

ENTROPÍA: UN BREVE RECORRIDO POR LA HISTORIA

Miranda A., Ortiz-Alonso¹

¹ Facultad de Agronomía, UANL, Campus de Ciencias Agropecuarias - UANL, Calle Fco. Villa s/n, Col. Ex-Hacienda "El Canada", General Mariano Escobedo, Nuevo León, México, C.P. 66054.

Imagen ilustrativa / Fuente: Internet.

Entropía de Clausius

La termodinámica es la parte de la física que se dedica al estudio de las transformaciones de energía, en las cuales intervienen el calor, el trabajo mecánico y otros aspectos de la energía; así como la relación que existe entre las transformaciones y propiedades de la materia.

Inicialmente la termodinámica surgió del estudio de la producción de trabajo mecánico a partir de fuentes de calor, y su interés se centró en las aplicaciones técnicas de las máquinas térmicas. Desde el punto de vista histórico, la termodinámica se desarrolló durante los siglos XVIII y XIX cuando las nociones de calor y temperatura no se comprendían completamente, hasta llegar a su formulación actual. Uno de los conceptos que no se comprendían en el inicio de la termodinámica, y que aun sigue siendo

un motivo de debate e incompreensión es el de entropía.

Para atestiguar el nacimiento del concepto de entropía, nos tenemos que remontar hasta el año 1865; en este año Rudolf Clausius en la escritura de sus Memorias, introdujo y definió el concepto de entropía como *la magnitud que mide la parte no utilizable de la energía para realizar un trabajo*. Clausius describe en sus Memorias los estudios sobre la máquina de Carnot, e intentó explicar las transformaciones entre calor y trabajo, que posteriormente se denominaría el principio de equivalencia de Clausius.

A las transformaciones entre calor y trabajo, Clausius las denominó entropía, palabra que etimológicamente viene del griego "tropos" que significa transformación, además, denotó la entropía con el símbolo S , el cual prevalece hasta nuestros días. Clausius considera como transformaciones equivalentes a aquellas que pueden reemplazarse mutua-

mente, y para las cuales se cumple la relación matemática Q/T , donde Q denota al calor y T a la temperatura. También intentó dar respuesta a la pregunta, ¿cómo el calor contenido en un cuerpo puede producir trabajo? En respuesta a esta pregunta, introduce una visión microscópica al establecer que el trabajo lo realiza un cuerpo, en virtud de una modificación de su arreglo de partículas.

Entropía de Boltzmann

Basado en este último razonamiento, Ludwig Boltzmann alrededor del año 1872 se propuso construir una descripción más precisa del movimiento de partículas microscópicas y su relación con el concepto de calor; de tal manera, que formuló el enfoque microscópico de la entropía. En este enfoque el movimiento de las partículas esta descrito por la distribución de velocidades de Maxwell, y a partir de ahí, Boltzmann establece que: *desde el punto de vista de la mecánica, cualquier arreglo de partículas en un contenedor es posible. Sin embargo, es posible distinguir dos distribuciones, una molarmente ordenada, la cual se relaciona con la velocidad de las partículas y una molecularmente ordenada que tiene que ver con el arreglo de las partículas en el espacio.*

Boltzmann afirmó que un gas confinado en un recipiente, a través de su expansión natural, pasará de una distribución molarmente ordenada y molecularmente ordenada hasta una distribución molarmente desordenada y molecularmente desordenada, respectivamente. Por lo tanto, en la formulación de Boltzmann es posible se distinguir dos tipos desorden: molar y molecular; además, concluye que la distribución de velocidades de las moléculas de un gas se acerca cada vez más a la distribución más probable, la cual es un estado molecularmente desordenado. A partir de estas consideraciones estadísticas, Boltzmann encontró que la entropía quedaba expresada por un logaritmo natural del número de estados posibles en los que puede encontrarse un gas.

Actualmente, se considera a la entropía como la medida del desorden, no obstante, Boltzmann, no observó a la entropía como un desorden, sino que la consideró como una medida de la probabilidad de los estados. El desorden molecular solo quedo expresado como una suposición necesaria a su formulación matemática, la cual se otorgó en el año 1900, cuando Max Planck dio la forma conocida de la ecuación de la entropía de Boltzmann.

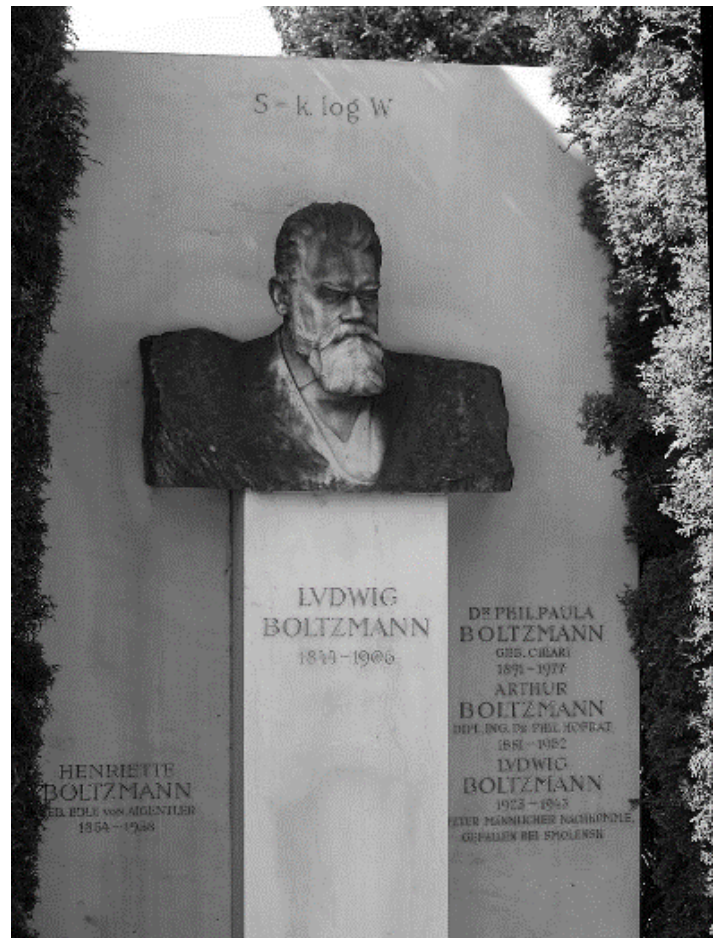


Figura 1. Tumba de Ludwig Boltzmann, con su ecuación de la entropía. Tomado de De Daderot de Wikipedia en inglés.

Entropía de Schrödinger

La mecánica cuántica introduce un cambio en los conceptos fundamentales de la mecánica clásica, pues además de aceptar la teoría corpuscular de la materia, modifica los conceptos de movimiento de una partícula. En la mecánica clásica se da por hecho que todas las coordenadas y velocidades, se pueden medir con exactitud dentro de los límites experimentales, no así en la mecánica cuántica, en donde además del límite experimental, existe un límite teórico, por debajo del cual no se puede despreciar la influencia del proceso de medición sobre el sistema a medir. Por consiguiente, la medida de la coordenada de una partícula cambia necesariamente su impulso en mayor cantidad, cuanto más precisa se realiza la medición de la coordenada. Este principio de incerteza, trae como consecuencia en la termodinámica, que los procesos de transferencia de energía cambian de una forma continua a nivel macroscópico, a una transferencia en forma discreta a nivel microscópico, en otras palabras, a través de niveles de energía.

En la mecánica estadística, un sistema siempre se encuentra en el estado de más alta energía; en la mecánica cuántica, el estado de más alta energía es solo uno de los niveles cuánticos de energía, en los cuales el sistema puede encontrarse. Lo que nos lleva a la cuestión: ¿cuál sería entonces la distribución de niveles cuánticos de energía, en la que el sistema tendrá la mayor probabilidad de encontrarse? Schrödinger en 1944 tomó como punto de partida la mecánica estadística, al establecer el concepto de peso estadístico o la probabilidad de que una partícula se encuentre en un nivel de energía determinado. En base a esto, definió la distribución más probable de que un sistema de partículas se encuentre en un determinado nivel de energía, donde designó un término logarítmico indicando la cuantización de la energía y un término Q/T similar al de Clausius para introducir el efecto cuántico en la termodinámica. Llegando así a su formulación de entropía, combinando un término clásico Q/T con un término logarítmico similar al de Boltzmann.

Entropía de Gibbs

En 1873, Josiah Willard Gibbs resaltó el papel de la entropía en la termodinámica, siguiendo los desarrollos de la entropía de Clausius, llegó a formular la versión clásica de la primera ley de la termodinámica en forma diferencial (la cual aparece muy común en los libros de texto actuales de termodinámica), en una expresión en donde solo aparecen variables de estado y la entropía es una de esas variables. Más adelante en 1902, realizó una formulación más general de la mecánica estadística, en particular, de las ideas de Boltzmann al considerar solo los argumentos probabilísticos a entidades de particular o moléculas. En palabras de Gibbs: *nosotros imaginamos a un gran número de sistemas de la misma naturaleza, pero que difieren en su configuración y velocidades que tienen en un instante dado, además estos sistemas pueden tener cualquier combinación posible de configuraciones y velocidades.* A este gran número de sistemas Gibbs lo denominó ensemble, e introdujo diferentes tipos de ensembles, dentro de los cuales destaca el ensemble canónico, es decir, sistemas con la misma energía. Utilizando su concepto de energía libre, y el concepto de ensemble, realiza su formulación de entropía como una generalización aplicable a todos los sistemas termodinámicos y sus aplicaciones a cualquier temperatura terrestre. De igual forma que Boltzmann y Schrödinger introduce un término logarítmico, solo que a diferencia de ellos es un logaritmo natural del número entero dos. Donde el número dos representa las dos pro-

habilidades en los que el electrón puede alcanzar la energía cero: espín hacia arriba y espín hacia abajo, por lo tanto, la entropía de Gibbs establece también una conexión de la termodinámica con la mecánica cuántica.

Entropía de Shannon

La publicación de la Teoría de la información de Claude Shannon crea un modelo matemático para poder descifrar los sistemas de comunicación por medio de entidades de probabilidad. El concepto de información es definido estrictamente en términos estadísticos, bajo el supuesto que puede ser tratado de forma semejante a como son tratadas las cantidades físicas como la masa y la energía. De hecho, el tratar a la información como una cantidad física es una premisa fundamental de la teoría de la información. Esta teoría es la base sobre la cual se ha creado toda la teoría actual de la codificación y la comunicación. Su objetivo es establecer los límites de cuanto se puede llegar a comprimir la información y definir la mayor velocidad a la cual se puede transmitir tal información. La teoría se basa principalmente en el uso de una función logarítmica como una medida de la información, y se respalda el uso de esta función porque los parámetros utilizados en ingeniería tales como el tiempo, el ancho de banda y el número de réplicas, tienden a variar linealmente con el logaritmo.

Shannon en 1949, estableció su formulación de entropía basado en el uso de la teoría de la probabilidad, la inspiración de Shannon de adoptar la palabra entropía en su teoría de la información, surgió de la estrecha similitud matemática entre su formulación y el de Boltzmann y Gibbs. No obstante, en el nivel práctico cotidiano, los vínculos entre la entropía de la información y la entropía termodinámica no son evidentes. En los procesos físicos y químicos, las cantidades de entropía son extremadamente grandes en comparación con cualquier proceso en la compresión de datos o procesamiento de señales. Otro aspecto a considerar, es que, en la termodinámica clásica, la entropía se define en términos de cantidades macroscópicas, y no hace ninguna referencia a ninguna distribución de probabilidad, punto central en la definición de la teoría de la información. Sin embargo, existen investigadores que especifican que la entropía termodinámica, tal como se explica mediante la mecánica estadística, debe verse como una aplicación de la teoría de Shannon: la entropía termodinámica se interpreta como una proporción a la cantidad de información adicional necesaria

para definir el estado microscópico detallado del sistema, que permanece sin comunicar mediante una descripción únicamente en términos de las variables macroscópicas de la termodinámica clásica donde la proporción viene dada por la constante de Boltzmann.



Figura 2. Claude Elwood Shannon (1916-2001). Tomado de Konrad Jacobs, Erlangen.

Dinámica, caos y entropía

La noción de dinámica ha evolucionado con el paso del tiempo, ahora cuando se habla de dinámica, no solo entendemos el movimiento de los cuerpos celestes y los sistemas mecánicos sólidos, sino cualquier cambio con respecto al tiempo de una o más variables. La dinámica se define como la parte de la física que describe la evolución temporal de un sistema físico, en relación con las causas que provocaron los cambios de estado de movimiento. En la actualidad se suele dividir a la dinámica en dos partes, lineal y no lineal, en donde estos términos son utilizados en base a la estructura matemática de las ecuaciones de movimiento de los objetos bajo estudio. En lo que nos

conciere, nos centraremos en los sistemas dinámicos no lineales, los cuales poseen las siguientes características:

1. No existe una relación causa-efecto.
2. El resultado final es mayor a la suma de cada término (emergencia).
3. Tienen alta sensibilidad a las condiciones iniciales, no siempre la misma causa produce el mismo efecto.
4. Son inestables.

De la cuarta característica, la inestabilidad se produce un tipo de movimiento denominado caos. El término caos aparece desde tiempos remotos en las grandes civilizaciones de la antigüedad, con la finalidad de explicar el fin del mundo, y, por ende, del ser humano, tal es así que, en las cosmogonías de propias de cada cultura, se le asocio al caos un significado mítico relacionado con el desorden. Hasta hoy en día sigue prevaleciendo este significado mítico, sobre todo en el lenguaje coloquial caos es sinónimo de desorden o falta de estructura. Sin embargo, cuando nos referimos a la ciencia, existe otro tipo de caos, denominado caos determinista, es decir, una conducta compleja e impredecible que se deriva de las ecuaciones del movimiento del sistema no lineal.

Existen indicadores que nos permiten identificar el comportamiento caótico, además de detectar el paso de un comportamiento regular al caos. A grandes rasgos, podemos dividir los indicadores de caos en dos grandes grupos:

1. Aquellos que miden de algún modo como se pierde la información a lo largo de una evolución temporal, como el exponente de Lyapunov o la entropía de Kolmogorov.
2. Los que se refieren al carácter fractal de la señal del atractor en el espacio de las fases.

La entropía de Kolmogorov, se formuló en la década de 1970 y se definió como el principio que mide la pérdida de información a lo largo de la evolución de un sistema dinámico. De acuerdo con las ideas de Shannon, la entropía proporciona un valor sobre la cantidad de información que se necesita para localizar el sistema en un determinado estado. En los sistemas dinámicos no lineales que presentan caos, el movimiento comienza a partir de las condiciones iniciales predeterminadas y seguirá una trayectoria a través del tiempo. Conforme el sistema va avanzando en la trayectoria, va perdiendo progresivamente la información

que poseía inicialmente, hasta que llega a un momento en que la ha perdido toda, y a partir de ese momento es imposible hacer alguna predicción sobre el sistema. Andrei Kolmogorov, al igual que Boltzmann, Gibbs y Shannon, también introduce el término logarítmico en su formulación de entropía, con la salvedad de que introduce un logaritmo adicional para la evolución temporal.

Agujeros negros y entropía

Se considera a la termodinámica de los agujeros negros como una rama de la astrofísica que se desarrolló a partir del descubrimiento de la analogía entre los principios de la termodinámica y algunas propiedades de los agujeros negros. La termodinámica de los agujeros negros tuvo su origen con Stephen Hawking en 1975, al plantear el fenómeno de la evaporación de los agujeros negros, el cual establece que un agujero negro no es un cuerpo absolutamente oscuro, sino que podría emitir una cantidad débil de radiación térmica.

La teoría de la relatividad general establece que un agujero negro es un ente matemático del cual ni la luz visible, ni cualquier tipo de radiación puede escapar de él. La termodinámica establece que cualquier sistema debe alcanzar el equilibrio térmico entre sus subsistemas, esta condición de equilibrio exige que un agujero negro emita radiación, sin embargo, desde el punto de vista de las teorías clásicas, esto es imposible.

En base a principios de la mecánica cuántica, Hawking indicó un mecanismo por el cual los agujeros negros pueden emitir radiación y cumplir con las leyes de la termodinámica. Este mecanismo es el de una fluctuación cuántica, es decir, un proceso en donde la creación de pares partícula-antipartícula durante instantes de tiempo muy breves a partir del vacío. Los pares partícula-antipartícula son virtuales, pero la intensa gravedad del agujero negro los transforma en reales. Todos los pares se desintegran rápidamente entre sí, devolviendo la energía prestada para su formación. Lo que Hawking demostró fue que en las cercanías de un agujero negro, las fluctuaciones cuánticas del vacío muestran un comportamiento peculiar: la antipartícula es capturada por el agujero negro y la partícula escapa al exterior, dicho de otra manera, al capturar preferentemente antipartículas, el agujero negro se muestra a un observador externo como un sistema que emite partículas o radiación. La pérdida de radiación implica que el agujero negro deba de perder masa (de ahí el término evaporación), pero en un agujero negro,

la temperatura es inversamente proporcional a su masa, así que, a medida que el agujero pierde masa, se calienta y como conclusión debe tener una temperatura distinta de cero y, por ende, una entropía. Hawking demostró, que la entropía de un agujero negro debía ser proporcional al área de su horizonte de eventos, debido que, durante la pérdida de masa por evaporación, se haría cada vez más pequeño.

Finalmente, Hawking se basó en la teoría de información de Shannon para interpretar la información perdida en un agujero negro, además de considerar los procesos de fluctuaciones cuánticas en el vacío, a escalas de tiempo muy pequeñas llegó a su formulación de entropía para un agujero negro, en la cual prevalece el término del logaritmo natural, además de las constantes fundamentales de la naturaleza, como la constante de gravitación universal, la velocidad de la luz y la constante de Planck. De hecho, matemáticamente la combinación de las constantes mencionadas y el logaritmo natural, da como resultado una constante de proporción de un cuarto, y por consiguiente la entropía de un agujero negro es proporcional a la cuarta parte del área del horizonte de eventos.

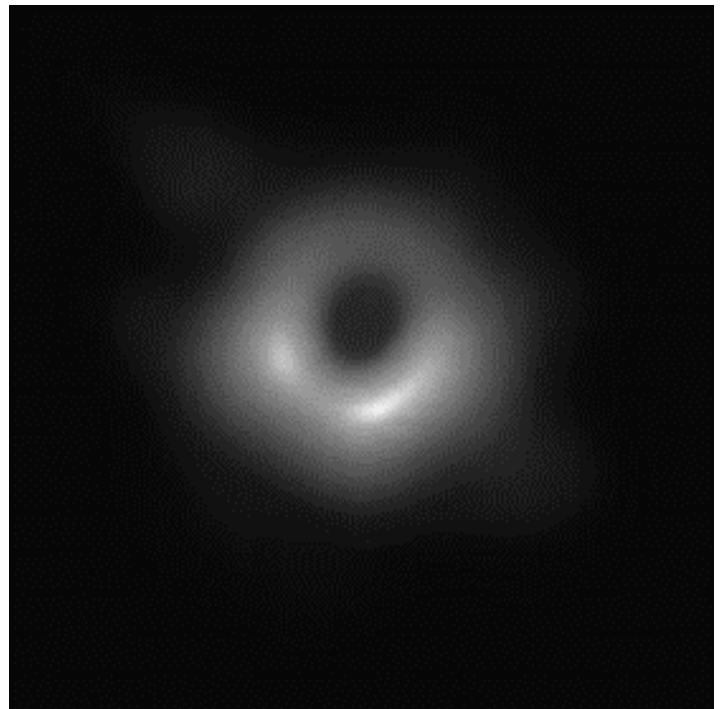


Figura 3. Primera imagen de la esfera de fotones de un agujero negro supermasivo ubicado en el centro de la galaxia M87, presentado el 10 de abril de 2019 por el consorcio internacional Telescopio del horizonte de sucesos. Tomada de Event Horizon Telescope.

(A) Hembra *C. sativa*; (B) Porción de las flores femeninas; (C) Flor femenina pistilada (estigmas, estilo, bráctea perigonal y estípula); (D) Porción de las flores masculinas que muestran anteras; (E) Semillas maduras. Traducido de (Farag and Kayser, 2017).

Conclusiones

A lo largo de este breve artículo hemos podido constatar que casi todas las formulaciones de entropía, matemáticamente poseen un término logarítmico. Este término normalmente se asocia con la pérdida de "algo", ya sea información en la teoría de Shannon, Kolmogorov o de Hawking en los agujeros negros. También, puede estar ligado a la pérdida de una cantidad física como el calor en los modelos clásicos de Clausius y Gibbs. Más aun, Schrödinger y Boltzmann nos interpretan el logaritmo como una distribución de probabilidad. No obstante, aun en nuestros días es muy compleja la interpretación cualitativa del concepto de entropía, en ocasiones aun muchos profesores y estudiantes no llegan a comprender a profundidad este enigmático concepto. Por lo que se recomienda al lector revisar la bibliografía si tiene interés en profundizar no solo en las distintas formulaciones matemáticas, sino también en sus correspondientes interpretaciones.

Finalmente hemos presentado algunos de los desarrollos de entropía históricamente más relevantes, empero, no es indicativo de que sean los únicos desarrollos de entropía, como lo acabamos de mencionar existen más formulaciones que merecen ser divulgadas, sin embargo, por el objetivo de este artículo nos extenderíamos mucho en el contenido, por lo que se deja al lector una invitación a investigar más sobre el intrigante concepto de entropía.

Bibliografía

- Benson, U. (2014). *Enseñanza de los fenómenos térmicos y la termodinámica: el aporte de la historia y la filosofía de la ciencia*.
- Calzetta, E. (2011). *Entropía*. Colección las ciencias y la matemática. Ministerio de Educación. Buenos Aires, Argentina.
- Falk, G. (1985). *Entropy, a resurrection of caloric-a look at the history of thermodynamics*. Eur. J. Phys. 6.
- Hacyan, S. (2003). *Los hoyos negros y la curvatura del espacio tiempo*. Colección la ciencia para todos. Fondo de Cultura Económica. México D.F.
- Jaynes, E. T. (1964). *Gibb vs Boltzmann entropies*. American Journal of Physics. Vol. 33.
- Muller, I. (2007). *A History of Thermodynamics. The Doctrine of Energy and Entropy*. Springer Berlin.
- Pancoatl, P. & Enriquez, R. (2024). Entropía de Kolmogorov-Sinai. Un caso de aplicación. Reporte Técnico No. 87. INAOE.
- Pinochet, J. (2019). *Stephen Hawking y los agujeros negros cuánticos*. Revista Mexicana de Física E. Vol. No.2.
- Sametband, M. (1999). *Entre el orden y el caos: la complejidad*. Colección la ciencia para todos. Fondo de Cultura Económica. México D.F.
- Shannon, C. E. (1948). *A Mathematical Theory of Communication*. The Bell System Technical Journal, Vol. 27.
- Ulloa Lugo, N. (2006). *Origen y evolución del concepto de entropía*. Representaciones e implicaciones para la enseñanza. Tesis de doctorado. UPN. México D.F.