distinguir entre velocidad y período a medida que definían sus estrategias para determinar la misma información y refinaban su conocimiento. Sengupta y col. (2015) abordaron una cuestión similar para el caso del impulso lineal y el uso de un videojuego. Mostraron cómo la comprensión conceptual evoluciona a medida que los estudiantes juegan con un videojuego a lo largo de una sesión de entrevista.

De manera similar, Kluge (2019) investigó cómo las representaciones interactivas pueden ser utilizadas para mejorar el aprendizaje conceptual. En un estudio naturalista con cuatro grupos de estudiantes, esas representaciones interactivas se utilizan para negociar un punto de encuentro entre la teoría, la experiencia previa y el conocimiento, y son instrumentales en la creación de sentido conceptual. En este estudio también se involucran elementos de marcos socioculturales para abordar aspectos interactivos de los registros obtenidos durante los estudios de caso. Los autores de este estudio utilizan representaciones interactivas en el contexto de termodinámica, diseñando simulaciones de bombas de calor y refrigeradores con el fin de entender de qué manera participaba esta herramienta en los cambios de estructura conceptual del grupo en cuestión.

Barth-Cohen y Wittman (2017) presentan un análisis empírico de las dificultades conceptuales encontradas y de las formas en que los estudiantes progresan en el aprendizaje a nivel individual y colectivo en el entorno del aula. El estudio revela cómo la contribución de un solo estudiante puede modificar el desarrollo del aprendizaje. Este trabajo propone un perfeccionamiento de la TCC para dar cuenta de los entornos colectivos. Definen las propuestas de modelo de los diferentes estudiantes como un contexto diferente de la clase de coordinación

3.3. TCC en entornos colectivos

La Teoría de Clases de Coordinación se desarrolló como un marco para describir la estructura cognitiva de individuos. La propuesta estuvo fuertemente orientada desde una concepción totalmente individual del aprendizaje. Esto es, aprender considerado como una construcción personal y mental.

La fortaleza de esta teoría siempre estuvo en su versatilidad para instanciar la descripción considerando con énfasis lo contextual del aprendizaje y de las situaciones de resolución de problemas. En particular, la aplicación con éxito en numerosos contextos de física la hizo un marco tentador para estudiar procesos de cambio conceptual en esta área.

Sin embargo, como hemos mencionado anteriormente, la tensión entre enfoques individuales y socioculturales impulsó casi de manera obligada a extender los límites primeros de la teoría. Más aún, la aplicación de la teoría para describir aprendizaje de conceptos en contextos más cercanos al aula real (donde hay varios estudiantes, no uno) demandó desarrollos nuevos para la teoría.

Hasta el momento, sólo dos estudios se abocaron en la descripción de aprendizaje colectivo en el contexto de la física con el uso de la teoría de clases de coordinación. En primera instancia encontramos el trabajo de Levrini y diSessa (2008) que describieron el proceso de desarrollo conceptual para el caso de tiempo propio

en el contexto de relatividad especial. Si bien hemos mencionado algunos hallazgos de estos autores, nos interesa enfatizar el formato que utilizaron.

En este caso los autores propusieron asignar el desarrollo de la clase de coordinación al grupo de estudiantes como un todo. Hasta el momento, la clase de coordinación siempre daba cuenta en estudios previos de implementaciones de la teoría, del desarrollo conceptual de un estudiante o a lo sumo de un grupo pequeño de dos estudiantes. En este caso se consideró que la clase de coordinación le pertenece a todos como si fuera uno. Si bien esta descripción simplifica el trabajo para poder estudiar la evolución de todo el grupo, claramente no refleja el proceso de cada uno ya que no todos realizaron el mismo camino. Es más, el estudio reporta instancias de desacuerdos entre los estudiantes que difícilmente se puedan describir desde la teoría considerando al grupo como un todo. A pesar de eso, la contribución de este trabajo es valiosa ya que es pionero en este sentido de la aplicación de la TCC en entornos colectivos.

Considerando esta debilidad, Barth-Cohen y Wittman en (2017) apuntaron directamente a dar un salto en este sentido. En lugar de considerar al grupo total como un todo, proponen el término o la noción de *contexto* para diferenciar posturas encontradas entre grupos de personas dentro del grupo total. Esta propuesta permitió mejorar la descripción del desarrollo conceptual para un grupo numeroso de aula real. Así se adquirió más detalle en cómo proyecciones alineadas de manera diferente permiten realizar alineamientos y procesos de articulación.

Si bien esta contribución permitió realizar un avance respecto de lo realizado por Levrini y diSessa (2008), aún la descripción luce incompleta. La propuesta alcanza a reconocer algunas contribuciones individuales pero no logra describir de qué manera la clase se instancia en la interacción de cada uno de los integrantes que participa en la construcción de la clase de coordinación. Extender el marco a entornos colectivos fue hasta aquí a costa de la precisión de la descripción de los procesos individuales, lo cual siempre fue un fuerte en la propuesta.

En los estudios presentados se abordará específicamente esta cuestión. Para ello existen dos motivaciones fuertes. La primera tiene que ver con la tensión en el campo de investigación en relación al aprendizaje individual-social que existe a nivel de gran área. La segunda se vincula directamente con los primeros pasos que se han hecho en este sentido en el campo específico de la Teoría de Clases de Coordinación. Si bien han sido importantes, aún se evidencia que resta mucho recorrido en este sentido.

Capítulo 4

Metodología

En el capítulo anterior se expuso la realidad en la investigación en enseñanza de las ciencias en relación a la coexistencia de multiplicidad de marcos teóricos para modelar el aprendizaje. Dentro de esa multiplicidad de teorías de aprendizaje, hemos incursionado específicamente en la Teoría de Clases de Coordinación debido a que se trata del modelo que mejor ajusta a nuestras necesidades e inquietudes. Precisamos de un marco que permita describir en detalle el desarrollo conceptual de estudiantes cuando abordan conceptos de física.

Al igual que con los enfoques teóricos, existen diversas líneas metodológicas a la hora de abordar problemas de investigación en el campo de la educación en física. No pretendemos realizar una exposición de todas las técnicas existentes en el área a la hora de investigar. Sin embargo, se expondrá las principales oportunidades que brindan las principales técnicas y se profundizará en la implementada en los estudios denominada *microgenetic learning analysis* (MLA) (Parnafes y diSessa, 2013). El objetivo es comunicar las principales motivaciones y fundamentos del tipo de técnica utilizada cómo así también en qué consiste el MLA, sus virtudes y debilidades.

4.1. Metodologías en investigación en educación en ciencias

En primer lugar, es importante comenzar con una aclaración y/o advertencia respecto del campo de investigación en educación en física. Cualquier metodología que se proponga en el área tendrá características diferentes a las que se conocen en el campo de la física. No hay técnica ni abordaje en esta área que tenga la misma reproducibilidad ni generalización que tienen los abordajes de la física en cualquiera de sus dominios. Esto principalmente se debe a que los investigadores en educación no tienen el lujo de encontrar agentes idénticos cuyo comportamiento sea exactamente sistemático y reproducible en un laboratorio (Ding, 2019). A pesar de esto, es posible construir conocimiento científico en esta área, construir modelos, teorías, refinarlas, refutarlas, verificarlas, etc., pero es importante estar advertido que la dinámica es distinta y, por lo tanto, las metodologías también.

La primera distinción que se debe presentar obligadamente en este campo es entre la *metodología cuantitativa* y la *cualitativa*. No se expondrá ampliamente en cada una y las controversias que existen entre ambas, más bien se hará una descripción general de cada perspectiva con el fin de exponer los principales fundamentos a la hora de elegir la metodología implementada en esta tesis. Sí se profundizará en las características de los métodos empleados en los trabajos realizados.

Diversos estudios en el campo de la investigación de la educación en física han producido convincentes resultados cuantitativos que han informado nuestra

comprensión acerca de cómo aprenden física los estudiantes. Por nombrar algunos ejemplos, se ha demostrado que métodos interactivos de aprendizaje produce cuantiosas ganancias en puntajes y evaluaciones en comparación con los métodos tradicionales expositivos (Pollock y Finkelstein, 2008; Adams y col., 2006). Si bien este tipo de resultados ha producido cuantiosa información acerca de cómo enseñar física y de cómo se aprende física, si se pretende un mejor nivel de detalle a la hora de entender mejor este tipo de fenómenos, como qué ocurre en estas dinámicas, por qué una es mejor que otra, qué oportunidades ofrece cada una, etc., este tipo de abordajes son insuficientes. Es así que los investigadores se volcaron a realizar estudios de tipo cualitativo, con otro tipo de datos y análisis. Al igual que los cuantitativos, la evidencia es el sostén de toda afirmación acerca de la enseñanza y el aprendizaje de la física.

En términos generales, la investigación cualitativa abarca en gran medida análisis de tipo inductivos. En el análisis inductivo, el investigador busca derivar tendencias, conceptos o modelos a través de múltiples lecturas de los datos. Distinto es el caso del análisis deductivo, más típico en los estudios cuantitativos, donde el investigador aplica a priori criterios o supuestos y busca determinar si los datos son consistentes con ellos. La investigación cualitativa también tiene rasgos deductivos, pero es posible afirmar que existe una tendencia hacia el análisis inductivo en el sentido que el investigador primero explora el contexto de estudio y, a partir de allí, trabaja hacia un modelo general que pueda describir o intentar explicar los datos.

Si bien el anhelo de la ciencia siempre es la objetivación, la investigación cualitativa tiende a ser subjetiva. Esto tiene que ver con dos factores. El primero trata de la naturaleza del estudio, ya que estos análisis intentan describir el mundo desde el punto de vista de la persona en estudio. El segundo tiene que ver con el propio investigador y cómo sus concepciones sobre aprendizaje, física, aprendizaje de la física, pensamiento, entre otros, tiñen todo análisis e interpretación del fenómeno.

La búsqueda de generalizaciones siempre es un norte definido en cualquier campo científico. Si bien es posible a partir de la investigación cualitativa hacer supuestos sobre otras poblaciones, los estudios solo declaran la descripción de la situación analizada en cuestión. Rara vez estudios cualitativos buscan confirmar resultados. La replicación, si bien existen, es difícil debido a que se trata de fenómenos de naturaleza fuertemente contextual. A pesar de eso, los resultados siempre pueden mostrar alguna descripción que permita hacer inferencias en contextos similares.

De acuerdo a lo presentado hasta aquí uno podría pensar que trabajar con metodología cualitativa con ciertos reparos en la generalización y la objetivación de resultados parece ser un camino árido para recorrer. Si bien es cierto, existe una buena razón para elegir trabajar con esta dinámica por sobre la cuantitativa, donde uno puede asignar números y en cierta medida sentirse más comfortable. En este sentido, es importante enfatizar en dos aspectos para fundamentar por qué se orientan los estudios de esta tesis en el marco de los cualitativos.

En primer lugar, es clave recordar que ni siquiera los resultados de los métodos cuantitativos tienen las características de los resultados de la física. Tal como se mencionó al comienzo, la naturaleza del objeto en estudio es dinámica y no sistemática en muchos aspectos. Es altamente multicausal, multivariable, sensible a condiciones de contexto y prácticamente imposible de reproducir en un laboratorio.

En segundo lugar, resulta crucial retomar las motivaciones, objetivos, búsquedas de esta tesis. Se pretende entender o estudiar de qué manera se desarrolla el

cambio conceptual a partir de la interacción entre pares y mediada por simulaciones computacionales. Los estudios ya relevados, indican que ya se conoce que tanto una dinámica interactiva entre pares como la interacción con simulaciones aportan beneficios a desempeños de estudiantes en física. Esto se ha hecho ampliamente en el marco de estudios cuantitativos con descripciones de los estados iniciales y finales de estos estudiantes (pre-post tests). Lo que se pretende con los estudios desarrollados en esta tesis es analizar en detalle el proceso de cómo se desarrolla el cambio conceptual en estas dinámicas. Con este objetivo en mente se precisa de abordajes cualitativos para atender a estos análisis.

Si bien se han mencionado las dificultades y limitaciones para este tipo de estudios a la hora de objetivar y generalizar resultados, esto no implica que no sea posible "decir nada acerca de nada". En realidad, implica tener ciertos recaudos metodológicos a la hora de realizar los estudios y sus análisis, como así también al momento de realizar afirmaciones o declaraciones acerca del aprendizaje.

La investigación cualitativa es multimetódica, naturalista e interpretativa. Es decir, que las investigadoras e investigadores cualitativos indagan en situaciones naturales, intentando dar sentido o interpretando los fenómenos en los términos del significado que las personas les otorgan. La investigación cualitativa abarca el estudio, uso y recolección de una variedad de materiales empíricos —estudio de caso, experiencia personal, introspectiva, historia de vida, entrevista, textos observacionales, históricos, interaccionales y visuales— que describen los momentos habituales y problemáticos y los significados en la vida de los individuos (De Gialdino y col., 2006). Es importante enfatizar en estas instancias el carácter interpretativo de este tipo de investigación. Los estudios aquí presentados estarán inundados de esta característica.

Principalmente la investigación cualitativa está: a) fundada en una posición filosófica que es ampliamente interpretativa en el sentido de que se interesa en las formas en las que el mundo social es interpretado, comprendido, experimentado y producido, b) basada en métodos de generación de datos flexibles y sensibles al contexto social en el que se producen, y c) sostenida por métodos de análisis y explicación que abarcan la comprensión de la complejidad, el detalle y el contexto (Mason, 1996).

La investigación cualitativa permite comprender, hacer al caso individual significativo en el contexto de la teoría, reconocer similares características en otros casos. Provee nuevas perspectivas sobre lo que conocemos y nos dice más de lo que las personas piensan, nos dice qué significa e implica ese pensamiento (Morse, 1999).

Sin embargo, para que la tarea de investigación constituya un aporte, es necesario agregar a las palabras de los actores algo adicional; sea una síntesis, sea una interpretación, sea el desarrollo de un concepto, un modelo, una teoría (Morse, 1999; De Gialdino y col., 2006). Es, precisamente, su relación con la teoría, con su extensión, con su modificación, con su creación lo que hace a la investigación cualitativa significativa (Morse, 1999). Las estrategias cualitativas no están aisladas, los métodos cualitativos de investigación conforman un conjunto coherente y consistente de procedimientos que no pueden separarse del todo (Morse, 1999).

En las próximas secciones se expondrá qué marco cualitativo se utiliza, se profundizará en la descripción de los estudios y la técnica para abordarlos.

4.2. Microgenetic Learning Analysis

Existe un amplio espectro de metodologías cualitativas. Dado que nuestro objetivo es elucidar procesos de desarrollo conceptual en entornos colectivos y en entornos mediados por simulaciones computacionales, implementamos para los estudios el método cualitativo denominado *microgenetic learning analysis* (MLA) (Parnafes y diSessa, 2013). Esta metodología presenta tres características principales:

- *Focalizada en teoría (Theory-focused)*: uno de los objetivos es generar y/o mejorar teorías abocadas al aprendizaje. En el caso de este estudio, intentaremos ampliar la descripción de cambio conceptual en la teoría de clases de coordinación en entornos colectivos y mediados por simulaciones.
- *Grano-fino*: se registra específicamente el momento a momento de toda explicación que da cuenta de aprendizaje en un contexto particular. El proceso de cambio y, por lo tanto, la naturaleza del cambio de elementos cognitivos son vistos o estudiados a la menor escala de tiempo observable posible. El grano fino aplica tanto a escala de tiempo como a resolución conceptual. Esto último significa que todas las distinciones finas en el significado son relevantes y por lo tanto deben ser rastreadas.
- *Apertura en aspectos relevantes de los datos*: toda característica del evento de aprendizaje puede ser potencialmente relevante. Por esta razón el análisis de video provee al menos la cantidad de información necesaria para este tipo de método. No sólo las verbalizaciones son importantes, sino también gestos, miradas, representaciones y elementos claves del análisis.

MLA frecuentemente toma la forma de estudio de caso, es decir, un estudio de la particularidad y la complejidad de un caso singular (Libarkin y Kurdziel, 2002). Esto resulta natural considerando que se pretende documentar detalles específicos respecto de la estructura de conocimiento de individuos o grupo de personas. Como diversos investigadores han observado (Siegler, 2007), cubrir el proceso de aprendizaje implica mirar cuidadosamente los datos. En una compensación parcial de las limitaciones de los estudios de caso, estos permiten analizar de forma más transparente y detallada la ecología de recursos que se habilitan durante el aprendizaje en un contexto particular, siempre difícil de controlar en su completitud.

En el marco de estudios empíricos contemporáneos los estudios de casos son caracterizados por algunas o todas estas condiciones: enfoques epistemológicos constructivistas y una mirada reflexiva de la ciencia, desarrollos teóricos en términos narrativos, predominio de categorías nativas, crítica de la realidad social, etc. En esta perspectiva, el estudio de caso consiste en el abordaje de lo particular priorizando el caso único, donde la efectividad de la particularización reemplaza la validez de la generalización (Stake, 1995). Aquí, la elección del caso es resultado del recorte temático, y el estudio de caso es definido por el interés en el mismo, mientras que el diseño metodológico del estudio o investigación es secundario. El acento se ubica en la profundización y el conocimiento global del caso y no en la generalización de los resultados por encima de este (Blasco, 1995; De Gialdino y col., 2006).

En nuestros trabajos realizaremos estudios de casos múltiples. Los diseños de investigación de casos múltiples se distinguen por sus posibilidades para la construcción y desarrollo de teoría, pudiéndose, en caso de considerarse apropiado, tomar como punto de partida la guía de un determinado marco conceptual y teórico. Estos diseños, permiten a partir de diferentes instancias de comparación, extender

los resultados empíricos hacia fenómenos de similares condiciones y niveles más generales de teoría, así como elaborar explicaciones causales «locales» referidas a la comprensión de procesos específicos y en contextos definidos (De Gialdino y col., 2006; Huberman y Miles, 1991).

Delimitada en términos generales la concepción detrás de los estudios que se llevan a cabo, se expone concretamente en qué consisten de acuerdo a los objetivos planteados inicialmente para esta tesis y qué recaudos metodológicos se consideran.

4.3. Registros y Análisis

Siendo el objetivo analizar el desarrollo conceptual durante la interacción entre pares y con artefactos como las simulaciones, se dispone analizar y estudiar grupos de estudiantes mientras abordan situaciones de resolución de problemas. Esta dinámica ha sido ampliamente utilizada y probada como escenario óptimo para identificar las estructuras de conocimiento de los estudiantes y su evolución, sobre todo en el caso de la física.

Se desarrollan para los estudios de caso entrevistas clínicas semi-estructuradas para la recolección de datos. La entrevista consta de una consigna en la cual se solicita al grupo abordar una situación problemática en el campo de la termodinámica (en cada estudio se explicará en esto). El problema es diseñado en función de relevamientos específicos realizados para cada concepto de manera que el respectivo abordaje permita explicitar las concepciones de los estudiantes.

Haremos un breve apartado para describir y fundamentar el uso y aplicación de entrevista clínica para los estudios de caso y para describir el diseño y desarrollo de los problemas implementados.

4.3.1. Entrevista Clínica

La entrevista clínica ha sido ampliamente utilizada como técnica para indagar fenómenos cognitivos e interactivos en el campo de la investigación en educación en ciencias. Cuenta con una larga presencia en los estudios en este campo y, particularmente, en el espectro del repertorio metodológico de los estudios cognitivistas desde al menos los tiempos de Piaget (diSessa, 2007).

Una entrevista clínica es un encuentro entre un entrevistador, quien tiene una agenda de investigación, y un sujeto. Usualmente el entrevistador propone situaciones problemáticas o cuestiones sobre las cuales el entrevistado es invitado a pensar y a abordar de la mejor forma posible. El aspecto central de atención puede ser el problema a resolver, algo para explicar o simplemente algo sobre lo que pensar. Generalmente, el entrevistado dispone de recursos como lápiz y papel, o incluso otros elementos como programas, etc. En la mayoría de los casos son filmados y luego transcritos los registros para un posterior análisis.

El objetivo primordial de la entrevista es permitir al entrevistado exponer de manera natural sus formas de razonamiento o pensamiento sobre la situación o tarea propuesta (diSessa, 2007). El propósito que persigue la entrevista, es develar las creencias, ideas, concepciones que residen en la individualidad del entrevistado.

En principio se asume un vínculo directo entre lo que el entrevistado “sabe” o piensa y sus respectivas verbalizaciones. En este sentido, asumimos que lo que un individuo dice refleja en algún aspecto su conocimiento y su respectiva estructura. Si bien esta suposición luce razonable y ha sido ampliamente considerada, algunos cuidados han sido tenidos en cuenta en estudios previos. El análisis de los datos

a veces incluye una consideración de algunos presupuestos (Posner y col., 1982), o se discuten los procesos inferenciales. Sin embargo, más allá de que en ocasiones se atiende explícitamente a los procesos que median entre las ideas y las verbalizaciones, se asume que las verbalizaciones de los sujetos reflejan sus representaciones sobre el fenómeno en cuestión (Chi, 1997).

Avances más recientes en términos de la concepción de la entrevista clínica han profundizado en relación a lo que ocurre durante la misma ya no tanto como un desarrollo exclusivamente individual sino contemplando la dimensión social que esta implica. La entrevista concebida como un fenómeno social e interactivo implica algunas consideraciones en relación a la evidencia que prestan y también al rol del entrevistador y en particular, sus intervenciones. Sobre estos dos últimos puntos profundizaremos a continuación

Sobre el rol de entrevistador

En este tipo de estudios el rol del entrevistador es importante a la hora de llevar adelante la entrevista. Su papel consiste en proponer una tarea y, a partir de ahí, seguir el razonamiento de los estudiantes. Para la entrevista se consideraron los elementos propuestos por la literatura: la misión del entrevistador es seguir las ideas de los estudiantes y no dirigir su razonamiento (Halldén, Haglund y Ström-dahl, 2007). Es importante que los estudiantes involucrados logren llevar a cabo su propio proyecto y no que sean conducidos por el entrevistador. Las intervenciones del entrevistador se orientan a pedir explicaciones más profundas, a comprobar la comprensión o a resaltar las diferencias entre los razonamientos de los estudiantes. Estas dinámicas en la entrevista tienen el objetivo de buscar que los estudiantes identifiquen disensos entre sus propuestas y traten de integrarlas.

Históricamente, durante un largo tiempo el rol del entrevistador estuvo fuertemente conducido a proponer la tarea a resolver y «contaminar» lo menos posible los razonamientos del entrevistado. Esto visto desde una visión exclusivamente cognitivista tenía sentido ya que se pretende develar las estructuras de conocimiento en su estado más puro y sin adulterarlas. Sin embargo, las nuevas concepciones respecto de la entrevista clínica y su faceta social que involucra la interacción entre distintos actores llevaron a repensar esta visión.

Si bien es cierto que lo que se pretende es alentar a los entrevistados a completar su misión de manera auténtica y genuina, la sola presencia del entrevistador y sus respectivas intervenciones inevitablemente son parte de este emprendimiento. Más aún, la explicitación de la estructura de conocimiento depende fuertemente de las intervenciones del entrevistador: cuáles son, con qué objetivos las realiza y en qué momento. En este sentido, mucho desarrollo hubo en el campo de la investigación para abordar esta cuestión.

La tarea principal del entrevistador en una entrevista clínica es descubrir los mecanismos que el entrevistado desarrolla para construir significado o sentido (di-Sessa, 2007). Es así que el éxito de la entrevista depende en gran medida de permitir al entrevistado que presente su propia forma de pensar o abordar una tarea o situación propuesta. En este sentido, es muy importante desarrollar la habilidad como entrevistador de evitar evaluaciones de respuestas como correctas o incorrectas. No es el objetivo en ningún momento evaluar las ideas del entrevistado sino por el contrario construir sentido de los razonamientos que este está presentando.

Algunos desarrollos contribuyeron en identificar herramientas metodológicas del entrevistador a la hora de llevar a cabo su entrevista clínica. Estos recursos, contruidos a partir de trabajo de campo, permitieron inferir diferentes tipos de

intervenciones del entrevistador con sus respectivas oportunidades a la hora de explorar las ideas del entrevistado.

Investigaciones en este campo propusieron cuatro tipos de intervenciones del entrevistador: de Empatía, de Socialización, de Introducción y de Focalización (Coleoni y Buteler, 2020). La de Empatía consiste en la construcción del vínculo con el entrevistado y apunta a la demostración de interés del entrevistador a lo que éste desarrolla. Resulta muy importante para toda la entrevista y, en particular, para el comienzo de la misma ya que invita al entrevistado a mostrarse de forma transparente en sus razonamientos, dudas, inquietudes, limitaciones, etc.

Las intervenciones de Socialización apuntan a promover la interacción entre los entrevistados. Tiene que ver con recuperar las disonancias o acuerdos o diversidad de opiniones para alentar la interactividad entre los participantes.

La de Introducción consiste en agregar un elemento en la discusión que no estaba siendo tenido en cuenta hasta el momento en los razonamientos de los entrevistados. Tal vez es un punto sensible respecto de las antiguas tradiciones en relación a la entrevista clínica. El entrevistador es parte de la entrevista y el desarrollo depende de sus intervenciones, y por lo tanto, estas últimas pueden agregar elementos nuevos si la agenda de investigación así lo tuviera planeado y definido. En nuestro caso particular, este recurso fue implementado para agregar elementos que no estaban siendo considerados en la discusión y que resultaron importantes para el abordaje de la tarea y la exploración de las ideas de los estudiantes.

La de Focalización consiste en orientar la atención de la discusión a un elemento que, estando presente, no ha sido tenido en cuenta. Este recurso de intervención ha sido muy útil en el desarrollo de las entrevistas para hacer dialogar las diferentes posturas de los estudiantes como así también para fomentar procesos de articulación de proyecciones en la tarea realizada.

Las entrevistas realizadas se orientaron a implementar estas herramientas y sugerencias propuestas por la literatura. Como se mencionó en un comienzo, el foco central de la entrevista clínica está puesto en las situaciones problemáticas a abordar y discutir. En la siguiente sección profundizaremos sobre el diseño de los problemas propuestos.

Problemas propuestos

Para los estudios realizados se diseñaron situaciones problemáticas, las cuales se implementaron en las entrevistas clínicas realizadas. El objetivo de las situaciones planteadas es explicitar las ideas previas que tienen los estudiantes en el campo de la termodinámica. En particular, se pensaron problemas alrededor de transformaciones termodinámicas donde se expliciten ideas previas sobre entropía, temperatura, reservorio, entre otros.

La literatura en investigación en educación en física releva que el concepto de entropía presenta numerosas dificultades a la hora de ser abordado. Si bien estas serán detalladas en los estudios, es posible mencionar entre las más importantes la «metáfora del desorden», la conflictiva relación entre cambios de entropía y reversibilidad de procesos y las dificultades en el dominio de las formulaciones matemáticas, en particular la macroscópica. Así también, numerosas dificultades a la hora de abordar situaciones que involucren la primera ley y estimaciones de propiedades en transformaciones termodinámicas fueron reportadas en los últimos años (Fredrik y col., 2013).

El objetivo de la entrevista clínica no es relevar estas ideas, sino hacerlas explícitas para poder estudiar su evolución y desarrollo a lo largo de la resolución del

Problema

Un gas ideal monoatómico completa un ciclo A-B-A, como se muestra en la figura. El proceso A-B consiste en una expansión libre donde el gas duplica su volumen sin intercambiar calor con el entorno. Desde B hasta A, el gas sufre una compresión isotérmica reversible hasta su estado inicial. Considerando que en el estado A, el gas tiene una temperatura T_0 y un volumen V_0 :

- Elegir la/s respuestas correctas en relación al gas:
 - a) La entropía del gas aumenta después del ciclo
 - b) La entropía del gas disminuye después del ciclo
 - c) La entropía del gas no cambia después del ciclo.
- Elegir la/s respuestas correctas en relación al entorno
 - a) La entropía del entorno disminuye después de completarse el ciclo
 - b) La entropía del entorno no cambia luego de ciclo.
 - c) La entropía del entorno aumenta después de completar el ciclo, y lo hace durante la transformación irreversible del gas.
 - d) La entropía del entorno aumenta después del ciclo, y lo hace durante la transformación reversible del gas.
 - e) Otra:

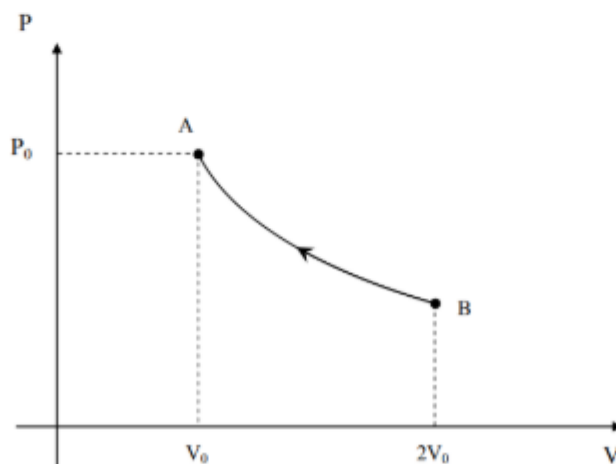


FIGURA 4.1: Problema 1

problema. Para este fin, se diseñaron 4 situaciones problemáticas en torno a estas ideas. Las mismas son presentadas en las figuras 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 y las denominaremos P1, P2, P3 y P4, respectivamente.

Para el diseño de los problemas se tuvieron en cuenta principalmente dos aspectos. El primero está vinculado con el modelo de problema con el que los estudiantes participantes de las entrevistas están familiarizados. Se buscó en el diseño que tuviera características similares a los problemas típicos presentados en las guías de ejercicios prácticos de la facultad para la materia de física térmica o denominada Física General II. En ese sentido los problemas presentan un estilo familiar a los que los estudiantes están acostumbrados a resolver.

Un segundo aspecto importante tiene que ver con la tipología de enunciado que se buscó. En todos los casos se presentaron problemas que tuvieran un formato de opción múltiple. El principal objetivo de esto es favorecer las instancias de discusión conceptual entre estudiantes. A menudo tareas del tipo "calcule" alienan a desestimar discusiones conceptuales y abordar el problema desde un enfoque exclusivamente matemático.

Problema

Un gas ideal monoatómico con temperatura T_0 , presión P_0 realiza una expansión libre desde un volumen V_0 hasta un volumen $2V_0$. No hay intercambio de calor durante el proceso.

- Elegir la respuesta correcta:
 - a) La expansión del gas es isotérmica
 - b) La expansión del gas es adiabática
 - c) La expansión del gas es isotérmica y adiabática
 - d) Otra:
- Encontrar la temperatura final del gas.

FIGURA 4.2: Problema 2

Problema Un gas ideal monoatómico realiza un ciclo de Carnot, que funciona entre dos reservorios a temperaturas T_1 y T_2 , con $T_1 > T_2$. Elegir la/s respuesta/s que consideren correcta/s:

- a) El gas mantiene invariante su entropía luego del ciclo, ya que es una función de estado.
- b) El reservorio a T_2 aumenta su entropía y su estado, luego del ciclo, cambia.
- c) El reservorio a T_2 no cambia su entropía, ya que su estado tras un ciclo es el mismo y la entropía es una función de estado.
- d) El reservorio a T_2 aumenta su entropía y mantiene constante su temperatura.

FIGURA 4.3: Problema 3

PROBLEMA: RESERVORIOS

Un gas ideal monoatómico realiza n ciclos de Carnot entre dos reservorios de agua, inicialmente a temperaturas T_1 y T_2 , con $T_1 > T_2$. Suponiendo que ambos reservorios tienen igual masa m .

- En relación al Reservorio 1 (a T_1), elegir la respuesta correcta:
 - Su temperatura disminuye
 - Su temperatura no cambia
 - Otra:
- En relación al Reservorio 2 (a T_2), elegir la respuesta correcta:
 - Su temperatura aumenta
 - Su temperatura no cambia
 - Otra:
- En relación al Reservorio 1, elegir la respuesta correcta:
 - La entropía del reservorio 1 disminuye después de n ciclos
 - La entropía del reservorio 1 aumenta después de n ciclos
 - La entropía del reservorio 1 no cambia después de n ciclos.
 - Otra:

FIGURA 4.4: Problema 4

Sobre los participantes

Los participantes son estudiantes voluntarios de tercer año de la Licenciatura en Física y del Profesorado en Física de la UNC. El requerimiento exigido a los mismos es que hayan cursado y rendido el examen de la materia correspondiente a física térmica (en este caso Física General II). Los estudiantes son videograbados, con su consentimiento, mientras abordan la tarea. Los videos resultan útiles para obtener información detallada acerca de sus razonamientos, con la posibilidad de ser revisada. Esta herramienta es sugerida ampliamente por la literatura a la hora de analizar desarrollo conceptual. Complementariamente los estudiantes cuentan con lápiz y papel para realizar las representaciones que consideren necesarias en la resolución de las consignas.

En total se entrevistaron 6 (seis) grupos de estudiantes los cuales se buscaron que tuvieran origen diferente en cuanto a pertenencia a la carrera de la facultad y diversidad de género. En todos los casos los estudiantes rindieron el final de Física General II (donde se abordan los tópicos presentados en la entrevista) con nota igual o mayor a 6 seis. Se conformaron 3 grupos de estudiantes de la Licenciatura en Física y 3 grupos de estudiantes del Profesorado en Física. Se detalla a continuación.

- *Grupo 1:* dos estudiantes mujeres de la Licenciatura en Física. Dos meses después de haber rendido el examen final.
- *Grupo 2:* dos estudiantes masculinos de la Licenciatura en Física. Cuatro meses después de haber rendido el examen final.
- *Grupo 3:* una estudiante mujer y un estudiante hombre de la Licenciatura en Física. Tres meses después de haber rendido el examen final.
- *Grupo 4:* dos estudiantes masculinos del Profesorado en Física. Seis meses después de haber rendido el examen final.
- *Grupo 5:* una estudiante mujer y un estudiante hombre del Profesorado en Física. Seis meses después de haber rendido el examen final.
- *Grupo 6:* dos estudiantes mujeres del Profesorado en Física. Seis meses después de haber rendido el examen final.

A cada uno de estos grupos se les pidió que abordaran algunas de las situaciones problemáticas descritas anteriormente durante sesiones de entrevistas. En total sumaron alrededor de 20 horas de grabación. El cuadro 4.1, muestra los problemas que abordó cada grupo.

Sobre Cantidad de Registros

En estudios cualitativos siempre es un interrogante abierto cuántos datos es necesario recolectar. Los mismos siempre están influenciados por el tiempo y el costo de su análisis y procesamiento. Idealmente, suficientes datos son recolectados cuando registros adicionales no agregan nada nuevo (Otero y Harlow, 2009). En términos prácticos, otros límites se encuentran antes como los tiempos de análisis, cantidad de voluntarios, entre otros. En el caso de los estudios aquí presentados, se entrevistaron a seis grupos de dos personas. Esto hace a un total de 12 estudiantes y más de 20 horas de grabación. Si bien es claro que estos datos no alcanzan para generalizaciones (lo cual no es el objetivo de los estudios cualitativos), los registros obtenidos permiten desarrollar extensiones teóricas como así también identificar

CUADRO 4.1: Grupos y Problemas

Grupo	P1	P2	P3	P4	Tiempo
Grupo 1	X	X	X		180 min
Grupo 2	X	X	X		210 min
Grupo 3	X	X			205 min
Grupo 4			X	X	195 min
Grupo 5			X	X	215 min
Grupo 6				X	200 min

patrones entre los grupos entrevistados. Cabe destacar que en cada estudio se realizaron alrededor de dos entrevistas preliminares con el fin de poner a prueba la situación problemática diseñada. Las mismas no fueron incluidas en los análisis, pero sí resultaron productivas para la construcción de los problemas.

Sobre Análisis y Validación

En términos generales, el análisis en cada estudio estuvo orientado al estudio del desarrollo conceptual en casos de interacción de pares y con simulaciones. Desde la Teoría de Clases de Coordinación, se persigue y describe la evolución de la estructura conceptual del grupo de entrevistados atendiendo a identificar los factores y elementos que producen modificaciones en la misma. En particular, el interés radica en dos aspectos: por una lado entender cómo estudiantes desarrollan una estructura conceptual conjunta y por otro de qué maneras la simulación interviene en la construcción conceptual de los estudiantes. Se detallarán estos estudios más adelante, pero la intención ahora es exponer aspectos metodológicos importantes a la hora del análisis.

Existen dos factores importantes para aclarar y abordar a la hora de realizar estudios cualitativos en educación en física: la validación y la replicación. Generalmente, la validación externa ha sido tradicionalmente definida como la generalización de los efectos observados en condiciones experimentales a otras poblaciones o contextos. En estudios cualitativos, la validación puede ser abordada implementando métodos que aumenten la probabilidad de obtener una precisa visión de la realidad de los participantes involucrados en el estudio. La validación puede ser incrementada utilizando múltiples recursos de registros para apoyar declaraciones y conclusiones, típicamente denominado triangulación. En el caso de los estudios en cuestión presentados fueron considerados en el análisis tanto grabaciones de video, anotaciones de los estudiantes, grabaciones de pantalla cuando interactuaban con simulaciones y notas en tiempo real del entrevistador. En la conjunción de estos registros, los análisis y conclusiones fueron construidas (Otero y Harlow, 2009).

La replicación hace referencia en qué medida el estudio puede ser replicable. Dada la naturaleza de la investigación cualitativa, la replicabilidad se ve limitada

en el sentido tradicional. Los contextos son variables, las condiciones muy difíciles de replicar y multicausales. Por esto, en este marco la replicabilidad se asocia a la obtención de mismas conclusiones dentro del mismo singular estudio por parte de múltiples miembros. En los estudios llevados a cabo se sigue la propuesta de la literatura para el análisis de videos (Jordan y Henderson, 1995). Es así que cada decodificación tiene tres instancias. En una primera, dos investigadores realizan la revisión de forma individual. Cada uno por separado estructura la entrevista, las representaciones de conocimiento identificadas y la evolución de la estructura conceptual desde la TCC. En una segunda instancia, estas dos revisiones son discutidas y analizadas en conjunto por ambos investigadores. Luego, en una tercera instancia se realiza una revisión en grupo de 4 investigadores (los dos que la realizaron y discutieron, más dos que toman contacto con los registros por primera vez). En esta instancia final se consensúan las visiones de todo el grupo en la interpretación de los registros de las entrevistas.

Esta visión colaborativa de análisis es fructífera a la hora de neutralizar preconcepciones de los individuos investigadores y desalienta la tendencia a mirar lo que uno está condicionado a ver o incluso lo que uno quiere ver. Todas las categorías, extensiones teóricas y declaraciones presentados a lo largo de estos trabajos han sido previamente discutidos y consensuados en el grupo de investigación de enseñanza de la ciencia y la tecnología (GECYT - Sección Física) en un proceso intrínsecamente iterativo.

Capítulo 5

Resultados

A lo largo de este capítulo se exponen los diversos estudios realizados orientados a entender cómo y de qué manera ocurre el aprendizaje de conceptos de termodinámica mediante la interacción entre pares y con simulaciones computacionales. En las primeras secciones los estudios están orientados a entender el desarrollo conceptual en contextos de termodinámica. En las últimas, los estudios se orientan al desarrollo y función de las simulaciones en el cambio conceptual.

En la primera sección, se presenta un trabajo orientado a entender qué efectos produce la problematización en el desarrollo conceptual. En el contexto de transformaciones termodinámicas, estudiantes expanden su red inferencial cuando se encuentran conflictuados con su proyección desalineada. Se identifica a esta última como generadora de nuevas inferencias y soporte para el alineamiento de proyecciones. En este trabajo se encuentran evidencias del rol colaborativo en el desarrollo conceptual, lo cual constituyó la motivación para continuar con el siguiente estudio.

En la segunda sección se presenta un estudio realizado en torno al concepto de entropía. El objetivo es estudiar cómo se desarrolla el cambio conceptual en entornos colectivos. Se pretende extender una teoría cognitivista-individual a entornos colectivos, mostrando cómo una clase de coordinación, en este caso del concepto de entropía, es co-construida por dos estudiantes.

En la tercera sección, se presenta el estudio de desarrollo conceptual asistido por una simulación diseñada específicamente para el estudio de caso. A partir de conflictos identificados en relación a las características de la idealización de un reservorio térmico en el contexto de Ciclo de Carnot, se desarrolla en Java una simulación orientada a las dificultades relevadas. A partir de una serie de entrevistas y estudios microgenéticos de aprendizaje se observa el rol específico de las simulaciones en el proceso conceptual desarrollado por estudiantes en el contexto de máquinas térmicas y ciclo de Carnot.

5.1. Proyecciones desalineadas: una oportunidad de aprendizaje

*Los resultados de esta sección, aquí comunicados, corresponden al artículo publicado en la revista *Journal of Science Education* titulado «Misaligned projections: an opportunity for learning». 2019. (Velasco y Buteler, 2019b)*

Sin duda uno de los temas que más centró la investigación en el campo de la enseñanza de la física tiene que ver con las ideas intuitivas o conceptualizaciones ingenuas (en inglés tomó varias denominaciones aunque la más común es *misconceptions*). Este término teórico se define principalmente como las ideas que los

estudiantes tienen para describir o explicar un aspecto específico de un área, campo o fenómeno (Eaton, Anderson y Smith, 1984). Los estudiantes construyen ideas del mundo desde una edad temprana, a veces correspondientes a ideas científicas y a veces no.

Durante los comienzos de la investigación en educación en física se argumentó que estos conceptos intuitivos o ingenuos, que no correspondían al conocimiento formal, eran un obstáculo para el aprendizaje. No sólo porque no coincidían con el conocimiento normativo, sino porque eran ideas difíciles de modificar. El papel de la instrucción durante mucho tiempo estuvo dirigido a confrontar estas ideas o a tratar de reemplazarlas. Es por eso que muchos estudios en este campo se dedicaron a identificar qué conceptos erróneos deben ser reemplazados o eliminados. Estos tipos de estudios se centraron durante un largo período de tiempo en distinguir las respuestas incorrectas de los estudiantes (Smith y col., 1992).

Afortunadamente, la investigación dio un giro cuando los conceptos erróneos fueron reconcebidos. En los años noventa, el campo de la investigación para el desarrollo conceptual creció fuertemente en este sentido. Los conceptos erróneos ya no eran un elemento que había que erradicar o confrontar en la enseñanza, sino que formaban parte de los primeros eslabones de lo que comenzó a denominarse cambio conceptual.

La comprensión de estas ideas como parte de la construcción del conocimiento condujo inmediatamente a la formulación de otros tipos de preguntas en relación con esto: ¿Qué papel juegan en el aprendizaje de los estudiantes y cómo se modifican finalmente?

Considerando la importancia de las dificultades conceptuales de los estudiantes en el aprendizaje y la efectividad de la TCC en el análisis del desarrollo conceptual, en este primer estudio abordamos la siguiente pregunta:

¿Cómo los estudiantes abordan una proyección desalineada y qué oportunidades se derivan de ella?

5.1.1. El estudio

Se realizó una entrevista clínica a estudiantes de la Licenciatura en Física y del Profesorado en Física. Los participantes fueron grabados en video mientras abordaban la tarea de resolver un problema. Los grupos involucrados en el estudio fueron: G1, G2 y G3. Si bien todos los grupos partían de un lugar equivalente en cuanto a su formación académica, los grupos G1 y G3 encontraron dificultades cuya naturaleza no les permitió abordar la situación problemática planteada. En el caso del grupo G2, el abordaje de sus dificultades les permitió realizar progresos en la resolución del problema. En este trabajo mostraremos el estudio del desarrollo conceptual de este grupo.

Se propuso a los estudiantes el problema P2. El problema fue diseñado con el propósito de que los estudiantes expliciten sus ideas sobre los procesos termodinámicos (isotérmicos, adiabáticos, reversibles, irreversibles, etc.). Esto permite monitorear cómo evolucionan sus ideas durante la discusión para resolver problemas.

La tarea consistió en analizar lo que sucede con un gas ideal monoatómico después de un proceso particular. El gas duplica su volumen durante una expansión libre, en la que no intercambia calor con el ambiente. Los estudiantes deben predecir qué tipo de proceso es y cuál es la temperatura final del gas. La figura 4.2, muestra el planteamiento del problema.

Dado que el gas no intercambia calor con el medio ambiente y no produce ningún trabajo, la energía interna debe permanecer constante. Por lo tanto, la temperatura tampoco cambia. Se podría pensar que la transformación es adiabática también, porque no hay intercambio de calor. Sin embargo, se debe tener especial cuidado en calcular la temperatura final. Dado que el gas no intercambia calor, no significa que acabe en una curva adiabática. Es importante recordar que la expansión libre corresponde a un proceso irreversible, por lo que la ecuación adiabática de estado no es válida en este caso.

5.1.2. Análisis desde la TCC

El análisis se realizó a partir de los datos de audio y vídeo obtenidos durante las entrevistas. Se trataba de dos casos distintos. Una primera etapa consistió en una revisión individual (de un solo investigador) de los videos a medida que eran transcritos. En una segunda etapa, estos fueron revisados por un equipo de investigación, tal como se propone en la literatura (Jordan y Henderson, 1995).

Analizamos en detalle, a partir de la Teoría de la Clase de Coordinación, cómo se desarrolla la clase "Temperatura". Queremos dar cuenta del desarrollo conceptual identificando elementos de la teoría en las discusiones de los estudiantes. Las definiciones operativas de algunos elementos de la teoría se presentaron ya en la sección anterior. En particular, se pretende inferir el papel de las proyecciones desalineadas durante el desarrollo conceptual.

El análisis está organizado en dos fragmentos. Primero, los estudiantes concluyen que el proceso es tanto isotérmico como adiabático (fragmento 1). Luego, se convencen de que la temperatura no cambia durante la expansión libre (fragmento 2).

Fragmento 1 - Una proyección desalineada: "El proceso es isotérmico y adiabático"

En los primeros minutos de la entrevista, los estudiantes llegan a la conclusión de que el proceso es isotérmico y adiabático. El siguiente fragmento muestra los diálogos de los estudiantes que nos permiten inferir sus razonamientos. Los estudiantes se identifican con las letras A y B respectivamente mientras que el entrevistador con la sigla *Int*.

*S*₁[2.00 min]

1. A: Creo que es isotérmico...
2. B: Sabemos que es adiabático...el enunciado lo dice: «No intercambia calor». Deberíamos ver si hace trabajo...
3. A: Es una expansión libre, así que no hace trabajo...
4. B: Tenés razón, no hace trabajo en el entorno... Así que también es isotérmico.
5. A: Claro...
6. Int: Entonces, están diciendo que la transformación es isotérmica y adiabática. Es adiabático porque el gas no intercambia calor y es isotérmico porque no hay trabajo. Ahora, tengo una duda: si la expansión del gas es tanto isotérmica como adiabática....en un diagrama P-V, ¿dónde va a estar la temperatura final?

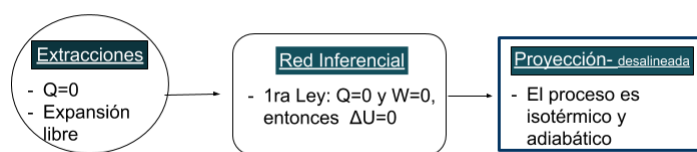


FIGURA 5.1: Síntesis del desarrollo conceptual durante fragmento 1.

Sabemos, como han dicho antes, que se trata de un proceso irreversible y que los puntos inicial y final son los únicos de equilibrio. Entonces, ¿el punto final es sobre una curva adiabática o isotérmica?

En este fragmento es posible inferir el camino conceptual que siguen los estudiantes para llegar a su respuesta. Se identifican dos extracciones de los estudiantes («...no intercambia calor...»; «Es una expansión libre...») que les permite inferir nueva información sobre la situación («...es adiabática...»; «es isotérmica también...»). Este tipo de análisis nos permite inferir algunas ideas que tienen que ver con la elección de esta opción. En primer lugar, consideran que cuando no hay intercambio de calor el proceso es adiabático. En segundo lugar, la aplicación de la primera ley de la termodinámica les permite inferir que no hay cambio de temperatura. Para ello, también consideran el proceso como un proceso isotérmico. Esta inferencia es el primer paso antes de la proyección de la clase temperatura. Hasta aquí, los estudiantes dedujeron el tipo de transformación que hacía el gas. La figura 5.1 resume los elementos de la clase durante este fragmento.

Sobre el final de este fragmento, el entrevistador plantea el problema a los estudiantes sobre cuál es la temperatura final. Toma las inferencias de los estudiantes y los hace dialogar entre ellos sobre el problema de la temperatura. El entrevistador conflictúa sus inferencias para presentar a los estudiantes posibles disonancias entre ellos. Este es un punto importante de la entrevista. El conflicto presentado a los estudiantes les hace reconsiderar sus ideas y revisar sus razonamientos para abordar el problema de la temperatura. En una primera aproximación, parece que los estudiantes hacen una inferencia desalineada cuando dicen que la transformación es isotérmica y adiabática simultáneamente.

Los siguientes fragmentos muestran cómo los estudiantes abordan el problema de la temperatura en la expansión libre. Su primera inferencia no es suficiente para alcanzar una respuesta única y consistente al problema. Por lo tanto, los estudiantes deben recurrir a otro conjunto de ideas.

Fragmento 2: Re-proyectando la clase: "La temperatura del gas permanece constante"

Durante este fragmento, los estudiantes se convencen uno a otro y a sí mismos de que la temperatura del gas no cambia durante la expansión libre. Abordan el problema desde dos enfoques: una visión microscópica y a través del primer principio de la termodinámica.

S₂[5.00 min]

1. A: Isotérmico implica que la temperatura no cambia, ¿verdad?
2. B: Correcto, pero si el proceso es isotérmico y adiabático al mismo tiempo... Imaginate que dibujas el estado inicial y el estado final. Si es isotérmico, el

punto final está justo acá (señala en un gráfico el punto final de una curva isoterma)...pero si el proceso es adiabático el punto final termina debajo de él.(señala en el gráfico el punto final de una adiabática)

3. A: Claro...
4. B: Las isothermas y los adiabáticos no se entrecruzan, ¿verdad? Mmm, no sé... Si tengo... mmm, no, no lo sé...
5. A: Tengo una duda... Si ya sé la temperatura a la que se hace la expansión... Pero, no sé...
6. B: Bien... desde el punto de vista de la teoría cinética, no encuentro ninguna razón para un cambio de temperatura.
7. A: Hay menos colisiones para mí...
8. B: No es por el número de colisiones... es por la velocidad y no disminuye con las colisiones... Las colisiones son elásticas.
9. B: El primer principio es siempre válido, ¿verdad? independientemente de si el proceso es reversible o irreversible. Por lo tanto, si el gas no intercambia calor, el ΔQ es cero. El gas no hace trabajo. Así que la variación de la energía interna es cero, por lo tanto el ΔT de la temperatura es igual a cero.
10. Int: ¿Qué pasa con la curva adiabática?
11. A: No sé... El problema es que no hay intercambio de calor...
12. Int: ¿Cómo se define la curva adiabática?
13. B: Ohh! claro....Se define a partir de la función de estado que es válida sólo para procesos reversibles. Así que no es verdad que el gas terminaría en esta curva. Y el primer principio es siempre válido!
14. Int: Entonces, ¿dices que la temperatura final es la misma que la del principio?
15. AB: ¡Sí!

Los estudiantes abordan el problema de la temperatura del gas durante este fragmento. Una vez que decidieron que el proceso era isotérmico y adiabático también, comenzaron a deducir la temperatura final del gas después de la libre expansión. Se enfrentan al problema de tener dos temperaturas finales para el proceso en simultáneo: una en la curva adiabática y otra en la curva isotérmica. Para ello, necesitan ampliar su conjunto de ideas.

Un conjunto de nuevas inferencias les permite deducir lo que sucede con la temperatura del gas. Se identifican dos enfoques durante el fragmento. Por un lado, proponen una visión microscópica para abordar el problema de la temperatura final. El Estudiante B infiere que no hay razones para pensar que las velocidades de las partículas cambian (turno 8). Por otro lado, se recuerda el primer principio de la termodinámica. Sobre el final del fragmento, B afirma que si no hay intercambio de calor y tampoco hay trabajo realizado, no habría un cambio de la energía interna. Una cosa importante que hay que destacar es la forma en que esta vez evocan el primer principio. Notan la irreversibilidad del proceso (extracción de la situación) y es considerada en su razonamiento. Es posible observar que el primer

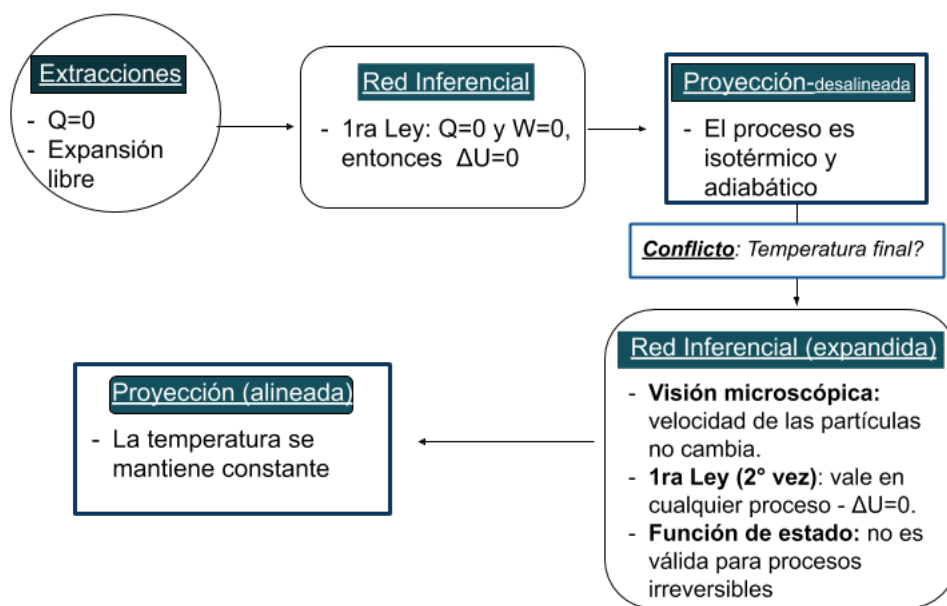


FIGURA 5.2: Síntesis de la proyección de la clase durante fragmento 1 y 2.

principio es un argumento importante para ellos porque es válido en contextos reversibles e irreversibles (turno 9). Así, estas nuevas inferencias les permiten afirmar que la temperatura permanece constante lo que completa la proyección de la Clase Temperatura (turno 9). La Figura 5.2 sintetiza la proyección de la Clase hasta aquí.

Es posible observar que la proyección desalineada se alineó con el conflicto propuesto por el entrevistador. Los estudiantes amplían su conjunto de ideas como resultado del problema propuesto. Incorporan nuevas ideas (como la visión microscópica) y refinan las más antiguas (como la primera ley) para convencerse de la nueva proyección.

Es importante destacar dos cosas de la entrevista. Por un lado, una proyección desalineada se supera a través de un nuevo problema, un nuevo conflicto. El proceso de aprendizaje se desarrolla a través de un conflicto, en lugar de dar la respuesta «correcta» para corregir los conceptos erróneos de los estudiantes. Algo análogo se presenta la siguiente sección donde el proceso de aprendizaje se desarrolla a través de la comparación de proyecciones desalineadas. Por lo tanto, se ha demostrado que el razonamiento incorrecto es un insumo importante para que el aprendizaje tenga lugar.

Por otro lado, el conflicto permite a los estudiantes no sólo alinear su proyección sino fortalecerla. La proyección desalineada les hace recurrir a nuevas ideas, expandir su red inferencial, analizar la validez sobre el contexto particular y crear una estructura jerárquica de sus argumentos e inferencias.

5.1.3. Discusión

La Teoría de Clases de Coordinación (TCC) resulta un marco teórico productivo para seguir el desarrollo conceptual de los estudiantes. El presente trabajo se orientó a analizar el papel y los potenciales de la proyección desalineada durante

la resolución de problemas. Se analizó un caso de estudio de discusión grupal de resolución de problemas con la ayuda del marco teórico de la TCC.

¿Cómo los estudiantes abordan una proyección desalineada y qué oportunidades se derivan de ella?

Se analizaron datos de videograbación para reconstruir el desarrollo conceptual de dos estudiantes universitarios de física. Discutieron sobre la temperatura final de una expansión libre de gas ideal aislada durante varios minutos. El análisis de la entrevista permite inferir algunos elementos de la TCC y revela resultados importantes sobre la pregunta de investigación.

En el primer caso, los estudiantes completan una proyección desalineada cuando concluyen que el proceso es isotérmico y adiabático. Extraen de la situación el no intercambio de calor entre el gas y el medio ambiente, lo que es suficiente para afirmar que el proceso es adiabático (S1, turno 2). Por otro lado, aplican la primera ley de la termodinámica para inferir que la energía interna no cambia (una expansión libre no realiza trabajo), por lo tanto, la temperatura es constante y el proceso isotérmico también (S1, turno 4). Esta proyección está desalineada si se considera que los procesos adiabáticos o isotérmicos son reversibles. La expansión libre es un proceso irreversible y lo único que se puede decir es que la temperatura es constante.

El entrevistador conflictúa a los estudiantes preguntando sobre la temperatura del estado final del gas. Considerando su proyección, la temperatura final podría tener dos posibles valores. Este conflicto hace que los estudiantes revisen sus ideas e incorporen otras nuevas para abordar el problema. En primer lugar, evocan la teoría cinética, una visión microscópica, en un intento de deducir la temperatura final del gas (una nueva inferencia) (S2, turno 6). Esto les permite sospechar que no hay razón para pensar que la temperatura cambiará. Sin embargo, recurren a un argumento más fuerte.

Recuerdan la primera ley de la termodinámica, pero esta vez notan que es válida para procesos reversibles e irreversibles (S2, turno 9). Esta información contextual les hace asignar una importancia especial. Ellos consideran que esta inferencia de la primera ley en el nivel más alto de jerarquía respeta las otras inferencias. Esta inferencia hace que los estudiantes terminen decidiendo que la temperatura no va a cambiar. Además, descartan que la temperatura termine en la curva adiabática porque consideran que está definida por la función de estado, que no es válida en este caso (S2, turno 13). De esta manera, se puede observar que los alumnos proyectan la clase de forma alineada tras el conflicto planteado por el entrevistador.

Del análisis se desprenden dos aspectos interesantes. Por un lado, es importante destacar cómo, a partir de una proyección desalineada, es posible llegar a una proyección alineada. Contrariamente a lo que se podría pensar, la proyección no se alinea a través de una explicación que «corrige» las ideas de los alumnos. Por el contrario, la proyección se alinea presentando a los estudiantes un problema o contexto en el que está en conflicto. No es el entrevistador quien alinea las proyecciones de los estudiantes, sino ellos mismos a través de la resolución de problemas.

Por otro lado, es importante destacar las oportunidades que genera una proyección desalineada. Del análisis de este trabajo se puede observar cómo una proyección desalineada y conflictiva permite a los estudiantes: ampliar su red inferencial, reconsiderar ideas ya pensadas y descubrir nuevos aspectos, establecer jerarquías entre diferentes inferencias e integrar los diferentes razonamientos. Estas potencialidades no sólo ayudan a alinear una proyección, sino que también la fortalecen.

5.2. Construcción conceptual compartida: co-construcción de una clase de coordinación

Los resultados de esta sección, aquí comunicados corresponden al artículo en evaluación enviado a la revista International Journal of Science Education titulado "Building shared knowledge: the co-development of a Coordination Class". 2019. (Velasco y col., 2019)

Como se mencionó anteriormente la investigación sobre el cambio conceptual es un esfuerzo multidisciplinario que examina cómo se transforman las estructuras conceptuales en dominios específicos del conocimiento. La literatura sobre las concepciones de los estudiantes y su cambio es vasta, como lo demuestra la bibliografía actualizada periódicamente que contiene miles de publicaciones (Duit y Treagust, 2012; Amin, Smith y Wiser, 2014; Amin y Levrini, 2018).

Dentro del campo del cambio conceptual, la Teoría de la Coordinación de Clases (TCC) constituyó una nueva perspectiva con una contribución significativa. Con el objetivo de enfatizar el proceso de cambio conceptual (más allá de las condiciones que lo promueven), la teoría es una propuesta para la descripción de cómo se organiza el conocimiento y cómo se reorganiza a lo largo del tiempo. Se ha mencionado ya cómo esta teoría ha sido implementada con éxito para describir procesos de cambio conceptual para algunos conceptos particulares. Varios trabajos han presentado valiosas contribuciones para los conceptos de Física: fuerza (diSessa y Sherin, 1998), frecuencia y velocidad (Parnafes, 2007), movimiento (Thaden-Koch, Dufresne y Mestre, 2006), flotabilidad (Buteler y Coleoni, 2016), ondas mecánicas (Wittmann, 2002), tiempo propio (Levrini y diSessa, 2008), energía (Barth-Cohen y Wittmann, 2017) y calor (Kluge, 2019).

Esta propuesta teórica corresponde a una concepción individual del aprendizaje y por lo tanto la mayoría de sus implementaciones para el análisis se orientaron al estudio del cambio conceptual individual. Si bien el análisis conceptual individual permite obtener un detalle fino de cómo se estructura el conocimiento y cómo evoluciona a lo largo del tiempo, se aleja de los contextos educativos reales donde se produce el aprendizaje, como las aulas con numerosos estudiantes y de forma colaborativa.

En este sentido, se ha intentado extender este marco a contextos colectivos. Dos trabajos presentaron una implementación de la TCC para describir el cambio conceptual de grupos de personas o en contextos colectivos (Levrini y diSessa, 2008; Barth-Cohen y Wittmann, 2017). Levrini y diSessa (2008) implementaron la TCC para el análisis de una clase entera a lo largo de una secuencia instructiva de varias sesiones sobre conceptos de relatividad especial. En este caso pionero asignaron la clase de coordinación a todo el grupo de estudiantes. Aunque esto permitió analizar la evolución conceptual del grupo y sus dificultades, el análisis no enfatiza las variadas contribuciones que los diferentes participantes hacen a la construcción de la clase.

Por otro lado, Bath-Cohen y Wittman (2017) hicieron un valioso aporte al considerar las diferentes interpretaciones de los estudiantes como diferentes contextos de la clase de coordinación. Aunque este trabajo avanza en la ampliación de la definición de contexto para considerar los desacuerdos, muchos mecanismos por los cuales un grupo puede o no construir conocimiento de manera compartida siguen siendo cuestiones abiertas: ¿Cómo construyen y desarrollan los estudiantes una clase de coordinación en conjunto? ¿Cómo funcionan los aportes de cada estudiante

en forma colaborativa para el desarrollo conceptual? ¿Qué formas de colaboración se desarrollan? ¿Alguien construye su propia clase de coordinación de manera independiente y/o aislada? ¿Son diferentes? ¿En qué se parecen? ¿Existe una clase de coordinación compartida?

El objetivo de este trabajo es estudiar cómo el proceso de cambio conceptual se desarrolla de manera colectiva. Buscamos aprovechar las virtudes de la TCC al describir los procesos de aprendizaje en detalle, para analizar en profundidad cómo se comparten, reorganizan, descartan y confrontan los elementos del conocimiento en un entorno colectivo. Es así que proponemos estudiar:

¿Cómo los estudiantes co-construyen una clase de coordinación?

5.2.1. Metodología y Contexto del estudio

Si bien se ha descrito la metodología en el capítulo 4, es importante enfatizar algunos aspectos. Para este estudio se vieron involucrados los grupos G1, G2 y G3. Es importante enfatizar nuevamente que el entrevistador tiene como misión seguir los razonamientos de los estudiantes y favorecer que el grupo pueda realizar su propio camino de resolución. Se evitan todo tipo de evaluaciones de los razonamientos de los estudiantes.

Consigna Presentada-Problema

Decidimos enfocar nuestro estudio en el contexto del concepto de entropía. La motivación tiene dos partes principales. En primer lugar, las características del concepto de entropía lo habilitan a ser bien descrito como clase de coordinación. Presenta diversas aristas y abordajes, desde lo macroscópico a lo microscópico, como así también desde el formalismo a lo conceptual. Nuestra segunda motivación está relacionada con las numerosas dificultades que las investigaciones han reportado en relación a este concepto. Entre ellas, cabe destacar los consistentes hallazgos de la «metáfora del desorden» mientras los estudiantes resuelven los problemas de entropía. Tanto los estudiantes universitarios como los de secundaria tienden a considerar la entropía como una medida del desorden de un sistema (Sozibilir, 2003; Ayyildiz y Tarhan, 2012; Brosseau y Viard, 1992; Weber III, 2009; Covolan, Silva y col., 2005; Bucy, Thompson y Mountcastle, 2006; Fredrik y col., 2013; Jeppsson, Haglund y Amin, 2015). Esta metáfora a menudo lleva a los estudiantes a hacer predicciones erróneas sobre la entropía de un sistema y su evolución. Otros trabajos informan sobre las dificultades de los estudiantes en relación con las propiedades de la entropía y sus representaciones.

En relación con la resolución de problemas por parte de los estudiantes, las siguientes ideas sobre la entropía son referidas frecuentemente en las investigaciones: aplicación incompleta de la expresión de la desigualdad para procesos irreversibles (Bucy, Thompson y Mountcastle, 2006; Granville, 1985), uso inadecuado de la propiedad de función de estado (Cochran y Heron, 2007) y consideración de la entropía como una función creciente independientemente del sistema y del proceso particular que experimenta.

A cada grupo de estudiantes se le propuso un problema diseñado (P1) y discutido por el grupo de investigación. El problema fue diseñado con el propósito de

que los estudiantes pudieran hacer explícitas sus ideas sobre entropía, sus diferentes representaciones, propiedades (por ejemplo, que es una función de estado), su relación con los procesos reversibles/irreversibles, entre otros. Se espera que el problema evoque ideas previas de los estudiantes reportadas en la literatura. Esto nos permite monitorear la forma en que evolucionaron. La tarea consistió en analizar qué ocurre con la entropía de un sistema y con la de su entorno después de pasar por un proceso determinado. La figura 4.1 muestra el planteo del problema.

Dado que la entropía es una función de estado, después de completar el ciclo, la entropía del gas es la misma que al principio. El entorno aumenta su entropía y lo hace en la compresión reversible, durante la cual el gas le proporciona calor. El punto curioso (o quizás contrario a la intuición) es que pareciera que la entropía neta del sistema en realidad aumenta durante el proceso reversible, y no durante el irreversible. En realidad, la entropía del universo aumenta durante la expansión libre de A a B (no representable en los diagramas P-V). Cuando el sistema se transforma reversiblemente de B a A, el universo mantiene su entropía, ya que el aumento de la entropía del entorno es igual a la disminución de la entropía del gas.

5.2.2. Resultados y Análisis

A partir de los registros de los grupos entrevistados, desarrollamos un análisis que consiste en tres dimensiones interconectadas: estudiamos el desarrollo de la clase de coordinación, determinamos un nuevo criterio de lo que denominamos co-construcción y determinamos tipos de co-construcción de la clase. Explicamos cada dimensión de forma breve a continuación. Cabe destacar que las propuestas de categorías y el análisis están basados en los tres grupos entrevistados para este estudio. Decidimos exponer en estos resultados extractos del grupo G1 para ejemplificar la propuesta teórica.

Clase de Coordinación

En esta dimensión analizamos en detalle, desde la teoría de clases de coordinación, cómo la *clase* «Entropía» se desarrolla. En el cuadro 5.1 se presentan criterios operacionales utilizadas para inferir los elementos de conocimiento en los registros y estructurar el desarrollo de la clase.

El análisis está organizado en cuatro fragmentos. Primero, los estudiantes concluyen que la entropía del gas aumenta después de completar un ciclo ya que aumenta durante la transformación irreversible y se mantiene constante durante la reversible (fragmento 1). Luego, revisan su respuesta y utilizan la formulación matemática macroscópica. Así, calculan el cambio de entropía y obtienen cero para la primera transformación y un valor negativo para la segunda. Como resultado final, concluyen que la entropía del gas después de todo el proceso disminuye. En una tercera etapa, intentan reconciliar estas ideas (fragmento 3). Finalmente, resuelven el cambio de entropía del entorno, considerando los elementos discutidos previamente (fragmento 4).

Determinación de Co-construcción

Además de analizar cómo la clase es coordinada, también nos centramos en la co-construcción de esas coordinaciones, enfocando el análisis en cómo se construyen las proyecciones con la participación de cada estudiante. Nos interesa entender cómo las contribuciones de cada estudiante colaboran o no con el desarrollo de la

CUADRO 5.1: Definiciones operacionales de una clase de coordinación.

Elemento	Criterio Operacional	Ejemplo
Extracción	-Refiere a aspectos específicos de los objetos -Son leídos directamente del contexto	- <i>Gas no interactúa con el entorno</i> - <i>La temperatura es constante</i>
Red Inferencial	-Involucra conceptos abstractos o leyes físicas	- <i>Es reversible, entonces la entropía no cambia</i>
Proyección	-Produce información distintiva del concepto	- <i>De A a B la entropía del gas aumenta, a la vuelta no</i>

clase. Se persiguen dos aspectos con el análisis: a) determinar si las proyecciones están siendo co-construidas (es decir, ambos estudiantes construyen la misma proyección) o no (es decir, toman dos formas diferentes de razonamiento) y, si es así, b) entender el tipo de co-construcción (cómo esta proyección es compartida por los estudiantes y cómo su participación contribuye o no con este co-desarrollo).

En una primera instancia se realiza una codificación general de la entrevista a través del software VideoGraph. Este programa permite representar dinámicas interactivas de la entrevista. De esta manera se configuran estructuras generales para organizar el análisis. Algunas cuestiones relacionadas con la representación del concepto que abordan y cómo son integradas se identifican a partir de las salidas del programa. Estos breves análisis se presentan en el Apéndice A de la tesis.

Para la determinación de co-construcción, definimos que una proyección de una clase de coordinación es co-construida cuando los elementos de una sola proyección son proporcionados por al menos dos personas. Esto significa que cada estudiante debe contribuir con, al menos una extracción o inferencia para considerar la proyección como co-desarrollada. Si todos los elementos de una proyección son proporcionados por un solo estudiante, entonces esa proyección no se considera como co-desarrollada.

Tipos de co-construcción

Con el fin de analizar los tipos de co-construcción, nos centramos en los tipos de participación. Como mencionamos anteriormente en el marco teórico, se recurrió a elementos particulares del enfoque sociocultural para extender la TCC a fenómenos de tipo colectivos. Se definieron dos categorías, inspiradas en las propuestas de Lave y Wenger (1991) sobre «participación periférica legítima» y adaptadas a nuestra discusión en pequeños grupos. En este punto es importante enfatizar algunas cuestiones.

En primer lugar, las categorías desarrolladas están inspiradas en la propuesta de Lave y Wegner (1991) y adaptadas para este estudio. Esto significa que no son clasificaciones traídas directamente de esta propuesta sino que están basadas en ellas. Es importante recalcar esto porque el abordaje de estos autores es totalmente sociocultural desde el marco del aprendizaje situado. En el paradigma donde se basan, el aprendizaje se desarrolla en comunidades de práctica y su propuesta aborda cómo se legitiman las participaciones, distinguiendo las establecidas de las nuevas que deben ser legitimadas. Estas últimas presentan un carácter inicial periférico y,

a medida que se desarrolla el aprendizaje las participaciones se involucran en las interacciones.

Considerando estos elementos, proponemos una simple distinción de las participaciones de los estudiantes involucrados en las entrevistas. Con esta distinción pretendemos ampliar la descripción del fenómeno en cuestión con el fin de atender la necesidad de describir la dinámica interactiva de los estudiantes. Definimos dos categorías de participación:

- *Participación Central*: intervenciones que pueden servir para aportar posiciones nuevas o divergentes en relación con lo que se está discutiendo. Estas intervenciones son claras, expresan certeza, proponen argumentos o cuestionan una idea.
- *Participación Periférica*: intervenciones que los estudiantes usan para estar de acuerdo, expresar dudas o preguntar sobre las opiniones de sus compañeros.

Un segundo aspecto importante de destacar de estas categorías tiene que ver con la aplicación al contexto o formato de estudio. Si bien es cierto que la propuesta de Lave y Wegner (1991) es orientada y construida en comunidades de práctica donde los grupos son numerosos y la dinámica social presenta otras características, encontramos dos motivos para considerar plausible el uso de recursos socioculturales en nuestro estudio. El primero, tiene que ver con que los estudiantes pertenecen a una comunidad de práctica, que es la facultad, donde sus dinámicas de aprendizaje e interacción se desarrollan diariamente. Si bien el formato del estudio no es estrictamente el habitual para los estudiantes, se trata de individuos que tienen una historia de pertenencia en ciertas dinámicas sociales características comunes entre sí. Por otro lado, en relación a este último punto, la resolución de problemas en pequeños grupos es una práctica totalmente habitual y común en el desarrollo de las clases de la FaMAF por lo que la configuración de los estudios no se aleja de las dinámicas interactivas cotidianas de las estudiantes.

A continuación se muestra un fragmento de entrevista de dos estudiantes para ejemplificar cómo funcionan las categorías. Las estudiantes (D y F) están empezando a discutir sobre la tarea. Se utilizan las letras *D* y *F* para referir a las estudiantes, mientras que *Int* se utiliza para referenciar al entrevistador.

Sejemplo

1. D: La entropía era?
2. F: Diferencial de Q sobre T
3. F: Es reversible, por lo que la entropía del universo no cambia.
4. D: Pero es la del gas...
5. F: Sí, el gas sí...
6. D: ¿La entropía permanece constante durante un proceso reversible?
7. F: Sí, sí...

Las intervenciones de F son centrales: da una definición ("diferencial de Q sobre T"), aplica una propiedad conocida ("Es reversible, por lo que la entropía del universo no cambia") y responde a las preguntas. En cambio, las intervenciones de

D son periféricas: expresa dudas ("La entropía era...?"); pide a su par información que ella misma no puede recordar ("¿La entropía permanece constante durante un proceso reversible?").

Después de definir las categorías para las participaciones de las estudiantes, definimos dos tipos de co-construcción de una proyección: *simétrica* y *asimétrica*.

- *Co-construcción simétrica*: llamamos co-construcción simétrica cuando se cumplen dos condiciones: los elementos de la proyección (extracciones e inferencias) están distribuidos uniformemente entre los participantes y las participaciones de todos los miembros de la discusión son en su mayoría de tipo central.
- *Co-construcción asimétrica*: se da cuando los elementos de la proyección no fueron aportados uniformemente por los participantes y la participación de al menos un miembro es mayoritariamente de tipo periférico.

A continuación se analiza cada fragmento considerando la estructura de la clase de coordinación de la entropía, si hay una co-construcción de la/s proyección/es o no y, si lo hay, el tipo de co-construcción.

Fragmento 1: "La entropía del gas aumenta después del ciclo"

Se analizan detalladamente las transcripciones y se infieren elementos de la teoría de la clase de coordinación. Las estudiantes abordan el problema utilizando ideas sobre los procesos reversibles/irreversibles y la aditividad de la entropía. Las transcripciones y su análisis se muestran a continuación.

S₁[3.02 min]

1. D: La entropía era?
2. F: Diferencial de Q sobre T
3. F: Es reversible, por lo que la entropía del universo no cambia.
4. D: Pero es la del gas...
5. F: Sí, el gas sí...
6. D: ¿La entropía permanece constante durante un proceso reversible?
7. F: Sí, sí...mm... No recuerdo bien...tengo una pregunta. Si calculo la entropía, ganada o perdida, lo que sea, la variación hasta aquí[de A a B y viceversa] y las sumo, esa es la entropía total, ¿no es así?
8. Int: Sí. Sólo para comprobar que las estoy siguiendo. Cuando un proceso es reversible no hay cambio de entropía y cuando es irreversible, sí.
9. F: Sí, siempre aumenta.
10. D: Pero el proceso de A a B es irreversible, ¿no?...¡Oh no! Aquí dice: corresponde a una compresión isotérmica reversible
11. F: Ahh no!...la primera transformación es irreversible
12. D: Para mí es irreversible

13. F: Es irreversible...ah, ok, bien entonces... De aquí para allá [de A a B] la entropía del gas aumenta, y de aquí para allá [de B a A] se mantiene constante...Por lo tanto, aumentó
14. Int: Entonces, están diciendo que la entropía del gas aumenta durante la primera transformación porque la expansión libre es un proceso irreversible. En el proceso de vuelta a A, la entropía del gas no cambia porque el proceso es reversible.
15. Ambas asienten.

Cuando D pregunta sobre la entropía (turno 1) F trae la correspondiente formulación/definición matemática. F identifica el ciclo como un proceso reversible y evoca una propiedad conocida según la cual la entropía del universo permanece constante. La identificación de la característica reversible del proceso corresponde a la primera extracción de esta proyección. Esto le permite hacer la primera inferencia y así afirmar que la entropía del universo no cambia (elemento de la red inferencial) (turno 3). Luego, F recuerda la aditividad de la entropía y comprueba su aplicabilidad con el entrevistador (turno 7). Esto les permitirá inferir nueva información sobre la situación. Más tarde, D introduce un nuevo elemento, del que F no se había dado cuenta: la irreversibilidad de la libre expansión, es decir, una nueva extracción (turno 10). Este elemento permite a F y D completar la primera proyección y afirmar que la entropía aumenta después del ciclo (turnos 13 y 15).

Es interesante señalar que en este fragmento se infirieron ideas previas similares a las reportadas en la literatura. A saber, el mal uso de la entropía como una función del estado (Granville, 1985) y la asociación de reversibilidad con invariancia en la entropía de un sistema (Cochran y Heron, 2007).

La evolución de la proyección de las estudiantes en este fragmento se puede sintetizar de la siguiente manera: comenzaron a evocar que durante un proceso reversible, la entropía del universo permanece constante. Después, comprobaron la propiedad sumativa de la entropía. Notaron la irreversibilidad de la expansión libre y finalmente concluyeron que la entropía del gas a lo largo del ciclo completo aumenta.

Determinación de Co-construcción

Las transcripciones del fragmento 1 muestran que hay una sola proyección que se construye mediante extracciones e inferencias de ambas estudiantes. F saca a relucir una propiedad que D no recordaba como «la entropía del universo permanece constante en los procesos reversibles» y la aditividad, mientras que D identifica una información que F no (la primera transformación como irreversible).

Aunque claramente F está liderando el proceso de razonamiento, la contribución de D es relevante. La figura 5.3 muestra un diagrama del desarrollo de la clase en el que se puede ver que la extracción de D es necesaria para la proyección. Las inferencias de F se basan en esta contribución de D. Es claro que sólo hay una proyección que es construida por ambos estudiantes. No hay duda de que hay muchas más contribuciones de F que de D. Este último punto se trata en el siguiente apartado.

Tipo de Co-construcción

La figura 5.3 muestra que en este fragmento hay un co-desarrollo de la clase. También muestra que las contribuciones no fueron equilibradas. La estudiante F

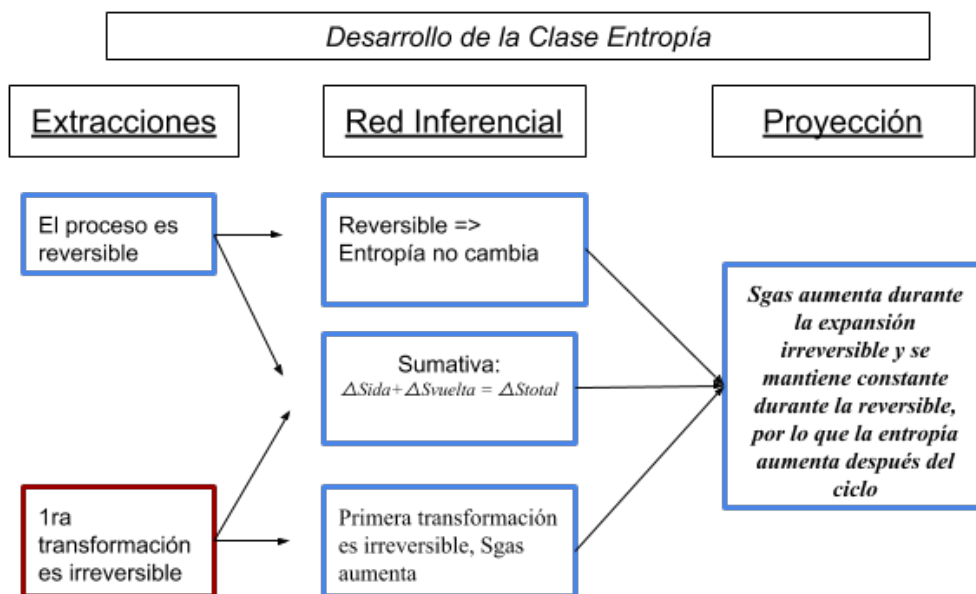


FIGURA 5.3: Esquema de la proyección de la clase durante el fragmento 1. En azul las contribuciones de la estudiante F, en rojo las de D.

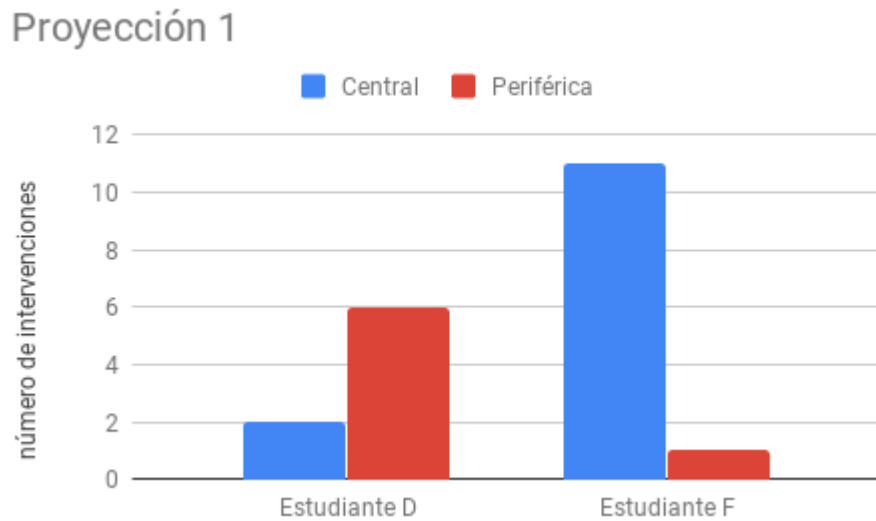


FIGURA 5.4: Intervenciones de las estudiantes durante el fragmento 1.

propuso la mayoría de los elementos de la proyección, mientras que el estudiante D contribuyó con una única extracción, aunque importante.

Además, la Figura 5.4 muestra que la participación de F es claramente central. La mayoría de sus intervenciones son sustantivas: argumentos, propuestas e inferencias críticas para abordar la solución del problema. Por otro lado, las participaciones de D son en su mayoría de tipo periférico, es decir, sus intervenciones no fueron para proponer nuevos argumentos, elementos o ideas originales sino para seguir las propuestas de F. Las primeras intervenciones de la estudiante F aportan ideas y propiedades de entropía a la discusión para abordar el problema. La estudiante D le pregunta sobre sus argumentos e intenta seguir las ideas de F hasta que se da cuenta de la irreversibilidad de la libre expansión (intervención central) e introduce este elemento en la discusión. Por las razones anteriores, y dado el enfoque teórico propuesto, concluimos que este fragmento muestra un desarrollo asimétrico de la proyección.

Fragmento 2: *"La entropía del gas decrece luego del ciclo"*

A lo largo de este fragmento veremos cómo las estudiantes evocan representaciones matemáticas para revisar su propia respuesta y calcular los cambios en la entropía del gas. Mostraremos cómo utilizan la expresión $dS = dQ/T$ indistintamente tanto para procesos reversibles como irreversibles. De esta manera calculan $\Delta S = 0$ para la parte irreversible y $\Delta S < 0$ para la reversible.

En este extracto, F evoca la formulación macroscópica de la entropía. Implementa la fórmula $dS = dQ/T$ para el proceso irreversible para encontrar que el cambio de entropía es cero de A a B.

$S_2[8.03 \text{ min}]$

1. F: No sé... podemos calcular y ver qué pasa.
2. F: En la primera, diferencial de Q...no recuerdo cual era la letra para entropía... W?

3. Int: Es la S...
4. F: S... ok, bien delta S es igual a la integral de dQ sobre T desde el estado A al estado B en la primera transformación... Así que... diferencial Q aquí es cero, sobre T... hmm...ohh!
5. D: Mm, no intercambia calor con el entorno.
6. F: mm...Y ahora, delta S2 sería de B a A, Q diferencial sobre T
7. D: ¿Esto es como un cálculo de entropía total?
8. F: Hm...no
9. D: ¿Es esta la entropía para el sistema que estás viendo?
10. F: Sí...

Es posible ver cómo notaron que este resultado es diferente de lo que habían pensado sobre la expansión irreversible. Primero encontraron que la entropía aumenta de A a B porque es un proceso irreversible, pero matemáticamente calculan este cambio de entropía y obtienen cero. En este punto, abusan de la fórmula, aplicando la forma igual para un proceso irreversible. Este problema fue identificado en investigaciones anteriores también (Covolan, Silva y col., 2005; Jeppsson, Håglund y Amin, 2015). Nuestro interés es analizar cómo funcionan estos conceptos intuitivos y cómo evolucionan durante la interacción de los estudiantes.

En el siguiente extracto, las estudiantes calculan el cambio de entropía para la transformación de B a A. Identificaron que durante esta compresión isotérmica reversible el gas libera calor al ambiente y por lo tanto su entropía disminuye. Esta idea contrasta con lo que pensaban antes cuando asumían que la entropía del gas no cambiaba durante el proceso reversible.

S₃[12.02 min]

1. F: Creo que las líneas isotérmicas cortan las adiabáticas, no perdón, las adiabáticas cortan las isotérmicas...
2. F: Entonces, el gas está haciendo esto... Pasa de un punto [B] de menos calor a uno [A] con más calor. Así que acá delta Q es negativo! Por lo tanto, el delta Q entre B y A es menor a cero. Así que la entropía aquí...
3. Int: Perdón, eso significa...
4. D: que pierde calor...
5. F: Entonces, acá...si tengo cero en el primer caso...lo cual no estoy segura que esté bien, pero el cálculo nos da que
6. D: Ahhh...oh no!
7. D: La entropía del universo aumenta...
8. F: Bien, aumenta. La entropía del gas no necesariamente aumenta en un proceso irreversible.
9. F: Bueno, aquí tenemos que el calor se pierde, así que la entropía del gas disminuyó en esta transformación reversible.

La Teoría de Clases de Coordinación nos permite inferir el camino conceptual seguido por los estudiantes para llegar a esta proyección diferente. Como mencionamos anteriormente, dudaron de su primera respuesta y buscaron otros recursos conceptuales para abordar el problema. Una vez que decidieron aplicar la representación matemática macroscópica, comenzaron a resolver la ecuación deduciendo el signo correcto para Q (cantidad de calor transferido).

Durante la primera parte, F extrae del contexto que no hay intercambio de calor durante la expansión libre (turno 4). Este elemento le permite inferir que el cambio de entropía es cero después de la primera transformación. Como hemos mencionado antes, la fórmula macroscópica se aplica mal en este contexto.

F notó que la temperatura se mantiene constante a lo largo de la compresión isotérmica reversible (extracción). Mediante un esquema gráfico (desplazamiento entre curvas adiabáticas implica transferencia de calor), infiere que dQ es negativo y, en consecuencia, afirma que la entropía disminuye durante la compresión. Uniendo los dos razonamientos, concluye que después del ciclo completo, la entropía disminuye (proyección 2). Al igual que en el fragmento 1, esta proyección también está desalineada.

Dos aspectos son importantes de mencionar en este fragmento. Primero, ninguna de las dos estudiantes estaba convencida de su primera respuesta, por lo que buscaron otras representaciones de la entropía para abordar el problema. Entre ellas, la formulación matemática (de procesos macroscópicos) tenía aspectos incompletos. Cuando la usaron, proyectaron la clase de manera desalineada. En segundo lugar, y lo más interesante, reconocieron estos diferentes resultados y los colocaron en el mismo nivel jerárquico. Más adelante mostraremos cómo articulan estas dos proyecciones desalineadas.

Determinación de Co-construcción

Hemos definido que hay co-construcción si hay una sola proyección y se hace con elementos propuestos por más de una participante. La figura 5.5, muestra un esquema del desarrollo de la clase y la contribución de cada estudiante. Tanto la transcripción, como el esquema de la proyección en la figura, muestran que hay una única proyección y que todos sus componentes son aportados por una sola estudiante. La estudiante F realizó las dos extracciones, ambas inferencias y proyectó la entropía de la clase. La estudiante D no aporta elementos sustanciales de la clase de coordinación con sus participaciones. Como muestra la figura 5.6, sus intervenciones fueron casi en su totalidad periféricas, a diferencia de las de la estudiante F, quien nuevamente tuvo participaciones de tipo central en su mayor parte. Por estas razones concluimos que no hay una co-construcción de la proyección durante el fragmento dos.

Fragmento 3: "La entropía del gas aumenta durante el proceso irreversible y disminuye en el reversible"

En este fragmento, mostramos cómo el entrevistador recupera las proyecciones desalineadas y las estudiantes las articulan. Primero dudan de la expresión matemática y piensan que hay algo incorrecto en ella. Después de las discusiones, las estudiantes alinean ambas proyecciones y reformulan su respuesta.

S₄[18.07 min]

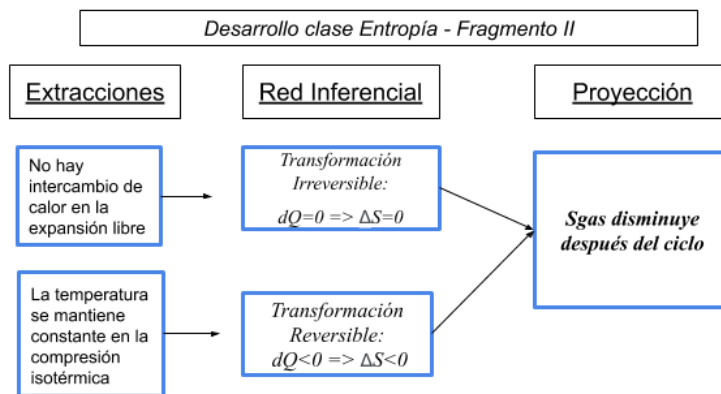


FIGURA 5.5: Diagrama de la clase durante el fragmento 2.

Proyección 2

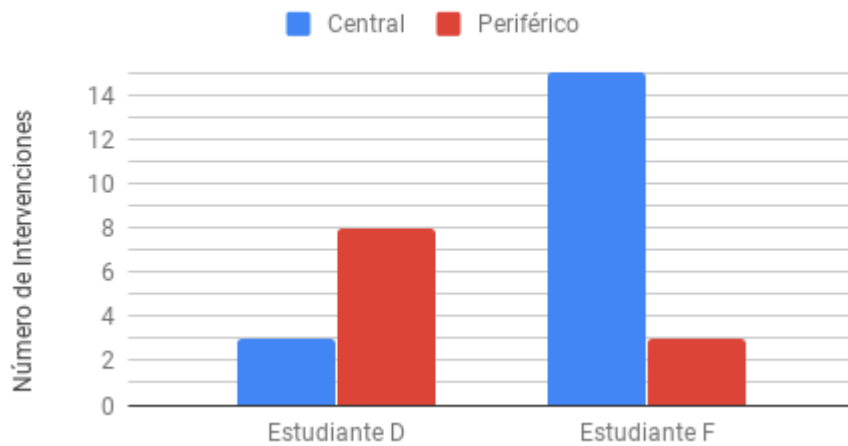


FIGURA 5.6: Intervenciones durante el fragmento 2.

1. Int: todavía tenemos dos opciones [las que se describen a continuación], ¿no?...
O bien la entropía aumenta durante la primera transformación porque es un proceso irreversible o bien no cambia porque el delta Q es cero...
2. F: Sí...ese es el problema...no estoy segura ahora
3. Int: Sus ideas sobre irreversibilidad y entropía no encajan completamente en esa ecuación, ¿verdad?
4. F: ¡Sí!...;no encajan!.
5. F: Espera...esta ecuación...¿Siempre funciona? Ahora no estoy segura.... ¿Es sólo para procesos reversibles? No recuerdo eso.
6. D: Pero si el ciclo es reversible, [cambio de entropía] siempre sería cero.
7. F: Si es un ciclo, pero no una transformación. Si calculo de A a A siempre será cero, pero aquí en el camino de vuelta tenemos incluso un valor negativo

8. D: Cierto...
9. Int: Bueno, de hecho, en esta expresión [matemática] el igual sólo es válido para transformaciones reversibles. De lo contrario, el signo "menos que..."
10. D: ah...
11. F: ¡Es verdad! No se pueden calcular los cambios de entropía en procesos irreversibles. Recuerdo que ahora...
12. Int: ¿Eso resolvió el problema?
13. D: Sí...la entropía del gas aumenta
14. F: Sí, siempre aumenta

En términos generales, lo primero que se puede observar es que las estudiantes articulan sus proyecciones cuando el entrevistador responde a sus preguntas sobre los límites y contextos en los que funciona la formulación matemática. Sin embargo, van más allá:

- Descartan la idea de que la entropía del gas permanece constante durante los procesos reversibles. Los cálculos las convencen de esto.
- Se podría pensar que es el entrevistador quien articula la clase de Entropía para ellas, pero no es el caso. Las estudiantes identificaron discrepancias entre sus propias proyecciones desde el principio. El entrevistador sólo vuelve sobre estas discrepancias a la discusión (S2, turno 4).
- Son las mismas estudiantes quienes dudan de la ecuación (turno 5). No sólo notan espontáneamente que hay un problema, sino que también identifican dónde podría residir ese problema.

En resumen, en esta etapa las estudiantes piensan que la entropía del gas aumenta durante la transformación irreversible y disminuye durante la compresión isotérmica reversible. Todavía tienen que decidir si, después del ciclo completo, la entropía del gas permanece constante, aumenta o disminuye.

De la Teoría de Clases de Coordinación podemos inferir que en este fragmento se hizo un proceso de articulación. Las estudiantes se dieron cuenta de que las dos proyecciones son diferentes e intentan hacerlas encajar. Modifican sus extracciones e inferencias de la proyección 1 y la proyección 2 para conciliarlas. La estudiante F duda de la implementación hecha de la ecuación y plantea una reformulación (turno 5). Incorporando la desigualdad en la ecuación, logran conciliar su idea de irreversibilidad y aumento de la entropía (turno 11). Las estudiantes también refinan la relación entre reversibilidad y cambio de entropía, concluyendo que la entropía del gas disminuye en la compresión isotérmica reversible (turno 7). De esta manera, completan una nueva proyección conciliando las dos anteriores.

Determinación de Co-construcción

Durante el tercer fragmento es posible inferir que las estudiantes todavía están construyendo una proyección única. Trabajan para conciliar sus dos proyecciones a partir de los fragmentos 1 y 2. Mientras que hay dos proyecciones, las estudiantes trabajan juntas para conciliarlas. Si cada estudiante desarrollara su propia proyección y la confrontara con la suya propia, podríamos inferir que hay un desarrollo

paralelo de las proyecciones. Sin embargo, no es así. Ambas trabajan juntas para conciliar sus dos proyecciones desalineadas.

Es posible ver que el proceso de articulación involucra a ambas estudiantes. Aunque la participación de F parece prevalecer en el proceso global, los aportes de D son valiosos, por lo que en el siguiente apartado profundizaremos en este análisis.

Tipo de co-construcción

La determinación del tipo de co-construcción en este fragmento requiere un análisis cuidadoso. Como muestra la figura 5.7, no se incorporaron muchos elementos en esta proyección, por lo que analizar quiénes los aportaron no proporcionará información relevante en este sentido. Sin embargo, las estudiantes propusieron cambios cruciales para la clase y el análisis de las contribuciones de las estudiantes a estos cambios puede informar sobre el co-desarrollo de la clase. Analizando la transcripción, podemos observar que:

- La estudiante D está de acuerdo con la modificación de la ecuación y propone que la entropía del gas aumenta en la expansión libre (turno 13).

- La estudiante F, por su parte, cuestiona la ecuación que había utilizado (turno 5), propone argumentos para explicar a su compañera (turno 6) y propone junto con D que la entropía aumenta (turno 11 y 14).

Aunque más distribuidos entre las estudiantes en comparación con los fragmentos 1 y 2, las contribuciones a la clase siguen siendo desiguales. La estudiante F continúa con contribuciones, argumentos y propuestas más sustanciales.

Si observamos los tipos de participación, aunque el fragmento es corto, se puede inferir que la estudiante F no cambia su patrón de participación, exhibiendo intervenciones de tipo central en su mayor parte. Por otro lado, la estudiante D tiene tantas intervenciones centrales como periféricas. La figura 5.8 representa estas inferencias. Considerando este análisis la co-construcción puede ser definida como *asimétrica*.

Fragmento 4: "La entropía del entorno aumenta, y lo hace durante la compresión reversible"

Una vez que la discusión sobre la entropía del gas ha terminado, las estudiantes cambian su atención hacia la entropía del entorno. Recuperan rápidamente las ideas sobre procesos reversibles/irreversibles y concluyen que durante la transformación reversible aumenta su entropía. Luego, después de un par de minutos, notan que el entorno no interactúa con el gas durante la expansión libre, por lo que afirman que la entropía del ambiente no cambia durante ese proceso irreversible.

En el siguiente fragmento, para completar una proyección de la Clase, las estudiantes recuperan, de las discusiones previas, elementos sobre cambios en la entropía, reversibilidad y primera ley de la termodinámica.

S₅[45.03 min]

1. D: Durante la transformación reversible, aumenta [la entropía]...
2. F: Sí...
3. D: Durante el irreversible... no sé
4. F: Yo tampoco

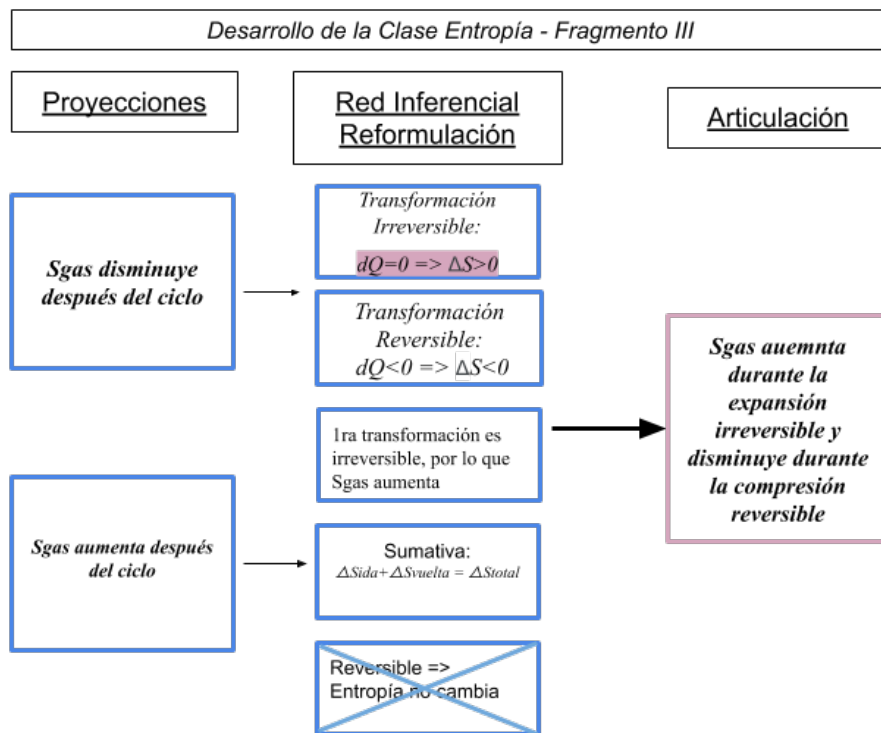


FIGURA 5.7: Diagrama de articulación durante el tercer fragmento. El resaltado lila es utilizado para representar las contribuciones o cambios propuestos por ambas estudiantes.

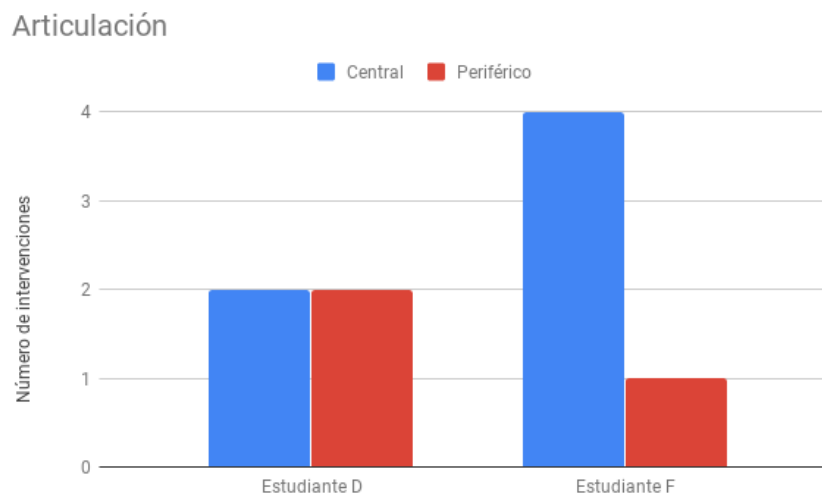


FIGURA 5.8: Intervenciones durante el tercer fragmento.

5. F: En la transformación reversible, aumenta
6. D: y en el irreversible...¿por qué disminuiría?
7. F: No tiene por qué disminuir. No hay ninguna razón para eso.
8. F: Sabemos que disminuye en el camino de regreso y la entropía del entorno permanece constante...
9. D: ¡Ah! ¡El entorno! Me refería al universo...Bien... Así que, durante la transformación irreversible tal vez no pase nada.
10. F: ¿Con el universo?
11. D: No, porque...¿por qué aumenta la entropía del entorno? Para mí, durante el proceso irreversible no cambia.
12. F: Correcto, el gas no interactúa con el medio ambiente durante el proceso irreversible. Quiero decir, no está haciendo ningún trabajo...tampoco está intercambiando calor... Bien, creo que permanece constante durante el primer proceso y en el segundo debe aumentar. No hay otra opción.
13. D: Sí. Así que, opción D.
14. F: Sí. Además, si se considera la entropía del universo, es decir, el gas más el medio ambiente, entonces, ya se sabe que su entropía debe aumentar y la del gas ya ha aumentado (durante el proceso irreversible).
15. D: Cierto
16. F: Creo que la entropía del entorno aumenta y lo hace durante el proceso reversible. Es más, el aumento de entropía del universo ocurre en la transformación irreversible. En la primera etapa, la entropía aumenta y durante la segunda permanece constante porque la entropía del gas disminuye tanto como aumenta la entropía del entorno. Todo el aumento de la entropía[universo] ocurre durante el proceso irreversible del gas.

Las estudiantes notaron que la entropía del entorno aumenta durante el proceso reversible debido al intercambio de calor del gas (primer elemento de la red inferencial - turnos 1 y 2). Después de eso, notaron que durante la transformación irreversible el entorno no interactúa con el gas, por lo que dedujeron que su entropía se mantiene constante (segundo fragmento - turno 12) y completaron la proyección encontrando que la entropía del entorno aumenta (turno 16). La explicación de F revela un profundo entendimiento del proceso. Figura 5.9, muestra una síntesis del desarrollo de la clase.

Es interesante destacar cómo la estructura de la clase muta a lo largo de la entrevista. Las dos primeras proyecciones estaban desalineadas (en la forma en que la literatura anterior lo había reportado). Después de un proceso de articulación, las estudiantes modificaron sus inferencias y proyectaron la clase de una manera diferente y alineada. Cuando abordaron el tema del medio ambiente, recuperaron muchos elementos de la discusión anterior y los aplicaron. Después de un breve debate, encontraron la manera de resolver el problema y proyectaron la clase de manera alineada. Las explicaciones finales de las estudiantes revelan que alcanzaron una comprensión más profunda de la entropía. Esto es posible de inferir a partir del proceso de articulación que realizan las estudiantes, donde comparan las

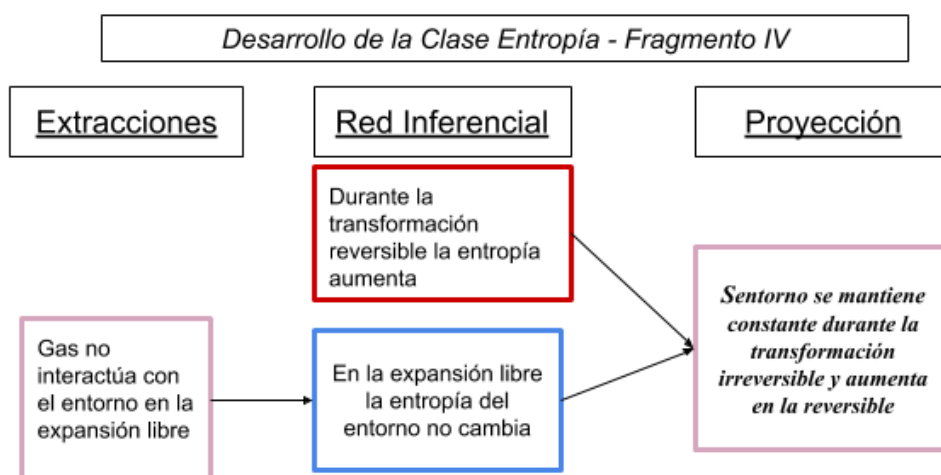


FIGURA 5.9: Desarrollo de la clase durante el fragmento IV. En azul las contribuciones de la estudiante F, en rojo las de D y en púrpura las de ambas.

proyecciones realizadas para el caso del gas y para el del entorno, donde integran los elementos de la red inferencial para dar explicación al fenómeno en cuestión. Vemos esto como una evolución conceptual durante la discusión en grupo.

Determinación de co-construcción

Como en toda la entrevista, estuvimos en presencia de un desarrollo de proyección único. Ambas estudiantes trabajan juntas en la misma construcción del conocimiento. Además, como se detalla en la figura 5.9, ambas estudiantes aportaron elementos a la proyección de la clase. Cada estudiante contribuyó con una inferencia y la proyección es acordada por ambas. Es trivial definir este fragmento como proyección co-construida.

Tipo de Co-construcción

A diferencia de lo que vimos en el caso anterior, en la entropía del gas, aquí es difícil asociar cada elemento a una estudiante en particular. Los elementos de la clase están distribuidos uniformemente entre ambas estudiantes. Las transcripciones evidencian un cambio en la participación de la estudiante D durante este fragmento. En la figura 5.10 podemos ver que las participaciones de D son ahora en su mayoría de tipo central, al igual que las de la estudiante F. Nuestra afirmación es que la participación de D en las discusiones cambió durante este fragmento en comparación con las anteriores. Dado que ambas estudiantes aportaron elementos a la clase de manera uniforme y que tuvieron una participación de tipo central, podemos decir que la co-construcción es simétrica.

A lo largo de toda la entrevista se produjeron diferentes tipos de co-construcción. En el primer fragmento, se infiere una co-construcción asimétrica. Durante el fragmento II, no hay co-construcción ya que la estudiante F contribuyó y desarrolló toda la proyección por sí misma. En el fragmento III, se produjo de nuevo una co-construcción de tipo asimétrica, ya que el estudiante D sigue contribuyendo en

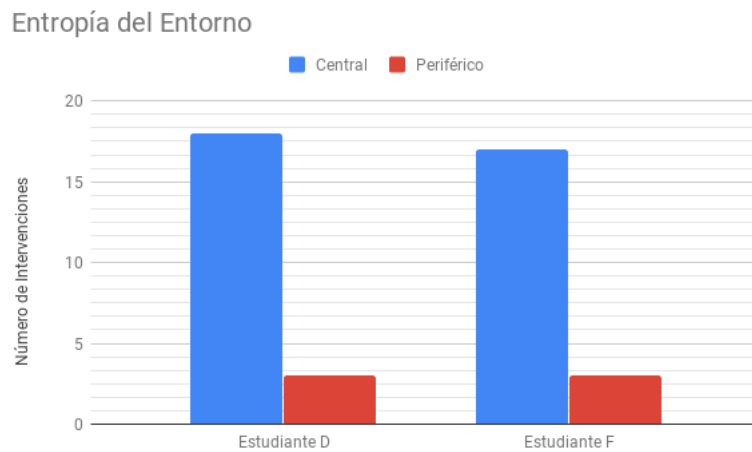


FIGURA 5.10: Tipo de intervenciones durante el fragmento IV

gran medida con intervenciones de tipo periférica. Al final de la sesión, las participaciones de D cambian y se instaura una co-construcción simétrica. Como revela el fragmento 4, ambas estudiantes continúan desarrollando la clase pero con elementos aportados de manera uniforme. Los datos indican que a medida que se desarrolló la entrevista, las estudiantes (especialmente D) mejoraron la forma en que integraron sus contribuciones.

El análisis realizado reveló detalles finos de cómo se organiza la Clase en cada etapa de la entrevista y los mecanismos que las estudiantes despliegan para compartir, construir y organizar el conocimiento.

5.2.3. Discusión

Nuestro interés estaba focalizado en explorar cómo una clase de coordinación se desarrolla en colaboración por dos estudiantes cuando se aborda una tarea de resolución de problemas que involucra la entropía. Nuestro estudio se orientó a entender los mecanismos de colaboración involucrados en la construcción de conocimiento común por parte de las estudiantes. Los estudios que utilizan la lente de la teoría de clases de coordinación normalmente han asignado la clase al grupo de personas como un todo, sin distinguir el proceso conceptual de cada participante del grupo. Hemos observado que las estudiantes que participan en una tarea de resolución de problemas pasan por diferentes procesos y que la TCC no nos permite diferenciarlos. ¿Por qué valdría la pena acercarse al proceso de cada participante durante la interacción? La razón principal es que nos permitiría comprender cuándo y cómo se producen las oportunidades de aprendizaje a través de la interacción de las estudiantes. Con esta motivación abordamos nuestra pregunta de investigación:

¿Cómo se desarrolla el aprendizaje de entropía de estudiantes durante la interacción entre pares en una tarea de resolución de problemas?

Para poder abordar esta pregunta de investigación fue necesario desarrollar una

extensión de la teoría para comprender cómo las estudiantes construyen una estructura conceptual mediante dinámicas de trabajo colaborativo. La co-construcción de la clase de coordinación de entropía fue nuestro foco de estudio a través de dos etapas. Primero, usamos los datos de la entrevista para interpretar las diferentes maneras en que la clase de entropía fue coordinada a lo largo de la entrevista. En una segunda etapa, determinamos si la clase estaba siendo co-construida por ambas estudiantes y cómo lo hacían. Para ello, definimos nuevos criterios dentro de la teoría que recurren a elementos específicos de una visión sociocultural del aprendizaje. Estas nuevas categorías se construyen inspiradas en los tipos de participación de Lave y Wenger (1991), adaptadas para este estudio.

Al igual que en investigaciones anteriores, la Teoría de Clases de Coordinación ha demostrado ser un enfoque teórico fructífero para analizar el cambio conceptual. Nos permite seguir el desarrollo conceptual. Al analizar diferentes proyecciones y articulaciones pudimos entender las dificultades de las estudiantes y cómo se superaron. Durante varios minutos de la entrevista, las estudiantes completan dos proyecciones diferentes y desalineadas. Muchas de estas dificultades han sido reportadas en investigaciones anteriores. Sin embargo, un aspecto interesante observado en nuestros datos fue cómo estas estudiantes reorganizaron su conocimiento de manera alineada durante la discusión. A lo largo del proceso de articulación, notaron la diferencia entre las proyecciones y dudaron de ellas. Al articular estas proyecciones pudieron ir más allá de sus ideas previas. Las estudiantes reordenaron los elementos de una manera diferente y, finalmente, proyectaron la clase de entropía de forma alineada. Articular las proyecciones desalineadas parece ser un proceso crucial para reorganizar la clase.

Aunque entender los matices de cómo se coordina una clase es valioso en sí mismo, nuestro interés se centró particularmente en cómo esta clase fue co-construida a partir de las contribuciones de las dos estudiantes. Como mencionamos al principio de este trabajo, las implementaciones previas de la TCC en entornos colectivos dejaron cuestiones abiertas. En particular, Barth-Cohen y Wittman (2017) buscaron extender la teoría para considerar diferentes posiciones entre grupos de estudiantes y propusieron una extensión en la definición del contexto dentro de la teoría. Esta contribución permitió distinguir las posiciones opuestas dentro de una discusión. Sin embargo, buscamos ir más allá de esa distinción. En lugar de sólo distinguir diferencias, nos interesaba indagar en el desarrollo compartido de la clase y avanzar de manera de determinar cómo cada participante contribuye a la construcción de la misma. La razón principal de esto es que hemos notado que la clase, a pesar de ser una construcción compartida, implica procesos diferentes para cada estudiante.

Para interpretar los datos en relación con el co-desarrollo de la clase, tomamos dos criterios definitorios: la presencia de una sola proyección y la presencia de aportes de ambas participantes. Hemos definido dos tipos de co-construcción: simétrica y asimétrica. El primero se produce cuando las participaciones de cualquiera de las dos estudiantes son mayoritariamente de tipo central y los elementos de la proyección son aportados uniformemente por ambas participantes. El segundo se produce cuando una de las estudiantes tienen participaciones básicamente de tipo periférico y los elementos de las proyecciones son aportados en su mayoría por la otra.

Con esta extensión teórica pudimos diferenciar tres tipos de co-construcción a lo largo de la entrevista. Encontramos fragmentos en los que había una co-construcción y ésta era asimétrica. Se construyó una única proyección con las extracciones e inferencias realizadas básicamente por una estudiante, mediante, principalmente, intervenciones centrales. Sin embargo, la otra estudiante contribuyó con una única extracción crucial que condicionó la dirección del desarrollo de la

proyección. Hubo un fragmento en el que no hubo co-construcción. Todos los aportes fueron realizados por una de las estudiantes. Las participaciones, sin embargo, siguen siendo desequilibradas, ya que una de las estudiantes tiene intervenciones básicamente periféricas. La clase fue proyectada casi en su totalidad por una sola participante. Finalmente, se analiza un fragmento en el que las estudiantes realizan una co-construcción simétrica de la clase. La Clase de coordinación se proyecta con elementos aportados uniformemente por ambas participantes y tienen participaciones principalmente de tipo central.

La importancia de poder distinguir entre estos tipos de dinámicas conceptuales colectivas va más allá de su clasificación. Pretendemos inferir las prestaciones de cada uno de esos escenarios para el aprendizaje conceptual. En este sentido, algunos temas son particularmente dignos de atención. Uno pensaría intuitivamente que las condiciones óptimas para el desarrollo conceptual del grupo de estudiantes corresponden a un co-desarrollo simétrico. Esto es en parte cierto, ya que los registros muestran que en condiciones simétricas las estudiantes van más allá de sus ideas previas y la clase se alinea.

Sin embargo, el análisis resalta un hallazgo muy interesante y un tanto inesperado: aún en co-construcciones asimétricas, las estudiantes exhiben un progreso valioso. La estudiante D, que al principio parecía tener pocos recursos para contribuir al co-desarrollo de la Clase, mostró, al final de la entrevista, habilidades para contribuir, incorporar, inferir y coordinar elementos a la Clase de entropía. En otras palabras, en condiciones de co-desarrollo asimétrico, incluso aquellas estudiantes que tienen una participación más periférica aportan elementos para las proyecciones que pueden resultar importantes.

También se puede inferir que en la co-construcción asimétrica no sólo los estudiantes con participaciones periféricas se benefician de los aportes de los participantes de tipo central. La participación asimétrica puede ofrecer oportunidades de aprendizaje incluso para aquellos que participan de manera central. Este es el caso de la estudiante F, por ejemplo. La co-construcción asimétrica también es valiosa para ella, que es en realidad una participante central en las discusiones. Su compañera ofrece un tema único pero crucial que dirige el desarrollo de la clase en una dirección particular.

En resumen, la Teoría de Clases de Coordinación se muestra, una vez más, como un marco fructífero para describir el desarrollo conceptual en el contexto de los conceptos de la Física. Aunque se trata de un marco especialmente diseñado para dar cuenta de la cognición individual, con la ayuda de elementos específicos del enfoque sociocultural, en particular los marcos de participación, pudimos acercarnos al proceso de co-construcción. No hubiéramos podido profundizar el análisis sin introducir estos elementos del análisis sociocultural.

La relación entre el enfoque individual y el sociocultural del aprendizaje ha sido y sigue siendo objeto de estudio. Cabe destacar que esta forma de diálogo entre la cognición individual (instanciada en la TCC) y el enfoque sociocultural (instanciada en las categorías de participación propuestas inspiradas en Lave y Wenger) se enmarca en lo que la literatura llama micro-complementariedad (diSessa, Sherin y Levin, 2016). En palabras de diSessa, Sherin y Levin (2016), en este tipo de análisis, estos enfoques «no sólo son complementarios al nivel de elección del problema o fenomenología a investigar, sino que tienen un papel crítico y particular para comprender cuestiones importantes en el aprendizaje». Nos situamos en un paradigma tomando elementos específicos del otro.

Es importante destacar las limitaciones del alcance del trabajo realizado con la metodología propuesta en este análisis microgenético del aprendizaje. Se trata de

una primera aproximación de la TCC a entornos colectivos a este nivel tan fino, aprovechando las fortalezas de la teoría para la descripción conceptual, en el caso colectivo más sencillo como es el de dos individuos. Esperamos que esta línea de investigación continúe profundizando en la comprensión del cambio conceptual colectivo.

5.3. Desarrollo Conceptual mediado por Simulaciones

Los resultados aquí presentados corresponden con el trabajo en evaluación en la revista Journal of Computer Assisted Learning titulado Conceptual development through computer simulations: a case study in physics. 2019. (Velasco y Buteler, 2019a)

Como se mencionó en los comienzos de esta tesis, un objetivo central es comprender de qué manera las simulaciones computacionales didácticas intervienen en el desarrollo conceptual de estudiantes de conceptos en termodinámica. Para ello, se realizaron en primer lugar algunos estudios para comprender en detalle cómo evoluciona la estructura conceptual de los estudiantes durante el aprendizaje. Estos estudios nos permitieron conocer cómo se estructura el conocimiento, cómo evolucionan las representaciones y cómo se alinean con el conocimiento normativo.

En esta sección pasaremos al estudio y desarrollo de simulaciones computacionales para el aprendizaje. Pretendemos entender qué mecanismos ocurren en la estructura de conocimiento de un grupo de estudiantes cuando interactúan con estas herramientas.

Las simulaciones computacionales se han convertido en una herramienta importante para la enseñanza y una línea de investigación. El desarrollo de la tecnología y su respectiva incursión en las aulas de ciencias y de física, resultó un importante reto en la comunidad de investigación en educación en física. Principalmente, el reto fue entender qué potencial tienen estas herramientas (si es que tienen) y cómo favorecen o no los procesos de aprendizaje.

Numerosos estudios se han realizado en las últimas décadas en relación con esta herramienta. Es posible encontrar en la literatura que casi todos los trabajos reportan beneficios en el aprendizaje de la ciencia mediado por simulaciones (Smetana y Bell, 2012). A pesar de ser un campo muy estudiado y de tener un importante consenso en este sentido, hay líneas que se desarrollaron de manera deficiente.

La mayor parte de la investigación se orientó a estudiar hasta qué punto las simulaciones computacionales incluidas en las secuencias de instrucción tienen impacto en el desempeño de los estudiantes de ciencias. Si bien es un buen punto de partida para saber si estas herramientas son potencialmente beneficiosas, es necesario hacer más. En contraste con el número de trabajos que estudiaron el impacto del uso de simulaciones, se dedicó poca atención a estudiar en detalle y en profundidad cómo estas herramientas se involucran en el proceso de aprendizaje (Velasco y Buteler, 2017). Por lo tanto, se sabe poco sobre cómo se desarrollan los mecanismos de aprendizaje cuando son asistidos por estas herramientas.

Dentro de los estudios de investigación que profundizaron en el aprendizaje con simulaciones, las contribuciones realizadas en relación con el aprendizaje conceptual mediado por representaciones interactivas encontraron fuertes potencialidades. Estas herramientas permiten un aprendizaje conceptual más profundo (Krajcik y Mun, 2014). Las simulaciones funcionan como un puente entre la teoría

y la práctica (Ronen y Eliahu, 2000) con animaciones dinámicas que permiten a los estudiantes llegar a una comprensión conceptual integrada (Lowe, 2004).

Algunos estudios profundizaron aún más en cómo las simulaciones interfieren en el desarrollo conceptual a nivel de grano fino, a partir de la Teoría de Clases de Coordinación (diSessa y Sherin, 1998). Kluge (2019), Sengupta y col. (2015) y Parnafes (2007), estudian cómo las simulaciones intervienen en el proceso de cambio conceptual. Dentro de esta visión de aprendizaje, pudieron revelar cómo estas representaciones intervienen en algunos mecanismos de cambio conceptual.

Kluge (2019), en el contexto de una bomba de calor, mostró que la simulación es un punto de encuentro entre la teoría, el conocimiento existente y la experiencia. Permite a los estudiantes conectar los conocimientos previos con los principios físicos. El estudio también muestra que la simulación permite explorar por incorporación y desplazamiento, dejando de lado ciertos aspectos y centrándose en otros. Estos aspectos son importantes para el proceso de aprendizaje conceptual. En el caso del trabajo de Sengupta y col., pudieron identificar que los videojuegos integrados conceptualmente podrían favorecer y apoyar el cambio conceptual al ayudar a los estudiantes a comenzar su razonamiento intuitivo sobre el mundo físico. Trabajaron en particular para el concepto de fuerza y observaron que los temas específicos de los videojuegos permiten a los estudiantes entrar en contacto con el mundo físico y fomentar la activación de recursos intuitivos productivos adicionales. Parnafes (2007) identificó cómo algunas características de las simulaciones intervinieron en el proceso de cambio conceptual. Así, demostró que múltiples representaciones hacían explícitas las inconsistencias conceptuales, la dinámica interactiva de la simulación construye puentes entre el mundo real y otras representaciones y la potencialidad de la simulación para centrarse en la información y proporcionar caminos de acceso a ella para los estudiantes.

A pesar de las valiosas contribuciones de estos trabajos, la importancia de seguir profundizando en esta línea sigue siendo válida. En primer lugar, porque los estudios realizados están especialmente vinculados a su contexto particular por su naturaleza. Por ello, es importante estudiar estas cuestiones para nuevos contextos, con el fin de inferir si estas dinámicas reportadas se repiten o no, y también para descubrir otras nuevas. En segundo lugar, si bien las investigaciones anteriores han reportado cómo algunas características específicas de las simulaciones intervienen en el desarrollo conceptual, también es clave entender cómo la interacción entre la simulación y los estudiantes se desarrolla y evoluciona durante el aprendizaje. Es decir, entender qué características tiene esta interacción a medida que se produce el proceso de aprendizaje y qué oportunidades ofrece en cada momento.

En esta investigación abordamos el propósito de distinguir las potencialidades del uso de las simulaciones por computadora según el momento y las características de la etapa particular dentro del proceso de cambio conceptual a través del lente de la Teoría de Clases de Coordinación. En particular, analizamos cómo una simulación sobre el ciclo de Carnot está involucrada dentro del proceso de aprendizaje de los estudiantes de grado durante una tarea de resolución de problemas.

Teniendo en cuenta la necesidad de conocer los mecanismos específicos del desarrollo conceptual mediado por simulaciones computacionales, se propone abordar la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo intervienen las simulaciones computacionales en el desarrollo conceptual durante una tarea de resolución de problemas en termodinámica?

El objetivo de esta investigación es distinguir las potencialidades del uso de programas según el momento y las características de la etapa particular dentro del proceso de cambio conceptual a través del lente de la Teoría de Clases de Coordinación para un contexto específico.

5.3.1. Análisis Preliminar

Con metodología similar a la implementada en las secciones anteriores, se realiza un estudio preliminar donde se plantea una situación problemática a un grupo de estudiantes para que resuelvan mientras se desarrolla la entrevista, la cual está siendo videograbada. Para este caso preliminar participó el grupo G1, G2, G4 y G5. El problema está orientado a explicitar ideas previas de las estudiantes en relación a la naturaleza de los reservorios termodinámicos y su relación con la entropía. Pretendemos inferir qué mecanismos de razonamiento implementan los estudiantes durante el abordaje de la situación como así también cómo reconstruyen la idealización de un reservorio. Interpretadas las estructuras de conocimiento puestas en juego, estas servirán de insumo para el diseño de la simulación. La figura 4.3 muestra el enunciado suministrado a las estudiantes.

A continuación se muestra un extracto de la entrevista del grupo G1. Observaremos las dificultades que presentan el grupo de estudiantes entrevistado con la entidad de reservorio termodinámico, en particular con la idealización del mismo.

- F: ¿Qué es Carnot? ¿Más eficiente? etc.
- D: ¿Un reservorio qué era? ¿Una fuente de calor constante?
- F: A temperatura constante... No... Vos sabes que no sé?
- D: Yo tampoco... O sea, sólo era una cosita que tenía que estar siempre a la misma temperatura.
- F: Me surgió una duda me acuerdo cuando estábamos por rendir que era... él (por un amigo) decía que la temperatura entre los dos reservorios se iba achicando, entonces al final llega un punto en que la máquina no hacía más trabajo. No me acuerdo bien, era un problema de la última guía. Pero bueno, digamos que la temperatura de los reservorios no se mantenía constante.
- F: ¿Esto es al cabo de un ciclo no?
- Int: Sí
- F: O sea quiero ver si el reservorio T2 aumenta la entropía al cabo de un ciclo
- Int: Sería el reservorio este (señala el dibujo que hicieron), es decir, el que según ustedes se le entrega calor.
- F: Ah... entonces aumenta la entropía. Está bien. Porque vos tenías que era la integral entre el estado, no sé qué se yo... 1 y el 2... diferencial de Q sobre T... y podes sacar el T afuera porque es constante y el dQ es positivo porque está recibiendo calor.
- F: Claro! por eso es que disminuía la temperatura entre los reservorios...
- D: ¿Estos dos estados que son? Antes de que...
- F: Este y este (señala la curva inferior del ciclo)

- D: Claro...
- D: Nos queda la integral del calor que es el calor total que cedió. ¿Es positiva para el reservorio porque recibió calor...?
- F: Una pregunta... ¿Es una máquina térmica o frigorífica?
- Int: Recibe calor, del reservorio T1, entrega trabajo W y entrega Q2 al reservorio T2 que está menor a T1.
- F: Entonces está bien... Si le entrega calor a este, la entropía es positiva. ¿A qué se refiere con su estado cambia?
- Int: Es una buena pregunta para que charlen... .
- F: Bueno..Entonces, ¿estamos de acuerdo hasta ahí? ¿que aumenta la entropía?
- D: Sí...En realidad no sé muy bien cual es el sistema que estamos viendo. O sea el reservorio...
- F: ¿Lo querés ver acá? (marca el gráfico). .
- D: Claro...el reservorio sería esto (marca un dibujo típico de máquina térmica) ponele que tengo unas moléculas a una temperatura, ponele que recibe calor...pero también de alguna forma libera calor...para que esté siempre a la misma temperatura. Bah, no sé como... .
- F: No, es que justamente... vos sabés esa duda a mí me quedó
- D: O sea, esto está conectado a una fuente que mantiene constante..
- F: Sí, en teoría...pero no importa porque es al cabo de un ciclo igual.
- F: Al cabo de un ciclo vos le vas a dar calor y no te importa después porque no lo vas a volver a usar hasta dentro de otro ciclo.

En un análisis preliminar de la transcripción es posible inferir las ideas presentes en la discusión y realizar algunas inferencias:

El problema no viene con la Entropía: han respondido en dos oportunidades que puede aumentar S sin que cambie la Temperatura (dicen que puede cambiar otra cosa como la presión o el volumen). Es decir, entienden a S como una variable de estado y entienden que el estado no sólo está determinado por la temperatura, ni siquiera en el reservorio.

El problema está con la temperatura, especialmente con el reservorio: en toda la entrevista no lograron entender qué pasa con la temperatura del reservorio que recibe calor. Hasta lo último dudan si la temperatura cambia o no. Hay dos razonamientos, análogos, que están presentes: si recibe Q y $W = 0$ (es decir, no trabaja el reservorio sobre otra cosa) entonces no hay otra opción más que la energía interna cambie (es decir, la temperatura); si no cambia la T, entonces o el reservorio transfiere calor a otra cosa o hace trabajo. A partir de esto, introducen en la discusión la idea de reservorio ideal o teórico y real. Del real piensan que las temperaturas se terminan equilibrando. Del ideal o teórico, poco saben. En principio, aquí pareciera que se deja entrever un camino de instrucción, donde primero prevalece la generalización para luego atender casos particulares. Esta es una práctica habitual en muchos cursos de física, donde la abstracción y generalización es el gran objetivo, y se comienza por ahí, y luego los casos particulares son meros ejemplos.

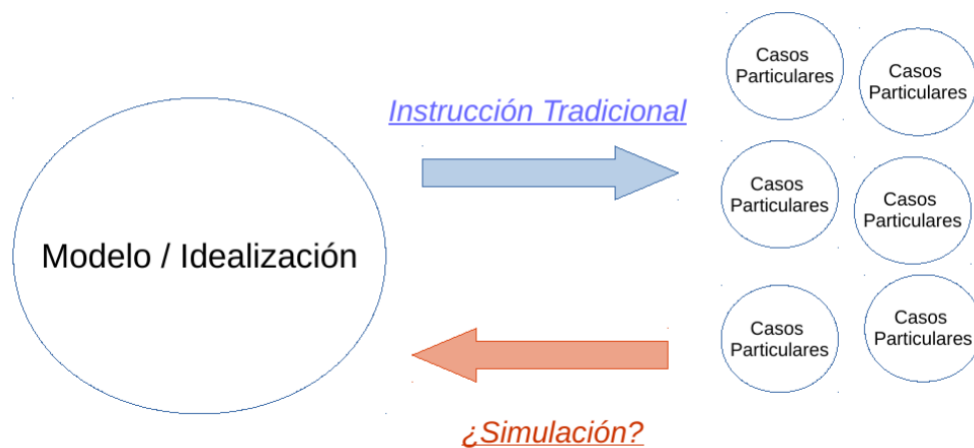


FIGURA 5.11: Esquema de construcción de idealización de reservorio

¿Cuál es el problema con esto? Desconocen qué es un reservorio, cuál es su naturaleza (si es un gas, un líquido, una bomba, un sólido), sus propiedades (si puede o no hacer trabajo, si transfiere calor, etc.) y lo que buscamos de él (que la T sea constante por ejemplo). Es más, de la entrevista parece que entienden el caso de reservorios reales y no el del reservorio ideal.

Estas ideas previas de los estudiantes podrían darnos indicios de qué rol puede llevar a cabo la simulación para ser de andamiaje en la construcción de un modelo como el de un reservorio termodinámico. Como muestra la figura 5.11 y hemos mencionado, la instrucción a la hora de construir modelos luce en una dirección desde lo general hacia lo particular. Es posible sospechar en función de las dificultades reportadas a partir de la entrevista y de estudios previos en la literatura, que la simulación brindaría la posibilidad de funcionar como andamiaje tanto para vincular el mundo teórico con el fenómeno como así también para asistir en procesos de modelización.

5.3.2. Simulación

Considerando lo que ha sido sugerido por la literatura en investigaciones previas sobre el diseño de simulaciones, se diseñó una para usarla como herramienta para investigar su potencial como andamiaje del desarrollo conceptual. Como vimos en la entrevista preliminar, las estudiantes tienen dificultades con la naturaleza del reservorio y lo que sucede durante un ciclo de Carnot. Es por esta razón que decidimos abordar la simulación circunscribiendo el caso a una máquina térmica que opera entre dos reservorios de agua. El diseño de la simulación se basó en lo propuesto en la literatura.

La característica más destacada de la literatura es la interactividad de la simulación. Se ha demostrado que existen potencialidades en aquellas simulaciones que ofrecen mayores oportunidades para que el usuario cambie los parámetros y manipule el modelo (Adams y col., 2008). Por esta razón, se decidió que la simulación debería ofrecer la posibilidad de modificar las temperaturas de los reservorios y la masa de cada uno de ellos. El objetivo es que los alumnos puedan utilizar simulaciones con diferentes condiciones del fenómeno en función de lo que consideren necesario.

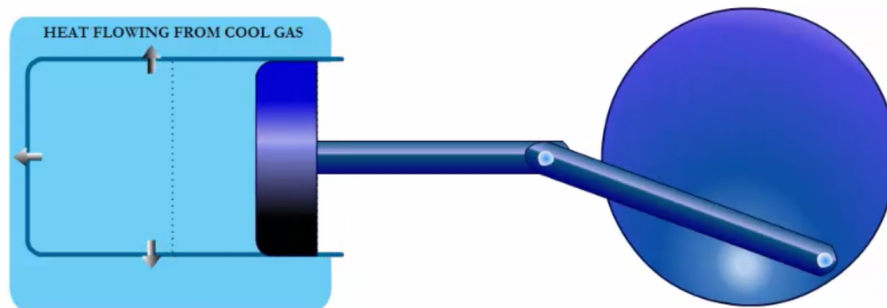
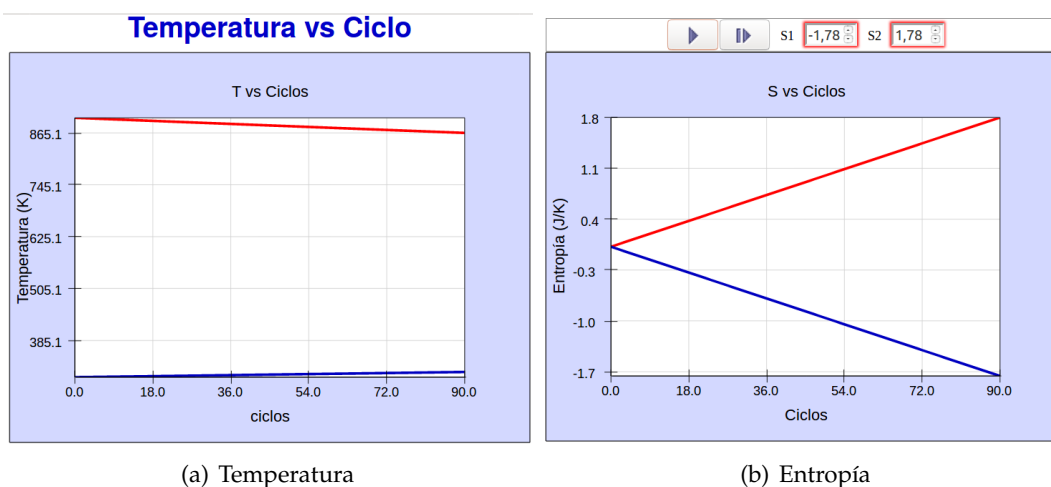


FIGURA 5.12: Animación incluida en la simulación.

También se relevó que los esquemas realistas proporcionan representaciones que favorecen la conexión entre los modelos y los fenómenos (Martínez y col., 2011), así como las animaciones ofrecen oportunidades para activar los primeros razonamientos intuitivos del fenómeno (Lowe, 2004). Por esta razón se incluyó una animación que representa el proceso de una máquina que realiza un ciclo de Carnot. Un gas confinado es representado con los respectivos flujos de calor durante cada etapa del ciclo de Carnot para ofrecer visualizaciones dinámicas del fenómeno, como se muestra en la figura 5.12. Los bordes coloreados representan contactos con reservorios de mayor y menor temperatura y las líneas discontinuas indican instancias donde el flujo de calor se detiene y el proceso se vuelve adiabático. Esta simple animación ofrece un fenómeno físico concreto que completa el ciclo de Carnot, con la respectiva dinámica de flujo de calor y trabajo realizado.

Parnafes (2007) declara la importancia para el desarrollo conceptual que ofrecen las simulaciones al convertir eventos temporales en espaciales. En este sentido, se decidió incluir dos gráficos de temperatura (figura 5.13, (a)) y entropía (figura 5.13, (b)) en función del número de ciclos para que los alumnos pudieran contar con este tipo de representaciones conociendo la oportunidad que ofrecen en el proceso de cambio conceptual. Como sugiere Sengupta y col. (2015), la simulación debe ser conceptualmente destacada, es decir, las interacciones deben implicar un razonamiento sobre los conceptos canónicos relevantes. Esto también fue considerado en las representaciones que también se incluyeron en el diseño de la simulación.



(a) Temperatura

(b) Entropía

FIGURA 5.13: Representación gráfica de la temperatura y la entropía de los reservorios en función de los ciclos. Rojo para el reservorio T1 y azul para el reservorio T2.

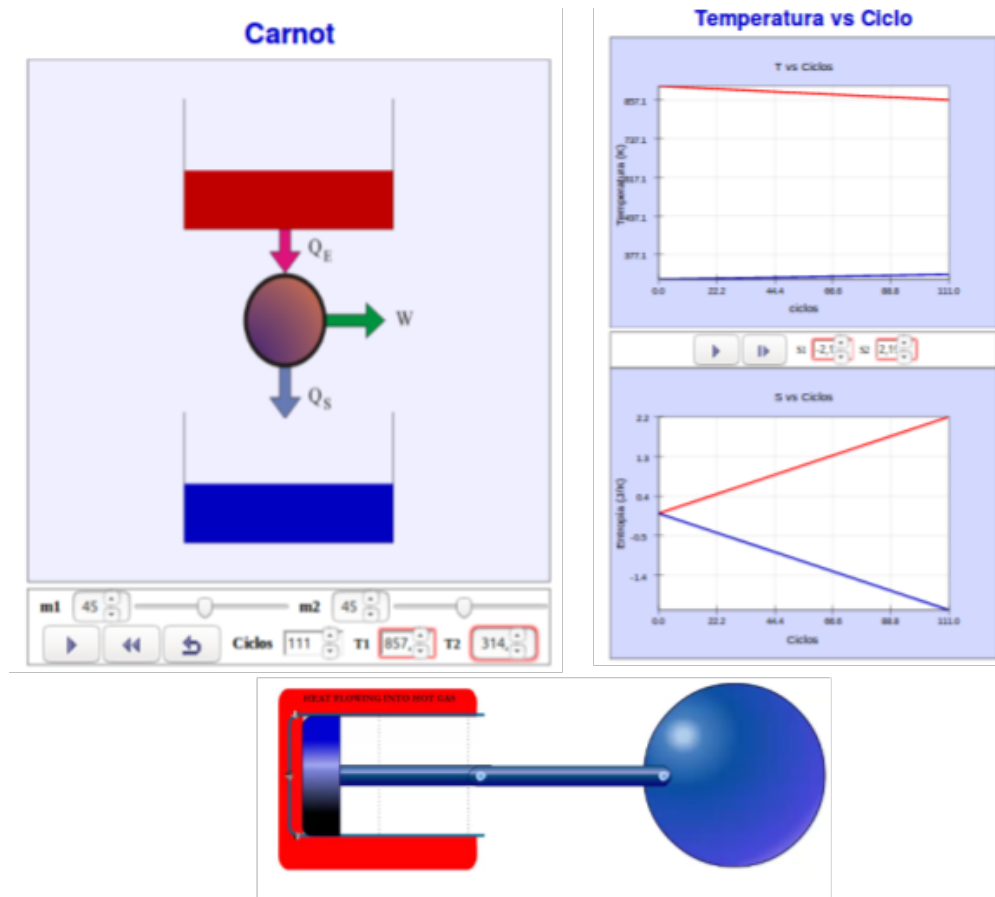


FIGURA 5.14: Captura de pantalla de la simulación diseñada.

La simulación se diseñó teniendo en cuenta estos elementos. Como se muestra en la figura 5.14, el programa simula una máquina de Carnot que trabaja entre dos reservorios de agua a diferentes temperaturas. Como hemos mencionado, también incluye una animación de un gas sometido a un ciclo de Carnot. La simulación fue diseñada con la plataforma Easy Java Simulation en un lenguaje html (para ver código, apéndice B).

Modelo del programa

La simulación calcula la entropía y la temperatura de cada reservorio después de cada ciclo. Detallaremos cómo y bajo qué circunstancias realiza esto. En primer lugar, tomemos el caso del reservorio 1 para luego extenderlo al caso del reservorio 2.

En un ciclo de Carnot, el reservorio 1 entrega un calor Q_1 durante la expansión isotérmica (ver diagrama PV en figura¹ 5.15). Es el único tramo donde entrega calor el reservorio 1. Lo que debemos ver es cuanto calor entrega en cada ciclo. Para un gas ideal se cumple la relación:

$$P.V = n.r.T \quad (5.1)$$

¹Imagen extraída de <http://www2.montes.upm.es/dptos/digfa/cfisica/termo2p/carnot.html>

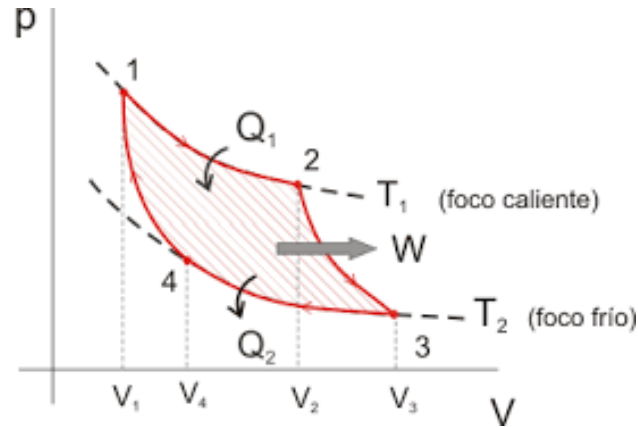


FIGURA 5.15: Diagrama P-V de un ciclo de Carnot.

Sabiendo que la primera transformación es a temperatura constante, la primera ley nos permite afirmar que $Q = W$. Si encontramos cuál es el trabajo realizado durante la expansión podremos identificar cuál es el calor otorgado por el reservorio 1.

$$W = \int p dV \quad (5.2)$$

lo que implica que,

$$Q_1 = n.R.T_1.ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (5.3)$$

Para el caso del reservorio 2, resulta igual ya que es una compresión isotérmica lo que resultaría:

$$Q_2 = n.R.T_2.ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \quad (5.4)$$

Es importante notar aquí que Q_2 toma esa forma ya que los cocientes de volúmenes respetan la siguiente relación:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4} \quad (5.5)$$

Partimos de la definición macroscópica de entropía. Recordando que estamos observando el reservorio 1, es importante notar que pedimos al reservorio que el sistema esté a temperatura constante en un ciclo. Por lo tanto, el cambio de entropía total será el calor entregado dividido la temperatura a la que lo hace. Resultando,

$$\Delta S = nRln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \quad (5.6)$$

Desarrollo Conceptual mediado por la simulación

En este caso se entrevistaron tres grupos de dos estudiantes (para este estudio, G4, G5 y G6). En el primer paso, se pide a los estudiantes que analicen lo que sucede con la temperatura de los reservorios después de que una máquina de Carnot funciona entre dos reservorios de agua (ver figura 4.4). Los estudiantes deben entonces predecir la temperatura de equilibrio de los reservorios y lo que sucede

PROBLEMA: RESERVORIOS

Un gas ideal monoatómico realiza n ciclos de carnot entre dos reservorios de agua, inicialmente a temperaturas T_1 y T_2 , con $T_1 > T_2$. Suponiendo que ambos reservorios tienen igual masa m .

- En relación al Reservorio 1 (a T_1), elegir la respuesta correcta:
 - Su temperatura disminuye
 - Su temperatura no cambia
 - Otra:.....

- En relación al Reservorio 2 (a T_2), elegir la respuesta correcta:
 - Su temperatura aumenta
 - Su temperatura no cambia
 - Otra:

- En relación al Reservorio 1, elegir la respuesta correcta:
 - La entropía del reservorio 1 disminuye después de n ciclos
 - La entropía del reservorio 1 aumenta después de n ciclos
 - La entropía del reservorio 1 no cambia después de n ciclos.
 - Otra:

FIGURA 5.16: Problema de reservorios presentado a los estudiantes.

P4

con su entropía (P4). El objetivo del problema es hacer que los estudiantes expliquen sus ideas sobre los reservorios térmicos. Buscamos entender la naturaleza de la conceptualización de los reservorios. Esperamos que los estudiantes se tensionen entre lo que le sucede a un reservorio real y uno ideal, y que en el desarrollo de la interacción con la simulación sean capaces de construir puentes entre las dos concepciones.

Es importante destacar que la intervención de la simulación fue mediada por el entrevistador. Para ello, los primeros minutos de la tarea de resolución de problemas se realizaron sin la participación de la simulación. Una vez que los estudiantes tienen ideas, razonamientos o dudas, el programa entra en acción.

Otro aspecto importante a destacar, es el hecho de que los estudiantes trabajan con su criterio propio con la simulación. Tienen la libertad de explorar, analizar, ejecutar y controlar la simulación como lo necesiten y quieran. Una vez que la simulación fue presentada a los estudiantes, el entrevistador sólo limita su participación a seguir los razonamientos de los estudiantes.

A partir de la Teoría de Clases de Coordinación, se analiza el desarrollo conceptual de los grupos de estudiantes. Es importante destacar que durante el análisis se pretende entender cómo la simulación participa en este proceso. En este sentido se identifican diferentes formas en que los estudiantes coordinan los elementos de la clase y cómo la simulación interviene en esta dinámica.

A partir del análisis de las entrevistas de los grupos participantes (G4, G5 y G6), se construyen tres categorías que responden a diferentes mecanismos identificados en los que la simulación interviene o es utilizada como recurso en el desarrollo conceptual del grupo de alumnos. Estas categorías fueron construidas en sesiones de revisión y discusión en grupos de investigadores siguiendo la propuesta de Jordan y Henderson (1995). Inspirados en el modelo de cambio conceptual de las TCC, se definen tres tipos de interacción identificados en los registros entre la simulación y los grupos de estudiantes. A continuación se muestran ejemplos de instanciación de cada una de las categorías con extractos de las entrevistas realizadas. Tomaremos extractos pertenecientes al grupo G4 para las dos primeras categorías, y del

G5 para la última a modo de ejemplos.

En primera instancia, antes de profundizar en las categorías mostraremos un extracto de los primeros minutos de entrevista del grupo G4 para ejemplificar el punto de partida de este grupo de discusión en relación al problema presentado. Podremos identificar las dificultades que presentan inicialmente para abordar el fenómeno desde las ideas que construyeron durante su instrucción.

Sejemplo [8,03min]

1. N: Para, te animás a hacer un gráfico de lo que está pasando? Porque dice que realiza n ciclos de Carnot...¿Qué te acordás de Carnot?
2. F: Era...tenías dos reservorios...uno a mayor temperatura que el otro...entonces, una máquina de Carnot es una máquina de vapor...
3. N: Bien, yo me acuerdo...a ver ayudame a armar el rompecabeza que tengo en la cabeza... Yo me acuerdo como que había algo así (dibuja reservorios, ver figura 5.17) y ponele que había una flechita para acá y otra para acá. Vos le entregabas un calor, hacía un trabajo y salía calor.
4. F: Eran las curvas esas decís?
5. N: Era algo así...(dibuja un diagrama P-V, ver figura 5.17)
6. F: Ah...y había algunas que eran adiabáticas y otras isotérmicas...
7. N: Eso es lo que te iba a decir... o sea porque es un gas el que realiza el ciclo no? Me gustaría entender un poco más cómo funciona el ciclo para saber bien qué función cumplen los reservorios. ¿Como sería por ejemplo? porque tenemos que pensar que el gas es el que realiza el ciclo y los reservorios son los que tienen las temperaturas...
8. F: Ya sé hacia donde vas... te entiendo...
9. N: ¿Me entendés? No sabemos nada de los reservorios solo la temperatura...
10. F: Bueno, ahora yo quiero saber qué es lo que pasa con ese gas...por lo menos para entender más el problema...

A partir del fragmento anterior es posible inferir que estos estudiantes recuerdan algunos elementos básicos del ciclo de Carnot. Por un lado, traen a colación el diagrama PV reconociendo que tenía dos curvas adiabáticas y dos isotérmicas. Por el otro, recuperan los dos reservorios y lo explicitan en los diagramas de flujo de energía típicos de libros de física térmica (ver figura 5.17).

A pesar de ello, los estudiantes no logran reconocer cuestiones fundamentales del fenómeno. A simple vista se puede ver que no logran identificar un proceso particular con un ciclo de Carnot. Hasta dudan si es un gas lo que realiza el ciclo de Carnot (turno 7). Se solicitan mutuamente un ejemplo para entender el ciclo. También desconocen la entidad de los reservorios, su naturaleza (turno 9). Saben que tienen que ver con el proceso, se los mencionaron durante su instrucción pero desconocen lo que son.

A continuación, interpretaremos fragmentos siguientes de la entrevista con el fin de estudiar cómo se desarrolla la resolución del problema y ejemplificar las categorías de interacción con la simulación.

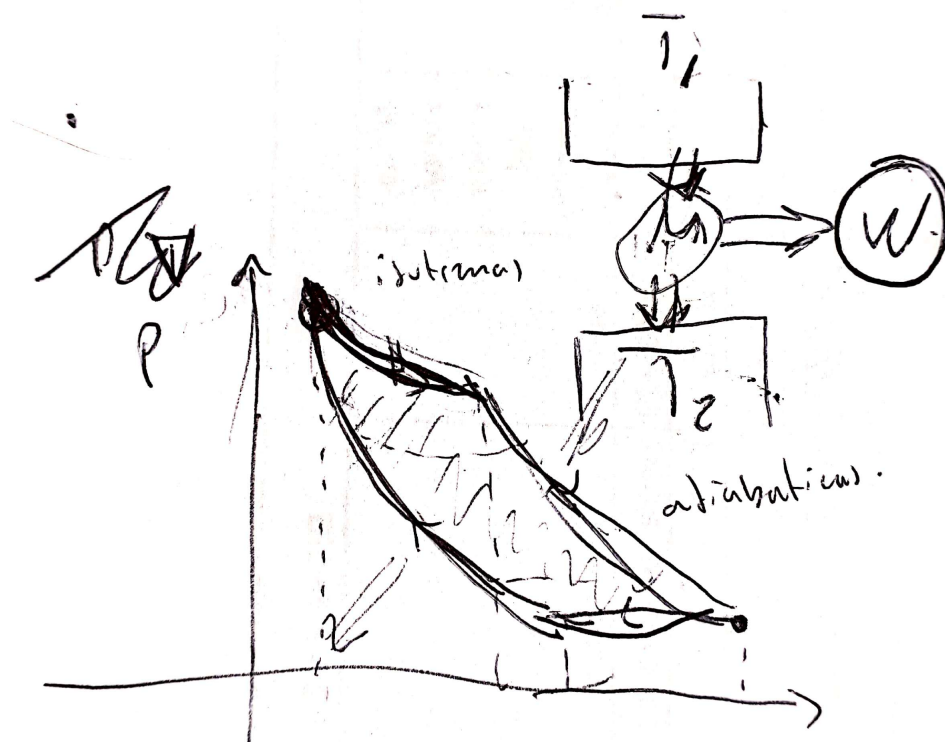


FIGURA 5.17: Representaciones iniciales de los estudiantes del grupo G4

Interacción Extractiva

Este fragmento se corresponde con el paso inicial de uno de los grupos (G4). Aunque logran explicar en un diagrama P-V el proceso de un ciclo de Carnot, evidencian que no pueden asociarlo con un proceso físico concreto. Además, a pesar de reconocer el ciclo en el diagrama, los estudiantes no pueden reconocer lo que sucede con el gas. Lo mismo ocurre con los reservorios. Saben algunas cosas sobre su idealización pero poco sobre su naturaleza (figura 5.18 muestra un esquema).

Los primeros minutos de la entrevista los estudiantes evidenciaron relaciones débiles entre los desarrollos teóricos que habían aprendido durante su instrucción y el mundo real o de los fenómenos (figura 5.19 muestra un esquema). En una primera instancia no lograron explicar ni de qué proceso se trataba. No fue hasta el momento en que comenzaron a interactuar con la simulación que se desarrolló lo que se muestra en el fragmento a continuación.

Durante el fragmento expuesto, los estudiantes comienzan a interactuar con la animación presentada en la simulación. De esta manera, les permite identificar qué tipo de proceso experimenta el gas y cuándo y cómo intervienen los reservorios.

$S_1[4,50min]$

1. Int: Tengo la sensación de que tienen que ver un caso concreto de lo que hace una máquina que realiza un ciclo de Carnot, ¿verdad? para entender lo que pasa con estos dos reservorios que dibujaste aquí... Tal vez esta simulación pueda ayudar.

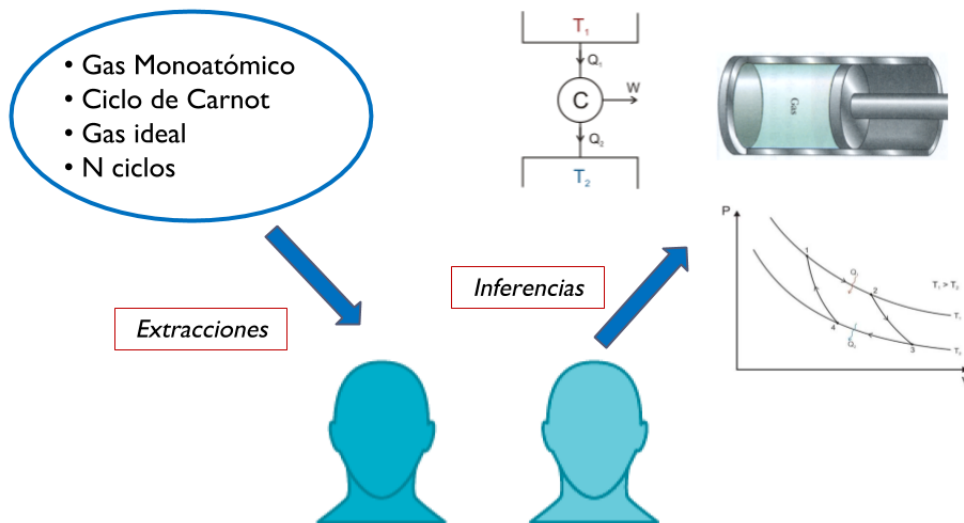


FIGURA 5.18: Situación inicial de los estudiantes en la entrevista. Identifican información de la situación y las relacionan con constructos teóricos pero abstractos sin lograr identificar el fenómeno.

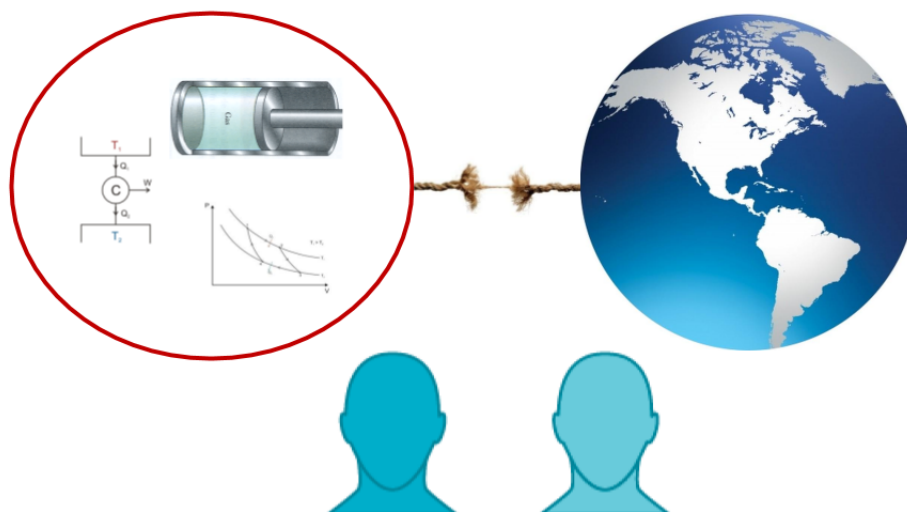


FIGURA 5.19: Situación inicial de los estudiantes en la entrevista. La abstracción los desvincula del fenómeno.

Los estudiantes interactúan con la simulación durante un par de minutos. Se centran específicamente en la animación, donde miran el proceso del gas y los flujos de calor.

2. N: Mira lo que está pasando allí. Creo que ahora puedo ver el proceso. Allí la temperatura aumenta pero allí la temperatura disminuye, ¿no es así? (señalando el gas de la animación)
3. F: No sé si eso te muestra la temperatura... Aquí en la animación puedes ver los flujos de calor...(señalando las flechas de la animación)
4. N: Bueno... ahí sale el calor... ahí la temperatura aumenta... Eso sería como los dos reservorios. (señalando los bordes del pistón)

A partir de la TCC, es posible inferir otras extracciones de las nuevas representaciones que ofrece la simulación. En primer lugar, los estudiantes son capaces de identificar un ciclo de Carnot con un proceso físico específico. La dinámica de la animación y el tipo de representación que engloba el proceso permite a los estudiantes extraer de qué se trata el proceso (turno 2). En segundo lugar, los estudiantes identifican a partir de la animación los flujos de calor del ciclo. En particular, el momento específico del intercambio de calor y la dirección del mismo (turnos 3 y 4). Estas extracciones les permiten iniciar algunos razonamientos sobre la temperatura. Conectan un aspecto específico de la animación con lo que piensan sobre la temperatura de los reservorios, que han representado en primer lugar en un diagrama P-V (ver figura 5.17) y que no está representado específicamente dentro de la animación.

Como se puede deducir de la transcripción, el programa ofrece nuevas representaciones que no estaban presentes en el enunciado del problema. Los estudiantes están principalmente orientados a extraer esta nueva información. De esta manera, tienen diferentes oportunidades para abordar sus dificultades, tales como lo que experimenta el gas durante el proceso, lo que le sucede a los reservorios, entre otros. Hasta ese momento los estudiantes se encontraban atascados en la comprensión del fenómeno ya que no podían conectarlo con sus estructuras de conocimiento.

Definimos este tipo de interacción como *extractiva* y corresponde cuando la simulación aporta nuevas representaciones que se convierten en fuente de nuevas extracciones. Estas nuevas extracciones son insumos para el desarrollo de nuevas proyecciones. Es característico de esta interacción que los estudiantes reconozcan nueva información que les permita conocer nuevos aspectos del fenómeno.

Interacción Integrada

A lo largo de este fragmento los estudiantes empiezan a interactuar de forma diferente con la simulación. Utilizando las representaciones proporcionadas por el programa, desarrollan nuevas inferencias. En el siguiente extracto exponemos cómo los estudiantes utilizan la simulación para inferir lo que sucede con la temperatura de los reservorios.

$S_2[8min]$

1. F: Entonces los reservorios van a mantener su temperatura... la idea es que mantengan su temperatura para que sigan cumpliendo el ciclo...

2. N: Claro eso es lo que pienso porque si la temperatura disminuye...
3. F: No completaría el ciclo...
4. F: Claro, si tenemos los reservorios y esto [por el reservorio a T_1] tiene que hacer que el cilindro vaya y vuelva, ¿no? Si cuando vuelva aquí [señalando el pistón en máxima compresión] la temperatura es menor este cilindro no va a ir allí... va a llegar aquí [apuntando al pistón de la simulación en máxima expansión]. Porque la temperatura que perdiste aquí [señalando el gas de la simulación] va a hacer que la cámara de gas no esté tan caliente y no llegará al final ahora. Entonces el próximo ciclo va a venir aquí para el otro reservorio y cuando vuelva allí [señalando el pistón de la simulación] ... porque no estaba a la misma temperatura que antes.
5. N: Bueno, creo que el ciclo inicial tiene este gráfico (figura 5.20). Supongamos que no tienes constante [apunta al reservorio]. Comienza con una T_1 , y supón que no añades calor al reservorio. Entonces, cuando un ciclo termina tienes una temperatura más baja [él apunta el gas], no llegas a T_1 sino que frenas antes. En otras palabras, si no haces nada, la temperatura del reservorio 1 disminuirá y el otro aumentará la temperatura porque estarás entregando calor.

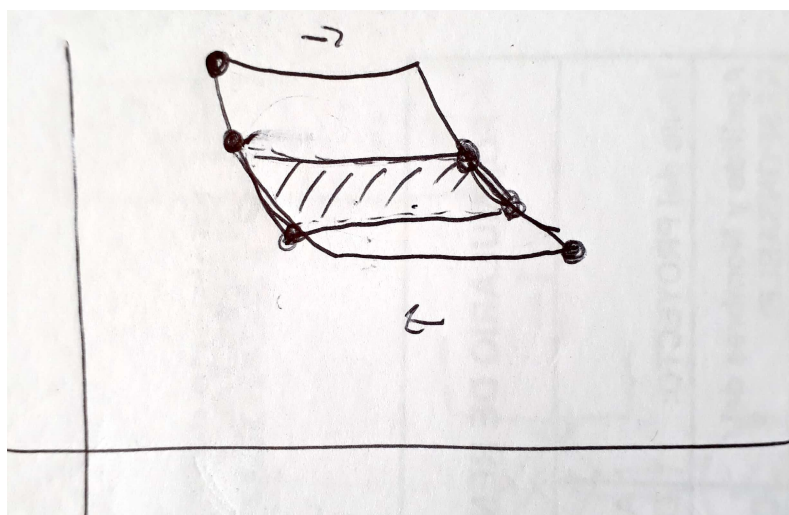
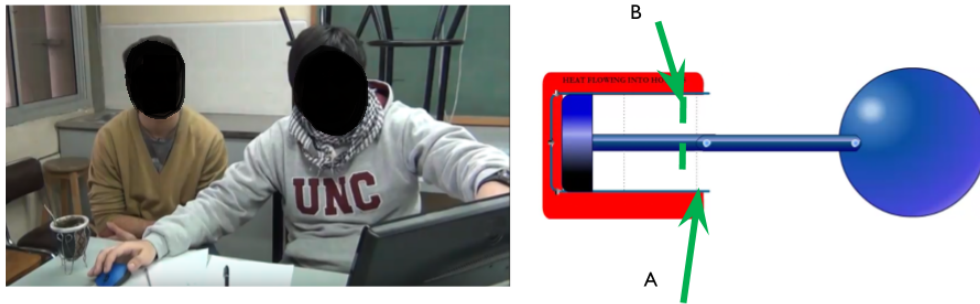


FIGURA 5.20: Representación de los estudiantes

En este extracto los estudiantes construyeron inferencias a partir de la representación dentro de la simulación. Identificaron los flujos de calor y comenzaron a conjeturar qué pasa con el pistón si la temperatura del depósito baja (turno 4). Inferieron que si el calor sale del reservorio a mayor temperatura, el pistón se expandirá y el gas aumentará su volumen y, en consecuencia, el gas no alcanzará una temperatura tan baja como la del primer ciclo. Lo mismo ocurre con la compresión y la alta temperatura de la curva isotérmica (turno 5) (representación en figura 5.20).

Posteriormente, la temperatura de los reservorios se modifica en cada ciclo (T_1 disminuye su temperatura y T_2 aumenta su temperatura) e incluso se logra una representación en el diagrama PV del ciclo de Carnot para reservorios que modifican su temperatura (turno 5). Después de unos minutos de discusión, los estudiantes son capaces de acordar una proyección común. Los estudiantes se convencen y completan la proyección de manera alineada. La Figura 5.22 muestra esquemáticamente la estructura de la proyección de la clase.



F: “Si cuando vuelve aquí la temperatura es menor este cilindro no va a ir allí (señala A)

F: “Entonces el próximo ciclo va a venir hasta aquí (señala B) por el otro reservorio y cuando vuelva hasta allí...”

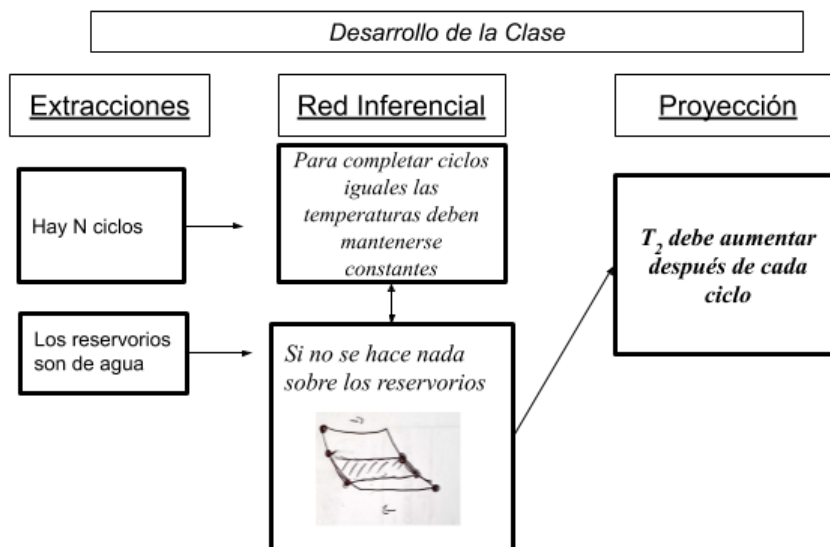
FIGURA 5.21: Esquema de estudiantes en interacción integrada con simulación.

A partir de la transcripción y grabación en vídeo se puede observar que la dinámica de interacción del grupo de estudiantes con la simulación ha cambiado. A diferencia de la interacción de tipo extractiva donde la simulación proporcionaba extracciones a los estudiantes, aquí la simulación se convierte en parte de las explicaciones de los estudiantes. En este sentido, los elementos de estas representaciones empiezan a funcionar como soporte para que los estudiantes elaboren nuevos razonamientos, ideas y conjeturas. Durante los turnos 4 y 5, los estudiantes incorporan elementos del programa en su discurso, señalan aspectos de la simulación y apoyan sus explicaciones en las representaciones. La dinámica de la interacción es diferente. En la extractiva, los estudiantes identifican aspectos del fenómeno en la nueva representación. Ellos estaban allí explícitamente. Aquí los estudiantes consiguen construir nuevos razonamientos a partir de y en conjunción con la simulación.

Es importante destacar que durante este tipo de interacción, los alumnos han sido capaces de proponer nuevas inferencias a partir de una discusión con el andamiaje de la simulación. Es decir, han logrado proponer nueva información que no estaba ni en el programa ni en ellos. En comparación con la situación inicial, los estudiantes fueron capaces de dar una respuesta desde el soporte de la simulación con sus diferentes intervenciones.

Un último punto valioso a destacar está relacionado con el gráfico PV producido por los estudiantes. Recordemos que la gráfica PV de un ciclo de Carnot fue la primera representación que hicieron al abordar el problema, pero que no les permitió abordar ningún aspecto del problema. A partir de la interacción con la simulación, los estudiantes logran encontrar un puente entre su diagrama PV y lo que sucede con el fenómeno físico en cuestión. Consiguen resignificar el diagrama PV encontrando un punto de contacto entre el modelo teórico proporcionado en su instrucción y el fenómeno que intentaban abordar.

Definimos este tipo de interacción como *Integrada*. Los estudiantes utilizan aspectos de la simulación para construir inferencias. Esto incluye el uso de gráficos, animaciones y/o representaciones proporcionadas por la simulación que les permiten desarrollar inferencias. Es característico de este tipo de interacción que los estudiantes involucren la simulación en sus explicaciones.

FIGURA 5.22: Desarrollo de la clase durante el fragmento S_2 .

Interacción Proyectiva

A lo largo de este fragmento, exponemos un extracto de otro grupo de estudiantes (G5, integrado por los estudiantes P y E) que son invitados por el entrevistador a estimar una temperatura de equilibrio para los reservorios. En primer lugar, los estudiantes utilizan la ecuación del calor para proponer el promedio de las temperaturas como la temperatura de equilibrio. Al contrastar con la simulación, identifican que el trabajo realizado hace que la temperatura de equilibrio sea inferior a la media.

$S_3[16min]$

1. P: Creo que es el promedio
2. E: El promedio... Bueno, creo que el calor fluye con un ritmo constante...
3. P: Sigue siendo el mismo...
4. E: Es lo mismo, así que el promedio tiene sentido...
5. P: Si aún dudas, calcúlalo... Conoces las masas, supón un coeficiente...
Toman el lápiz y escriben la ecuación del calor ($Q = cm\Delta T$)...
6. P: Bueno, como podés ver, es el promedio...
7. E: Sí. Tenés razón.
8. Int: Están de acuerdo en que es el promedio?
9. E-P: Si...
10. Int: Ok, entonces de acuerdo a tu entrada la temperatura promedio debe ser...?

11. P: 250 K...
12. E: El resultado es 245K... Bueno, para... El problema es que no estamos considerando las disipaciones, ¿no? Las temperaturas van a ser las mismas pero hay una pérdida de energía.
13. Int: ¿La simulación está considerando las disipaciones?
14. P: No, no lo creo...
15. E: No encaja de nuevo. Espera... No estamos considerando [durante su cómputo] que el gas está haciendo el trabajo. Esa energía se está agotando, por lo que las temperaturas no van a converger en el promedio. Deben ajustarse a un valor menor que el promedio.
16. P: Sí, no es por la disipación. Es por el trabajo.

En este fragmento los estudiantes inicialmente completan una proyección desalineada. Basando sus inferencias en el formalismo de la ecuación del calor, llegan a la temperatura de equilibrio para dos reservorios con la misma masa siendo el promedio de sus temperaturas (turno 6). Sin embargo, al contrastarla con el resultado de la simulación dudan de lo que obtuvieron. La simulación ofrece la oportunidad de manipular los parámetros, para ejecutar varias veces los fenómenos simulados con diferentes condiciones. Esto permite a los estudiantes convencerse de que algo estaba mal con su predicción y les hace buscar otra explicación.

A partir de la disonancia con el resultado de la simulación, los estudiantes inician un proceso de articulación. Tienen dos proyecciones que no están alineadas, por lo que vuelven a comprobar sus inferencias. Después de algunas ejecuciones de la simulación, identifican que la presencia de un trabajo realizado por la máquina implica que la temperatura de equilibrio debe ser inferior a la media (turnos 15 y 16). Es importante destacar que la simulación favorece este proceso de articulación. Las múltiples representaciones ofrecen la oportunidad de explicitar las inconsistencias conceptuales y hacer que los estudiantes trabajen en la alineación de su propia proyección con los resultados de la simulación. Esto fue mencionado por Parnafes (2007).

En este fragmento, la simulación presenta una nueva dinámica de participación en el desarrollo conceptual de los estudiantes. Para este caso, es posible inferir que se utiliza para comparar con la proyección construida por el grupo de discusión. Definimos este tipo de interacción como Proyectiva y tiene lugar cuando los estudiantes utilizan la simulación para contrastar o verificar sus predicciones. En este caso, los estudiantes utilizan la evolución del sistema propuesto por la simulación para comparar con sus propias proyecciones. En el análisis se identifica con una dinámica con características de verificación.

Hay dos aspectos importantes a destacar en este fragmento. En primer lugar, la jerarquía que los estudiantes dan a la simulación es prácticamente la de la verificación experimental. Es decir, los resultados obtenidos por el programa son considerados como el mismo comportamiento de la naturaleza. Esto también ha sido mencionado por estudios anteriores (Thaden-Koch, Dufresne y Mestre, 2006). En segundo lugar, el análisis muestra que la simulación favorece los procesos de articulación. La literatura sugiere como una instancia importante de aprendizaje estas instancias en las que los estudiantes pueden identificar similitudes y diferencias entre las proyecciones para alinearlas.

5.3.3. Discusión

En este trabajo nos centramos en el estudio del desarrollo conceptual asistido por simulaciones. A partir de la Teoría de Clases de Coordinación, nos centramos en el análisis de los mecanismos de interacción que ocurren durante la resolución de problemas que involucran este recurso. Estudios previos en este sentido han revelado que la simulación ofrece un impacto positivo en el aprendizaje (Smetana y Bell, 2012). Sin embargo, pocos trabajos se orientaron a investigar cómo se desarrolla el proceso de aprendizaje con esta herramienta (Velasco y Buteler, 2017). Los antecedentes en este último sentido muestran que las simulaciones permiten centrar la atención en algún aspecto del fenómeno, convertir los fenómenos temporales en espaciales, explicitar las inconsistencias conceptuales y estabilizar las extracciones e inferencias en nuevos contextos (Parnafes, 2007; Sengupta, Krinks y Clark, 2015). A pesar de los valiosos avances en este sentido, el estado del arte sugiere seguir profundizando en la comprensión de cómo la simulación apoya el desarrollo conceptual. En particular, todavía se sabe poco sobre cómo se caracteriza la interacción entre la simulación y los usuarios en momentos específicos del desarrollo conceptual. Por lo tanto, en este trabajo abordamos la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo intervienen las simulaciones computacionales en el desarrollo conceptual durante una tarea de resolución de problemas en termodinámica?

El análisis permitió inferir dos cuestiones importantes. En primer lugar, el desarrollo conceptual de grupos de estudiantes mostró diferentes etapas y mecanismos de interacción con la simulación. En segundo lugar, los estudiantes presentaron grandes dificultades para afrontar la situación problemática propuesta. En sus verbalizaciones, se puede inferir una relación débil entre los modelos teóricos de instrucción que habían aprendido sobre el ciclo de Carnot y el mundo fenomenológico. Estas dificultades les impidieron avanzar en la tarea asignada.

Ante la dificultad, los alumnos comienzan a interactuar con la simulación. La animación de la simulación les proporciona nuevas representaciones que sirven de puente entre el modelo y el fenómeno (vínculo que era débil), además de permitirles centrarse en aspectos importantes del fenómeno. Es importante recordar que aspectos similares fueron reportados por Sengupta y col. (2015), cuando encuentra que estas representaciones funcionan como lanzador o arrancador de sus razonamientos. Sin embargo, el estudio nos ha permitido ir más allá. La simulación durante esta etapa funcionó como un proveedor de nuevas extracciones. Los estudiantes aquí reconocieron la nueva información. Llamamos a esta dinámica interactiva extractiva. Esta dinámica se observa en particular en los grupos que presentan dificultades para iniciar la resolución de problema, en particular, aquellos que presentan una débil relación entre modelos y fenómeno. En el caso del grupo G6 los estudiantes no presentaron este tipo de interacción al inicio de la entrevista ya que contaban con fuertes vínculos entre sus ideas previas y el fenómeno en cuestión.

En una segunda instancia, se observa un cambio en la interacción de los estudiantes con la simulación. Abandonaron la postura pasiva de recibir nueva información y comenzaron a usar esa información y a hacer inferencias con ella. En esta etapa, las representaciones comenzaron a formar parte de sus explicaciones y discusiones. El análisis revela que los estudiantes construyeron nuevas inferencias a partir de la representación, es decir, construyeron relaciones que no estaban ni en ellos ni en la simulación. Definimos este tipo de interacción como un tipo integrado. Este tipo de interacción se desarrolla en los tres grupos participantes.

En última instancia, los estudiantes utilizan la simulación para corroborar sus predicciones. Decimos que este tipo de interacción es proyectiva. Esta forma de interactuar con el programa resulta reiterada a lo largo de todas las entrevistas. A partir del TCC, podemos inferir que los estudiantes comparan sus proyecciones con la propuesta de simulación. Cuando encuentran disonancias reorganizan sus inferencias para alinear su proyección. Esto es similar a lo reportado por Parnafes (2007) quien menciona que las diferentes representaciones hacen explícitas las inconsistencias conceptuales. En este sentido, vimos que los estudiantes asignan un valor a la simulación muy similar al de la experimentación, como si el programa fuera directamente el fenómeno. Este tipo de dinámica fomenta procesos de articulación, donde los estudiantes identifican diferencias y similitudes entre las proyecciones.

Además de tener un impacto positivo en el aprendizaje, se ha demostrado que las simulaciones computacionales corresponden a una herramienta muy útil como andamiaje de procesos de cambio conceptual. Esta línea de trabajo ha permitido inferir con mayor detalle cómo esta herramienta interfiere en el proceso de aprendizaje. Hemos podido demostrar que lo hace de diferentes maneras en diferentes etapas del desarrollo conceptual y de acuerdo a la necesidad de aprendizaje en ese momento. El factor contextual es clave para entender esta herramienta en la acción. Esta línea de investigación aún necesita ser profundizada, para que la comunidad no sólo entienda que son herramientas con un gran potencial, sino que sobre todo, podamos entender cómo utilizarlas.

Capítulo 6

Conclusiones

Desde los comienzos de la corriente de Cambio Conceptual numerosos avances se han logrado. Como se mencionó en un principio, se desarrollaron en profundidad diversas teorías en relación a la estructura del conocimiento de las personas como así también a los mecanismos por el cual la misma es reorganizada o modificada. Todas estas teorías se realizaron en el marco de evidencias empíricas con un espectro diverso de metodologías empleadas y con una inversión de muchos años de desarrollo y refinamiento. Durante esta tesis pretendimos abordar la pregunta: ¿cómo se desarrolla el cambio conceptual en el contexto de la termodinámica? ya sea para entornos colectivos como para entornos asistidos por simulaciones.

Los estudios realizados en esta tesis corresponden con una contribución dentro de una de las líneas más importantes en el campo: *Knowledge in Pieces* (o Conocimiento en piezas). Dentro de esta área se desarrollaron tres estudios orientados a: a) identificar las potencialidades cognitivas de situaciones conflictivas durante la resolución de problemas, b) extender esta línea cognitivista-individual a entornos colectivos y c) profundizar en el desarrollo conceptual cuando es asistido por simulaciones computacionales.

En un primer estudio, se identificaron las potencialidades que ofrecen proyecciones desalineadas durante la resolución de problemas. En el contexto de transformaciones termodinámicas, una proyección desalineada produjo una expansión de la red inferencial. La inconsistencia de resultados induce en la búsqueda de nuevas relaciones, en la jerarquización de conceptos y en el metanálisis de dominios de aplicación. La expansión de la red inferencial favorece, en el caso estudiado, la reorganización de los elementos de la clase y la consecuente alineación de la proyección.

Durante este estadio del estudio, se identificaron dinámicas colectivas en los grupos analizados de gran interés para estudiar. La clase de coordinación presentaba diferentes mecanismos de desarrollo en la interacción discursiva de los estudiantes. Esto es algo no abordado por la literatura en relación a la TCC de manera completa y de sumo interés dado que nuestra principal motivación yacía en entender lo que ocurre en el desarrollo conceptual en pequeños grupos durante la resolución de problemas.

En secciones anteriores desarrollamos las limitaciones presentadas por los investigadores en relación al cambio conceptual entendido como un fenómeno exclusivamente cognitivo-individual. Recientes discusiones académicas pusieron de manifiesto la necesidad de los teóricos a completar sus descripciones y modelos y acercar posiciones entre las dos perspectivas del aprendizaje más reconocidas: la individual y la sociocultural.

En conocimiento de este estado actual del área, decidimos desarrollar un estudio de desarrollo conceptual en el campo de la termodinámica con un enfoque desde

la Teoría de Clases de Coordinación (enfoque individual) en un contexto de discusión en pequeños grupos. El principal objetivo consistía en estudiar si la estructura conceptual (clase de coordinación) desarrollada en una situación de resolución de problema es o no un entidad compartida y, si lo es, qué mecanismos se desarrollan.

A partir de este estudio determinamos que la clase de coordinación no solamente representa una estructura mental del conocimiento que se instancia y se organiza de acuerdo a situaciones contextuales, sino que también es un estructura que puede instanciarse en más de una persona o ser una entidad compartida. En el interrogante ¿quién tiene un concepto?, podemos afirmar que la clase de coordinación resulta ser un constructo compartido donde cada individuo contribuye con extracciones e inferencias. Más aún, cuando existen estas dinámicas los individuos se apropian de aportes que no son propios para identificar información distintiva de los fenómenos.

A estas dinámicas las denominamos co-construcción de una clase de coordinación. Identificamos dos dinámicas particulares dentro de la construcción común de una estructura conceptual. Con la implementación de elementos de la corriente sociocultural, se diferencian dos tipos de estructura compartida: la *simétrica* y la *asimétrica*. Ambas dinámicas fueron diferenciadas en estructuras de participación durante la resolución de problemas con el concepto de entropía.

En ambas dinámicas se identificaron potencialidades cognitivas. En la simétrica, el flujo de extracciones del contexto e inferencias del fenómeno se ve incrementado en la medida que existe un balance participativo. Más aún, se identifican elementos cognitivos compartidos entre los participantes especialmente interconectados. En este tipo de dinámica, incluso desde una perspectiva individual del aprendizaje se identifica una estructura conceptual compartida y totalmente instanciada en la discusión del grupo.

En una co-construcción asimétrica, las dinámicas participativas cambian. Las inferencias causales son predominantemente coordinadas por uno de los individuos del grupo. A pesar de los desbalances en las intervenciones se observan oportunidades de desarrollo conceptual en estas instancias para ambos participantes. Para quien coordina la resolución del problema, las participaciones periféricas le brindan extracciones que pueden ser insumos importantes para el desarrollo de la clase. Hemos identificado cadenas de razonamientos con semillas de información focalizada por estudiantes en un intervalo de participaciones periférica. Para quien se encuentra en una dinámica periférica a la resolución del problema, también ocurren oportunidades cognitivas importantes. El análisis de las entrevistas permitió develar desarrollos conceptuales muy importantes en integrantes con participaciones inicialmente periféricas.

Mediante entrevistas preliminares se identifican dificultades en el proceso de modelización y/o idealización para el caso de reservorios termodinámicos. A partir de este caso, se diseña específicamente una simulación interactiva con el fin de estudiar cómo esta interviene en el desarrollo conceptual.

Los casos estudiados permitieron develar tres mecanismos diferentes a través de los cuales la simulación se involucra en la construcción y desarrollo de una clase de coordinación. En primera instancia, la representación interactiva constituye una fuente de extracciones de naturaleza diferente a una no-interactiva. En los casos reportados, la dinámica que denominamos *extractiva* implicó principalmente la focalización de nueva información a partir de la representación. Esta interacción implica un notable andamiaje principalmente para los primeros pasos de la resolución del problema cuando los estudiantes presentan una débil conexión entre sus modelos provenientes de la instrucción y el mundo real.

Identificamos una dinámica que llamamos *integrada* donde la simulación actuó de andamiaje para la producción de nuevas relaciones por parte de los estudiantes. Se observó en los casos estudiados que las representaciones se involucraron directamente en la dinámica discursiva del grupo, siendo puente para comunicar ideas e inferir nueva información, en muchos casos, que no se encontraba ni en la simulación ni en el discurso de los estudiantes.

Finalmente, identificamos que en todos los casos estudiados, los estudiantes perciben una jerarquía en la representación a nivel prácticamente de la experimentación. Esto induce una dinámica de corroboración en los grupos de discusión a la hora de resolver situaciones problemáticas. La gran ventaja de esta forma de interacción yace en que favorece procesos de articulación entre proyecciones que, como ya hemos mostrado, resultan claves a la hora de la reorganización de elementos de una clase de coordinación.

En términos generales, cada mecanismo de interacción exhibió potencialidades importantes a la hora de asistir el desarrollo conceptual para los casos de estudio. La simulación y la respectiva dinámica empleada a la hora de resolver problemas en el contexto de la termodinámica, mostraron ser de importante andamiaje para los procesos de cambio conceptual. Este aspecto se alinea directamente con lo relevado en investigaciones previas. Sin embargo hemos logrado a partir de los casos estudiados profundizar en las diferentes dinámicas interactivas presentes en los estudiantes y la simulación como así también las potencialidades que cada una de estas ofrece.

Recuperando las motivaciones iniciales de esta tesis, podemos afirmar nuevamente que no abordamos ni los problemas de deserción ni las dificultades conceptuales que presentan los estudiantes. Sin embargo, tanto la comunidad de investigación en educación en física (mediante las publicaciones) como la comunidad de la unidad académica (mediante el contacto cotidiano y la socialización de los resultados aquí presentados) cuentan con nuevos aportes para entender qué sucede en la interacción entre estudiantes y de éstos con las simulaciones mientras resuelven problemas de física que les permite o no aprender conceptos y qué se puede y qué no se puede hacer al respecto para lograr una enseñanza fructífera, tan necesaria para personas que se dedicarán a la ciencia y a la educación.

6.1. **Perspectivas**

En términos de investigación, entre tantas líneas para profundizar y con grandes desafíos por delante, decidimos enfatizar dos. La primera está en el diálogo abierto y aún en trabajo entre las perspectivas individual y sociocultural del aprendizaje. La primera con su virtud para describir procesos de desarrollo conceptual en detalle fino mientras que la segunda con la capacidad de describir procesos más cercanos a la dinámica de aprendizaje real en aula. La conjunción de estas líneas parece no ser tarea sencilla en estos tiempos. Es preciso que se desarrollen más estudios en la intersección de estas corrientes para poder tomar ventaja de las virtudes de las dos vertientes para describir con mayor detalle el complejo fenómeno de aprendizaje colectivo. El estado del arte así lo revela como así también los grandes esfuerzos de la comunidad en estudiar esta intersección. "¿Cómo compatibilizar estos dos paradigmas para describir el proceso de aprendizaje desde la complejidad que representa?" continúa siendo un interrogante abierto donde profundizar el estudio.

El segundo desafío yace en el desarrollo de tecnología para la enseñanza y el aprendizaje. Es común en la historia temprana, como mencionamos desde un comienzo, que la investigación persiga los adelantos tecnológicos involucrados en el aula. Así fue en el caso de las simulaciones computacionales, cuyos desafíos aun son grandes. En este sentido, se precisan más resultados empíricos donde extender el conocimiento sobre estas herramientas durante el proceso de aprendizaje. En estos términos, la comunidad contará con mejores estrategias y conocimiento para desarrollar herramientas tecnológicas más pertinentes y precisas para el aprendizaje. Así también, a medida que se conozca en mayor detalle cómo interviene la tecnología en el proceso de aprendizaje tendremos la capacidad de desarrollar secuencias didácticas mejor orientadas y explotar el uso de las tecnologías.

Más allá de los dos grandes desafíos que continúan abiertos para la comunidad de investigación en educación en ciencias, desafíos locales, para nuestra unidad académica y universidad, quedan pendientes. Recuperando las motivaciones que mencionamos en un comienzo, donde vemos que existen problemas importantes en la educación incluso en facultades prestigiosas como FAMAF, algunas puertas se pueden abrir en este sentido.

Tal vez esta tesis no de respuestas inmediatas para los problemas mencionados en las motivaciones, como la deserción. Sin embargo, nos abre interrogantes nuevos donde existen oportunidades. En primer lugar, en los estudios mencionados en este trabajo hemos visto que incluso estudiantes que han rendido y aprobado las materias, no han transformado las ideas más básicas respecto de su comprensión de fenómenos termodinámicos. A pesar de que esta realidad puede resultar desalentadora, los estudios que se desarrollaron en estos años muestran dos buenas noticias.

En primer lugar, la instancia de interacción entre pares durante la resolución de problemas parece ser un ecosistema clave para que los estudiantes superen y transformen sus ideas. Lo que resulta bueno de esto, es que se trata de una configuración típica de trabajo en las instancias prácticas de FAMAF. Tal vez sea ahí donde debemos profundizar la mirada y ver qué oportunidades nos perdemos en esos momentos en términos de enseñanza/aprendizaje.

En segundo lugar, hemos visto que las simulaciones presentan oportunidades importantes en términos de andamiaje para el cambio conceptual. Siendo nuestra facultad una comunidad de numerosos profesionales con habilidades en este campo, seguramente existe un potencial enorme para mejorar las prácticas de enseñanza con el desarrollo y buena implementación de estrategias en los espacios curriculares de la facultad.

Oportunidades siempre existen, la clave siempre fue, es y será las decisiones que tomemos para cambiar la educación.

Apéndice A

Interactividad: Videograph

Se realizan un primer análisis de las interacciones de los estudiantes. Consiste básicamente en identificar quién/cuándo habla y sobre qué. El propósito es determinar cómo interactúan los participantes mientras resuelven la tarea y tener un primer esquema general de interacción. Esto se lleva a cabo utilizando el software Videograph para determinar los giros de la conversación y las ideas que intervienen en los debates. Este software nos permite codificar quién, durante cuánto tiempo y de qué está hablando cada participante. Asignamos a cada línea de color una idea particular, relacionada con las diferentes representaciones, propiedades o atributos del concepto entropía. La figura A.1 muestra una captura de pantalla para un ejemplo. Sobre la izquierda de la figura se sitúan los cuadros que indican sobre qué ideas discuten los participantes. Dentro de cada cuadro, se encuentran tres niveles que representa cada uno, un participante de la discusión. Sobre el eje horizontal se representa el tiempo.

- dQ/T : un estudiante evoca la formulación matemática para calcular los cambios en la entropía desde un punto de vista macroscópico.
- State Funct: Mencionan que la entropía es una función del estado.
- Rev-Irrev: declaraciones que implican la relación entre los cambios en la entropía y los procesos reversibles o irreversibles.
- Aditividad: cuando evocan la aditividad de la entropía.

Durante el primer fragmento, como muestra la figura A.1, la discusión oscila entre representaciones y propiedades del concepto y luego se estabiliza en torno a las ideas de reversibilidad/irreversibilidad. Las intervenciones del entrevistador son ocasionales y la discusión es conducida principalmente por los estudiantes.

Durante el segundo fragmento, cuando los estudiantes comienzan a pensar en la entropía del medio ambiente, siguen sus pasos y comprueban su respuesta en la proyección 1. Ahora disconformes con su respuesta anterior, evocan otra representación de la entropía como se ve en la figura A.2. Se observa un patrón similar al de la proyección 1. La discusión se establece en torno a una representación hasta que se alcance la proyección 2. Hay un fuerte contraste en la participación del estudiante F en comparación con la del estudiante D. El entrevistador interviene sólo ocasionalmente también.

La interacción del grupo tiene una característica particular durante el tercer fragmento. Como se puede ver en la figura A.3, comienzan a discutir ideas sobre reversibilidad / irreversibilidad hasta que pueden incluir consideraciones matemáticas en esa charla.

Dos aspectos relevantes emergen del gráfico de la Figura A.4 Primero, el tiempo que les toma a las estudiantes resolver el problema es sorprendentemente menor

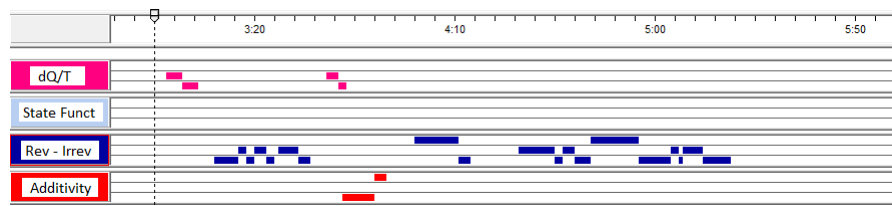


FIGURA A.1: Interacción durante el fragmento 1.

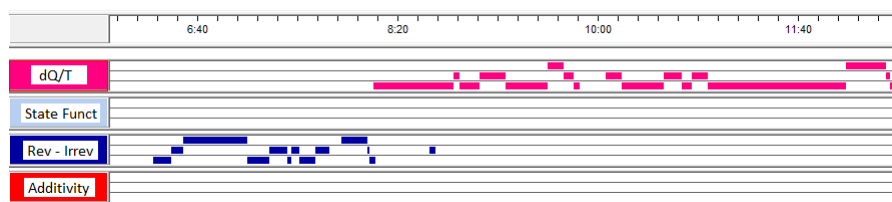


FIGURA A.2: Interacción durante el fragmento 2.

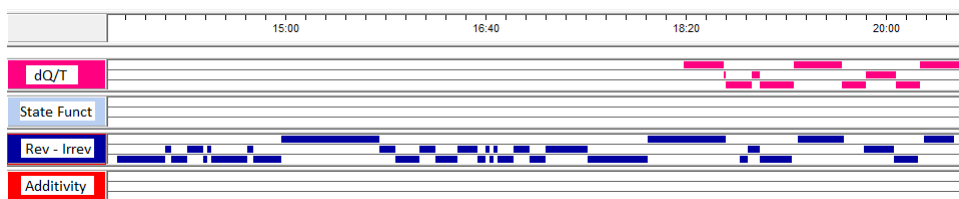


FIGURA A.3: Interacción durante el fragmento 3.

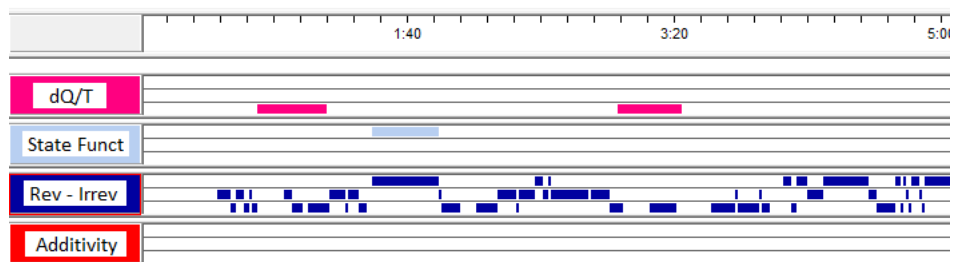


FIGURA A.4: Interacción durante el fragmento 4.

que el tiempo que necesitaron para resolver el ítem anterior. Encontrar el aumento de la entropía del gas les llevó más de 40 minutos de discusión en lugar de los menos de 10 minutos que necesitaron para encontrar el cambio de la entropía en el entorno. En segundo lugar, habíamos destacado cómo los estudiantes hablaban de muchas ideas simultáneamente cuando articulaban la clase de entropía. En este caso, la figura A.4 muestra que los estudiantes exploran algunas ideas durante la discusión, pero principalmente se centran en las de reversibilidad/irreversibilidad. Parece que la discusión sobre el gas les ayudó a abordar la discusión sobre el entorno. Les llevó menos tiempo decidir dónde concentrarse y también elegir un enfoque.

Apéndice B

Código Simulación

El código se encuentra disponible para la comunidad en la plataforma EasyJava Simulation. El desarrollo contó con las colaboraciones de Dr. Kyle Forinash (Indiana University Southeast), Dr. Wolfgang Christian (Davidson College) y Dr. Francisco Esquembre (Universidad de Murcia).

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-16"?>
<Osejs version="5.3" password="" >
<Osejs.Information>
<Title><![CDATA[]]></Title>
<Copyright><![CDATA[]]></Copyright>
<Keywords><![CDATA[]]></Keywords>
<Password><![CDATA[]]></Password>
<Level><![CDATA[]]></Level>
<Language><![CDATA[]]></Language>
<Abstract><![CDATA[]]></Abstract>
<ExecPassword><![CDATA[]]></ExecPassword>
<CaptureTools>>false</CaptureTools>
<DataTools>>false</DataTools>
<LanguageTools>>false</LanguageTools>
<AppletColSupport>>false</AppletColSupport>
<UseMacMenuBar>>false</UseMacMenuBar>
<FixedNavigationBar>>false</FixedNavigationBar>
<RunInBrowserFirst>>false</RunInBrowserFirst>
<RunAlways>>true</RunAlways>
<UseInterpreter>>true</UseInterpreter>
<UseDeltaForODE>>false</UseDeltaForODE>
<ModelTab></ModelTab>
<ModelTabTitle><![CDATA[]]></ModelTabTitle>
<ModelName><![CDATA[]]></ModelName>
<CSSFile></CSSFile>
<StaticImages>
</StaticImages>
<HTMLHead><![CDATA[]]></HTMLHead>
<Logo></Logo>
<Author><![CDATA[ Author name]]></Author>
<AuthorLogo></AuthorLogo>
<AdditionalLibraries>
</AdditionalLibraries>
<ImportStatements>
</ImportStatements>
<ClassesRequired>
</ClassesRequired>
<ManifestLines><![CDATA[ Permissions: sandbox
Codebase: *
Caller-Allowable-Codebase: *
]]></ManifestLines>
<DetectedFiles><![CDATA[./carnot.mp4;./reservorio_sim2.png;]]></DetectedFiles>
<AuxiliaryFiles><![CDATA[]]></AuxiliaryFiles>
</Osejs.Information>
<Osejs.Description>
</Osejs.Description>
<Osejs.Model>
<Osejs.Model.FramesPerSecond>20</Osejs.Model.FramesPerSecond>
<Osejs.Model.StepsPerDisplay>1</Osejs.Model.StepsPerDisplay>
<Osejs.Model.RealTimeVariable></Osejs.Model.RealTimeVariable>
<Osejs.Model.Autostart>>true</Osejs.Model.Autostart>
```

```

<Osejs . Model . Variables >
<Osejs . Model . Variables . Page>
<Type>VARIABLE_EDITOR</Type>
<Name>Tabla Variables</Name>
<Active>>true</Active>
<Internal>>false</Internal>
<Content>
<PageComment><![CDATA[]]></PageComment>
<Variable>
<Name><![CDATA[m1]]></Name>
<Value><![CDATA[45]]></Value>
<Type><![CDATA[double]]></Type>
<Dimension><![CDATA[]]></Dimension>
<Domain><![CDATA[public]]></Domain>
<Comment><![CDATA[]]></Comment>
</Variable>
<Variable>
<Name><![CDATA[m2]]></Name>
<Value><![CDATA[45]]></Value>
<Type><![CDATA[double]]></Type>
<Dimension><![CDATA[]]></Dimension>
<Domain><![CDATA[public]]></Domain>
<Comment><![CDATA[]]></Comment>
</Variable>
<Variable>
<Name><![CDATA[T1]]></Name>
<Value><![CDATA[900]]></Value>
<Type><![CDATA[double]]></Type>
<Dimension><![CDATA[]]></Dimension>
<Domain><![CDATA[public]]></Domain>
<Comment><![CDATA[]]></Comment>
</Variable>
<Variable>
<Name><![CDATA[T2]]></Name>
<Value><![CDATA[300]]></Value>
<Type><![CDATA[double]]></Type>
<Dimension><![CDATA[]]></Dimension>
<Domain><![CDATA[public]]></Domain>
<Comment><![CDATA[]]></Comment>
</Variable>
<Variable>
<Name><![CDATA[S1]]></Name>
<Value><![CDATA[0]]></Value>
<Type><![CDATA[double]]></Type>
<Dimension><![CDATA[]]></Dimension>
<Domain><![CDATA[public]]></Domain>
<Comment><![CDATA[]]></Comment>
</Variable>
<Variable>
<Name><![CDATA[S2]]></Name>
<Value><![CDATA[0]]></Value>
<Type><![CDATA[double]]></Type>
<Dimension><![CDATA[]]></Dimension>
<Domain><![CDATA[public]]></Domain>
<Comment><![CDATA[]]></Comment>
</Variable>
<Variable>
<Name><![CDATA[c]]></Name>
<Value><![CDATA[1]]></Value>
<Type><![CDATA[double]]></Type>
<Dimension><![CDATA[]]></Dimension>
<Domain><![CDATA[public]]></Domain>
<Comment><![CDATA[]]></Comment>
</Variable>
<Variable>
<Name><![CDATA[ciclos]]></Name>
<Value><![CDATA[0]]></Value>
<Type><![CDATA[int]]></Type>
<Dimension><![CDATA[]]></Dimension>
<Domain><![CDATA[public]]></Domain>
<Comment><![CDATA[]]></Comment>
</Variable>

```



```

<Variable>
<Name><![CDATA[V1]]></Name>
<Value><![CDATA[1]]></Value>
<Type><![CDATA[double]]></Type>
<Dimension><![CDATA[]]></Dimension>
<Domain><![CDATA[public]]></Domain>
<Comment><![CDATA[]]></Comment>
</Variable>
<Variable>
<Name><![CDATA[V2]]></Name>
<Value><![CDATA[1.01]]></Value>
<Type><![CDATA[double]]></Type>
<Dimension><![CDATA[]]></Dimension>
<Domain><![CDATA[public]]></Domain>
<Comment><![CDATA[]]></Comment>
</Variable>
<Variable>
<Name><![CDATA[R]]></Name>
<Value><![CDATA[1.987207]]></Value>
<Type><![CDATA[double]]></Type>
<Dimension><![CDATA[]]></Dimension>
<Domain><![CDATA[public]]></Domain>
<Comment><![CDATA[]]></Comment>
</Variable>
<Variable>
<Name><![CDATA[t]]></Name>
<Value><![CDATA[0]]></Value>
<Type><![CDATA[double]]></Type>
<Dimension><![CDATA[]]></Dimension>
<Domain><![CDATA[public]]></Domain>
<Comment><![CDATA[]]></Comment>
</Variable>
<Variable>
<Name><![CDATA[h1]]></Name>
<Value><![CDATA[0]]></Value>
<Type><![CDATA[double]]></Type>
<Dimension><![CDATA[]]></Dimension>
<Domain><![CDATA[public]]></Domain>
<Comment><![CDATA[]]></Comment>
</Variable>
<Variable>
<Name><![CDATA[h2]]></Name>
<Value><![CDATA[0]]></Value>
<Type><![CDATA[double]]></Type>
<Dimension><![CDATA[]]></Dimension>
<Domain><![CDATA[public]]></Domain>
<Comment><![CDATA[]]></Comment>
</Variable>
<Variable>
<Name><![CDATA[W]]></Name>
<Value><![CDATA[0]]></Value>
<Type><![CDATA[double]]></Type>
<Dimension><![CDATA[]]></Dimension>
<Domain><![CDATA[public]]></Domain>
<Comment><![CDATA[]]></Comment>
</Variable>
</Content>
</Osejs.Model.Variables.Page>
</Osejs.Model.Variables>
<Osejs.Model.Initialization>
<Osejs.Model.Initialization.Page>
<Type>CODE_EDITOR</Type>
<Name>P gina Inicio</Name>
<Active>true</Active>
<Internal>false</Internal>
<Content>
<Comment><![CDATA[]]></Comment>
<Code><![CDATA[
]]></Code>
</Content>
</Osejs.Model.Initialization.Page>

```

```

</Osejs.Model.Initialization>
<Osejs.Model.Evolution>
<Osejs.Model.Evolution.Page>
<Type>EVOLUTION_EDITOR</Type>
<Name>Página Evolución</Name>
<Active>>true</Active>
<Internal>>false</Internal>
<Content>
<Comment><![CDATA[]]></Comment>
<Code><![CDATA[

    h1=T1;
    h2=T2;
    T1=T1-R*T1*Math.log(V2/V1)/(m1*c);
    T2=T2+R*T2*Math.log(V2/V1)/(m2*c);

    // S2= S2+(c*m2)*Math.log(T2/h2);
    // S1= S1+(c*m1)*Math.log(T1/h1);

    S1= S1-R*Math.log(V2/V1);
    S2=S2+R*Math.log(V2/V1);
    ciclos=ciclos+1;

    if(T1<T2) {
        _pause();
    }

]]></Code>
</Content>
</Osejs.Model.Evolution.Page>
</Osejs.Model.Evolution>
<Osejs.Model.Constraints>
</Osejs.Model.Constraints>
<Osejs.Model.Library>
</Osejs.Model.Library>
<Osejs.Model.Elements>
</Osejs.Model.Elements>
</Osejs.Model>
<Osejs.View>
<Osejs.View.Creation>
</Osejs.View.Creation>
</Osejs.View>
<Osejs.HtmlView>
<Osejs.HtmlView.Page>
<Type>HTML_VIEW_EDITOR</Type>
<Name>HtmlView Page</Name>
<Active>>true</Active>
<Internal>>false</Internal>
<Content>
<SizeOption>0</SizeOption>
<X>0</X>
<Y>0</Y>
<Width>800</Width>
<Height>600</Height>
<KeepHidden>>false</KeepHidden>
<RootProperties>
</RootProperties>
<Tree>
<HtmlView.Element>
<Expanded>>true</Expanded>
<Type>Elements.Panel</Type>
<Name><![CDATA[ singleDrawingPanel ]]></Name>
</HtmlView.Element>
<HtmlView.Element>
<Expanded>>false</Expanded>
<Type>Elements.Panel</Type>
<Name><![CDATA[ labelPanel ]]></Name>
<Parent><![CDATA[ singleDrawingPanel ]]></Parent>
</HtmlView.Element>
</HtmlView.Element>

```

```

<Type>Elements . Label</Type>
<Name><![CDATA[ topLabel ]]></Name>
<Parent ><![CDATA[ labelPanel ]]></Parent>
<Property name="Text"><![CDATA[" <h1>Carnot</h1>"]]></Property>
</HtmlView . Element>
<HtmlView . Element>
<Expanded>true </Expanded>
<Type>Elements . WrappedPanel</Type>
<Name><![CDATA[ Panel_Reservorios ]]></Name>
<Parent ><![CDATA[ singleDrawingPanel ]]></Parent>
<Property name="CSS"><![CDATA[{ "display ":" block"}]></Property>
</HtmlView . Element>
<HtmlView . Element>
<Expanded>>false </Expanded>
<Type>Elements . DrawingPanel</Type>
<Name><![CDATA[ drawingPanel ]]></Name>
<Parent ><![CDATA[ Panel_Reservorios ]]></Parent>
<Property name="Height"><![CDATA[400]]></Property>
<Property name="Width"><![CDATA[400]]></Property>
</HtmlView . Element>
<HtmlView . Element>
<Type>Elements . Tank</Type>
<Name><![CDATA[ Reservorio_frio ]]></Name>
<Parent ><![CDATA[ drawingPanel ]]></Parent>
<Property name="LevelColor"><![CDATA[" rgba(0,0,192,1)"]]></Property>
<Property name="SizeX"><![CDATA[0.8]]></Property>
<Property name="Y"><![CDATA[-0.6]]></Property>
<Property name="Visibility"><![CDATA[ true ]]></Property>
<Property name="Level"><![CDATA[m2/200]]></Property>
<Property name="SizeY"><![CDATA[0.5]]></Property>
</HtmlView . Element>
<HtmlView . Element>
<Type>Elements . Image2D</Type>
<Name><![CDATA[ imagen ]]></Name>
<Parent ><![CDATA[ drawingPanel ]]></Parent>
<Property name="SizeX"><![CDATA[.75]]></Property>
<Property name="X"><![CDATA[.1]]></Property>
<Property name="ImageUrl"><![CDATA[" ./ reservorio_sim2 .png"]]></Property>
<Property name="Y"><![CDATA[0]]></Property>
<Property name="SizeY"><![CDATA[.75]]></Property>
</HtmlView . Element>
<HtmlView . Element>
<Type>Elements . Tank</Type>
<Name><![CDATA[ Reservorio_caliente ]]></Name>
<Parent ><![CDATA[ drawingPanel ]]></Parent>
<Property name="LevelColor"><![CDATA[" rgba(192,0,0,1)"]]></Property>
<Property name="SizeX"><![CDATA[0.8]]></Property>
<Property name="Y"><![CDATA[0.6]]></Property>
<Property name="Visibility"><![CDATA[ true ]]></Property>
<Property name="Level"><![CDATA[m1/200]]></Property>
<Property name="SizeY"><![CDATA[0.5]]></Property>
</HtmlView . Element>
<HtmlView . Element>
<Expanded>>false </Expanded>
<Type>Elements . Panel</Type>
<Name><![CDATA[ controlPanel ]]></Name>
<Parent ><![CDATA[ Panel_Reservorios ]]></Parent>
<Property name="CSS"><![CDATA[{ "display ":" block"}]></Property>
<Property name="BorderStyle"><![CDATA[" solid"]]></Property>
<Property name="BorderColor"><![CDATA[" Gray"]]></Property>
<Property name="BorderWidth"><![CDATA[1]]></Property>
<Property name="Width"><![CDATA[398]]></Property>
</HtmlView . Element>
<HtmlView . Element>
<Expanded>>false </Expanded>
<Type>Elements . Panel</Type>
<Name><![CDATA[ firstRowPanel2 ]]></Name>
<Parent ><![CDATA[ controlPanel ]]></Parent>
</HtmlView . Element>
<HtmlView . Element>
<Expanded>>false </Expanded>
<Type>Elements . Panel</Type>

```

```

<Name><![CDATA[ executionPanel2 ]]></Name>
<Parent ><![CDATA[ firstRowPanel2 ]]></Parent>
<Property name="Display" ><![CDATA[" inline-block"]]></Property>
</HtmlView . Element>
<HtmlView . Element>
<Type>Elements . Label</Type>
<Name><![CDATA[m14]]></Name>
<Parent ><![CDATA[ executionPanel2 ]]></Parent>
<Property name="Text" ><![CDATA["m1"]]></Property>
<Property name="Font" ><![CDATA["normal bold 12px "]]></Property>
</HtmlView . Element>
<HtmlView . Element>
<Type>Elements . ParsedField</Type>
<Name><![CDATA[m122]]></Name>
<Parent ><![CDATA[ executionPanel2 ]]></Parent>
<Property name="Value" ><![CDATA[m1]]></Property>
<Property name="OnChange" ><![CDATA[%_initialize %]]></Property>
<Property name="Width" ><![CDATA[30]]></Property>
</HtmlView . Element>
<HtmlView . Element>
<Type>Elements . Slider</Type>
<Name><![CDATA[m13]]></Name>
<Parent ><![CDATA[ executionPanel2 ]]></Parent>
<Property name="ShowText" ><![CDATA[ false ]]></Property>
<Property name="Value" ><![CDATA[m1]]></Property>
<Property name="Width" ><![CDATA[120]]></Property>
</HtmlView . Element>
<HtmlView . Element>
<Type>Elements . Label</Type>
<Name><![CDATA[m23]]></Name>
<Parent ><![CDATA[ executionPanel2 ]]></Parent>
<Property name="Text" ><![CDATA["m2"]]></Property>
<Property name="Font" ><![CDATA["normal bold 12px "]]></Property>
</HtmlView . Element>
<HtmlView . Element>
<Type>Elements . ParsedField</Type>
<Name><![CDATA[m222]]></Name>
<Parent ><![CDATA[ executionPanel2 ]]></Parent>
<Property name="Value" ><![CDATA[m2]]></Property>
<Property name="OnChange" ><![CDATA[%_initialize %]]></Property>
<Property name="Width" ><![CDATA[30]]></Property>
</HtmlView . Element>
<HtmlView . Element>
<Type>Elements . Slider</Type>
<Name><![CDATA[ deslizador2 ]]></Name>
<Parent ><![CDATA[ executionPanel2 ]]></Parent>
<Property name="Value" ><![CDATA[m2]]></Property>
<Property name="Width" ><![CDATA[120]]></Property>
</HtmlView . Element>
<HtmlView . Element>
<Expanded>>false</Expanded>
<Type>Elements . Panel</Type>
<Name><![CDATA[ firstRowPanel ]]></Name>
<Parent ><![CDATA[ controlPanel ]]></Parent>
</HtmlView . Element>
<HtmlView . Element>
<Expanded>>false</Expanded>
<Type>Elements . Panel</Type>
<Name><![CDATA[ executionPanel ]]></Name>
<Parent ><![CDATA[ firstRowPanel ]]></Parent>
<Property name="Display" ><![CDATA[" inline-block"]]></Property>
</HtmlView . Element>
<HtmlView . Element>
<Type>Elements . TwoStateButton</Type>
<Name><![CDATA[ runPauseButton ]]></Name>
<Parent ><![CDATA[ executionPanel ]]></Parent>
<Property name="OnClick" ><![CDATA[%_pause %]]></Property>
<Property name="State" ><![CDATA[ _isPaused ]]></Property>
<Property name="Tooltip" ><![CDATA[" Play/Pause"]]></Property>
<Property name="ImageUrl" ><![
CDATA[" /org/opensourcephysics
/resources/controls/images/play . gif"]]></Property>

```

```

<Property name="OnClick" ><![CDATA[%_play %]]></Property >
<Property name="ImageOffUrl" ><![
CDATA[" / org / opensourcephysics /
resources / controls / images / pause . gif "]]></Property >
</HtmlView . Element >
<HtmlView . Element >
<Type>Elements . Button</Type >
<Name ><![CDATA[ initButton ]]></Name >
<Parent ><![CDATA[ executionPanel ]]></Parent >
<Property name="Tooltip" ><![CDATA[" Initialize "]]></Property >
<Property name="ImageUrl" ><![CDATA
[" / org / opensourcephysics / resources /
controls / images / reset1 . gif "]]></Property >
<Property name="OnClick" ><![CDATA[%_initialize %]]></Property >
</HtmlView . Element >
<HtmlView . Element >
<Type>Elements . Button</Type >
<Name ><![CDATA[ resetButton ]]></Name >
<Parent ><![CDATA[ executionPanel ]]></Parent >
<Property name="Tooltip" ><![CDATA[" Reset "]]></Property >
<Property name="ImageUrl" ><![
CDATA[" / org / opensourcephysics /
resources / controls / images / reset . gif "]]></Property >
<Property name="OnClick" ><![CDATA[%_reset %]]></Property >
</HtmlView . Element >
<HtmlView . Element >
<Type>Elements . Label</Type >
<Name ><![CDATA[ T1_T2 ]]></Name >
<Parent ><![CDATA[ executionPanel ]]></Parent >
<Property name="Text" ><![CDATA[" T1-T2 "]]></Property >
<Property name="Font" ><![CDATA[" normal bold 12px "]]></Property >
</HtmlView . Element >
<HtmlView . Element >
<Type>Elements . ParsedField</Type >
<Name ><![CDATA[ campoNumerico ]]></Name >
<Parent ><![CDATA[ executionPanel ]]></Parent >
<Property name="Value" ><![CDATA[ T1-T2 ]]></Property >
<Property name="Editable" ><![CDATA[ false ]]></Property >
<Property name="Width" ><![CDATA[40]]></Property >
</HtmlView . Element >
<HtmlView . Element >
<Type>Elements . Label</Type >
<Name ><![CDATA[ T13 ]]></Name >
<Parent ><![CDATA[ executionPanel ]]></Parent >
<Property name="Text" ><![CDATA[" T1 "]]></Property >
<Property name="Font" ><![CDATA[" normal bold 10px "]]></Property >
</HtmlView . Element >
<HtmlView . Element >
<Type>Elements . ParsedField</Type >
<Name ><![CDATA[ T12 ]]></Name >
<Parent ><![CDATA[ executionPanel ]]></Parent >
<Property name="Value" ><![CDATA[ T1 ]]></Property >
<Property name="Editable" ><![CDATA[ _isPaused ]]></Property >
<Property name="OnChange" ><![CDATA[%_initialize %]]></Property >
<Property name="Width" ><![CDATA[35]]></Property >
</HtmlView . Element >
<HtmlView . Element >
<Type>Elements . Label</Type >
<Name ><![CDATA[ t22 ]]></Name >
<Parent ><![CDATA[ executionPanel ]]></Parent >
<Property name="Text" ><![CDATA[" T2 "]]></Property >
<Property name="Font" ><![CDATA[" normal bold 10px "]]></Property >
</HtmlView . Element >
<HtmlView . Element >
<Type>Elements . ParsedField</Type >
<Name ><![CDATA[ T22 ]]></Name >
<Parent ><![CDATA[ executionPanel ]]></Parent >
<Property name="Value" ><![CDATA[ T2 ]]></Property >
<Property name="OnChange" ><![CDATA[%_initialize %]]></Property >
<Property name="Width" ><![CDATA[35]]></Property >
</HtmlView . Element >
<HtmlView . Element >

```

```

<Expanded>true</Expanded>
<Type>Elements . Panel</Type>
<Name><![CDATA[ singlePlotPanel ]]></Name>
</HtmlView . Element>
<HtmlView . Element>
<Expanded>>false</Expanded>
<Type>Elements . Panel</Type>
<Name><![CDATA[ labelPanel2 ]]></Name>
<Parent ><![CDATA[ singlePlotPanel ]]></Parent >
</HtmlView . Element>
<HtmlView . Element>
<Type>Elements . Label</Type>
<Name><![CDATA[ Etiqueta_Temp_vs_Ciclo ]]></Name>
<Parent ><![CDATA[ labelPanel2 ]]></Parent >
<Property name="Text"><![CDATA["<h1>Temperatura vs Ciclo</h1>"]]></Property>
</HtmlView . Element>
<HtmlView . Element>
<Expanded>true</Expanded>
<Type>Elements . WrappedPanel</Type>
<Name><![CDATA[ Temperaturas ]]></Name>
<Parent ><![CDATA[ singlePlotPanel ]]></Parent >
<Property name="CSS"><![CDATA[{ "display ":" block"}]></Property>
</HtmlView . Element>
<HtmlView . Element>
<Expanded>true</Expanded>
<Type>Elements . PlottingPanel</Type>
<Name><![CDATA[ Temperaturas2 ]]></Name>
<Parent ><![CDATA[ Temperaturas ]]></Parent >
<Property name="YFixedTick"><![CDATA[ T1 ]]></Property >
<Property name="TitleY"><![CDATA[" Temperatura (K)"]]></Property >
<Property name="AutoScaleY"><![CDATA[ true ]]></Property >
<Property name="TitleX"><![CDATA[" ciclos"]]></Property >
<Property name="AutoScaleX"><![CDATA[ true ]]></Property >
<Property name="XFixedTick"><![CDATA[ ciclos ]]></Property >
<Property name="Title"><![CDATA[" T vs Ciclos"]]></Property >
<Property name="Height"><![CDATA[300]]></Property >
<Property name="Width"><![CDATA[400]]></Property >
</HtmlView . Element>
<HtmlView . Element>
<Type>Elements . Trace</Type>
<Name><![CDATA[ T1 ]]></Name>
<Parent ><![CDATA[ Temperaturas2 ]]></Parent >
<Property name="LineColor"><![CDATA[" Red"]]></Property >
<Property name="InputX"><![CDATA[ ciclos ]]></Property >
<Property name="InputY"><![CDATA[ T1 ]]></Property >
<Property name="NoRepeat"><![CDATA[ true ]]></Property >
<Property name="LineWidth"><![CDATA[2]]></Property >
</HtmlView . Element>
<HtmlView . Element>
<Type>Elements . Trace</Type>
<Name><![CDATA[ T2 ]]></Name>
<Parent ><![CDATA[ Temperaturas2 ]]></Parent >
<Property name="LineColor"><![CDATA[" rgba(0,0,192,1)"]]></Property >
<Property name="InputX"><![CDATA[ ciclos ]]></Property >
<Property name="InputY"><![CDATA[ T2 ]]></Property >
<Property name="NoRepeat"><![CDATA[ true ]]></Property >
<Property name="LineWidth"><![CDATA[2]]></Property >
</HtmlView . Element>
<HtmlView . Element>
<Expanded>>false</Expanded>
<Type>Elements . Panel</Type>
<Name><![CDATA[ controlPanel2 ]]></Name>
<Parent ><![CDATA[ Temperaturas ]]></Parent >
<Property name="CSS"><![CDATA[{ "display ":" block"}]></Property >
<Property name="BorderStyle"><![CDATA[" solid"]]></Property >
<Property name="BorderColor"><![CDATA[" Gray"]]></Property >
<Property name="BorderWidth"><![CDATA[1]]></Property >
<Property name="Width"><![CDATA[398]]></Property >
</HtmlView . Element>
<HtmlView . Element>
<Expanded>>false</Expanded>
<Type>Elements . Panel</Type>

```

```

<Name><![CDATA[ firstRowPanel3 ]]></Name>
<Parent><![CDATA[ controlPanel2 ]]></Parent>
</HtmlView.Element>
<HtmlView.Element>
<Expanded>>false</Expanded>
<Type>Elements.Panel</Type>
<Name><![CDATA[ executionPanel3 ]]></Name>
<Parent><![CDATA[ firstRowPanel3 ]]></Parent>
<Property name="Display"><![CDATA[" inline-block"]]></Property>
</HtmlView.Element>
<HtmlView.Element>
<Type>Elements.TwoStateButton</Type>
<Name><![CDATA[ runPauseButton2 ]]></Name>
<Parent><![CDATA[ executionPanel3 ]]></Parent>
<Property name="OnClick"><![CDATA[%_pause%]]></Property>
<Property name="State"><![CDATA[ _isPaused ]]></Property>
<Property name="Tooltip"><![CDATA[" Play/Pause"]]></Property>
<Property name="ImageUrl"><![
CDATA[" / org/opensourcephysics/resources/controls/images/play.gif "]]>
</Property>
<Property name="OnClick"><![CDATA[%_play%]]></Property>
<Property name="ImageOffUrl"><![
CDATA[" / org/opensourcephysics/resources/controls/images/pause.gif "]]>
</Property>
</HtmlView.Element>
<HtmlView.Element>
<Type>Elements.Button</Type>
<Name><![CDATA[ stepButton ]]></Name>
<Parent><![CDATA[ executionPanel3 ]]></Parent>
<Property name="Tooltip"><![CDATA[" Step"]]></Property>
<Property name="ImageUrl"><![
CDATA[" / org/opensourcephysics/resources/
controls/images/stepforward.gif "]]>
</Property>
<Property name="OnClick"><![CDATA[%_step%]]></Property>
</HtmlView.Element>
<HtmlView.Element>
<Type>Elements.Button</Type>
<Name><![CDATA[ initButton2 ]]></Name>
<Parent><![CDATA[ executionPanel3 ]]></Parent>
<Property name="Tooltip"><![CDATA[" Initialize"]]></Property>
<Property name="ImageUrl"><![
CDATA[" / org/opensourcephysics/
resources/controls/images/reset1.gif "]]></Property>
<Property name="OnClick"><![CDATA[%_initialize%]]></Property>
</HtmlView.Element>
<HtmlView.Element>
<Type>Elements.Button</Type>
<Name><![CDATA[ resetButton2 ]]></Name>
<Parent><![CDATA[ executionPanel3 ]]></Parent>
<Property name="Tooltip"><![CDATA[" Reset"]]></Property>
<Property name="ImageUrl">
<![CDATA[" / org/opensourcephysics
/resources/controls/images/reset.gif "]]></Property>
<Property name="OnClick"><![CDATA[%_reset%]]></Property>
</HtmlView.Element>
<HtmlView.Element>
<Expanded>>true</Expanded>
<Type>Elements.PlottingPanel</Type>
<Name><![CDATA[ panelConEjes ]]></Name>
<Parent><![CDATA[ Temperaturas ]]></Parent>
<Property name="TitleY"><![CDATA[" Entrop a (J/K)"]]></Property>
<Property name="AutoScaleY"><![CDATA[ true ]]></Property>
<Property name="TitleX"><![CDATA[" Ciclos"]]></Property>
<Property name="AutoScaleX"><![CDATA[ true ]]></Property>
<Property name="Title"><![CDATA[" S vs Ciclos"]]></Property>
<Property name="Height"><![CDATA[ 300 ]]></Property>
<Property name="Width"><![CDATA[ 400 ]]></Property>
</HtmlView.Element>
<HtmlView.Element>
<Type>Elements.Trace</Type>
<Name><![CDATA[ S2 ]]></Name>

```

```

<Parent ><![CDATA[ panelConEjes ]]></Parent>
<Property name="LineColor" ><![CDATA[" Red"]]></Property>
<Property name="InputX" ><![CDATA[ ciclos ]]></Property>
<Property name="InputY" ><![CDATA[ S2 ]]></Property>
<Property name="NoRepeat" ><![CDATA[ true ]]></Property>
<Property name="LineWidth" ><![CDATA[2]]></Property>
</HtmlView.Element>
<HtmlView.Element>
<Type>Elements.Trace</Type>
<Name><![CDATA[ S1 ]]></Name>
<Parent ><![CDATA[ panelConEjes ]]></Parent>
<Property name="LineColor" ><![CDATA[" rgba(0,0,192,1)"]]></Property>
<Property name="InputX" ><![CDATA[ ciclos ]]></Property>
<Property name="InputY" ><![CDATA[ S1 ]]></Property>
<Property name="NoRepeat" ><![CDATA[ true ]]></Property>
<Property name="LineWidth" ><![CDATA[2]]></Property>
</HtmlView.Element>
<HtmlView.Element>
<Expanded>true</Expanded>
<Type>Elements.Panel</Type>
<Name><![CDATA[ narrativePanel2 ]]></Name>
<Parent ><![CDATA[ singlePlotPanel ]]></Parent>
</HtmlView.Element>
<HtmlView.Element>
<Type>Elements.VideoInterface</Type>
<Name><![CDATA[ video ]]></Name>
<Parent ><![CDATA[ narrativePanel2 ]]></Parent>
<Property name="Loop" ><![CDATA[ true ]]></Property>
<Property name="Width" ><![CDATA[400]]></Property>
<Property name="VideoUrl" ><![CDATA["./ carnot.mp4"]]></Property>
</HtmlView.Element>
</Tree>
</Content>
</Osejs.HtmlView.Page>
</Osejs.HtmlView>
</Osejs>

```


Bibliografía

- Adams, W. K. y col. (2006). «New instrument for measuring student beliefs about physics and learning physics: The Colorado Learning Attitudes about Science Survey». En: *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.* 2 (1), pág. 010101. DOI: [10.1103/PhysRevSTPER.2.010101](https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.2.010101).
- Adams, Wendy K, Archie Paulson y Carl E Wieman (2008). «What levels of guidance promote engaged exploration with interactive simulations?» En: *AIP conference proceedings*. Vol. 1064. 1. AIP, págs. 59-62.
- Adams, Wendy K y col. (2008). «A study of educational simulations Part II–Interface Design». En: *Journal of Interactive Learning Research* 19.4, págs. 551-577.
- Alessi, SM y SR Trollip (2001). «Learning principles and approaches». En: *Multimedia for Learning: Methods and Development*, SR Trollip, Ed. London: Allyn and Bacon, págs. 16-47.
- Alexander, Patricia A (1996). «The past, present, and future of knowledge research: A reexamination of the role of knowledge in learning and instruction». En: *Educational Psychologist* 31.2, págs. 89-92.
- Alexander, Patricia A. (2007). «Bridging Cognition and Socioculturalism Within Conceptual Change Research: Unnecessary Foray or Unachievable Feat?» En: *Educational Psychologist* 42.1, págs. 67-73. DOI: [10.1080/00461520709336919](https://doi.org/10.1080/00461520709336919). eprint: <https://doi.org/10.1080/00461520709336919>. URL: <https://doi.org/10.1080/00461520709336919>.
- Alvarez, Teresa (2010). «La visualización de conceptos matemáticos y el aprendizaje del electromagnetismo». En: *Latin-American Journal of Physics Education* 4.1, pág. 21.
- Alzugaray, Gloria E, Marta B Massa y Marco A Moreira (2014). «La potencialidad de las simulaciones de campo eléctrico desde la perspectiva de la teoría de los campos conceptuales de vergnaud.» En: *Latin-American Journal of Physics Education* 8.1.
- Amin, Tamer y Olivia Levrini (ene. de 2018). *Converging perspectives on conceptual change: Mapping an emerging paradigm in the learning sciences*. ISBN: 9781138205406.
- Amin, Tamer, Carol Smith y Marianne Wiser (ene. de 2014). «Student Conceptions and Conceptual Change: Three Overlapping Phases of Research.» En:
- Andrés, Ma M, Marta Pesa y Jesús Meneses (2006). «Desarrollo conceptual acerca de ondas mecánicas en un laboratorio guiado por el modelo MATLaF». En: *Revista electrónica de enseñanza de las ciencias* 5.2, págs. 280-288.
- Ayyildiz, Yildizay y Leman Tarhan (ene. de 2012). «The Effective Concepts on Students' Understanding of Chemical Reactions and Energy». En: *Eğitim fakültesi dergisi* 42, págs. 72-83.
- Barth-Cohen, Lauren A. y Michael C. Wittmann (2017). «Aligning Coordination Class Theory With a New Context: Applying a Theory of Individual Learning to Group Learning». En: *Science Education* 101.2, págs. 333-363. DOI: [10.1002/sce.21264](https://doi.org/10.1002/sce.21264). eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/sce.21264>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/sce.21264>.

- Baudino Quiroga, Nicolás y col. (2019). «La interacción mediante el habla. Una revisión del discurso en las aulas de ciencias». En: *Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias* 14.2.
- Blake, Canan y Eileen Scanlon (2007). «Reconsidering simulations in science education at a distance: features of effective use». En: *Journal of Computer Assisted Learning* 23.6, págs. 491-502.
- Blasco, Xavier Serrano (1995). «Estudio de casos». En: *Etnografía: metodología cualitativa en la investigación sociocultural*. Marcombo, págs. 203-208.
- Bozkurt, Ersin y Aslan Ilik (2010). «The effect of computer simulations over students' beliefs on physics and physics success». En: *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 2.2, págs. 4587-4591.
- Brosseau, C y J Viard (1992). «Quelques réflexions sur le concept d'entropie issues d'un enseignement de thermodynamique». En: *Enseñanza de las ciencias* 10.1, págs. 013-16.
- Bucy, Brandon R, John R Thompson y Donald B Mountcastle (2006). «What is entropy? Advanced undergraduate performance comparing ideal gas processes». En: *AIP Conference Proceedings*. Vol. 818. 1. AIP, págs. 81-84.
- Buteler, Laura y Enrique Coleoni (2016). «Solving problems to learn concepts, how does it happen? A case for buoyancy». En: *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.* 12 (2), pág. 020144. DOI: [10.1103/PhysRevPhysEducRes.12.020144](https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.12.020144). URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevPhysEducRes.12.020144>.
- Carey, Susan (1985). *Conceptual change in childhood*. MIT press.
- Chamberlain, Julia M y col. (2014). «How guidance affects student engagement with an interactive simulation». En: *Chemistry Education Research and Practice* 15.4, págs. 628-638.
- Champagne, Audrey B, Leopold E Klopfer y John H Anderson (1980). «Factors influencing the learning of classical mechanics». En: *American Journal of physics* 48.12, págs. 1074-1079.
- Chang, Kuo-En y col. (2008). «Effects of learning support in simulation-based physics learning». En: *Computers & Education* 51.4, págs. 1486-1498.
- Chi, Michelene TH (1997). «Quantifying qualitative analyses of verbal data: A practical guide». En: *The journal of the learning sciences* 6.3, págs. 271-315.
- Chi, Michelene TH, James D Slotta y Nicholas De Leeuw (1994). «From things to processes: A theory of conceptual change for learning science concepts». En: *Learning and instruction* 4.1, págs. 27-43.
- Chirino, Sandra Ansise, Nélica Palma Rodríguez y Gabriel Alfredo Rodríguez (2015). «Aprendizaje de contenidos de óptica geométrica utilizando software didáctico». En: *Revista de Enseñanza de la Física* 27.2, págs. 37-44.
- Clark, Douglas y Doris Jorde (2004). «Helping students revise disruptively experientially supported ideas about thermodynamics: Computer visualizations and tactile models». En: *Journal of Research in Science Teaching: The Official Journal of the National Association for Research in Science Teaching* 41.1, págs. 1-23.
- Clement, John (1982). «Students' preconceptions in introductory mechanics». En: *American Journal of physics* 50.1, págs. 66-71.
- Cochran, Matthew y Paula Heron (mar. de 2007). «Development and assessment of research-based tutorials on heat engines and the second law of thermodynamics». En: *American Journal of Physics* 74. DOI: [10.1119/1.2198889](https://doi.org/10.1119/1.2198889).
- Coleoni, Enrique Andres y Laura Buteler (2020). «El entrevistador y la entrevista clínica. Una mirada desde la progresividad discursiva». En: *Enseñanza de las Ciencias. En evaluación*.

- Couture, Marc (2004). «Realism in the design process and credibility of a simulation-based virtual laboratory». En: *Journal of Computer Assisted Learning* 20.1, pág. 40-49.
- Covolan, Silvia Cristina Teodoro, Dirceu da Silva y col. (2005). «A entropia no Ensino Médio: utilizando concepções prévias dos estudantes e aspectos da evolução do conceito». En: *Ciência & Educação (Bauru)*.
- Daane, Abigail R y col. (2018). «The pedagogical value of conceptual metaphor for secondary science teachers». En: *Science Education* 102.5, págs. 1051-1076.
- De Gialdino, Vasilachis y col. (2006). «Estrategias de investigación cualitativa». En: *Barcelona: Gedisa*, págs. 42-50.
- De Jong, Ton y Wouter R Van Joolingen (1998). «Scientific discovery learning with computer simulations of conceptual domains». En: *Review of educational research* 68.2, págs. 179-201.
- Ding, Lin (2019). «Theoretical perspectives of quantitative physics education research». En: *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.* 15 (2), pág. 020101. DOI: [10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.020101](https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.020101). URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.020101>.
- diSessa, AA, B Sherin y M Levin (2016). «Knowledge analysis: An introduction». En: *A. diSessa, M. Levin, & N. Brown (Eds.), Knowledge and interaction: A synthetic agenda for the learning sciences*, págs. 30-71.
- diSessa, Andrea A (1993). «Toward an epistemology of physics». En: *Cognition and instruction* 10.2-3, págs. 105-225.
- diSessa, Andrea A. (2007). «An Interactional Analysis of Clinical Interviewing». En: *Cognition and Instruction* 25.4, págs. 523-565. DOI: [10.1080/07370000701632413](https://doi.org/10.1080/07370000701632413). eprint: <https://doi.org/10.1080/07370000701632413>. URL: <https://doi.org/10.1080/07370000701632413>.
- diSessa, Andrea A. (2014). «A History of Conceptual Change Research». En: *The Cambridge Handbook of the Learning Sciences*. Ed. por R. Keith Editor Sawyer. 2.ª ed. Cambridge Handbooks in Psychology. Cambridge University Press, 88-108. DOI: [10.1017/CB09781139519526.007](https://doi.org/10.1017/CB09781139519526.007).
- diSessa, Andrea A, Nicole M Gillespie y Jennifer B Esterly (2004). «Coherence versus fragmentation in the development of the concept of force». En: *Cognitive science* 28.6, págs. 843-900.
- diSessa, Andrea A y Bruce L Sherin (1998). «What changes in conceptual change?» En: *International journal of science education* 20.10, págs. 1155-1191.
- Docktor, Jennifer L. y José P. Mestre (2014). «Synthesis of discipline-based education research in physics». En: *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.* 10 (2), pág. 020119. DOI: [10.1103/PhysRevSTPER.10.020119](https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.10.020119). URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevSTPER.10.020119>.
- Duit, Reinders y David Treagust (ene. de 2012). «How Can Conceptual Change Contribute to Theory and Practice in Science Education?» En: págs. 107-118. ISBN: 978-1-4020-9040-0. DOI: [10.1007/978-1-4020-9041-7_9](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9041-7_9).
- Eaton, Janet F, Charles W Anderson y Edward L Smith (1984). «Students' misconceptions interfere with science learning: Case studies of fifth-grade students». En: *The Elementary School Journal* 84.4, págs. 365-379.
- Finkelstein, N. D. y col. (2005). «When learning about the real world is better done virtually: A study of substituting computer simulations for laboratory equipment». En: *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.* 1 (1), pág. 010103. DOI: [10.1103/PhysRevSTPER.1.010103](https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.1.010103). URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevSTPER.1.010103>.

- Fredrik, Jeppsson y col. (ene. de 2013). «Exploring the Use of Conceptual Metaphors in Solving Problems on Entropy». En: *Journal of the Learning Sciences* 22, págs. 70-120. DOI: [10.1080/10508406.2012.691926](https://doi.org/10.1080/10508406.2012.691926).
- Freitas, Sara I. de (2006). «Using games and simulations for supporting learning». En: *Learning, Media and Technology* 31.4, págs. 343-358. DOI: [10.1080/1743988-0601021967](https://doi.org/10.1080/1743988-0601021967).
- Fund, Zvia (2007). «The effects of scaffolded computerized science problem-solving on achievement outcomes: a comparative study of support programs». En: *Journal of Computer Assisted Learning* 23.5, págs. 410-424.
- García Barneto, A. y J. P. Bolívar Raya (2014). «Efecto de las simulaciones interactivas sobre las concepciones de los alumnos en relación con el movimiento armónico simple.» En: *Latin American Journal of Physics Education* 1, págs. 81-90.
- Granville, Mark F. (1985). «Student misconceptions in thermodynamics». En: *Journal of Chemical Education* 62.10, pág. 847. DOI: [10.1021/ed062p847](https://doi.org/10.1021/ed062p847). eprint: <https://doi.org/10.1021/ed062p847>. URL: <https://doi.org/10.1021/ed062p847>.
- Greeno, James G y Carla van de Sande (2007). «Perspectival understanding of conceptions and conceptual growth in interaction». En: *Educational Psychologist* 42.1, págs. 9-23.
- Halldén, Ola, Liza Haglund y Helge Strömdahl (2007). «Conceptions and Contexts: On the Interpretation of Interview and Observational Data». En: *Educational Psychologist* 42.1, págs. 25-40. DOI: [10.1080/00461520709336916](https://doi.org/10.1080/00461520709336916). eprint: <https://doi.org/10.1080/00461520709336916>. URL: <https://doi.org/10.1080/00461520709336916>.
- Hsu, Ying-Shao y Rex A. Thomas (2002). «The impacts of a web-aided instructional simulation on science learning». En: *International Journal of Science Education* 24.9, págs. 955-979. DOI: [10.1080/09500690110095258](https://doi.org/10.1080/09500690110095258).
- Huberman, A Michael y Matthew B Miles (1991). *Analyse des données qualitatives: recueil de nouvelles méthodes*. Éditions du Renouveau pédagogique; De Boeck,
- Huffman, Douglas y Patricia Heller (1995). «What does the force concept inventory actually measure?» En: *The Physics Teacher* 33.3, págs. 138-143.
- Ioannides, Christos y Stella Vosniadou (2002). «The changing meanings of force». En: *Cognitive science quarterly* 2.1, págs. 5-62.
- Jara, Carlos A y col. (2012). «A new 3D visualization Java framework based on physics principles». En: *Computer Physics Communications* 183.2, págs. 231-244.
- Jeppsson, Fredrik, Jesper Haglund y Tamer G. Amin (2015). «Varying Use of Conceptual Metaphors across Levels of Expertise in Thermodynamics». En: *International Journal of Science Education* 37.5-6, págs. 780-805. DOI: [10.1080/09500693.2015.1025247](https://doi.org/10.1080/09500693.2015.1025247). eprint: <https://doi.org/10.1080/09500693.2015.1025247>. URL: <https://doi.org/10.1080/09500693.2015.1025247>.
- Johnson-Laird, Philip Nicholas (1983). *Mental models: Towards a cognitive science of language, inference, and consciousness*. 6. Harvard University Press.
- Jordan, Brigitte y Austin Henderson (1995). «Interaction Analysis: Foundations and Practice». En: *Journal of the Learning Sciences* 4.1, págs. 39-103. DOI: [10.1207/s15327809jls0401_2](https://doi.org/10.1207/s15327809jls0401_2). eprint: https://doi.org/10.1207/s15327809jls0401_2. URL: https://doi.org/10.1207/s15327809jls0401_2.
- Keller, CJ y col. (2006). «Assessing the effectiveness of a computer simulation in conjunction with tutorials in introductory physics in undergraduate physics recitations». En: *AIP Conference Proceedings*. Vol. 818. 1. AIP, págs. 109-112.
- (2007). «Assessing the effectiveness of a computer simulation in introductory undergraduate environments». En: *AIP Conference Proceedings*. Vol. 883. 1. AIP, págs. 121-124.

- Kluge, Anders (2019). «Learning science with an interactive simulator: negotiating the practice-theory barrier». En: *International Journal of Science Education* 41.8, págs. 1071-1095. DOI: [10.1080/09500693.2019.1590881](https://doi.org/10.1080/09500693.2019.1590881). eprint: <https://doi.org/10.1080/09500693.2019.1590881>. URL: <https://doi.org/10.1080/09500693.2019.1590881>.
- Krajcik, Joseph S y Kongju Mun (2014). «Promises and challenges of using learning technologies to promote student learning of science». En: *Handbook of research on science education 2*, págs. 337-360.
- Kuhn, Thomas S. (1970). *The structure of scientific revolutions*. Chicago: University of Chicago Press, págs. xii, 210.
- Lave, Jean, Etienne Wenger y col. (1991). *Situated learning: Legitimate peripheral participation*. Cambridge university press.
- Lee, Silvia Wen-Yu y col. (2011). «Internet-based Science Learning: A review of journal publications». En: *International Journal of Science Education* 33.14, pág. 1893-1925. DOI: [10.1080/09500693.2010.536998](https://doi.org/10.1080/09500693.2010.536998). eprint: <https://doi.org/10.1080/09500693.2010.536998>. URL: <https://doi.org/10.1080/09500693.2010.536998>.
- Lemke, Jay L (1990). *Talking science: Language, learning, and values*. ERIC.
- Levrini, Olivia y Andrea A. diSessa (2008). «How students learn from multiple contexts and definitions: Proper time as a coordination class». En: *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.* 4 (1), pág. 010107. DOI: [10.1103/PhysRevSTPER.4.010107](https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevSTPER.4.010107). URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevSTPER.4.010107>.
- Libarkin, Julie C y Josepha P Kurdziel (2002). «Research methodologies in science education: Qualitative data». En: *Journal of Geoscience Education* 50.2, págs. 195-200.
- López Ríos, Sonia Yaneth, Eliane Angela Veit e Ives Solano Araujo (2011). «Modelación computacional apoyada en el uso del diagrama V de Gowin para el aprendizaje de conceptos de dinámica newtoniana». En: *Revista electrónica de enseñanza de las ciencias. Ourense. Vol. 10, no. 1 (2011), p. 202-226*.
- Lowe, Richard (2004). «Interrogation of a dynamic visualization during learning». En: *Learning and instruction* 14.3, págs. 257-274.
- Martínez, Guadalupe y col. (2011). «Comparative study of the effectiveness of three learning environments: Hyper-realistic virtual simulations, traditional schematic simulations and traditional laboratory». En: *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.* 7 (2), pág. 020111. DOI: [10.1103/PhysRevSTPER.7.020111](https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevSTPER.7.020111). URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevSTPER.7.020111>.
- Mason, Jennifer (1996). «Planning and designing qualitative research». En: *Qualitative Researching*, págs. 9-19.
- Mason, Lucia (2007). «Introduction: Bridging the cognitive and sociocultural approaches in research on conceptual change: Is it feasible?» En: *Educational psychologist* 42.1, págs. 1-7.
- Métioui, Abdeljalil y Louis Trudel (2013). «Contribution of the Computer Technologies in the Teaching of Physics: Critical Review and Conception of an Interactive Simulation Software». En: *Editorial Preface* 4.7.
- Morse, Janice M (1999). «Qualitative methods: The state of the art». En: *Qualitative health research* 9.3, págs. 393-406.
- Olde, Cornelise Vreman-de y Ton de Jong (2006). «Scaffolding learners in designing investigation assignments for a computer simulation». En: *Journal of Computer Assisted Learning* 22.1, págs. 63-73.
- Otero, Valerie K y Danielle Boyd Harlow (2009). «Getting started in qualitative physics education research». En: *Reviews in PER Vol 2*, págs. 1-67.

- Parnafes, Orit (2007). «What Does “Fast” Mean? Understanding the Physical World Through Computational Representations». En: *Journal of the Learning Sciences* 16.3, págs. 415-450. doi: [10.1080/10508400701413443](https://doi.org/10.1080/10508400701413443).
- Parnafes, Orit y Andrea diSessa (2013). «Microgenetic learning analysis: A methodology for studying knowledge in transition». En: *Human Development* 56.1, págs. 5-37.
- Paul, Ariel, Noah Podolefsky y Katherine Perkins (2013). «Guiding without feeling guided: Implicit scaffolding through interactive simulation design». En: *AIP Conference Proceedings*. Vol. 1513. 1. AIP, págs. 302-305.
- Perkins, Katherine y col. (2012). «Towards research-based strategies for using PhET simulations in middle school physical science classes». En: *AIP Conference Proceedings*. Vol. 1413. 1. AIP, págs. 295-298.
- Piaget, Jean (1926). *The language and thought of the child* New York.
- Pintrich, Paul R, Ronald W Marx y Robert A Boyle (1993). «Beyond cold conceptual change: The role of motivational beliefs and classroom contextual factors in the process of conceptual change». En: *Review of Educational Research* 63.2, págs. 167-199.
- Podolefsky, Noah S, Katherine K Perkins y Wendy K Adams (2009). «Computer simulations to classrooms: tools for change». En: *AIP Conference Proceedings*. Vol. 1179. 1. AIP, págs. 233-236.
- Podolefsky, Noah S y col. (2010). «Characterizing complexity of computer simulations and implications for student learning». En: *AIP Conference Proceedings*. Vol. 1289. 1. AIP, págs. 257-260.
- Pollock, Steven J. y Noah D. Finkelstein (2008). «Sustaining educational reforms in introductory physics». En: *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.* 4 (1), pág. 010110. doi: [10.1103/PhysRevSTPER.4.010110](https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.4.010110). URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevSTPER.4.010110>.
- Posner, George J y col. (1982). «Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change». En: *Science education* 66.2, págs. 211-227.
- Redish, Edward F (1993). «Are computers appropriate for teaching physics?» En: *Computers in Physics* 7.6, págs. 613-613.
- Redish, Edward F, Jeffery M Saul y Richard N Steinberg (1998). «Student expectations in introductory physics». En: *American Journal of Physics* 66.3, págs. 212-224.
- Rehn, Daniel Adam y col. (2013). «Tools for high-tech tool use: A framework and heuristics for using interactive simulations». En: *Journal of teaching and learning with technology*, págs. 31-55.
- Rivers, Robert H y Edward Vockell (1987). «Computer simulations to stimulate scientific problem solving». En: *Journal of Research in Science Teaching* 24.5, pág. 403-415.
- Ronen, Miky y Matzi Eliahu (2000). «Simulation—A bridge between theory and reality: The case of electric circuits». En: *Journal of computer assisted learning* 16.1, págs. 14-26.
- Rumelhart, David E (1984). «Schemata and the cognitive system.» En:
- Sadler, PM, MH Schneps y S Woll (1989). «A private universe». En: *Pyramid Film and Video, Santa Monica, CA*.
- Säljö, Roger (1999). «Concepts, cognition and discourse: From mental structures to discursive tools». En: *New perspectives on conceptual change* 81, pág. 90.
- Sánchez, Manuel Alonso (2007). «Animaciones Modelling y videos de experiencias de laboratorio para dar un nuevo impulso a la enseñanza de la mecánica newtoniana». En: *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias* 6.3, págs. 729-745.

- Sánchez-Sánchez, Rubén (2013). «Simulación de órbitas post-newtonianas usando EJS para una clase de Física». En: *Latin American Journal of Physics Education* 7.2, págs. 235-256.
- Schulze, Kay G y col. (2000). «Andes: A coached learning environment for classical Newtonian physics». En: *Selected Papers from the 11th International Conference on College Teaching and Learning*. Citeseer, págs. 151-162.
- Sengupta, Pratim, Kara D. Krinks y Douglas B. Clark (2015). «Learning to Deflect: Conceptual Change in Physics During Digital Game Play». En: *Journal of the Learning Sciences* 24.4, págs. 638-674. DOI: [10.1080/10508406.2015.1082912](https://doi.org/10.1080/10508406.2015.1082912). eprint: <https://doi.org/10.1080/10508406.2015.1082912>. URL: <https://doi.org/10.1080/10508406.2015.1082912>.
- Siegler, Robert S. (2007). «Microgenetic Analyses of Learning». En: *Handbook of Child Psychology*. American Cancer Society. Cap. 11. ISBN: 9780470147658. DOI: [10.1002/9780470147658.chpsy0211](https://doi.org/10.1002/9780470147658.chpsy0211). eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9780470147658.chpsy0211>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780470147658.chpsy0211>.
- Simon, Herbert Alexander (1979). *Models of thought*. Vol. 352. Yale university press.
- Smetana, Lara Kathleen y Randy L. Bell (2012). «Computer Simulations to Support Science Instruction and Learning: A critical review of the literature». En: *International Journal of Science Education* 34.9, págs. 1337-1370. DOI: [10.1080/09500693.2011.605182](https://doi.org/10.1080/09500693.2011.605182). eprint: <https://doi.org/10.1080/09500693.2011.605182>. URL: <https://doi.org/10.1080/09500693.2011.605182>.
- Smith III, John P, Andrea A Disessa y Jeremy Roschelle (1994). «Misconceptions reconceived: A constructivist analysis of knowledge in transition». En: *The journal of the learning sciences* 3.2, págs. 115-163.
- Sozibilir, Mustafa (ene. de 2003). «A review of selected literature on students' misconceptions of heat and temperature». En: *Boğaziçi University Journal of Education* 20.
- Stake, Robert E (1995). *The art of case study research*. Sage.
- Steinberg, Richard N. (2000). «Computers in teaching science: To simulate or not to simulate?» En: *American Journal of Physics* 68.S1, S37-S41. DOI: [10.1119/1.19517](https://doi.org/10.1119/1.19517). eprint: <https://doi.org/10.1119/1.19517>. URL: <https://doi.org/10.1119/1.19517>.
- Stern, Luli, Nitzza Barnea y Sofia Shauli (2008). «The effect of a computerized simulation on middle school students' understanding of the kinetic molecular theory». En: *Journal of science Education and Technology* 17.4, págs. 305-315.
- Strike, KA y GJ Posner (1985). «Cognitive structure and conceptual change». En: *A Conceptual change view of learning and understanding*, págs. 211-231.
- Strike, Kenneth A y George J Posner (1992). «A revisionist theory of conceptual change». En: *Philosophy of science, cognitive psychology, and educational theory and practice* 176.
- Swaak, Janine y Ton De Jong (2001). «Discovery simulations and the assessment of intuitive knowledge». En: *Journal of Computer Assisted Learning* 17.3, págs. 284-294.
- Tao, Ping-Kee y Richard F Gunstone (1999). «The process of conceptual change in force and motion during computer-supported physics instruction». En: *Journal of Research in Science Teaching: The Official Journal of the National Association for Research in Science Teaching* 36.7, págs. 859-882.
- Tao, Ping-Kee (2004). «Developing understanding of image formation by lenses through collaborative learning mediated by multimedia computer-assisted learning programs». En: *International Journal of Science Education* 26.10, págs. 1171

1197. DOI: [10.1080/0950069032000138879](https://doi.org/10.1080/0950069032000138879). eprint: <https://doi.org/10.1080/0950069032000138879>. URL: <https://doi.org/10.1080/0950069032000138879>.
- Thaden-Koch, Thomas, Robert Dufresne y Jose Mestre (nov. de 2006). «Coordination of knowledge in judging animated motion». En: *Physical Review Special Topics : Physics Education Research* 2. DOI: [10.1103/PhysRevSTPER.2.020107](https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.2.020107).
- Trowbridge, David E y Lillian C McDermott (1980). «Investigation of student understanding of the concept of velocity in one dimension». En: *American journal of Physics* 48.12, págs. 1020-1028.
- Velasco, Juan y Laura Buteler (2019a). «Conceptual development through computer simulation: a case study in Physics». En: *Journal of Computer Assisted Learning - En evaluación*.
- (2019b). «Misaligned Projections: an opportunity for learning». En: *Journal of Science Education* 20.1, págs. 1-10.
- Velasco, Juan y col. (2019). «Building shared knowledge: the co-development of a Coordination Class». En: *International Journal of Science Education - En evaluación*.
- Velasco, Juan José y Laura Maria Buteler (2017). «Simulaciones computacionales en la enseñanza de la física: una revisión crítica de los últimos años». En: *Enseñanza de las Ciencias* 35, págs. 161-178.
- Von Glasersfeld, Ernst (1991). «An exposition of constructivism: Why some like it radical». En: *Facets of systems science*. Springer, págs. 229-238.
- Vosniadou, Stella (1994). «Capturing and modeling the process of conceptual change». En: *Learning and instruction* 4.1, págs. 45-69.
- Vygotsky, Lev S (1987). «The development of scientific concepts in childhood». En: *The collected works of LS Vygotsky* 1, págs. 167-241.
- Wagner, Joseph F (2006). «Transfer in pieces». En: *Cognition and instruction* 24.1, págs. 1-71.
- Weber III, John J (2009). «Post-secondary science students' conceptions of randomness and entropy». Tesis doct. uga.
- Wertsch, James V y col. (2007). «The Cambridge Companion to Vygotsky». En: *Cambridge, New York*.
- Wilson, Jock M y Edward F Redish (1989). «Using computers in teaching physics». En: *Physics today* 42.1, págs. 34-41.
- Wittmann, Michael C. (2002). «The object coordination class applied to wave pulses: Analysing student reasoning in wave physics». En: *International Journal of Science Education* 24.1, págs. 97-118. DOI: [10.1080/09500690110066944](https://doi.org/10.1080/09500690110066944). eprint: <https://doi.org/10.1080/09500690110066944>. URL: <https://doi.org/10.1080/09500690110066944>.
- Zacharia, Zacharias y O Roger Anderson (2003). «The effects of an interactive computer-based simulation prior to performing a laboratory inquiry-based experiment on students' conceptual understanding of physics». En: *American Journal of Physics* 71.6, págs. 618-629.
- Zacharia, Zacharias C. (2005). «The Impact of Interactive Computer Simulations on the Nature and Quality of Postgraduate Science Teachers' Explanations in Physics». En: *International Journal of Science Education* 27.14, págs. 1741-1767. DOI: [10.1080/09500690500239664](https://doi.org/10.1080/09500690500239664).
- Zacharia, Zacharias C (2007). «Comparing and combining real and virtual experimentation: an effort to enhance students' conceptual understanding of electric circuits». En: *Journal of Computer Assisted Learning* 23.2, págs. 120-132.
- Zacharia, Zacharias C, Georgios Olympiou y Marios Papaevripidou (2008). «Effects of experimenting with physical and virtual manipulatives on students' conceptual understanding in heat and temperature». En: *Journal of Research in Science*

Teaching: The Official Journal of the National Association for Research in Science Teaching 45.9, págs. 1021-1035.

Zhang, Jianwei y col. (2004). «Triple scheme of learning support design for scientific discovery learning based on computer simulation: Experimental research». En: *Journal of Computer Assisted Learning* 20.4, págs. 269-282.