

¿Cómo enseñan la entropía los profesores universitarios?

Fernando Flores-Camacho¹ y Norma Ulloa-Lugo²

¹Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, Universidad Nacional Autónoma de México, México. ²Facultad de Estudios Superiores – Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México, México. Emails: fernando.flores@ccadet.unam.mx. nulloamx@yahoo.com.mx.

Resumen: La entropía es un concepto complejo y las formas en que se enseña parecen no aportar elementos para su comprensión. En este trabajo se hace un análisis sobre cómo los profesores de carreras de Física y Química abordan este tema, en particular cómo la desarrollan en clase, la definen e interpretan y las características de los libros en los que se apoyan. Para comprender las formas de enseñanza, se llevó a cabo un breve análisis del desarrollo histórico de la entropía y de su desarrollo con fines de enseñanza en los primeros textos que la abordan sistemáticamente. También se analizan las actuales propuestas en torno a su sentido físico. Los datos muestran un amplio desconocimiento de los elementos históricos y actuales sobre el concepto de entropía por los profesores y textos e incluso se evita darle un significado físico a este concepto. Los alumnos se encuentran así, ante una enseñanza confusa, con diversas formas de abordar y de nombrar la entropía, así como con una visión centrada en resolver problemas que poco aporta a su comprensión. Algunas sugerencias de retomar la historia y los nuevos desarrollos se presentan como corolario.

Palabras clave: entropía, enseñanza de la física, aprendizaje de conceptos.

Title: How do college teachers teach entropy?

Abstract: This work provides a brief analysis about how university teachers teach Entropy. Aspects as how they define Entropy, how the development the issue occurred and what is their physical interpretations were obtained from interviews with teachers of faculties of science and chemistry. Also, an analysis is made about how entropy is presented in textbooks that teachers use. In order to understand the ways teachers develop the concept of entropy, a historical review was made, and a brief review of new approaches to find new meaning to entropy was revised. Results show that the teachers did not have any knowledge about the historical development of entropy neither do they have an idea about new developments of this concept. This situation is also found in the textbooks. Students', therefore, find in teachers and textbooks a very fuzzy concept, with many meanings and with a scholar practice that does not contribute to their understanding. Some suggestions are presented.

Keywords: entropy, physics teaching, concepts learning.

Introducción

Las investigaciones sobre las ideas previas o concepciones alternativas muestran que temas como la diferenciación entre calor y temperatura y la segunda ley (Chang, 1999; Kesidou y Duit, 1993; Sciarretta, Stilli, y Vicentini, 1990) y otros conceptos de la termodinámica presentan una gran variedad de interpretaciones y por tanto de problemas de comprensión. Dentro de estos conceptos difíciles está, sin duda, el de entropía que no sólo presenta problemas a los estudiantes sino también a los profesores e incluso los textos no resisten un análisis sin que se encuentren ambigüedades o interpretaciones poco afortunadas.

Entre los elementos que dan cuenta de esas problemáticas en textos y en profesores se encuentran las confusiones entre la concepción macroscópica y la microscópica de la entropía (Brosseau y Viard, 1992), así como el uso poco claro de la idea de "desorden" que aparecen sin ninguna explicación convincente o suficiente y que el referirse a ella, desde la explicación fenomenológica que se describe en la termodinámica clásica sólo aumenta la problemática para los alumnos (Alonso y Finn, 1996; Tarsitani y Vicentini, 1996).

La entropía de propio, como veremos más adelante, es un concepto que tiene una historia compleja (Hollinger y Zenzen, 1991; Müller, 2007; Uffink, 2001) y que ha sido motivo de diversas reconstrucciones e interpretaciones así como de formulaciones axiomáticas y formales (Ibarra y Morman, 2006; Leff, 2007) lo que ha dificultado su enseñanza. La entropía tiene además impacto en otros campos como la teoría de información y en los campos de "complejidad" y "caos" y con ello una mayor dispersión en su conceptualización. Cabe entonces preguntarse: ¿Cómo enseñan los profesores el concepto de entropía? ¿Qué aportan los libros que eligen para los alumnos? ¿Cómo toman en cuenta el proceso histórico de la entropía y sus diversas formulaciones? ¿Qué elementos utilizan de las nuevas propuestas sobre los nuevos significados de la entropía?

Para intentar dar respuesta, al menos parcialmente, a esas preguntas se desarrollarán tres secciones. En la primera se hará una breve revisión de los orígenes del concepto (Clausius y Boltzmann) de entropía y de quienes lo desarrollaron en términos de ponerlos en libros de síntesis del campo y con perspectivas educativas (Planck, Gibbs y Fermi), así como una breve descripción de nuevas propuestas (Falk, 1985; Lieb e Yngvason, 2000; Leff, 2007). La segunda sección describirá el estudio empírico sobre lo que los profesores enseñan de este concepto y, en la tercera parte lo que aportan los libros que utilizan. Finalmente se presentará una discusión y conclusiones en torno a su enseñanza.

Fundamentación teórica

Los orígenes de la entropía: Clausius y Boltzmann

El concepto de entropía aparece con Rudolf Clausius como parte del razonamiento con el que se enfrenta al problema de encontrar una expresión matemática para describir todas las transformaciones de un cuerpo ante un intercambio de calor entre ese cuerpo y otro o con el exterior. Este propósito lo publica en dos etapas, en su Memoria VI de 1862

y su Memoria IX de 1865 (Clausius, 1991). Clausius parte de los estudios de Carnot con relación a los ciclos de las máquinas térmicas y trata de esclarecer las relaciones de calor y energía en lo que el mismo denomina "principio de equivalencia de las transformaciones de energía" y al cual le asigna, al menos, dos significados; "el trabajo puede transformarse en calor y recíprocamente", y "el calor no puede pasar de sí mismo de un cuerpo frío a uno caliente".

En su Memoria VI Clausius considera como transformaciones equivalentes a aquellas que pueden reemplazarse mutuamente y para las que se cumple la expresión Q/T . Clausius también intenta dar respuesta a la pregunta sobre cómo el calor H contenido en un cuerpo puede producir trabajo y para ello introduce una visión microscópica estableciendo que el trabajo lo realiza a costa de que se modifique el arreglo de las partículas que constituyen el cuerpo. De esta forma intenta combinar los procesos macroscópicos con los microscópicos.

Clausius encuentra que el calor cedido por un cuerpo, $-dQ$, es equivalente a la variación de calor que contenga el cuerpo, dH , más el trabajo dL que realice el cuerpo durante la modificación en el arreglo de las partículas del cuerpo. De lo anterior llega a la expresión:

$$\int((dQ+dH)/T) + \int dZ \geq 0 \quad (1)$$

donde la variable Z representa la "disgregación" o "grado de división de los cuerpos. La igualdad se cumple para los procesos reversibles.

Clausius relaciona entonces el segundo principio (segunda ley) con una "transformación no compensada" como él denomina a los procesos irreversibles y que está descrita por la ecuación (1), a la que le designa el significado de "Valor o contenido de transformación" y que denomina entropía. De esta forma

$$S - S_0 = \int dH/T + \int dZ \quad (2)$$

El nombre de entropía fue designado por Clausius para dar sentido a un proceso que ocurre con la energía, como él describe "...propongo llamar a la cantidad S la entropía del cuerpo tomando la palabra griega *transformación* ($\theta\tau\rho\omega\pi\eta$). El diseño que yo he armado con la palabra entropía lo hice de manera que se asemejara tanto como fuera posible a la palabra energía" (Clausius, 1991, p. 411).

Como puede apreciarse, para Clausius la entropía tiene un significado relativo a la transformación de energía y ésta la ubica tanto en el calor interno H como en la transformación del arreglo de partículas o "disgregación". En cuanto a la relación con el calor y la temperatura, esta relación es la que se continúa utilizando pero lo por lo que respecta a la disgregación Z , se ha perdido por diversas razones. Una de ellas es sin duda la falta de claridad de lo que significa Z y cómo operarla como señalan Moulines (1990) y Uffink (2000), aspecto que no pasó desapercibido por Maxwell como apuntan Harman (1962), Klein (1981) y Cercignangi y Penrose, (2006).

A diferencia de Clausius, Boltzmann no intenta combinar lo macroscópico con lo microscópico sino establecer el comportamiento macroscópico a partir del modelo de partículas. Entre sus propósitos estaba el probar que

los hechos sobre los que se basa la segunda ley de la termodinámica y las leyes estadísticas de movimiento de las partículas o moléculas de un gas, era más que una semejanza superficial (Boltzmann, 1964, p. 28). De esta forma sus supuestos son: 1) excluir cualquier diferencia cualitativa entre calor y energía mecánica, 2) utilizar la energía cinética y potencial en el tratamiento de las colisiones entre moléculas, 3) adoptar analogías mecánicas y ecuaciones diferenciales para describir los movimientos internos, 4) asumir que la materia no es continua sino que consiste en moléculas discretas inobservables debido a su tamaño y 5) mostrar que cualquier arreglo de moléculas en un contenedor es posible.

A partir de esas consideraciones establece las posibilidades de orden y desorden de un arreglo de moléculas, así

“... desde el punto de vista de la mecánica cualquier arreglo de moléculas en un contenedor es posible; en algún arreglo, las variables que determinan el movimiento de las moléculas puede tener diferentes valores promedio en parte del espacio lleno con el gas que en otra... Tal distribución se llama molar-ordenado. ... si el arreglo de las moléculas tampoco exhibe regularidades que varíen de una región finita a otra – si está molar-desordenado - entonces pese a ello... pequeños grupos de moléculas pueden exhibir regularidades definidas. Una distribución que exhiba regularidades de esta clase será llamada molecularmente ordenado... Cuando estos agrupamientos espaciales no están limitados a lugares particulares... sino que se encuentran en promedio igualmente distribuidos... la distribución puede llamarse molarmente desordenado” (Boltzmann, 1964, p. 40).

Con lo anterior Boltzmann describe que el estado más probable de un gas en un contenedor es en el que las moléculas no guardan ninguna configuración específica, sino que es totalmente aleatorio y que llama molecularmente desordenado y lo considera una propiedad necesaria para probar los teoremas de la teoría de los gases y la distribución de velocidades de Maxwell (Boltzmann, 1964, p. 41).

A partir del cálculo de lo que ocurre con un gas que se calienta una cierta cantidad dQ y de los efectos en términos de los procesos internos y del trabajo cuando aumenta el volumen del gas, llega a la siguiente expresión para la entropía (la descripción puede seguirse en las páginas 68 – 72; Boltzmann, 1964).

$$\int dQ/T = Rk/\mu \ln [T^{3/2(1+\beta)} \rho^{-1}] + \text{cte} \quad (3)$$

En esta ecuación R es una constante del gas, k la masa del gas, μ el peso molecular, ρ la densidad del gas y β es considerada constante que puede obtenerse de los calores específicos a presión y volumen constante. En la presentación de esta ecuación Boltzmann no hace ninguna interpretación y sólo la denomina la entropía.

A partir del comportamiento del producto de los elementos de un logaritmo como suma de los logaritmos sin considerar otro significado físico (d'Abro, 1951) establece para un volumen Ω el logaritmo de la probabilidad B del arreglo de moléculas y distribución de estados en varios gases y llega finalmente a la expresión

$$R \ln B = R \sum k / \mu \ln [T^{3/2} \rho^{-1}] \quad (4)$$

Donde R es un factor constante de los gases y considera $\beta = 0$ la descripción detallada se encuentra en (Boltzmann, 1964, pp. 73-74). Esta expresión, (4), Boltzmann la equipara con la entropía total de los gases en consideración, es decir la entropía como el logaritmo natural de estados posibles en los que puede estar un gas o un conjunto de gases.

Como puede notarse Clausius y Boltzmann presentan a la entropía desde dos concepciones distintas. En el caso de Clausius ligada a las transformaciones de energía y si bien intentó considerar el comportamiento molecular, no lo llevó a cabo ni logró establecer la relación entre lo macroscópico y lo microscópico. Por su parte Boltzmann describe a la entropía en función de los estados de los arreglos y movimiento de las partículas pero con un significado de entropía diferente y que no puede considerarse que cumplimenta la parte inacabada de Clausius.

Posteriores desarrollos: Planck, Fermi y Gibbs

El desarrollo de la entropía de manera más formal, es decir como una teoría sistemática, fue llevada a cabo por Duhem, Jaumann y Lohr (Müller, 2007). Debido a que nos interesa una aproximación hacia los libros de texto y a cómo se enseña la entropía actualmente, seguiremos los autores que nos lleven a través de sus textos y que han sido también personajes clave en la historia de la ciencia. De esta forma abordaremos los textos de Planck y Fermi en la línea de la termodinámica clásica y de Gibbs en cuanto a la mecánica estadística.

Planck

Planck estaba profusamente interesado en la entropía y los procesos irreversibles o como él lo denominaba, "mi tema favorito" (Planck, 1987). En su desarrollo toma como base la expansión de un gas en un proceso adiabático y llega a la siguiente expresión para la entropía Φ (Planck, 1945, p 92)

$$\Phi = M(c_v \log T + R/m \log v + \text{cte}) \quad (5)$$

Posteriormente toma en cuenta que hay absorción de calor. Con ello llega a la expresión (Planck, 1945, p 92)

$$d\Phi = Q/T \quad (6)$$

Donde explica que ahora el calor se ha descompuesto en dos factores $d\Phi$ y T y que "...esta descomposición del calor en factores es considerada como una propiedad general del calor" (Planck, 1945, p 92). Debe notarse que la ecuación 6, en términos actuales debe escribirse como $d\Phi = dQ/T$.

Planck también da un nuevo sentido a la segunda ley y con ello a la direccionalidad de los procesos termodinámicos. En cuanto a la segunda ley la expresa como "el proceso de conducción del calor no puede ser invertido completamente, en forma alguna" (Planck, 1987, p. S10-231). En cuanto a la direccionalidad dice

"Como el problema de si un proceso es reversible o irreversible sólo depende de la naturaleza de su estado inicial y de su estado final, y no de la manera en que se desarrolla; entonces, en el caso de un proceso

irreversible, el estado final es, en cierto modo, más importante que el inicial – como si la naturaleza, por decirlo así, “prefiera” el estado final al inicial. Descubrí una medida de esta preferencia en la entropía de Clausius”(Planck, 1987, p. S10-232).

Las aportaciones de Planck fueron un fundamento para posteriores desarrollos y libros de texto, pero como señalan Tarsitani y Vicentini (1996) los textos modernos tienden a olvidar u omitir los detalles sutiles de una aproximación fenomenológica adecuada y los procesos abstractos que pertenecen a la experiencia fenomenológica.

Fermi

De la misma forma que Planck, Fermi introduce la segunda ley haciendo ver las limitaciones a la posibilidad de transformar calor en trabajo, pues de no haber esas limitaciones “sería posible construir una máquina con la que se podría, enfriando los alrededores de los cuerpos, transformar ese calor, tomado del ambiente, en trabajo. Y puesto que la energía contenida en la tierra, agua, atmósfera es prácticamente ilimitada, tal máquina sería equivalente a un móvil perpetuo llamado de segunda clase” (Fermi, 1967, p. 29).

En cuanto a la entropía, Fermi lleva a cabo su desarrollo a partir de las “propiedades de los ciclos” (Fermi, 1967, p. 46). Tomando en consideración que son transformaciones cíclicas, llega a establecer para los procesos reversibles que

$$S_A - S_B \geq \int dQ/T \quad (7)$$

Para Fermi, la entropía es una propiedad de los ciclos y una función de estado.

“La propiedad expresada por el teorema que dice que el valor de la integral para una transformación reversible depende sólo de los estados extremos de la transformación y no de la transformación misma; nos permite definir una nueva función de estado de un sistema. Esta función llamada entropía que es de la mayor importancia en termodinámica” (Fermi, 1967, p. 50).

Como puede apreciarse, en Fermi la preocupación por explicar la entropía (más allá de su expresión matemática) queda reducida a definirla como una función de estado sin preocuparse por su significado fenomenológico. Como se verá en los textos que se utilizan actualmente, este tipo de descripciones argumentativas prevalecerán sobre todo intento de dar significado al concepto de entropía.

Gibbs.

Gibbs, en sus primeros trabajos sobre termodinámica, publicados en 1873 resalta el papel fundamental de la entropía y, siguiendo el trabajo de Clausius, establece una ecuación donde sólo aparecen variables de estado, siendo la entropía una de ellas y que denomina ecuación fundamental:

$$dU = TdS - PdV \quad (8)$$

Posterior a esos trabajos desarrolla una formulación de mayor potencial matemático de la mecánica estadística y, a partir de ello, lleva a una

generalización de las ideas de Boltzmann al considerar solo los argumentos probabilísticos a entidades como partículas o moléculas pues como apunta "Nosotros imaginamos un gran número de sistemas de la misma naturaleza, pero que difieren en su configuración y velocidades que tienen en un instante dado y difieren no solamente infinitesimalmente sino que pueden tomar cualquier combinación posible de configuraciones y velocidades" (Gibbs, 1902, tomado de Müller, 2007, p. 119).

Gibbs establece diversas clases de sistemas o ensambles, los que satisfacen las condiciones de equilibrio se denominan canónicos y a partir de ellos encuentra finalmente una expresión para la entropía S , de la forma

$$S = k \partial(\ln P)/\partial T \quad (9)$$

P representa un función probabilística de la partición de energía de los sistemas. Esto constituye una generalización importante para todos los sistemas termodinámicos y sus interacciones. (se utiliza la descripción y notación de Müller, 2007).

Nuevas interpretaciones

Recientemente se han seguido diversas líneas para esclarecer el concepto de entropía. Por ejemplo, Falk, (1985) propone rescatar la concepción "sustancialista" que aparece en los inicios de la termodinámica, en especial las ideas sobre calórico de Black y Carnot. Muestra que las características fenomenológicas de la entropía son equivalentes a las de la idea de calórico y propone con ello, proporcionar una idea intuitiva a la entropía, en términos de su aumento y su imposibilidad de disminución y, con ello alejarla de su connotación ligada a la energía.

Desde una perspectiva axiomática Lieb e Yngvason (2000; 2007) plantean un desarrollo sin el empleo de los conceptos de calor, ciclo termodinámico, temperatura, etc. Para ello establecen la noción de *accesibilidad adiabática* entre estados X, Y de un sistema, varias reglas operatorias (reflexividad, aditividad, transitividad, escalamiento) y diversas condiciones como la de que los sistemas pueden analizarse adiabáticamente en partes y que la accesibilidad adiabática es estable frente a perturbaciones pequeñas. De esta forma para estos autores la entropía es el conjunto de todos los estados X, Y de un sistema que se pueden alcanzar adiabáticamente.

En una perspectiva distinta Leff (2007) sugiere una nueva interpretación en términos del término *dispersión* (spreading) – al que encuentra cierta semejanza con la "disgregación" de Clausius - que le permite describir tanto la entropía en sistemas macroscópicos como cuánticos y recuperar no sólo las descripciones de arreglos espaciales con los que usualmente se entiende la entropía, sino también los procesos temporales y de dispersión de energía en los sistemas físicos.

" La metáfora de la dispersión es poderosa, y ofrece una interpretación física transparente y alternativa a las metáforas discutidas previamente. ... La metáfora de la dispersión resuelve esta deficiencia enfocándose sobre los cambios temporales entre configuraciones. En 1996, la metáfora de la dispersión fue usada para

motivar el desarrollo de la termodinámica desde un punto de vista pedagógico” (Leff, 2007, p.1749).

De esta breve descripción del origen y desarrollo de la entropía, puede notarse cómo el concepto original en sus dos interpretaciones – clásica y estadística – fue ampliando sus posibilidades de representar los procesos fenomenológicos de los sistemas termodinámicos con nuevas formulaciones matemáticas, mayor alcance fenomenológico. Sin embargo no deja de notarse que, en los desarrollos de los continuadores, no se retoma la interpretación física, se van adicionando nominaciones como función de estado, propiedad de un sistema termodinámico o variable termodinámica. Por su parte las nuevas formulaciones presentan conceptualización que incluso pueden resultar inconmensurables y si bien abren nuevas perspectivas se requiere de mayor tiempo de análisis y de consenso para que alguna de ellas o en su caso nuevas interpretaciones muestren ser la mejor alternativa posible.

El desarrollo histórico descrito da origen a preguntarse sobre cómo enseñan los profesores universitarios el concepto de entropía, que aspectos del desarrollo histórico siguen, si incorporan en alguna medida los nuevos desarrollos o bien si, por el contrario, establecen interpretaciones sintéticas que planteen nuevos significados.

Contexto y metodología

Muestra

Para conocer cómo los profesores explican y trabajan la entropía se llevó a cabo una entrevista con profesores de dos facultades de la UNAM, la Facultad de Química y la Facultad de Ciencias. Todos los profesores enseñan termodinámica y algunos de ellos son investigadores en ese campo. La muestra consistió en 12 profesores, 7 de la Facultad de Química (30% de todos los profesores que tienen que ver con físico-química y termodinámica) y 5 profesores de la Facultad de Ciencias (70% de los profesores de termodinámica de la carrera de Física). Todos los profesores entrevistados tienen al menos 15 años de experiencia docente en la Universidad.

Categorías de análisis

Para analizar las ideas y formas de enseñanza de los profesores se determinaron tres categorías: a) Cuáles son las dificultades que perciben los profesores en sus alumnos para la comprensión del concepto de entropía, b) Cuál es el proceso que siguen y cómo definen a la entropía y c) Qué aspectos de la historia y de las nuevas formulaciones de la entropía conocen y, en su caso cómo las toman en cuenta en su clase. A partir de esas categorías se estableció la guía de entrevista.

Guía de entrevista

La guía de entrevista llevó un proceso de ajuste. La primera versión se aplicó a 5 profesores voluntarios (que no formaron parte de la muestra). La guía aplicada consistió de un conjunto mínimo de 20 preguntas que contemplan las tres categorías y el caso las respuestas erróneas de alumnos ante un caso de expansión adiabática de un gas (Morris, 1982; Broseau y

Viard, 1992). Las últimas preguntas de la guía estuvieron orientadas a conocer los libros que utilizan con sus alumnos.

Las entrevistas tuvieron una duración aproximada de 60 minutos, fueron audiograbadas y transcritas en su totalidad. Las interpretaciones fueron revisadas por cuatro expertos, dos en Física y dos en enseñanza de las ciencias.

A partir de las entrevistas, también se averiguó el texto o textos que utilizan en sus clases y se llevó a cabo un análisis de los mismos describiendo cómo desarrollan el tema y cómo definen a la entropía.

Resultados

A continuación se presentan los resultados organizados de acuerdo a las tres categorías descritas diferenciando, además, entre las respuestas que proporcionan los profesores de la Facultad de Química y los de Física. La síntesis de los datos se muestran en el Anexo 1.

Categoría a). Dificultades que reconocen en sus alumnos para comprender la entropía

Por cuanto a las dificultades que los profesores entrevistados perciben de sus alumnos, es notorio que 41% (5/12) centra la problemática en que los estudiantes no tienen las suficientes bases matemáticas para comprender la entropía; 16% lo atribuyen al desinterés de los alumnos; 16% a las ideas previas; un profesor (8%) lo atribuye a la confusión de términos y otro profesor (8%) dice que sus alumnos no presentan ninguna dificultad para comprender la entropía, finalmente un profesor (8%) no manifestó interés en responder. Es interesante resaltar que el 75% de los profesores hace referencia a que los alumnos, de sus estudios previos, expresan la entropía como "desorden" pero sin poder explicar en qué consiste o que significado tiene en un sistema termodinámico. Otros solo indican que consideran que sus alumnos no tienen ninguna idea previa sobre la entropía (25%).

Como puede notarse el mayor porcentaje se encuentra en los profesores que atribuyen a las matemáticas el problema de comprensión de los alumnos indicando, el énfasis, como veremos adelante, con el que abordan la enseñanza de la entropía. Correspondiente con lo anterior, se encuentra ante preguntas sobre la forma de evaluar, que los profesores se muestran conformes con que sus alumnos resuelvan problemas de aplicación y en su preferencia (50%) al libro de Abbot y Vanness (1991) que trata los temas basado en resolución de problemas.

Categoría b). Forma de enseñanza e interpretación de la entropía

La mayoría de los profesores entrevistados (75%) desarrolla una exposición que parte de los ciclos de Carnot y llega a la expresión de Clausius como viene descrito en los textos a partir de Fermi y sin hacer ninguna referencia a la interpretación de Clausius de transformabilidad de energía y mucho menos a establecer una relación con una interpretación microscópica. Un profesor menciona introducir la entropía a partir de Boltzmann (como medida de desorden) indicando que proviene de otra rama de la física (mecánica estadística). Dos profesores expresan seguir el

desarrollo axiomático del texto de Callen (1995) resaltando procesos energéticos uno de ellos y el otro planteando situaciones "absurdas" y la imposibilidad de algunos procesos térmicos.

Por lo que toca a cómo definen la entropía, se encuentra la siguiente dispersión (algunos profesores expresan más de una definición).

La entropía determina la dirección de los procesos espontáneos (4/12)

Entropía como calidad de la energía disponible (1/12)

La entropía no tiene definición (4/12)

La entropía es la expresión $\Delta S = \Delta Q/T$ (3/12)

La entropía es el calor disponible para realizar trabajo (1/12)

La entropía es una propiedad termodinámica (2/12)

La entropía es un concepto que surge por necesidad de explicar los cambios espontáneos (1/12)

La entropía se inventa para dar cuenta de los procesos irreversibles (1/12)

La entropía es el volumen en el espacio fase (1/12)

En la entrevista se intentó que los profesores expresaran el significado físico que dan a la entropía y lo que intentan que sus alumnos comprendan. Al respecto se obtiene:

Cantidad de calor disponible para realizar trabajo (1/12)

Representa la degradación de la energía (1/12)

Una propiedad termodinámica (1/12)

Criterio de direccionalidad de los procesos (4/12)

Criterio de espontaneidad de los procesos (1/12)

No tiene interpretación (2/12)

Pérdida de restricciones del sistema (1/12)

El concepto de orden y desorden (2/12)

Es interesante notar como la idea de desorden (orden) no aparece en la interpretación de la entropía de la mayoría de los profesores (16%) y, prefieren referirse a criterios y restricciones de los sistemas (50%). Algunos la relacionan con la energía (16%) y aunque el porcentaje es bajo, no deja de llamar la atención que hay profesores (16%) que no le asignan ninguna interpretación a pesar de tratarse de un concepto físico. Por otro lado, es notorio en la interpretación, más que en la definición, la correspondencia entre los libros de texto y lo que dicen los profesores a sus alumnos como se verá más adelante.

Categoría c). Uso de la historia y de nuevas formulaciones

No resulta extraño, de los resultados de categorías a) y b) que los profesores no conozcan o tomen en cuenta el desarrollo histórico del concepto de entropía. Cabe destacar que los profesores de la Facultad de

Química (85%) no toman en cuenta ningún aspecto histórico, mientras que los profesores de la Facultad de Ciencias (60%), dicen concederle mayor importancia a la historia y reconocen que el desarrollo de su clases a partir de los ciclos de Carnot toma en cuenta el aspecto histórico, alguno más deja a sus alumnos la lectura de algún texto de divulgación con enfoque histórico (texto de García-Colín, 2000), sin embargo, la presentación que hacen es la basada en los libros de texto, sobre todo a partir de la propuesta de Fermi.

Ninguno de los profesores entrevistados lleva a cabo el desarrollo de Boltzmann aunque lo mencionen o hablen de la entropía como desorden. Cabe resaltar un profesor de la Facultad de Química que dice que la historia no es necesaria, que lo que debe buscarse es el dominio matemático por parte del alumno.

En el cuestionario también se les presentó la ecuación de Clausius ($S - S_0 = \int dH/T + \int dZ$) para conocer si habían tenido alguna información de ella o si podían decir algo al respecto. De la muestra, sólo un profesor dijo tener una vaga idea de haberla visto en alguna clase cuando fue estudiante pero no podría ahora interpretarla, el resto de los profesores dijo nunca haberla visto ni podría darle alguna interpretación.

Por lo que respecta a nuevas formulaciones o a declarar estar enterados del debate (físico y filosófico) que se lleva a cabo en nuestros días, ninguno de los profesores entrevistados tienen noticia de esas propuestas ni conoce de trabajos y autores que aborden el significado del concepto de entropía como se muestra en el tratamiento que describen de la entropía.

Cómo se presenta la entropía en los libros de texto

Los libros de texto que mencionaron los profesores y sobre los cuales se lleva a cabo el análisis se muestran en la Tabla 1:

Termodinámica y Mecánica Estadística	Físico – Química
Abbott M. y Van Ness, H. (1991)	Morris, J. (2011)
Callen, H. (1985)	Canales, M (1999)
Chue, S. (1979)	
García – Colín, L. (1972)	
Piña, E. (1978)	
Pippard, A. (1960)	
Reif, F. (1965)	

Tabla 1.- Libros más usados por los profesores entrevistados.

En el Anexo 2 se resume para cada autor los elementos que toma para el desarrollo de la entropía en su texto. Estos elementos son: enfoque (macroscópico o microscópico); aspectos esenciales de su argumentación; definición de entropía.

Como puede apreciarse, la mayoría de los textos se orientan por una versión postulatoria en la que, se parte de introducir la entropía como una consecuencia de los ciclos termodinámicos y de la segunda ley. Sin embargo se notan diferencias en el lenguaje. Por ejemplo Pippard (1960), Piña Garza (1978) y Chue (1979) la consideran una *propiedad del sistema* ligada a ciertas restricciones. Otros como García Colín (1972) la introducen

como un *criterio* para decidir si un proceso entre diversos estados puede ocurrir o no. Abbott y Vanness afirman que no hay una definición explícita por lo que la consideran un *concepto primitivo*.

En congruencia con ese enfoque, los textos de termodinámica (ver Anexo 2) con mayor o menor refinamiento matemático, reproducen los tratamientos clásicos de Clausius, Planck, y Fermi y no ven como necesidad dar una explicación de un concepto que señalan "se desprende de la segunda ley y desde la cual se va a poder definir la entropía como variable termodinámica" (García Colín, 1972 p. 85).

De la revisión se muestra que hay una referencia polisémica para la entropía lo cual sin duda tiene que ver con las dificultades para su comprensión (Fast, 1970). Entre las denominaciones para la entropía de los textos revisados se tienen los siguientes términos:

Propiedad termodinámica

Variable termodinámica

Función de estado

Propiedad intrínseca del sistema

Criterio para decidir si un proceso entre dos estados puede ocurrir o no

Criterio para distinguir las transformaciones irreversibles de las reversibles

Criterio para definir la dirección en la cual un proceso puede tener lugar

Un postulado

Un concepto primitivo

De la muestra, dos libros tratan de manera amplia el punto de vista microscópico (Díaz Peña, 1979; Callen, 1985). En ellos el enfoque probabilístico se centra en el término de desorden. Por ejemplo, en Díaz Peña se describe "... el desorden está relacionado con la probabilidad o con el número de maneras de colocar una serie de objetos. Cuanto mayor es este número mayor es la probabilidad de que estos objetos estén ordenados al azar, que es lo mismo que decir que están desordenados." (Díaz Peña, 1979, p. 54).

Es de hacer notar que en lugar de establecer una representación con los sistemas termodinámicos, el desarrollo posterior se centra en el barajar de cartas o arreglo de objetos y de ello infiere su analogía con la entropía cuando los trabajos de Boltzmann y Gibbs presentan aproximaciones centradas en los procesos físicos.

En el caso de Callen (1985) la termodinámica es un formalismo que se sustenta en pocas hipótesis simples y la entropía es un concepto central. Define a la entropía como " ... uno de los parámetros extensivos como la energía, el volumen, el número de moles y el momento magnético" y lo conecta con la probabilidad argumentando que si las restricciones externas se remueven el número de estados permisibles aumenta. Establece como postulado de la energía que "la entropía aumenta al máximo permitido por las restricciones impuestas" (Callen, 1985, p. 332) por lo que concluye que la entropía puede ser identificada con el número de microestados,

siguiendo, en parte, la formulación de Gibbs. Para dar sentido a la expresión $S = k \ln W$, este autor refiere a la teoría de información de Shannon (1949) introduciendo una explicación desde otro campo distinto a la física para intentar dar sentido físico a la entropía, aspecto que no aparece en ninguno de los tratados históricos descritos.

Discusión

La entropía es uno de los conceptos importantes de la física por todas las implicaciones que tiene en los diversos sistemas físicos no solo los de la termodinámica clásica o mecánica estadística, sino también en los procesos para entender la evolución del universo, sin embargo es también uno de los más abstractos y más difíciles de representar, tal vez esa dificultad radica en que no tiene una imagen substancial subyacente, que permanezca en el imaginario colectivo (Falk, 1984). Esto puede notarse tanto en el desarrollo de Boltzmann que desarrolla su propuesta de entropía a partir de la semejanza con el comportamiento matemático (propiedades aditivas y multiplicativas de los logaritmos) funcional de sus expresiones para los estados probables de los arreglos de partículas o como en los desarrollos posteriores a Clausius (Planck, Fermi, Gibbs, etc.) que la asocian a un estado o una propiedad de los sistemas también por medio de su comportamiento matemático.

Adicionalmente, la aceptación de Shannon de la sugerencia de von Neumann de utilizar el término de entropía debido al parecido de su ecuación informática con la de la probabilidad de Boltzmann, se constituye en una fuente adicional de confusión que abona a la idea de desorden (Cercignani & Penrose, 2006).

La identificación de la entropía como desorden que si bien tiene referentes en el propio Boltzmann en su descripción de configuraciones molecularmente ordenadas o desordenadas, ha resultado más un obstáculo que una clarificación para la comprensión de la entropía como dan cuenta de ello los diversos análisis físicos, filosóficos e históricos (Harman, 1962; Falk, 1985; Ibarra & Morman, 2006; Müller, 2007). Esta confusión, puede verse en las interpretaciones de los alumnos de situaciones físicas como la expansión del un gas en un proceso adiabático (Broseau y Virard, 1992). Lo mismo puede argumentarse en expresiones como "propiedad intrínseca del sistema" o "postulado primitivo" que no aportan ningún elemento de interpretación para los alumnos e incluso el término de variable de estado que no tiene un referente sensitivo como volumen, presión y temperatura presenta dificultades para su comprensión.

Tanto textos como profesores presentan a la entropía con una diversidad muy grande de denominaciones como se ha mostrado en los resultados. Esto da indicios de sus intentos por darle inteligibilidad a la entropía (Criterio de espontaneidad de procesos, pérdida de restricciones del sistema, propiedad intrínseca del sistema, etc.). Sin embargo, cualquier estudiante que atienda a esos intentos encontrará que son poco comprensibles (Tarsitani & Vicentini, 1996; Cotignola, Bordogna, Puente, & Cappannini, 2002), pues como señalan Alonso y Fin "... las dificultades mayores encontradas cuando la entropía se presenta de esta manera son: i) aceptar que se define como un <cambio>; ii) comprender que es una

variable de estado sin efectuar ninguna conexión con la estructura interna del sistema" (Alonso y Finn, 1996, p. 30). No es pues de extrañar que el término "desorden" sea asumido por los alumnos pues es, a fin de cuentas, un referente correlacionable con su contexto cotidiano, es una expresión que ofrece algo al cuál asirse aunque no puede comprenderse cómo a partir de una expresión como $\Delta S = \Delta Q/T$ pueda definirse el desorden de un sistema termodinámico o bien cómo desde una concepción mecánica pueda introducirse un proceso probabilístico (Daub, 1969).

Conclusiones

A partir de los resultados de las entrevistas y de la revisión de los textos pueden obtenerse algunas consideraciones.

El significado de los textos para la entropía se remite a enfatizar los aspectos matemáticos y se ignoran los esfuerzos de inteligibilidad de Clausius y Boltzmann. En efecto, las interpretaciones de Clausius en términos de transformabilidad de energía y su relación con las partículas (Término Z) no se menciona siquiera como un referente histórico y sobre Boltzmann en pocos libros se hace notar la deducción de su ecuación en términos de los estados posibles. La mayoría de los textos y profesores al definirla como variable sólo atienden a sus relaciones y condiciones matemáticas y no profundizan en su significado.

La entropía, un concepto polisémico. Como puede notarse, desde los primeros *tratados para los cursos de termodinámica*, la entropía comienza a tener diferentes connotaciones (Planck, Fermi, Sommerfeld, etc.) que se ven aumentadas por los profesores y los libros de texto. Así la entropía pasa a ser desde una transformación no compensada hasta una propiedad termodinámica o un criterio para definir qué es una transformación reversible y que no. Desde luego que varias de esas connotaciones están estrechamente relacionadas y en conjunto contribuyen a ampliar las condiciones y formas de abordar la entropía, sin embargo esto no es explícito ni en los docentes ni en los libros.

La interpretación de la entropía como "medida del desorden" se ha justificado fuera del campo de la termodinámica. Para hacer comprensible esta idea, diversos difusores, han propiciado la apertura a otros campos como la teoría de información, los procesos biológicos y las teorías sobre sistemas que si bien, han transpuesto el concepto de entropía ampliando con ello su campo de aplicación, no se tratan, sin embargo, en los libros de termodinámica con una orientación clara y marcando las diferentes funciones del concepto en esos campos, propiciando ambigüedad para su interpretación física.

La medida del desorden como definición de la entropía parece apelar a la intuición y facilitar su comprensión pero en realidad la obscurece. Esta expresión de carácter general lleva sólo a la consideración de que la entropía sólo mide si el arreglo de un sistema tiene cierto orden o si tiende a la configuración aleatoria o equiprobable. En este sentido pierde significado en términos de los propios sistemas termodinámicos y su relación con la segunda ley y la energía, al menos no es claro para los

estudiantes como hacen notar Broseeau y Viard (1992) y Tarsitani y Vicentini, (1996).

Ni la historia ni los nuevos desarrollos tienen cabida en las perspectivas de los profesores. Es claro que la mayoría de los profesores no conoce el desarrollo histórico de la termodinámica y en especial del concepto de entropía, también se mezcla en sus perspectivas educativas la noción de inutilidad de la historia de la ciencia que sólo se puede explicar si la conciben como una colección de hechos. Por lo que respecta a los nuevas interpretaciones y desarrollos para formalizar y esclarecer el significado de la entropía, los profesores no muestran estar al tanto de tales desarrollos lo que, desde luego les impide de tener nuevos elementos e ideas que pudieran ser de utilidad en sus clases.

Implicaciones

Los conceptos físicos tienen una historia en la que han pasado por reinterpretaciones y formalizaciones diversas hasta que logran un cierto uso estándar o dejan de usarse de manera definitiva en procesos como coalescencia y transformación. La entropía no sólo sigue un proceso de transformación representacional sino que además presenta dificultades especiales como otros conceptos físicos relevantes que comparten una posición de conceptos estructuradores dentro de las teorías físicas, que han tenido un desarrollo histórico rico en interpretaciones diversas y polémicas y que han sido motivo de intensos debates filosóficos.

Sugerimos que la enseñanza de la entropía debería beneficiarse de la riqueza histórica y del debate actual que este concepto presenta y, que los alumnos deberían tener la oportunidad de conocer esos desarrollos, si bien no con la intención de que se adhieran a uno específico – cosa que puede ocurrir según sus posibilidades representacionales – sí con la posibilidad de que amplíen su imagen sobre el desarrollo de los conceptos físicos y que tomen un papel más activo en sus procesos de comprensión o de aprendizaje.

De esta forma en los cursos regulares de termodinámica y en los textos debería incluirse un breve panorama de su historia, no sólo de sus orígenes, sino también de cómo fue cambiando su estatus y significado, así como los diversos nombres que los desarrollos de los continuadores fueron aportando y, en la medida de lo posible, hacer notar que los esfuerzos clarificadores aún continúan. Las ventajas que esto podría tener para los alumnos se pueden resumir pero no agotar en lo siguiente:

Los alumnos comprenderían que la entropía es un concepto que se ha ido transformando en el tiempo y en el cuál aún existen debates.

Tendrían más elementos para comprender que los conocimientos científicos no son permanentes.

Tendrían elementos para juzgar y así confiar o no en textos que indican que la entropía no tiene significado físico o que es un criterio para determinar procesos.

Tendrían nuevos elementos para comprender la importancia de la historia de la ciencia en su aprendizaje de los conocimientos científicos y valorar los experimentos y desarrollos históricos (Sichau, 2000).

Generarían expectativas diferentes sobre lo que implica aprender los conocimientos físicos y su papel que como estudiantes tienen en la comprensión de esos conocimientos.

Referencias bibliográficas

- Abbott, M.M. y H. Van Ness (1991). *Termodinámica*. México: McGraw Hill.
- Alonso, M. y E. Finn (1996). Un enfoque integrado de la Termodinámica en el curso de Física General (segunda parte), *Revista Española de Física*, 10, 3, 30 – 37.
- Boltzmann, L. (1964). *Lectures on gas theory*. Berkeley: University of California Press.
- Brosseau, C. y J. Viard (1992). Quelques reflexions sur le concept d'entropie issues d'enseignement de thermodynamique. *Enseñanza de las Ciencias*, 10, 1, 13-16.
- Canales, M.; Hernández, T.; Meraz, S. y I. Peñaloza (1999). *Físicoquímica* (Vol. 1). México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Cercignangi, C. y R. Penrose (2006). *Ludwig Boltzmann*. London: Oxford University Press.
- Chang, J.Y. (1999). Teacher's college students' conceptions about evaporation, condensation and boiling. *Science Education*, 83, 5, 511-526.
- Chue, S.H. (1977). *Thermodynamics. A rigorous postulatory approach*. New York: John Willey and Sons.
- Clausius, R. (1991). *Théorie mécanique de la chaleur*. Sceux: Jacques Gabay.
- Callen, H. (1985). *Thermodynamics and a introduction to thermostatics*. New York: John Willey and Sons Inc.
- Cotignola, M.; Bordogna, C.; Puente, G. y O. Cappannini (2002). Difficulties in learning thermodynamics concepts: are they linked to the historical development of this field? *Science & Education*, 11, 279-291.
- d'Abro, A. (1951). *The rise of new physics. Its mathematical and physical theories* (Vol. 1). New York: Dover Publications.
- Daub, E. (1969). Probability and thermodynamics: the reduction of the second law. *Isis*, 60, 3, 318-330.
- Díaz Peña, M. (1979). *Termodinámica y mecánica estadística*. Madrid: Alambra.
- Falk, G. (1985). Entropy, a resurrection of caloric -a look at the history of thermodynamics. *European Journal o Physics*, 6, 108-115.
- Fast, J.D. (1979). *Entropy*. Lonodon: McMillan.
- Fermi, E. (1956). *Thermodynamics*. New York: Dover Publications.

- García-Colín, L. (2000). *De la máquina de vapor al cero absoluto*. México: Fondo de Cultura Económica.
- García-Colín, L. (1972). *Introducción a la termodinámica clásica*. México: Trillas.
- Harman, P. (1962). *Energy, Force and Matter*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hollinger, H.B. y M.J. Zenzen (1991). Thermodynamic irreversibility. *Journal of Chemical Education*, 68, 1, 31-34.
- Ibarra, A. y T. Morman (2006). Scientific Theories as Intervening Representations. *Theoria*, 55, 21-38.
- Klein, M.J. (1981). Gibbs, Josiah Willard. En C.C. Gillispie (Ed.), *Dictionary of Scientific Biography Vol 5*. (pp. 386-393). New York: Charles Scribner's Sons.
- Kesidou, S. y R. Duit (1993). Students' conceptions of the second law of thermodynamics. An interpretative study. *Journal of Research in Science Teaching*, 30, 1, 85-106.
- Leff, H. (2007). Entropy, its language, and interpretation. *Foundations of Physics*, 37, 1744-1766.
- Lieb, E. y J. Yngvason (2000). A fresh look at entropy and the second law of thermodynamics. *Physics Today*, 53, 4, 32-37.
- Lieb, E. y J. Yngvason (1999). The physics and mathematics of the second law of thermodynamics. *Physics Report*, 310, 1-96.
- Müller, I. (2007). *A history of thermodynamics*. Berlin: Springer.
- Morris, J. (1982). *Fisicoquímica para biólogos*. Madrid: Reverté.
- Moulines, U. (1991). The classical spirit in J. Willard Gibbs's thermodynamics. En K. Martínás, L.; Ropolyi y P. Szegedi (Eds.), *Thermodynamics: history and philosophy facts, trends, debates* (pp. 1-12). Singapore: World Scientific.
- Planck, M. (1987). *autobiografía científica*. Mexico: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Planck, M. (1945). *Treatise on thermodynamics*. New York: Dover.
- Piña, E. (1978). *Termodinámica*. México: Editorial Limusa.
- Pippard, A.B. (1981). *Elementos de Termodinámica Clásica*. México: EASO.
- Sciarretta, M.; Stilli, M. y M. Vicentini (1990). On the thermal properties of materials: common-sense knowledge. *International Journal of Science Education*, 12, 4, 369-379.
- Sichau, C. (2000). Practising helps: Thermodynamics, history and experiment. *Science & Education*, 9, 389-398.
- Tarsitani, C. y M. Vicentini (1996). Scientific mental representations of thermodynamics. *Science & Education*, 5, 51-68.

Uffink, J. (2001). Bluff your way in the second law or thermodynamics. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 32, 3, 305-394.

Anexo 1.- Definición y desarrollo de la entropía y consideraciones sobre dificultades de los alumnos y el uso de la historia por los profesores de Física.

Profesor	Dificultades que perciben en los estudiantes	Desarrollo del tema	Definición de entropía	Interpretación de la entropía	Papel que asignan a la historia
1	Piensan que la termodinámica no es importante	Ciclo de Carnot; ecuaciones de energía	Cualidad de la energía útil	Direccionalidad de los procesos	Introduzco la historia con los ciclos de Carnot
2	Tienen conceptos distorsionados	Sigo el libro de Callen	No defino, muestro ejemplos	La entropía no tiene interpretación Física	Pienso que tienen un papel heurístico pero no la uso
3	No tienen ningún problema	Ciclos de Carnot y segunda ley	Sólo introduzco la ecuación integral	Pérdida de constricciones de un sistema	Remarco el trabajo de Gibbs
4	Confunden calor y temperatura, confunden reversibilidad e irreversibilidad	Sigo a Clausius y las máquinas térmicas	Cantidad que se transforma en un proceso	Cantidad que es transformada en los procesos	Introduzco la historia con los ciclos de Carnot
5	Los profesores de bachillerato no enseñan bien	Sigo a Clausius	Entropía como volumen en un espacio fase	Orden y desorden en un espacio fase	No es relevante
Profesor	Dificultades que perciben en los estudiantes	Desarrollo del tema	Definición de entropía	Interpretación de la entropía	Papel que asignan a la historia
1	No entienden los conceptos	Sigo el libro de Callen	El calor útil para hacer trabajo	El calor útil para hacer trabajo	No la tomo en cuenta
2	Sus matemáticas son pobres	Ciclo de Carnot y ecuación de Clausius	No doy ninguna definición	Degradación de la energía, flecha del tiempo	No la tomo en cuenta
3	No entienden las variables	Ciclos de Carnot	Sólo muestro la ecuación	Nivel de organización y desorganización de un sistema	No la tomo en cuenta
4	Sus matemáticas son pobres	Ecuación de Clausius, máquinas térmicas	Cantidad de calor transferida por unidad de tiempo	Una propiedad termodinámica	No la tomo en cuenta
5	Confusión entre trayectoria y estado	Ciclos de Carnot	No doy ninguna definición	Propiedad de un sistema; criterio de direccionalidad	No la tomo en cuenta
6	No piensan lógicamente	Ecuación de Boltzmann y el concepto de	Un concepto que emerge de la necesidad	Criterio de espontaneidad de los procesos	No la tomo en cuenta

		aleatoriedad	de explicar cambios espontáneos		
7	Sus matemáticas son pobres no entienden los diagramas PV	Ciclos de Carnot	Es la flecha del tiempo; la direccionalidad de los procesos	Direccionalidad de los procesos	Pido que lean sobre historia de la termodinámica

Anexo 2.- Tratamiento y definición de entropía en los textos de termodinámica.

Textos (Termodinámica)	Desarrollo	Definición de Entropía
Abbott M. y Van Ness, H.	Define la energía interna e introduce la entropía en términos de coordenadas de un sistema; describe la segunda ley con base en la entropía. Menciona lo inútil de que los estudiantes aprendan a través de la historia.	No hay definición para la Entropía, porque es un concepto primitivo.
Callen, H.	Introduce la entropía como una función variacional que define el estado de equilibrio; menciona a Gibbs pero no explica sus ideas. Describe un sistema macroscópico en términos de transiciones cuánticas de estado.	Define entropía como el logaritmo de un número de micro-estados. Describe la entropía como desorden y usa analogías fuera de la física.
Chue, S.	Introduce las máquinas térmicas y describe la segunda ley .	Define entropía como una propiedad deducida de la segunda ley, describe los teoremas de Hatsopolous – Kennan y la integral de línea.
García –Colín, L.	Describe el ciclo de Carnot, los procesos reversibles e irreversibles y describe la entropía como una relación entre calor y temperatura.	Define entropía como una variable termodinámica y muestra su ecuación integral..
Piña, E.	Describe el ciclo de Carnot y la relación calor –temperatura.	Describe la entropía como una integral que aumenta cuando no hay restricciones en el sistema.
Pippard, A	Describe el ciclo de Carnot; hace generalizaciones con la relación calor – temperatura y describe la integral entre dos estados.	Define entropía como una propiedad de los sistemas y sus restricciones.
Reif, F.	Describe estados de equilibrio y de no equilibrio, usa el logaritmo para describir la variación de energía.	Define la entropía como la función logarítmica de Boltzmann.

Textos (Físico-Química)	Desarrollo	Definición de Entropía
Morris, J.	Introduce la entropía como una función matemática; describe la entropía como una medida de la distribución aleatoria de energía.	Introduce tres definiciones: S – medida de la estabilidad de un sistema S – medida de la distribución aleatoria de energía S – medida del desorden de un sistema.
Canales, M.	Describe la unidireccionalidad de la transferencia del calor y describe que los sistemas tienden al equilibrio de manera espontánea.	Define la entropía como una medida que aumenta cuando la distribución es aleatoria. Usa la función logarítmica de Boltzmann y la ecuación diferencial de Clausius sin explicar cómo están relacionadas.