

La Segunda Ley de la Termodinámica

# Sobre esas presuntivas *aguas del tiempo*

por Guillermo Mattei\*  
gmattei@df.uba.ar

*Nacida en el siglo XIX, acreedora de la Revolución Industrial, perturbación para matemáticos, casi un mandamiento para físicos, portadora del mismísimo enigma de la realidad, fascinación de filósofos y poetas, la Segunda Ley de la Termodinámica, o Ley de la Entropía, dibuja inagotables laberintos borgeanos en el conocimiento humano.*

**D**esafío. Una de las dos citas de Borges que siguen es apócrifa.

“Nietzsche recurre a la energía; la Segunda Ley de la Termodinámica declara que hay procesos energéticos que son irreversibles. El calor y la luz no son más que formas de la energía. Basta proyectar una luz sobre una superficie negra para que se convierta en calor. El calor, en cambio, ya no volverá a la forma de luz. Esa comprobación de aspecto inofensivo e insípido, anula el ‘laberinto circular’ del Eterno Retorno.” Jorge Luis Borges, “La doctrina de los ciclos” (*Historia de la eternidad*).

“He dicho que los hombres de ese planeta conciben el universo como una serie de procesos que se desenvuelven menos de modo sucesivo en el tiempo que en el espacio. En los diccionarios de Tlön no hay palabra alguna que signifique *ahora* ni es exagerado afirmar que la existencia admite dos sentidos temporales. Las humaredas en el horizonte convergen hacia los campos incendiados reduciéndolos a un cigarro a medio apagar. Los conceptos *causa* y *efecto*, en Tlön, no encierran una petición de principio sobre el problema de las simetrías temporales. Saben que las causas de las cosas pueden estar en el futuro y los efectos en instantes pretéritos”. Jorge Luis Borges, “Tlön, Uqbar, Orbis Tertius” (*Ficciones*).

Correcto. La primera cita es verdadera y, a la vez, constituye una pequeña evidencia de la vasta cultura de un erudito de la primera mitad del siglo XX. La segunda es una (¿irreverente?) simulación que pretende poner en la letra de Borges algunos otros aspectos básicos de la realidad explorados profundamente por la física en la segunda parte de esa centuria. Sin embargo, y aunque no lo parezca, en ninguna de las dos citas hay ficción. Un imaginario testista noruego de literatura latinoamericana afirmaría: “Las citas refieren al problema aparente que enfrenta al tiempo consciente de los seres humanos, que parece fluir, con el tiempo reversible del mundo físico de la relatividad y de la cuántica. Sin embargo, hay un puente entre la percepción humana del pasado, presente y futuro y la evolución de los procesos naturales: La Segunda Ley de la Termodinámica.”

**Una primera enciclopedia de Tlön Vol. XI**

Alfred Hitchcock personalmente filma la toma. La actriz Janet Leight deja caer una copa con vino y la cámara registra el choque contra el piso. La copa, que inicialmente está completa y llena sobre la mano, termina rota y con el vino despararramado según la topografía del piso. Copa y vino siguen las mismas leyes de caída



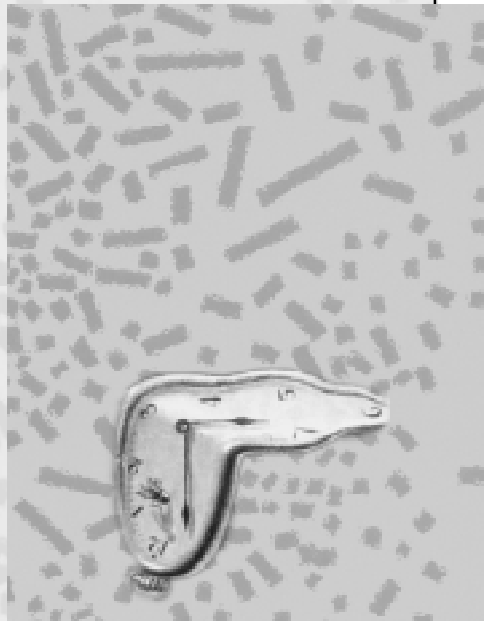
## Entropía y algo más

La Segunda Ley de la Termodinámica esconde mucho más de lo que muestra. Emparentada con los mismísimos orígenes de la realidad, para muchos científicos es la más perfecta de las leyes físicas. Cualquier modelo físico puede ser insuficiente para describir tal o cual aspecto de la realidad, puede quedar incluido en otro modelo más abarcativo y nada de esto perturbará el equilibrio emocional de sus autores, pero violar la Segunda Ley es caer en el averno científico más abyecto. Einstein decía: “Es la única teoría física de contenido universal sobre lo que estoy convencido que, dentro del marco de la aplicabilidad de sus conceptos básicos, nunca será superada”. No se ha encontrado ni la más mínima violación a la Segunda Ley y, tal como la Primera Ley, es precisa e independiente no sólo de los detalles de los modelos sino del hecho de que la materia esté constituida por partículas interactuantes.

Su estructura formal parece no gozar del beneplácito de los matemáticos: “Cada matemático sabe que es imposible entender un curso básico de termodinámica”, dijo el renombrado especialista Víctor Arnold hace una década. Aún hoy se discute la consistencia de sus variadas formulaciones.

Muchos filósofos reconocieron en la Segunda Ley diferentes trazos fundamentales de la existencia. Pío XII encontró la evidencia de un ser superior que daba origen al universo con un valor bajo de entropía a partir del cual procedía la inevitable degradación. Engels veía una contradicción al materialismo dialéctico en tanto argumento opuesto a la perfectibilidad humana.

El ecólogo Jean Paul Deléage ve la Segunda Ley como una llave para entender y resolver los problemas económicos que aparecen, cada vez más a escalas planetarias, durante la fase final del proceso productivo en la forma de acumulación de desperdicios.



Muchos historiadores parten de la Segunda Ley como una reorientación de la *Dialéctica de la Naturaleza* engeliana ya que “los seres humanos no son inmunes a estos procesos que tienen lugar en lo más profundo de la materia misma”.

Su impacto en la tecnología está relacionado nada menos que con la comprensión de los motores térmicos que inauguraron la Era Industrial.

En los años setenta comienzan las primeras aplicaciones del concepto de entropía a la economía en un esfuerzo por entender mejor las relaciones entre los subsistemas de un sistema planetario que tiene, entre otras perspectivas, el agotamiento de las fuentes convencionales de energía, el aumento de la población y las crecientes desigualdades sociales. Algunas corrientes marxistas plantean reformulaciones que incluyen a la Segunda Ley en el diseño de las regulaciones de la relación entre subsistemas, mientras el capitalismo, por su parte, solo parece ser la encarnación paradigmática de un sistema aislado librado a esta ley fundamental de la Naturaleza. ¿Aquello de que la prosperidad de algunos países es consecuencia de la degradación de otros tendrá que ver con la Segunda Ley?

que la manzana de Newton. Pero la física enseña que estas leyes son reversibles en el tiempo. Es decir, pasar para atrás la filmación de la caída no es físicamente ilógico: el vino disperso se aglutina, los pedazos de vidrio se juntan para recomponer la copa, el conjunto *salta* del piso a la mano de la actriz. De hecho, la película de Hitchcock al revés es la realidad del hipotético Tlön.

Aunque no parezca, los argumentos anteriores no se pergeñaron en la mente de un físico luego de reiterados brindis con vino. La energía adquirida en la caída debe transformarse en calor. Los pedazos de vidrio y el vino en las baldosas están levemente más calientes que antes del vuelo. La energía en forma de calor disipado es la cantidad justa y necesaria para retrotraer el movimiento. La ley física que describe la imposibilidad de perder energía cuando el calor cuenta, es la Primera Ley de la Termodinámica. La naturaleza temporalmente simétrica de esta ley guarda el milagro de la recomposición. ¡Pero nunca nadie vio semejante cosa!

Los llamados movimientos térmicos de los átomos en los fragmentos de copa, vino y baldosas son tan desordenados que solo una combinación ridículamente precisa de ellos podría recomponer la copa llena. Sin embargo, en Tlön, tales fenómenos serían normales siempre y cuando sucedieran *después* de que ocurriera un cambio a gran escala en el sistema copa-vino, tal como romperse y desparramarse. Los movimientos precisamente coordinados son aceptables en tanto efecto de una causa que reside en un cambio a gran escala.

La palabras *causa* y *efecto*, y su uso cotidiano, encierran implícitamente la noción de la asimetría *pasado* y *futuro*, aunque, desde el punto de vista físico, cualquier ser humano tendría que estar dispuesto a encontrar causas en el futuro tal

como lo hacen los tlönistas. Las leyes físicas no distinguen evoluciones hacia el pasado o hacia el futuro. En la dirección *normal* del tiempo, las causas preceden a los efectos pero, para *el otro lado*, el futuro (copa rota y vino derramado) es causa del pasado (copa llena de vino).

Según explica el famoso físico británico Roger Penrose en su libro *La nueva mente del Emperador*, “Si bien las recomposiciones de copas rotas son hechos físicamente plausibles, lo que aparenta ser imposible es su coexistencia con los fenómenos *normales*. Vivimos en un mundo donde, de alguna manera, las causas se empecinan en preceder a los efectos o, más técnicamente, los movimientos exactamente coordinados de un grandísimo número de pequeñas partículas ocurren sólo después de algún cambio a gran escala del objeto en estudio y no antes”. ¿El porqué? La magnitud que los físicos llaman *entropía* (ver recuadro “Desafío para padres”) tiene la respuesta.

En términos generales, a partir de un determinado estado del sistema en estudio, la entropía aumenta siempre en ambas direcciones del tiempo. Sin embargo, en caso de que algún condicionamiento obligue a la entropía a ser baja en el pasado, entonces no le quedará otra que exclusivamente subir hacia el futuro. Por ejemplo, el gas retenido adentro de la botella por la tapa de una gaseosa no tendrá más opción que la de expandirse por la habitación una vez producido el destape. Hubo condiciones fundamentalísimas en el origen del universo que hicieron las veces de la tapa de la gaseosa y todo comenzó con baja entropía. Ahí el origen de la Segunda Ley de la Termodinámica: la entropía de un sistema aislado nunca decrece o, más estrictamente, crece en transformaciones irreversibles o permanece constante en las reversibles. Ahí la asimetría temporal.



### Desafío para padres

Para acercarse al concepto de entropía (que significa “transformación” en griego), el físico Kip Thorne aporta una simpática experiencia generalizada entre los padres contemporáneos: ordenar el cuarto de un hijo. Valen algunas simplificaciones poco realistas pero que aportan claridad a las ideas.

El cuarto no tiene muebles, su piso cuadrado está formado por cien baldosas (diez filas de diez) y el criterio de orden paterno es tirar al voleo veinte juguetes a la fila norte de baldosas, sin importar de qué juguete se trate y en qué baldosa caen. ¿De cuántos modos pueden aterrizar los juguetes? El primer juguete podría caer en cualquiera de las diez baldosas, el segundo también y así sucesivamente hasta el vigésimo: es decir de “veinte-veces-diez” (diez a la veinte,  $10^{20}$ ) maneras diferentes. Dado que es un número muy grande para escribir, su logaritmo decimal (número de factores diez que deben multiplicarse para obtener el número en cuestión), facilita las cosas. En este caso vale veinte. La entropía del cuarto ordenado por el padre tiene que ver con la cantidad “veinte”.

Sin embargo, el niño naturalmente desordena y desparrama los juguetes entre las cien baldosas posibles de su cuarto. Ahora, el número de maneras en las que los juguetes pueden caer sobre las baldosas, con razonamiento análogo al anterior, son “veinte-veces-cien” (cien a la veinte,  $10^{20}$ ). Pero “veinte-veces-cien” es equivalente a “cuarenta-veces-diez” (diez a la cuarenta,  $10^{40}$ ). El logaritmo de este número es cuarenta y así la medida de la entropía, en este caso, será “cuarenta”.

La entropía del cuarto sube de veinte a cuarenta con la intervención del niño y la entropía del cuarto baja de cuarenta a veinte con la intervención del padre. A mayor entropía, mayor desorden. A menor entropía, es necesario dar más información: “juguetes en la fila norte” tiene mayor contenido informativo que “juguetes en todo el cuarto”.

En una versión un poco más realista de esta historia familiar, sucede algo parecido con el dato adicional de que el padre termina cansado, acalorado y fastidiado: sus músculos, los reguladores térmicos de su cuerpo y su ánimo pagaron las consecuencias. El aire de la habitación recibió un poco del calor corporal del padre. La entropía del cuarto bajó por la acción externa del padre. La entropía del padre tendió a subir, pero descansando un poco, transpirando y pasando a actividades más placenteras logró compensar esa subida. El aire de la habitación se calentó (mínimamente, pero inevitablemente recibió el calor del cuerpo paterno) y su entropía subió. La entropía de todo el universo subió. Así las cosas, finalmente y pase lo que pase, la entropía del universo siempre sube, dicta la Segunda Ley. El universo tiende a desordenarse por más que la infinidad de sus partes constitutivas jueguen a intercambiar entropía entre sí.

Penrose explica que “los estados de alta entropía son los estados ‘naturales’ que no necesitan más explicación, pero los estados de baja entropía en el pasado son un enigma”. El hombre es un enigma.

Los científicos pueden afirmar, con sus cálculos, que los seres vivos son sistemas de baja entropía y alta organización. Entre otras formas vitales, el hombre adquiere energía ordenada del oxígeno y de los alimentos, con bajos niveles de entropía, y libera energía desordenada en forma de calor, con altos niveles de entropía. El juego de la vida, en todos sus órdenes, se llama “compensar la subida de la entropía propia, que dicta la Segunda Ley, recurriendo a otras fuentes de baja entropía”. Los animales, las plantas y el petróleo son las fuentes de las que se surte el hombre, por ahora, como eslabón

final de una cadena de baja entropía que empieza en el Sol.

#### El piso de las tormentas y el fuego del aire

El Sol es una concentración localizada de alta temperatura y baja entropía en un frío y desordenado mar espacial. Para beneficio de las formas terrícolas organizadas, el Sol provee radiación ordenada de baja entropía y la Tierra devuelve al entorno la forma más desordenada y entrópica de energía: el calor.

¿Cómo logra el Sol mantenerse desde hace miles de millones de años en esta situación? El juego entre el colapso gravitatorio, debido a su gran masa, y la fuerza expansiva de las reacciones term nucleares en su interior da por resultado una fuente, por ahora estable, de radiación de baja entropía. Penrose explica: “en

los mecanismos de concentración gravitatoria de gas interestelar difuso de materia, que forman estrellas tales como nuestro Sol, reside la respuesta al enigma de la baja entropía en el pasado y, en consecuencia, de nuestra Segunda Ley”.

Precisamente, el primer eslabón de la cadena de baja entropía que condicionó todo el devenir posterior de la naturaleza, incluido el hombre, es el gas difuso de los orígenes del universo. En otras palabras, todos los caminos por entender el origen de la Segunda Ley y la asimetría temporal conducen a los arrabales del conocimiento que desvelan hoy a muchos físicos. Algo así como el personaje borgiano de *Historia de la Eternidad*—el mismísimo Borges—, que busca certezas sobre el tiempo en “esas calles penúltimas” donde “el callejón, ya campeano, se desmoronaba hacia el Maldonado”. ■

\* Asistente de la Coordinación de los Laboratorios Básicos de Enseñanza del Departamento de Física, FCEyN.

## Los autores más destacados del pensamiento universal en Ariel y Crítica

Los mejores textos universitarios y de divulgación científica al alcance de todos



Grupo  Planeta [www.editorialplaneta.com.ar](http://www.editorialplaneta.com.ar)