EPISTEMOLOGÍA E HISTORIA DE LA CIENCIA

SELECCIÓN DE TRABAJOS DE LAS VII JORNADAS
1997

Patricia Morey
José Ahumada
Editores

ÁREA LOGICO-EPISTEMOLÓGICA DE LA ESCUELA DE FILOSOFÍA
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE LA FACULTAD DE FILOSOFÍA Y HUMANIDADES
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

Olimpia Lombardi
Universidad Nacional de Buenos Aires

TERMODINAMICA E IRREVERSIBILIDAD : LA RESPUESTA DE PRIGOGINE A LA PARADOJA DE LOSCHMIDT

Termodinámica y mecánica.

Las raíces del problema de la irreversibilidad se remontan a 1854, cuando Clausius formuló la primera versión del Segundo Principio de la Termodinámica, según el cual todo sistema aislado térmica y mecánicamente de su entorno evoluciona hacia el equilibrio, esto es, su entropía aumenta durante la evolución. Sobre la base de estos trabajos, en 1860 Maxwell formuló su famosa ley de distribución de velocidades para un gas en equilibrio, la cual establece, para cada intervalo de velocidades, la fracción de moléculas con velocidades pertenecientes a dicho intervalo.

Si la distribución de velocidades de las moléculas de un gas es inicialmente diferente de la de Maxwell, los choques intermoleculares producirán con el tiempo tal distribución, y de allí en adelante la mantendrán; la manera natural de demostrar la unicidad de la distribución de Maxwell consistiría en probar que una distribución inicial arbitraria de velocidades moleculares debe evolucionar con el tiempo hacia la distribución de Maxwell y estabilizarse en ella. De este modo se brindaría, además, una interpretación microscópica del aumento de entropía postulado por el Segundo Principio: en un sistema aislado, cualquier distribución inicial de velocidades, correspondiente a un cierto valor de entropía, evolucionará hacia el estado de equilibrio con entropía máxima, caracterizado por la distribución de Maxwell.

Precisamente en estos términos podría expresarse el programa de Boltzmann, dentro del cual cobra una relevancia central su "Teorema H",presentado como una explicación del Segundo Principio en términos exclusivamente mecánicos. Según tal teorema, para cada sistema aislado puede definirse una función H(t) monótonamente decreciente con el tiempo hasta un valor mínimo, para el cual la distribución de velocidades se convierte en la de Maxwell (y a partir de allí se mantiene); además, la función H(t) sólo puede diferir de la entropía del sistema en una constante aditiva arbitraria, de modo tal que la disminución de H(t) con el tiempo puede interpretarse como el aumento de entropía postulado por el Segundo Principio.

En su minucioso análisis del teorema, Kuhn (1980, Cap.1) señala las hipótesis estadísticas que, implícitamente, introduce Boltzmann en su derivación. Pero el propio Boltzmann debió enfrentarse a diversas objeciones que le fueron sugeridas por sus contemporáneos, en particular las de Loschmidt, Zermelo y Poincaré. En 1776, ante la

Academia de Ciencias de Viena, Loschmidt anunciaba un teorema que pretendía demostrar la imposibilidad de derivar el Segundo Principio de la Termodinámica a partir de la mecánica: si en un dado instante de la evolución de un sistema se invierten las velocidades de todas las partículas que lo componen, todas las colisiones que tienen lugar en sentido inverso "deshacen" lo que fue previamente hecho, y el sistema debe retornar a su estado inicial. Por consiguiente, la función H también debe aumentar con la consecuente disminución de la entropía, hasta alcanzar ambas funciones nuevamente su valor inicial. En resumen, por cada evolución mecánicamente posible que conduce al equilibrio hay otra, igualmente posible, que conduce en sentido contrario y que, por tanto, es incompatible con el Segundo Principio. De ello se infiere que el modelo de Boltzmann no resulta adecuado para ciertas condiciones iniciales, en particular, las resultantes de una inversión de velocidades. En base a esta descripción, la crítica de Loschmidt suele denominarse "la paradoja la inversión de velocidades".

Si bien el desafío de Loschmidt condujo a Boltzmann a un replanteo probabilístico del Teorema H, tal reformulación condujo a nuevos problemas que tampoco recibieron una respuesta satisfactoria. Frente a esta situación, en 1902 Gibbs brindó un nuevo enfoque al, ya entonces, muy debatido problema de la reducción de la termodinámica a la mecánica. La mecánica estadística de Gibbs proporciona una interpretación subjetiva del Segundo Principio: el aumento de la entropía en un sistema aislado no describe la evolución del propio sistema, sino únicamente nuestro conocimiento de él: lo que aumenta de un modo constante es nuestra ignorancia del microestado preciso del sistema. En el instante inicial podemos disponer de muchos datos acerca del sistema pero, a medida que el tiempo transcurre, la información relacionada con las condiciones iniciales va perdiendo su relevancia hasta que, finalmente, en el equilibrio todo lo que se conoce acerca del sistema son las magnitudes que han permanecido invariantes durante la transformación.

La respuesta de Prigogine a la paradoja de Loschmidt.

¿A qué se debe el profundo interés de Prigogine por la reducción de la termodinámica a la mecánica?. Se debe a que tal cuestión apunta directamente al núcleo del problema de la irreversibilidad. Las críticas a Boltzmann ponen de manifiesto la necesidad de incorporar hipótesis no mecánicas para la derivación del Teorema H; por lo tanto, cierran las puertas a la interpretación de la irreversibilidad termodinámica macroscópica como una propiedad "emergente" de un sistema cuyas propiedades microscópicas son exclusivamente mecánicas y, por tanto, reversibles. A su vez, dado que el crecimiento de la entropía determina el sentido temporal privilegiado, según la interpretación subjetiva de Gibbs, el observador es el responsable de la flecha del tiempo; en otras palabras, los únicos procesos que en realidad existen son los procesos reversibles; la irreversibilidad que observamos y, con ella, la anisotropía temporal que percibimos, no son más que una apariencia subjetiva debida a nuestros limitados poderes de observación; pero, desde un punto de vista estrictamente ontológico, no existe asimetría alguna entre ambos sentidos temporales.

En el marco de su intento de fundamentar la irreversibilidad objetiva de los procesos físicos, Prigogine rechaza totalmente la interpretación subjetiva de Gibbs, propiciando un retorno al programa boltzmanniano; pero para ello debe responder a las principales objeciones a las que debió enfrentarse el propio Boltzmann, en particular, la paradoja de Loschmidt que aún hoy carece de una solución definitiva. Por ello, tanto el físico como el epistemólogo reciben con entusiasmo el anuncio de Prigogine por el cual afirma haber hallado finalmente la respuesta al problema:

"Dos objeciones habían acarreado la derrota de Boltzmann: la del «retorno» y la de la «inversión». [...] Es interesante comprender desde este momento por qué las objeciones levantadas contra las ideas de Boltzmann pierden toda pertinencia en cuanto consideramos un sistema suficientemente inestable." (Prigogine & Stengers, 1991, pp.108-109)

Sin embargo, el entusiasmo inicial pronto se disipa al comprobarse que la supuesta solución al viejo problema se basa en el recurso a la teoría del caos:

"la existencia, para los sistemas «caóticos», de un horizonte temporal medido por el tiempo de Lyapounov resta todo valor a estas dos objeciones." (Prigogine & Stengers, 1991, p.109)

Cabe aquí recordar que la teoría del caos trata de cierto tipo de ecuaciones diferenciales que, si bien no lineales, resultan ser totalmente deterministas y reversibles. Desde el punto de vista físico, la característica central del comportamiento caótico es su sensibilidad a las condiciones iniciales: si se parte de dos condiciones iniciales próximas, las evoluciones posibles del sistema se separan muy rápidamente, y al cabo de un tiempo bastante corto parecen no tener nada en común; en lenguaje matemático esto se expresa diciendo que, si se toman dos puntos en el espacio de las fases pertenecientes a la misma cuenca de atracción y separados entre sí una distancia $D(0)$ en $t = 0$, en el curso del tiempo tales puntos se separarán exponencialmente según e exp $[\ t\ /\ \tau\ ]$, donde τ se denomina "tiempo de Lyapounov".

Esta característica del comportamiento caótico implica una importante consecuencia en relación con la predictibilidad. En la práctica, los inevitables errores experimentales harán que nunca podamos conocer con precisión infinita el estado inicial de un sistema. Si se trata de un sistema de comportamiento no caótico, la situación no es grave: pequeñas incertidumbres en las condiciones iniciales producen incertidumbres grandes pero acotadas en el curso ulterior de la evolución. Pero si el sistema posee un comportamiento caótico, las pequeñas incertidumbres iniciales se amplifican exponencialmente con el transcurso del tiempo de modo tal que, para tiempos muy superiores al tiempo de Lyapounov, la predicción de los estados futuros del sistema se torna prácticamente imposible, a pesar de tratarse de ecuaciones completamente deterministas.

En base a tales consideraciones, Prigogine sostiene que:

"una inversión de velocidades no es ya concebible, ni siquiera como experimento mental, tras un tiempo de evolución grande comparado con el tiempo de Lyapounov. Los sistemas caóticos no pueden entonces ser definidos como reversibles para tiempos largos comparados con el tiempo de Lyapounov." (Prigogine & Stengers, 1991, p.109) pues, para tales intervalos temporales:

"la noción de trayectoria individual hace tiempo que ha perdido su sentido." (Prigogine & Stengers, 1991, p.109)

Pero tal argumento resulta por completo inaceptable, en especial proviniendo de un defensor de la interpretación objetiva del Segundo Principio: el tiempo de Lyapounov no se relaciona con algún tipo de indeterminación del sistema; por el contrario, sólo resulta relevante respecto de la predicción de sus estados futuros pues constituye la medida del crecimiento exponencial de los errores en la determinación empírica de las condiciones iniciales. Del hecho de que, para un tiempo largo respecto del tiempo de Lyapounov, se ha perdido toda información respecto de las posiciones y velocidades de las partículas del sistema, Prigogine infiere la imposibilidad de la inversión de velocidades. Pero dicha imposibilidad práctica no impide que otro sistema posea una configuración idéntica a la del sistema original luego del tiempo en cuestión, salvo el sentido inverso de las velocidades de sus partículas: de acuerdo con las leyes de la mecánica tal sistema evolucionará remontando las trayectorias del sistema original y, consecuentemente, disminuyendo su entropía, con independencia de que el observador sea o no capaz de describir tales trayectorias. En síntesis, el argumento de Prigogine se basa en la incorrecta inferencia, a partir de consideraciones gnoseológicas, de conclusiones ontológicas que nada tienen que ver con el conocimiento que efectivamente pueda obtenerse de un sistema ni con la posibilidad de predicción de sus estados futuros.

Pero Prigogine no se limita a presentar esta respuesta "conceptual" a la objeción de Loschmidt. A fin de reforzar su posición no duda en recurrir a un argumento muy diferente del original: la simulación numérica por computadora:

"Esta limitación fundamental [para la inversión de velocidades] está confirmada mediante cálculos con ordenador. Estos cálculos utilizan un programa basado en un sistema de ecuaciones reversibles en el tiempo y muestran el carácter irreversible de la evolución definida por estas ecuaciones para tiempos suficientemente grandes." (Prigogine & Stengers, 1991, p.109)

La estrategia de Prigogine consiste en recurrir a la simulación numérica del movimiento de un conjunto de discos sobre una superficie bidimensional, a partir de una distribución de velocidades correspondiente a una situación alejada del equilibrio. La gráfica de la función H en función del tiempo muestra un decrecimiento monótono tendiente a un valor constante que caracteriza al estado de equilibrio del sistema, tal como lo había predicho ya el propio Boltzmann. Pero, si tras un cierto número de colisiones se invierten las velocidades de las partículas, puede comprobarse que el valor de H comienza a aumentar en lugar de disminuir, justificando aparentemente la objeción de Loschmidt. Sin embargo, Prigogine considera tener la última palabra: la simulación numérica muestra que, tras un cierto número de colisiones luego de la inversión de velocidades, la función H comienza a decrecer nuevamente alcanzando un valor incluso inferior al que poseía antes de la inversión.

En una época en que la computación goza de un prestigio indiscutido en la sociedad, el lector no especializado, aún no comprendiendo totalmente los conceptos involucrados en la discusión, considerará que la prueba que brinda la computadora constituye una refutación definitiva de la controvertida objeción de Loschmidt: la computadora "demuestra" que, a la larga, la entropía -la función H cambiada de signo- sólo puede aumentar,aún cuando se produzca la tan mencionada pero nunca antes efectivamente realizada inversión de velocidades. Sin embargo, un análisis conceptual de este nuevo argumento de Prigogine pone al descubierto la falacia en la incurre el autor: la simulación por medio de una computadora de la inversión de velocidades en modo alguno constituye la realización efectiva del experimento mental propuesto por Loschmidt. Tal experimento no puede ser simulado con absoluta precisión mediante una computadora, pues el número limitado de cifras significativas con las que trabaja y los inevitables errores de redondeo conducen a una pérdida de información que va incrementándose con el transcurso del tiempo de evolución. La amplificación de los errores así generados resulta mucho más crítica en el caso de los sistemas de comportamiento caótico, como consecuencia de la divergencia exponencial de las evoluciones. Pero es precisamente debido a tales errores que el cálculo de la función H muestra una posterior disminución luego del crecimiento inicial debido a la inversión de velocidades. En otras palabras, la flecha del tiempo que surge de este tipo de simulaciones numéricas no expresa una irreversibilidad "intrínseca" como pretende Prigogine; por el contrario, tales simulaciones sólo ponen de manifiesto la irreversibilidad práctica de los sistemas de comportamiento caótico: debido a su fuerte sensibilidad a las condiciones iniciales, a lo largo de la evolución se pierde la información precisa acerca de las posiciones y los momentos que permitiría recalcular el microestado inicial a partir de una inversión de velocidades. Como afirma Giulio Casati:

"Cabe preguntarse también por otra característica de los movimientos caóticos clásicos: su irreversibilidad práctica. Las ecuaciones del movimiento de un sistema caótico siempre son deterministas y en principio pueden ser resueltas al revés: toda bola caótica de un billar en forma de estadio [comportamiento caótico] puede recorrer su trayectoria en sentido contrario hasta el punto inicial. Pero en la práctica, la memoria se pierde [...]. Es imposible remontar exactamente el curso del tiempo mediante el cálculo, porque las trayectorias son demasiado sensibles a las condiciones iniciales. Un simple error de redondeo, inevitable en un ordenador, que siempre calcula con un número limitado de cifras significativas, se traduce en unos errores cada vez mayores a medida que se intenta volver a un pasado cada vez más lejano." (Casati, 1991, p.271)

Por lo tanto, dado que el decrecimiento de la función H surge del explosivo aumento de los errores de cálculo en un sistema de comportamiento caótico, la interpretación más inmediata de tal función y, con ella, de la entropía, resulta muy cercana a la interpretación subjetiva de Gibbs, según la cual el aumento de la entropía expresa la falta de conocimiento preciso del microestado en que se encuentra el sistema. Pero ésta es, precisamente, la interpretación que Prigogine tanto se empeña por rechazar.

Conclusiones.

Este análisis pretende contribuir a poner de manifiesto el carácter infructuoso del intento de Prigogine por brindar una respuesta adecuada a la objeción de Loschmidt, en el marco de su programa de fundamentación objetiva de la irreversibilidad. Los argumentos de

Prigogine basados en la teoría del caos se apoyan en una incorrecta inferencia de conclusiones ontológicas a partir de consideraciones gnoseológicas.

Esto nos lleva acompartir la opinión de Heinz Pagels quien, en su reseña de Order out of Chaos, sostiene que:

"while this book contains much that is new and correct, all too often that which is correct is not new and which is new is not correct." (Pagels, 1985, pp.97-98)

Bibliografía.

Kuhn, T. (1980), La Teoría del Cuerpo Negro y la Discontinuidad Cuántica, Alianza, Madrid.

Prigogine, I. & Stengers, I. (1991), Entre el Tiempo y la Eternidad, Alianza, Buenos Aires.

Casati, G. (1991), "De los Billares al Caos de los Atomos", Mundo Científico, Vol.11, N°115.

Pagels, H. (1985), "Is the Irreversibility We See a Fundamental Property of Nature?", Physics Today, Enero-95, pp.97-99.