

Una aproximación al concepto entropía

EDVCATIO PHYSICORVM



ISSN 1870-9095

José Quintín Cuador Gil¹, Leonardo Julian Picos Rivers²,
Carlos Rafael Martínez de Osaba Picos³

¹Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad de Pinar del Río,
Calle Martí 300, Pinar del Río, Cuba.

²Instituto de Ciencias Básicas, Universidad Tecnológica de la Habana
"José Antonio Echeverría", CUJAE, Calle 114, No. 11901,
Marianao, La Habana, Cuba, CP 10400.

³Departamento de Física, Universidad de Pinar del Río,
Calle Los Pinos final, Pinar del Río, Cuba.

E-mail: cuador@upr.edu.cu

(Recibido el 20 de diciembre de 2023, aceptado el 15 de marzo de 2024)

Resumen

La entropía es uno de los conceptos más abstractos y polémicos estudiados en la física, en este sentido se ha escrito mucho, aun así, un gran número de personas no entiende este concepto. Una encuesta realizada a una muestra de profesores de física relacionada con la pregunta, defina la entropía, demostró diversidad de criterios al respecto. En este artículo pretendemos realizar un breve esbozo de los elementos fundamentales que pueden conllevar al entendimiento de la entropía.

Palabras clave: calor, temperatura, energía, entropía.

Abstract

Entropy is one of the most abstract and polemic concepts studied in physics. In this sense, it has been written a lot, even so, a great number of people doesn't understand this concept. A survey performed to a sample of physics professors about the question, what is the entropy, demonstrated the diversity of approaches about it. In this article, we intend to carry out a brief sketch of the main elements in order to the understanding of the entropy.

Keywords: heat, temperature, energy, entropy.

I. INTRODUCCIÓN

El primer principio de la termodinámica constituye una expresión de la ley de conservación de la energía. El calor o el trabajo pueden producir un cambio en la energía interna de un sistema, y a pesar de que existe una distinción entre estos dos conceptos, el primer principio de la termodinámica no lo hace evidente. Podemos comprobar que, si usted vierte leche y café en un recipiente, los líquidos se mezclan espontáneamente; o que, si dos cuerpos con diferentes temperaturas se ponen en contacto, ellos alcanzan una temperatura intermedia de equilibrio. En estos procesos se conserva la energía. Si los líquidos mencionados después de mezclarse "pudieran" separarse de forma espontánea o si los cuerpos después de ser separados "pudieran" alcanzar las temperaturas que tenían inicialmente de forma espontánea, también se conservaría la energía. Sin embargo, estos procesos en sentido inverso no ocurren en esas condiciones. Parece que existe alguna condición necesaria que impone reglas que selecciona de todos los entornos posibles, solo aquellos en que pueden ocurrir los procesos naturales. Fueron muchos los científicos que desde la antigüedad buscaron la forma de asociar la dirección en la que pueden o no ocurrir

determinados procesos en la naturaleza con una cantidad física que pudiera explicar y describir tal comportamiento. Esta magnitud física se le conoce hoy por Entropía, la cual constituye una de las nociones más abstractas y polémica de la Física. La entropía fue originalmente formulada como un concepto útil en termodinámica, posteriormente se perfeccionó con el florecimiento de la mecánica estadística. En este trabajo nos proponemos hacer un recuento histórico de como aparece en la física tal concepto y de que forma fué evolucionando en la mente de las personas.

II. DESARROLLO

Las primeras ideas que se relacionan con la entropía fueron a partir del análisis de las primeras máquinas térmicas, como las de Thomas Savery en 1698 [1], de "Newcome" en 1712 y el Cugnot de vapor de tres ruedas de 1769 [2], vistas como muy relevantes para la ingeniería, en las que se comprobó que una gran cantidad de energía útil se disipaba y no se podía convertir en trabajo. Cuestión esta que los investigadores de los próximos siglos lo asociaron con el concepto Entropía.

Con los primeros motores de calor, 1847 el físico William Thomson (también conocido por Lord Kelvin) se refirió al hecho de que la energía no puede crearse ni destruirse, pero sin embargo la energía térmica perdía su capacidad de realizar trabajo cuando se transfiere de un cuerpo caliente a otro frío [3].

En 1852, Thomson ya sostenía la idea de que, en un proceso de conducción de calor, la energía no se pierde, sino que se disipa o deja de estar disponible. La disipación para él era equivalente a una ley natural que estaba relacionada con la dirección de los procesos naturales.

En 1862, Clausius buscando una expresión matemática para describir todas las transformaciones de un cuerpo ante un intercambio de calor entre este cuerpo y otro o con el exterior, publica en su memoria VI, que durante las relaciones de calor y energía se combinan los procesos macroscópicos con los microscópicos y estableciendo que “el trabajo puede transformarse en calor y recíprocamente”, y “el calor no puede pasar de sí mismo de un cuerpo frío a uno caliente” [4]. El trabajo de Clausius se basó en el trabajo de del ingeniero francés Sadi Carnot, quien en 1824 publicó “La potencia motriz del fuego”, sobre los principios que regían la transformación de la energía térmica (calor) en energía mecánica (trabajo). De aquí denominación que Clausius le dio a la entropía, que representó como S [5].

En 1865 Rankine [6], refiriéndose a la misma tendencia de la energía hacia la disipación le asocia el concepto de “función termodinámica” como una medida de la parte no utilizable de la energía contenida en un sistema o materia [7], y Clausius ingeniero francés la definió como “disgregación”, siendo este quien finalmente le dio su nombre, y estableció que cada proceso que tiene lugar en un sistema aislado va acompañado de un aumento de entropía [8]. Clausius Formuló a partir del estudio de una máquina frigorífica la segunda ley en la forma "No es posible proceso alguno cuyo único resultado sea la transferencia de calor desde un cuerpo frío a otro más caliente". En base a esto, Clausius introdujo el concepto de entropía, la cual es una medición de la cantidad de restricciones que existen para que un proceso se lleve a cabo y determina también la dirección de dicho proceso. Estableciendo las leyes de la termodinámica en la forma, “La energía del universo es constante y su entropía tiende a alcanzar el máximo valor” Interpretación que algunos idealistas le han dado de forma reaccionaria al plantear la posibilidad de llegar a la “muerte térmica del universo” [9], como la posibilidad de alcanzar una temperatura uniforme sin tener en cuenta que en el caso de un sistemas cuyas dimensiones sean comparables a las dimensiones de las moléculas, la diferencia entre calor y trabajo desaparece, y por tanto, los parámetros termodinámicos como la entropía, no tendría significado [10] [4]. Conduciendo a la afirmación de que el segundo principio de la termodinámica no es aplicable a tales microsistemas, porque realmente no son sistemas termodinámicos. Pero en sistemas infinitos como el universo con sus fluctuaciones se pone en duda la afirmación de Clausius sobre la muerte térmica del Universo. La formulación de la entropía a partir del teorema de Clausius es percibida por algunos estudiosos del

tema como una formulación matemática sin significado claro y preciso ya que pocas personas captan con claridad ese concepto. Cuando Clausius definió la entropía tratando de explicar matemáticamente el funcionamiento de la energía en máquinas térmicas, la idea del desorden estaba lejos de aparecer.

En 1871, Maxwell publicó un experimento mental que a primera vista está en contradicción con el segundo principio de la termodinámica [11]. El intentaba demostrar que no siempre el calor tiene que fluir de un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura. Colocando un dispositivo capaz de “sentir” las moléculas por separado en una pared que divide en dos partes una vasija con gas a las mismas temperatura y presión. El dispositivo, al que le llamo “diablo” empieza a actuar de modo que podría elegir y dejar pasar sólo aquellas moléculas del gas que se muevan más rápidamente a un lado de la vasija. Como resultado, en la mitad a la que pasan las moléculas rápidas su velocidad media resulta ser mayor que en la otra mitad, y por tanto alcanza una temperatura más alta. Luego sin trabajo exterior se origina una diferencia de temperaturas, lo que está en contradicción con el segundo principio de la termodinámica, que solo permite que se igualen las temperaturas de dos sistemas con diferencias de temperaturas de forma espontánea, pero prohíbe por sí mismo que se establezca tal diferencia. Este experimento mental venía a indicar que la “disipación” no era algo inherente en la naturaleza, sino que surgía de la inhabilidad humana de controlar los procesos microscópicos.

En 1877, Boltzmann interpretando la segunda ley de la termodinámica en el sentido del demonio de “Maxwell”, estableciendo que a cada estado macroscópico de un sistema corresponden muchos microestados los que consideraba igualmente probables [12]. Por lo tanto, la probabilidad de un macroestado dependerá del número de microestados que se corresponden con él. Boltzmann identificó la entropía de un sistema como una función logarítmica de la probabilidad de su estado macroscópico. Con esta interpretación, la segunda ley afirmaba que los sistemas termodinámicos tienen tendencia a evolucionar hacia los estados más probables. Una disminución de entropía es improbable, aunque no imposible.

A partir de 1890 Boltzmann entre otros, desarrollaron las ideas de lo que hoy se conoce como mecánica estadística [13], teoría profundamente influenciada por el concepto de entropía, dándole un sentido estadístico y relacionando los microestados de la materia con el macroestado del sistema. Esta definición se refiere a la medida estadística del desorden, entendido como la distribución de probabilidad entre los diferentes microestados posibles. Estableciendo una ecuación que asume que todos los microestados tienen la misma probabilidad de aparecer. Uno de los aspectos más importantes que describe esta ecuación es la posibilidad de dar una definición absoluta al concepto de la entropía. La tendencia en que los sistemas evolucionan al equilibrio algunos autores la relacionan con la flecha del tiempo, concepto ligado a la entropía.

En 1902 el químico estadounidense Theodore William Richards a partir de los estudios relacionados con el cambio de la energía libre de Gibbs durante algunas reacciones químicas, sentó las bases para que el químico-físico alemán Walther Hermann Nernst en 1906 formulara su teorema del calor que decía que si tenía lugar un cambio químico entre sólidos cristalinos puros en el cero absoluto no debería haber cambio de entropía. La formulación más general de este teorema establece que es imposible enfriar un cuerpo hasta el cero absoluto por un proceso finito y en el cero absoluto todos los cuerpos tienen la misma entropía, que puede igualarse arbitrariamente a cero. Si fuese posible enfriar un cuerpo hasta alcanzar el cero absoluto, cuando los movimientos térmicos cesan y se establece el mayor orden posible, entonces se alcanzaría el menor valor de entropía y se podría construir el móvil perpetuo de segunda especie lo que contradice el segundo principio de la termodinámica [14]. En 1913 el alemán Max Planck sugirió que el valor de la entropía en el cero absoluto es cero para todas las sustancias puras perfectamente cristalinas [15].

En 1943 el físico Erwin Schrödinger a partir de la consideración de que algunos sistemas abiertos logran conservar su entropía natural gracias a las aportaciones de los otros subsistemas con los que se relacionan, desarrolló el concepto de entropía negativa como aquella entropía que un sistema exporta o libera para mantener bajos sus niveles de entropía [16]. En el sistema abierto, la entropía negativa supone una resistencia que se sustenta en los subsistemas asociados que le permiten reequilibrar el sistema entrópico. Sin embargo, en el sistema cerrado, estos procesos no pueden detenerse por sí mismo.

En 1948 el matemático e ingeniero Claude Shannon aplicó la idea de la entropía a la pérdida de información en las telecomunicaciones. El físico Kevin Knuth, de la Universidad de Albany en este sentido expresó “la entropía es una medida de la incertidumbre y, como tal, tiene amplia aplicación a cualquier problema en el que uno está haciendo inferencias” [17].

En 1957 el físico Edwin Jaynes refiriéndose a lo introducido por Shannon para la información expresó “Es por esto que se confunde con el desorden, porque un sistema desordenado resulta en una gran incertidumbre”, dice Knuth; “pero el concepto principal es la incertidumbre, no el desorden” [18].

La formación de un copo de nieve o de cualquier clase de materia viva parece que pueden ir en contra de la espontaneidad de los procesos naturales que conllevan a un aumento de entropía, luego, la idea del desorden es engañosa, ya que muchos procesos pueden ocurrir espontáneamente, pero en la dirección equivocada. Según [19], [20] señala “Aquí no tenemos un sistema aislado; tenemos un sistema de interés, y su entorno”. En estos casos no hay un equilibrio, sino un gradiente que guía la dirección del proceso; la entropía de un sistema puede disminuir espontáneamente, si al mismo tiempo la de su entorno aumenta en mayor grado. Comprender esta idea fue lo que en 1960 llevó a Ilya Prigogine, químico belga de origen ruso, a explicar cómo era termodinámicamente posible que la vida hubiera surgido a partir de sus

componentes elementales, lo que a su vez fue una gran influencia en el desarrollo de la teoría del caos. [21].

El físico y premio Nobel, León N. Cooper expresó que el término elegido por Clausius no había facilitado la comprensión del concepto, y al respecto en 1968 escribió, “en lugar de extraer una expresión del lenguaje común (digamos calor perdido), logró acuñar una palabra que significa lo mismo para todo el mundo”. Coincidiendo con muchos autores que consideran que el concepto de entropía tiene significados múltiples, es ambiguo, impreciso y en algunas ocasiones inestable, lo que lo convierte “en el más difícil de todos los conceptos físicos” [22].

La entropía, señala Kevin Knuth, es una medida de la incertidumbre, por eso se confunde con el desorden, porque un sistema desordenado resulta en una gran incertidumbre. El dramaturgo inglés Tom Stoppard, escribe en su obra de 1993, *Arcadia*: “El calor va al frío, es una calle de un solo sentido. Tu té acabará a temperatura ambiente. Lo que le sucede a tu té le está ocurriendo a todo en todas partes. El sol y las estrellas. Tardará un tiempo, pero todos acabaremos a temperatura ambiente”. [23].

IV. CONCLUSIONES

El concepto entropía es difícil de entender por la mayor parte de las personas que estudian termodinámica. Para entenderlo sólo se debe pensar en el origen de la palabra “entropía”, la cual proviene del vocablo griego “trope”, que significa transformación, cambio. Pensemos en los estados de un sistema en los cuales puede cambiar de forma espontánea, es decir, estados en que tienen la capacidad para realizar trabajo, cuando el sistema llega a un estado de equilibrio, un estado en el que ya no efectuará cambios de forma espontánea, se dice que la entropía es máxima, porque ya no puede cambiar. En el estado inicial del sistema se dice que la entropía es mínima, la que va aumentando en la medida que el sistema va cambiando, es decir va perdiendo la capacidad de realizar trabajo, hasta el punto en que no puede cambiar más, estado del sistema en que tiene su máxima entropía. Es el momento en que se dice que el sistema se encuentra en su máximo desorden, es decir, ya no se puede desordenar más, y por tanto perdió la capacidad de cambiar, de transformarse.

Concluimos que, para cualquier sistema, la entropía es una función de estado que caracteriza la capacidad de cambiar, hasta lograr el estado más probable, el que inevitablemente se alcanza de forma natural, por lo que transita desde el estado inicial de menor entropía, mayor capacidad para cambiar y realizar trabajo, mayor orden hasta el estado en que ya no puede cambiar más, no puede realizar trabajo y existe el máximo desorden, la mayor entropía. En este sentido se plantea que la entropía mide el grado de desorden, terminología que vista desde un sentido físico, puede considerarse lo contrario, el sistema logra la máxima entropía, cuando se ordena, se ordena en el sentido de que alcanza su estado más probable.

REFERENCIAS

- [1] Jenkins, R., S., *Newcomen and the early history of the steam engine*, Transactions of the Newcomen Society **3**, 96-118 (2014).
- [2] Rabasa Cachón, A., Castillo Díaz, M. A., *Modelado de un sistema de suspensión derecha para un vehículo arenero*, Tesis, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Ticomán, (2009), p. 56.
- [3] Domenech Blanco, J. Ll., Rey Cubero, A., Nicolás Castellano, C., Martínez Torregrosa, J., *Enseñanza sobre calor y temperatura en la educación secundaria*, Alambique, Didáctica de las Ciencias Experimentales, No. 113, 7-13 (2023).
- [4] Flores-Camacho, F., Ulloa Lugo, N., *¿Cómo enseñan la entropía los profesores universitarios?*, Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias **13**, 201-221 (2014)
- [5] Rojas Diéguez, J. J., *Entropía: un breve esbozo*, Facultad de Ingeniería, Universidad Rafael Landívar Boletín Electrónico No. 4, 11 (2007)
- [6] Meade, R., *Rankine's Manuals and the Disciplining of 'Engineering Science' in Nineteenth-century Britain*, (2014), p. 27.
- [7] Koll, M., *Equation of state and Rankine-Hugoniot Shock relation for realistic dynamical processes in stellar atmospheres*, Trabajo de grado, (2020), p. 36.
- [8] Hernández Aguilera, J. S., *Una aproximación epistemológica al concepto de entropía: un análisis a la transición de Clausius a Boltzmann*, Trabajo de grado, Bogotá, Universidad Pedagógica Nacional, (2019), p. 53.
- [9] Rosales Marsano, C. M., *No aceleremos la muerte térmica del universo*, Nota técnica, Ensayo sobre educación y sostenibilidad ambiental, Luminotecnia, No. 48. (2016).
- [10] Fabián Scozzina, E., *Teoría de la Información y codificación: El significado de la entropía en la transmisión de información*, Extensionismo, innovación y transferencia tecnológica - claves para el desarrollo **6**, 218 (2020).
- [11] Romero Blanco, L., Nuñez de los Santos, I. A., Peralta Díaz, G., *El legado científico de James Clerk Maxwell: una síntesis*, Ibero-American Journal of Engineering & Technology Studies **2**, 1-8 (2022).
- [12] Young, H. D. y Freedman, R. A., *Física Universitaria*, Volumen 1, Decimosegunda edición, (Pearson Educación, México, 2009), p. 760.
- [13] Garzó, V., Gómez González, R., *Introducción a la Física Estadística*, Colección manuales uex - 116, 245 pp. (2022).
- [14] Rolle, K. C., *Termodinámica*, Sexta edición, University of Wisconsin—Platteville, (PEARSON Education, México, 2006).
- [15] Galles, C. D., *El camino de Max Planck hacia los cuantos de energía*, Revista de Enseñanza de la Física **17**, 63-73 (2004).
- [16] Cárdenas Messa, G. A., *De la entropía social a la entropía educativa. Una reflexión en el contexto colombiano*, Revista Educación **44**, 1-6 (2020).
- [17] Knuth, K. H., *Lattices and their consistent quantification*, Annalen der Physik, (2018).
- [18] Jaynes, E. T., *Papers on Probability, Statistics and Statistical Physics*, R. D. Rosenkrantz Editors, 458 pp. (2012).
- [19] Yanes, J., *¿Que es la entropía desorden?* (2023), <https://www.bbvaopenmind.com/ciencia/fisica/que-es-la-entropia-desorden/>, consultado el 19 de diciembre del 2023.
- [20] Roduner, E., *Acid Catalysis in HZSM-5: The Role of Entropy*, J. Am. Chem. Soc., **123**, 7717–7718 (2001).
- [21] Prigogine, I., *La estructura de lo complejo; en el camino hacia una nueva comprensión de las ciencias*, (Alianza Editorial, Madrid, 1994), p. 390.
- [22] García Sanz, J. J., *Semblanzas de los Premios Nobel de Física 2003*, 100cias@uned, (2004), pp. 68-70.
- [23] Chaves Vallejo, P. C., *Estudio Cualitativo de la termodinámica: una aproximación al concepto de entropía*, Tesis para optar por el título de Magister en Enseñanza de las Ciencias Exactas y Naturales (2013), p. 98.