

La variación de entropía nos muestra la variación del orden molecular ocurrido en una reacción química. Si el incremento de entropía es positivo, los productos presentan un mayor desorden molecular (mayor entropía) que los reactivos. En cambio, cuando el incremento es negativo, los productos son más ordenados. Entre la entropía y la espontaneidad de una reacción química se establece una relación que viene dada por la energía de Gibbs.

Entropía y termodinámica

La RAE recoge el concepto de entropía definido como la "magnitud termodinámica que mide la parte de la energía no utilizable para realizar trabajo y que se expresa como el cociente entre el calor cedido por un cuerpo y su temperatura absoluta."⁴

Dentro de la termodinámica o rama de la física que estudia los procesos que surgen a partir del intercambio de energías y de la puesta en movimiento de diferentes elementos naturales, la entropía figura como una especie de desorden de todo aquello que es sistematizado, es decir, como la referencia o la demostración de que cuando algo no es controlado puede transformarse y desordenarse. La entropía, además, supone que de ese caos o desorden existente en un sistema surja una situación de equilibrio u homogeneidad que, a pesar de ser diferente a la condición inicial, suponga que las partes se hallan ahora igualadas o equilibradas.

Esta idea de desorden termodinámico fue plasmada mediante una función ideada por Rudolf Clausius a partir de un proceso cíclico reversible. En todo proceso reversible la integral curvilínea de

$$\left| \frac{\delta Q}{T} \right.$$

solo depende de los estados inicial y final, con independencia del camino seguido (δQ es la cantidad de calor absorbida en el proceso en cuestión y T es la temperatura absoluta). Por tanto, ha de existir una función del estado del sistema, $S=f(P,V,T)$, denominada entropía, cuya variación en un proceso reversible entre los estados 1 y 2 es:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} .$$

Téngase en cuenta que, como el calor no es una función de estado, se usa δQ , en lugar de dQ . La entropía física, en su forma clásica, está definida por la ecuación siguiente:

$$\left| dS = \frac{\delta Q}{T} \right.$$

o, más simplemente, cuando no se produce variación de temperatura (proceso isotérmico):

$$\left| S_2 - S_1 = \frac{Q_{1 \rightarrow 2}}{T} \right.$$

donde S_2 es la entropía del estado final del sistema termodinámico, S_1 la entropía del estado inicial, $Q_{1\rightarrow 2}$ la cantidad de calor intercambiado entre el sistema y el entorno y T la temperatura absoluta expresada en Kelvin.

La unidad de entropía en el Sistema Internacional es: JK^{-1} , si bien, son frecuentes otras unidades como: calK^{-1}

Significado

El significado de esta ecuación es el siguiente:

Cuando un sistema termodinámico pasa, en un proceso reversible e isotérmico, del estado 1 al estado 2, el cambio en su entropía es igual a la cantidad de calor intercambiado entre el sistema y el medio, dividido por su temperatura absoluta.

De acuerdo con la ecuación, si el calor se transfiere al sistema, también lo hará la entropía, en la misma dirección. Cuando la temperatura es más alta, el flujo de calor que entra al sistema produce un aumento de entropía.

Las unidades de la entropía, en el Sistema Internacional, son el J/K (o Clausius), definido como la variación de entropía que experimenta un sistema cuando absorbe el calor de 1 julio a la temperatura de 1 kelvin.

Cuando el sistema evoluciona irreversiblemente, la ecuación de Clausius se convierte en una inecuación:

$$dS \geq \sum_{i=1}^n \frac{\delta Q_{TF_i}}{T_{FT_i}}$$

Siendo el sumatorio de las i fuentes de calor de las que recibe o transfiere calor el sistema y la temperatura de las fuentes. No obstante, sumando un término positivo al segundo miembro, podemos transformar de nuevo la expresión en una ecuación:

$$dS = \delta\sigma_p + \sum_{i=1}^n \frac{\delta Q_{TF_i}}{T_{FT_i}}$$

Al término σ_p , siempre positivo, se le denomina *producción de entropía*, y es nulo cuando el proceso es reversible salvo irreversibilidades fruto de transferencias de calor con fuentes externas al sistema. En el caso de darse un proceso reversible y adiabático, según la ecuación, $dS=0$, es decir, el valor de la entropía es constante y además constituye un proceso isoentrópico.

Cero absoluto

Solo se pueden calcular variaciones de entropía. Para calcular la entropía de un sistema, es necesario fijar la entropía del mismo en un estado determinado. El tercer principio de la termodinámica fija un estado estándar: *para sistemas químicamente puros, sin defectos estructurales en la red cristalina, de densidad finita, la entropía es nula en el cero absoluto (0 K) o -273.15 °C.*

Esta magnitud permite definir el segundo principio de la termodinámica, de la cual se deduce que un proceso tiende a darse de forma espontánea en un cierto sentido solamente. Por ejemplo: un vaso de agua no empieza a hervir por un extremo y a congelarse por el otro de forma espontánea, aun cuando siga cumpliéndose la condición de conservación de la energía del sistema (el primer principio de la termodinámica).

Entropía y reversibilidad

La entropía global del sistema es la entropía del sistema considerado más la entropía de los alrededores. También se puede decir que la variación de entropía del universo, para un proceso dado, es igual a su variación en el sistema más la de los alrededores:

$$\Delta S_{\text{universo}} = \Delta S_{\text{sistema}} + \Delta S_{\text{entorno}}$$

Si se trata de un proceso reversible, ΔS (universo) es cero, pues el calor que el sistema absorbe o desprende es igual al trabajo realizado. Pero esto es una situación ideal, ya que para que esto ocurra los procesos han de ser extraordinariamente lentos, y esta circunstancia no se da en la naturaleza. Por ejemplo, en la expansión isotérmica (proceso isotérmico) de un gas, considerando el proceso como reversible, todo el calor absorbido del medio se transforma en trabajo y $Q = -W$. Pero en la práctica real el trabajo es menor, ya que hay pérdidas por rozamientos, por lo tanto, los procesos son irreversibles.

Para llevar al sistema nuevamente a su estado original, hay que aplicarle un trabajo mayor que el producido por el gas, lo que da como resultado una transferencia de calor hacia el entorno, con un aumento de la entropía global.

Como los procesos reales son siempre irreversibles, siempre aumentará la entropía. Así como *la energía no puede crearse ni destruirse*, la entropía puede crearse pero no destruirse. Es posible afirmar entonces que, *como el universo es un sistema aislado, su entropía crece constantemente con el tiempo*. Esto marca un sentido a la evolución del mundo físico, que se conoce como principio de evolución.

Cuando la entropía sea máxima en el universo, esto es, cuando exista un equilibrio entre todas las temperaturas y presiones, llegará la muerte térmica del universo (enunciada por Clausius).

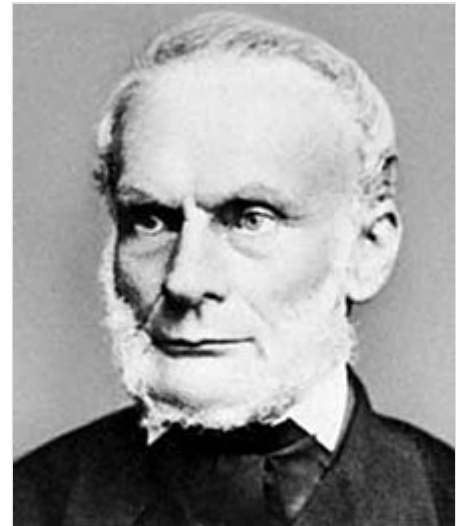
En el caso de sistemas cuyas dimensiones sean comparables a las dimensiones de las moléculas, la diferencia entre calor y trabajo desaparece y, por tanto, parámetros termodinámicos como la entropía, la temperatura y otros no tienen significado. Esto conduce a la afirmación de que el segundo principio de la termodinámica no es aplicable a estos microsistemas, porque realmente no son sistemas termodinámicos. Se cree que existe también un límite superior de aplicación del segundo principio, de tal modo que no se puede afirmar su cumplimiento en sistemas infinitos como el universo, lo que pone en controversia la afirmación de Clausius sobre la muerte térmica del universo.

Historia de la entropía

El concepto de entropía fue desarrollado en respuesta a la observación de que una cierta cantidad de energía liberada de reacciones de combustión siempre se pierde debido a la disipación o la fricción y por lo tanto no se transforma en trabajo útil. Los primeros motores de calor como el de Thomas Savery (1698), la

máquina de Newcomen (1712) y el Cugnot de vapor de tres ruedas (1769) eran ineficientes, la conversión de menos del 2 % de la energía de entrada en producción de trabajo útil; una gran cantidad de energía útil se disipa o se pierde en lo que parecía un estado de aleatoriedad inconmensurable. Durante los próximos dos siglos los físicos investigaron este enigma de la energía perdida, el resultado fue el concepto de entropía.

En la década de 1850, Rudolf Clausius estableció el concepto de sistema termodinámico y postuló la tesis de que, en cualquier proceso irreversible, una pequeña cantidad de energía térmica δQ se disipa gradualmente a través de la frontera del sistema. Clausius siguió desarrollando sus ideas de la energía perdida, y acuñó el término «entropía». Durante el siguiente medio siglo se llevó a cabo un mayor desarrollo. Recientemente, el concepto de entropía ha encontrado aplicación en el campo análogo de pérdida de datos en los sistemas de transmisión de información.



Fotografía de Rudolf Clausius

Interpretación estadística de la entropía

Entre 1890 y 1900 el físico austriaco Ludwig Boltzmann y otros desarrollaron las ideas de lo que hoy se conoce como física estadística, teoría profundamente influenciada por el concepto de entropía. Una de las teorías termodinámicas estadísticas (la teoría de Maxwell-Boltzmann) establece la siguiente relación entre la entropía y la probabilidad termodinámica:

$$S = k \cdot \ln \Omega,$$

donde S es la entropía, k la constante de Boltzmann y Ω el número de microestados posibles para el sistema (\ln es la función logaritmo natural). La ecuación asume que todos los microestados tienen la misma probabilidad de aparecer.

La ecuación se encuentra grabada sobre la lápida de la tumba de Ludwig Boltzmann en el Zentralfriedhof (el cementerio central) de Viena. Boltzmann se suicidó en 1906, profundamente deprimido, quizá por la poca aceptación de sus teorías en el mundo académico de la época.⁵

El significado de la ecuación es el siguiente:

La cantidad de entropía de un sistema es proporcional al logaritmo natural del número de microestados posibles.

Uno de los aspectos más importantes que describe esta ecuación es la posibilidad de dar una definición absoluta al concepto de la entropía. En la descripción clásica de la termodinámica, carece de sentido hablar del valor de la entropía de un sistema, pues solo los cambios en la misma son relevantes. En cambio, la teoría estadística permite definir la entropía absoluta de un sistema.



Tumba de Boltzmann en el cementerio central de Viena con la fórmula de entropía.

La entropía es una magnitud física básica que dio lugar a diversas interpretaciones, al parecer a veces en conflicto. Han sido, sucesivamente, asimilados a diferentes conceptos, como el desorden y la información. La entropía mide tanto la falta de información como (en función inversa) la información. Estas dos concepciones son complementarias. La entropía también mide la libertad de movimiento de las moléculas, y esto permite una interpretación coherente de las fórmulas de entropía y de los hechos experimentales. No obstante, asociar la entropía y el desorden implica definir el orden como la ausencia de libertad de movimiento.⁶ El desorden o la agitación guardan relación con la temperatura, interpretándose el aumento de esta como un estado de mayor energía de las moléculas, lo que conduce a un incremento de su movimiento y, por consiguiente, de la aleatoriedad de su posición y su velocidad en cualquier momento dado.

Entropía y desorden

Cuando la energía es degradada, dijo Boltzmann, se debe a que los átomos asumen un estado más desordenado. Y la entropía es un parámetro del desorden: ésta es la concepción profunda que se desprende de la nueva interpretación de Boltzmann. Por extraño que parezca, se puede crear una medida para el desorden; es la probabilidad de un estado particular, definido aquí como el número de formas en que se puede armar a partir de sus átomos

Jacob Bronowski. *El ascenso del hombre* (The Ascent of Man). Bogotá, Fondo Educativo Interamericano, 1979, p. 347, capítulo 10 "Un mundo dentro del mundo".

Coloquialmente, suele considerarse que la entropía es el desorden de un sistema, es decir, su grado de homogeneidad. Un ejemplo doméstico sería el de lanzar un vaso de cristal al suelo: tenderá a romperse y a esparcirse, mientras que jamás será posible que, lanzando trozos de cristal, se construya un vaso por sí solo. Otro ejemplo doméstico: imagínense dos envases de un litro de capacidad que contienen, respectivamente, pintura blanca y pintura negra; con una cucharita, se toma pintura blanca, se vierte en el recipiente de pintura negra y se mezcla; luego se toma pintura negra con la misma cucharita, se vierte en el recipiente de pintura blanca y se mezclan; el proceso se repite hasta que se obtienen dos litros de pintura gris, que no podrán reconvertirse en un litro de pintura blanca y otro de pintura negra; la entropía del conjunto ha ido en aumento hasta llegar a un máximo cuando los colores de ambos recipientes son sensiblemente iguales (sistema homogéneo).

Podemos considerar la homogeneidad, y la consiguiente pérdida de orden estructural, como un indicador de la entropía. Por tanto, el surgimiento de la vida supondría una disminución de la entropía, ya que la materia viva está más estructurada que su entorno inanimado. Así, por ejemplo, en un ser vivo encontramos una concentración altamente organizada de hasta 60 elementos de un total de 92 presentes en la naturaleza. Por otra parte, la dispersión de los elementos en la naturaleza tampoco es del todo homogénea; si consideramos por ejemplo, el hierro en nuestro planeta, vemos que se concentra principalmente en el núcleo de la Tierra (más de un 80% de la composición de este), mientras que la presencia de elementos más ligeros como el oxígeno no pasaría allí de un 5%. En cambio, en el mar, el hierro solo representa un 0,0000034 %, y el agua un 95 %. En un ser vivo como una sardina, la presencia de agua se reduce a un 45% y el hierro es de solo un 0,0022 % de su peso.



Noción popular de la entropía en las actividades y espacios humanos

Hay, por tanto, sistemas físicos que no siempre tienden al desorden, como la composición estructural de los planetas a consecuencia, entre otras cosas, de la acción gravitatoria; y otros aún más notables como los seres vivos, que manifiestan una clara tendencia al orden, en aparente contradicción con el aumento de entropía predicho por la Segunda Ley de la Termodinámica. No obstante, se trata de inversiones de entropía limitadas tanto en el tiempo como en el espacio, dentro de los que podemos considerar subsistemas de un sistema ampliado con el cual tiene lugar un intercambio de energía y/o materia, de modo que tales subsistemas son abiertos respecto al resto del sistema en su sentido más amplio, donde dicha ley se cumple inexorablemente, y la entropía total siempre aumenta.

Entropía como creadora de orden

A pesar de la identificación entre la entropía y el desorden, hay muchas transiciones de fase en la que emerge una fase ordenada y al mismo tiempo, la entropía aumenta (en dicha fase). En este artículo se muestra que esta paradoja se resuelve haciendo una interpretación literal de la famosa ecuación de Boltzmann $S = k \log W$. Podemos verlo en la segregación de una mezcla tipo coloide, por ejemplo cuando el agua y el aceite tienden a separarse. También en la cristalización de esferas duras: cuando agitamos naranjas en un cesto (esto es, bajo la acción de una fuerza externa), estas se ordenan de forma espontánea. De estos casos se deduce el concepto de fuerza entrópica o interacción, muy útil en la ciencia de polímeros o ciencia coloidal.⁷

El astrofísico Alan Lightman reconoció que a los científicos “les parece misterioso el hecho de que el universo fuera creado con este elevado grado de orden”. Agregó que “cualquier teoría cosmológica viable debería explicar en última instancia esta contradicción de la entropía”, es decir, que el universo no se halle en estado caótico.⁸

De acuerdo con Ilya Prigogine, galardonado con el Premio Nobel de Química en 1977, “la producción de entropía contiene siempre dos elementos dialécticos: un elemento creador de desorden, pero también un elemento creador de orden. Y los dos están siempre ligados”. Prigogine ejemplifica esta afirmación con el caso de un sistema compuesto de dos cajas comunicantes que contienen una mezcla de nitrógeno e hidrógeno. Si la temperatura del sistema es homogénea, también lo será la distribución del hidrógeno y el nitrógeno, pero si se somete al sistema a una constricción térmica se genera una disipación, un aumento de la entropía, pero también del orden, ya que el hidrógeno predominará en una de las cajas y el nitrógeno en la otra (fenómeno de termodifusión).⁹

Relación de la entropía con la teoría de la información

Véase también: Entropía (información)

Recientes estudios han podido establecer una relación entre la entropía física y la entropía de la teoría de la información gracias a la revisión de la física de los agujeros negros. Según la nueva teoría de Jacob D. Bekenstein el bit de información sería equivalente a una superficie de valor 1/4 del área de Planck. De hecho, en presencia de agujeros negros la segunda ley de la termodinámica solo puede cumplirse si se introduce la entropía generalizada o suma de la entropía convencional (S_{conv}) más un factor dependiente del área total (A) de agujeros negros existente en el universo, del siguiente modo:

$$S_{tot} = S_{conv} + \frac{kc^3}{4G\hbar} A$$

Donde, k es la constante de Boltzmann, c es la velocidad de la luz, G es la constante de la gravitación y \hbar es la constante de Planck racionalizada.

Los agujeros negros almacenarían la entropía de los objetos que engulle en la superficie del horizonte de sucesos. Stephen Hawking tuvo que ceder ante las evidencias de la nueva teoría y propuso un mecanismo nuevo para la conservación de la entropía en los agujeros negros.

Simplemente, al realizar un trabajo, se ocupa muy poca energía; la entropía se encarga de medir la energía que no es usada y queda reservada en un cuerpo.

La entropía como flecha del tiempo

Como se demuestra en el segundo principio de la termodinámica, de los dos únicos sentidos en que puede evolucionar un sistema el espontáneo es el que corresponde al estado del universo con una igual o mayor entropía. Se entiende por lo tanto que la entropía del universo tiene un único sentido: es creciente. Es equiparable al paso del tiempo, cuyo sentido a ojos de la vida humana es siempre el mismo.

El tiempo pasa y la entropía crece hasta alcanzar el punto de máxima entropía del universo, el equilibrio termodinámico. A modo tanto de cuestión filosófica como de cuestión científica este concepto recae inevitablemente en la paradoja del origen del universo. Si el tiempo llevara pasando infinitamente la entropía del universo no tendría sentido, siendo esta un concepto finito creciente en el tiempo y el tiempo un concepto infinito y eterno.

Véase también

- Aceleración
- Caos
- Dinámica de sistemas
- Equilibrio termodinámico
- Energía
- Energía libre de Gibbs
- Energía libre de Helmholtz
- Energía interna
- Entalpía
- Entalpía libre
- Entropía de formación
- Estructura disipativa
- Economía ecológica
- Exergía
- Fuerza
- Ilya Prigogine
- Ley de pérdida de exergía
- Masa
- Neguentropía
- Principio antrópico
- Principio de conservación de la energía
- Principio de máximo de entropía
- Sistema complejo
- Sistema dinámico
- Stephen Hawking
- Trabajo
- Termodinámica
- Tiempo

Referencias

1. Clausius, R. (1850). «Über die bewegende Kraft der Wärme» (<http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k15164w/f384.table>). *Annalen der Physik und Chemie* **79**: 368-397, 500-524. Consultado el 23 de septiembre de 2009.
2. Clausius, R. (1865). «Ueber verschiedene für die Anwendung bequeme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie» (<http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k152107/f369.table>). *Annalen der Physik und Chemie* **125**: 351-400. Consultado el 23 de septiembre de 2009.
3. Bronowski, J. (1979). *El ascenso del hombre*. Alejandro Ludlow Wiechers/BBC, trad. Bogotá: Fondo Educativo Interamericano.
4. «Entropía, definición según RAE» (<http://dle.rae.es/srv/search?m=30&w=entrop%C3%ADa>).
5. Véase el capítulo 10, "Un mundo dentro del mundo", de *El ascenso del hombre*, de Jacob Bronowski. En [1] (<https://www.youtube.com/watch?v=C2p9By0qXms>) pueden verse, en inglés, los últimos minutos de ese capítulo.

6. Jean-Bernard Brissaud. The meanings of entropy. *Entropy*, 2005, 7.1, 68-96. (<http://www.mdpi.org/entropy/htm/e7010068.htm>)
7. Cuesta, José A.: La entropía como creadora de orden. *Revista Española de Física*, 2006, vol. 20, n. 4, p. 13-19 (<http://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/7209>)
8. *Revista ¡Despertad!* 1999, 22/6
9. Prigogine, Ilya (1900). *El nacimiento del tiempo* (<https://www.planetadelibros.com.ar/libro-el-nacimiento-del-tiempo/134929>). Tusquets Editores. ISBN 9789876700870.

Enlaces externos

- [Documentos de termodinámica \(http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/bk3/index.html\)](http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/bk3/index.html) Archivado (<https://web.archive.org/web/20180321060738/http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/bk3/index.html>) el 21 de marzo de 2018 en [Wayback Machine](#).
 - [Entendiendo la entropía \(http://inquietudes.wordpress.com/2008/01/27/entendiendo-la-entropia/\)](http://inquietudes.wordpress.com/2008/01/27/entendiendo-la-entropia/)
-

Obtenido de «<https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Entropía&oldid=155206573>»

-