

Significado Institucional de Entropía

Juan Alberto Farina¹, Graciela Rita Utges²

¹Facultad Regional Rosario, Universidad Tecnológica Nacional, Zeballos 1341, CP 2000, Rosario, Santa Fe, Argentina-

²Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Av. Pellegrini 250, CP 2000, Rosario, Santa Fe, Argentina

REVISTA
DE
ENSEÑANZA
DE LA
FÍSICA

E-mail: juanalbertofarina@gmail.com

Resumen

En este trabajo analizamos el significado institucional de la entropía. La perspectiva teórica metodológica se inscribe dentro del enfoque ontosemiótico (EOS) y se aborda el concepto de entropía como "objeto" de conocimiento y su significado desde una perspectiva sistémica y pragmática, que incorpora aspectos correspondientes tanto al logos (conceptos-definiciones, proposiciones, argumentaciones) como a la praxis (situaciones-problemas y acciones). Se presenta una síntesis de un trabajo más amplio hecho en razón de explorar el significado Institucional y Personal del objeto entropía, abarcando tres vertientes preponderantes para la enseñanza de entropía y Segundo Principio de la Termodinámica: macroscópica o clásica, microscópica y axiomática. Se analizan tres textos representativos de cada enfoque y se presenta como resultado de ello las configuraciones epistémicas asociadas al concepto de entropía según las tres perspectivas analizadas

Palabras clave: Objeto, Significado Institucional, Entropía, Enfoques, Termodinámica.

Abstract

This paper analyzes the institutional meaning of entropy. The methodological theoretical perspective is part of ontosemiotic approach (EOS) and the concept of entropy as "object" of knowledge and its meaning is approached from a systemic and pragmatic perspective, incorporating relevant aspects both the logos (concepts-definitions, propositions, arguments) and praxis (problem situations and actions). a summary of a larger work done It occurs due to explore the institutional and personal meanings of entropy object, spanning three prevailing aspects for teaching entropy and secondlaw of thermodynamics: macroscopic or classic, microscopic and axiomatic. Three representative word of eachapproach are analyzed and as a result presents the concept of entropy associated epistemic configurations according to three perspectives analyzed.

Keywords: Object, Institutionalmeaning, Entropy, Approaches, Thermodynamics.

I. INTRODUCCIÓN

Entropía es un concepto central tanto en física como en química. Se trata no obstante de una noción compleja, difícil de explicar e interpretar significativamente.

Generalmente, la entropía es presentada en los cursos básicos universitarios, desde una perspectiva clásica, sea porque esa es la que han recibido los docentes en su formación o porque es la que reproducen la mayoría de los libros de texto.

Como detallan Tarsitani y Vicentini (1996), los libros de texto basados en el enfoque clásico desarrollan el concepto de Entropía a partir de la visión de Clausius, con particular atención en los aspectos fenomenológicos de los procesos térmicos y el rendimiento de las máquinas térmicas. Esta es precisamente la perspectiva utilizada en el clásico libro de Zemansky (1970), que reconoce como antecedentes los textos de Maxwell y de Planck de fines del siglo XIX, y que ha impregnado a autores posteriores, marcando un camino para la enseñanza del concepto.

Esa perspectiva, que se apoya en el análisis de las máquinas térmicas puede ser vista como muy relevante en carreras técnicas, como por ejemplo en ingeniería, dada su utilidad para realizar cálculos concretos. Sin embargo, la típica formulación de la entropía a partir del teorema de Clausius es percibida por los estudiantes como una formulación matemática sin significado claro y preciso. Muchos autores coinciden con esta apreciación. Así, García Colin (1983) destaca, por ejemplo, que en su larga trayectoria

docente en la enseñanza de la termodinámica, ha observado que muy poca gente logra que los estudiantes capten con claridad el concepto de entropía.

La manera clásica de definir este concepto central de la Termodinámica, si bien se organiza a partir de una elegante formulación matemática, acarrea el problema de no aportar demasiado a la comprensión de la entropía desde el punto de vista físico. La expresión clásica, en términos de $\delta Q/T$ permite realizar cálculos relevantes, pero su significado permanece, en general, oscuro y opaco para los estudiantes, e incluso para muchos profesores. Frente a las dificultades de comprensión conceptual que acarrea la perspectiva clásica, surgen voces que plantean la conveniencia de enseñar el concepto desde una perspectiva microscópica. Vale citar autores como William Reynolds (1967), Charles Kittel (1973), Frederick Reif (1969) y Bernard Jancovici (1997) quienes, entre otros, sugieren que la perspectiva microscópica podría ofrecer mayores ventajas para la interpretación de la entropía y proponen introducirla a partir de la formulación de Boltzmann tomando como base la noción de multiplicidad de estados.

Si bien coincidimos con las apreciaciones anteriores, advertimos que un enfoque de la enseñanza del concepto de entropía planteada desde la formulación de Boltzmann tampoco está exento de problemas, y requiere de la elaboración de situaciones didácticas adecuadas para lograr una apropiación significativa por parte de los estudiantes. Particularmente, hay que tener en cuenta que la misma involucra modelos especiales y consideraciones de probabilidades y estadística que no siempre los estudiantes comprenden acabadamente.

De hecho, si bien son pocas las investigaciones que abordan las dificultades de los estudiantes en la comprensión microscópica de la entropía, estas coinciden, como veremos más adelante, en afirmar que conceptos como macroestado, microestado o multiplicidad no siempre son debidamente interpretados. Se requiere entonces de mayor investigación en ese aspecto, así como en el desarrollo y análisis de modalidades didácticas que contribuyan a una apropiada presentación del tema.

Sea cual fuere la modalidad didáctica que contribuya a una apropiada presentación del tema, es interesante la perspectiva planteada por Godino como marco teórico para el análisis de lo que denomina “objeto” y “significado”. En el Libro “Teoría de las Funciones Semióticas: Un Enfoque Ontológico-Semiótico de la Cognición e Instrucción Matemática”, presentado en el año 2003 para optar a la cátedra de Didáctica de la Matemática en la Universidad de Granada (España), Juan Godino sintetiza los aspectos relevantes del marco teórico que venía desarrollando desde hace años en el campo de la Didáctica de las Matemáticas. Desde entonces el enfoque ha sido ampliado y profundizado, y actualmente es una referencia para el desarrollo de numerosas investigaciones en didácticas específicas.

II. MARCO TEÓRICO

Godino (2003) presenta el objeto como constructo central de su modelo y lo define como: “el emergente de un sistema de prácticas operativas y discursivas ante un cierto tipo de situaciones problema”, aclarando además que esta noción es sistémica y que el sistema de prácticas está asociado a un campo de problemas. Las prácticas operativas y discursivas sustituyen a los praxemas, Chevallard (1991)

En síntesis lo que este autor propone es que la noción de “objeto”, es un constructo teórico de naturaleza pragmática que puede ser utilizado como herramienta del análisis didáctico. Del sistema de prácticas operativas y discursivas de una persona ante un tipo de situaciones problema se postula la emergencia de objetos personales e institucionales objetivados por un léxico común. Los objetos son considerados como símbolos de unidades culturales, emergentes de un sistema de usos ligados a las actividades de resolución de problemas que realizan ciertas personas y que van evolucionando con el tiempo.

Desde el punto de vista de la didáctica, la noción de significado juega un rol importante en su relación con los objetos. Las ciencias preocupadas por la cognición humana como la psicología, la lingüística, la semiótica o la filosofía, contribuyen con sus aportes a la clarificación del mismo, pero hay que destacar que el abordaje del significado constituye de por sí una temática muy compleja.

El enfoque ontosemiótico (Godino y Recio, 1998; Godino y Batanero, 1998; Godino, 2002) caracteriza el significado como entidad compuesta integrada básicamente por una praxis, un logos y un lenguaje. Las situaciones problema, y las acciones y técnicas asociadas, conforman el componente práctico o praxis. A su vez, los conceptos-definiciones; proposiciones y argumentaciones o validaciones constituyen el componente teórico o discursivo, es decir, el logos. Los sistemas de prácticas amalgamados de esta manera constituyen sistemas discursivos y operativos, que se articulan a través del lenguaje, sea este formal o coloquial, oral o escrito.

El triplete constituido por praxis, logos y lenguaje es desagregado en la propuesta de Godino y su equipo, en seis elementos básicos que integran el significado: Situaciones-problema/Tareas; Lenguaje; Acciones/Técnicas; Conceptos; Propiedades y Argumentos.

Por lo dicho anteriormente, no es posible hablar de un significado institucional unívoco de la entropía. Por el contrario, coexisten múltiples definiciones, asociadas a diversas formulaciones del Segundo Principio de la Termodinámica. Así, en un reciente tratado sobre el tema, Capek y Sheehan (2005), distinguen 21 variedades diferentes de entropía, a partir de la manera como la misma es presentada y definida.

Sin considerar aquí toda esa diversidad de manera detallada, nos interesa destacar que la misma se relaciona con la manera como se plantea de modo general la Termodinámica. En ese sentido, podemos reconocer, desde nuestra perspectiva, tres enfoques generales diferenciados:

El enfoque clásico o fenomenológico, sustentado históricamente por su relación con las máquinas de vapor y la conservación de la energía y vinculado al trabajo desarrollado por Sadi Carnot y Rudolph Clausius. Enfatiza sobre la construcción de los conceptos asociados al desarrollo de las máquinas térmicas, es decir a la termodinámica de los ciclos y los rendimientos.

El enfoque microscópico, iniciado por Ludwig Boltzmann, que utiliza métodos estadísticos y plantea las propiedades macroscópicas de un sistema como emergentes del comportamiento colectivo de sus componentes microscópicas

El enfoque axiomático, basado en los trabajos de Constantin Carathéodory, en el que los conceptos, los axiomas que los relacionan y las leyes que de ellos se deducen se presentan formalmente, prescindiendo de sus orígenes históricos, asociados a las máquinas térmicas, y de las hipótesis corpusculares.

Es interesante observar que los textos que suelen utilizarse en la enseñanza universitaria de la Termodinámica exhiben también esa diversidad de enfoques. Algunos textos siguen fielmente uno de ellos, mientras que otros muestran presentaciones híbridas, en las que coexisten más de un enfoque.

Como ejemplos representativos de las posturas antes mencionadas podemos destacar tres libros muy difundidos: Zemansky (1970), representante del enfoque clásico, Reif (1969), prototipo del microscópico y Callen (1985), característico del axiomático.

Con el propósito de reconocer los aspectos distintivos de cada enfoque, hemos realizado un análisis de esos tres textos, que sintetizamos a continuación. Considerando el marco teórico que hemos adoptado, destacamos en cada caso los elementos que se ponen en juego para caracterizar el objeto entropía e identificamos los componentes del significado: logos (conceptos-definiciones, proposiciones, argumentaciones), praxis (situaciones-problemas y acciones) y lenguaje.

III. ANÁLISIS DE TEXTOS – ENFOQUES

A. Enfoque clásico

El texto de Zemansky (1970) es una obra ya clásica en el tema, basada fundamentalmente en el estudio de motores prácticos, motores ideales y procesos termodinámicos. Las transformaciones de calor en trabajo y de trabajo en calor son consideradas básicas para explicar, a través de procesos termodinámicos cíclicos, el funcionamiento del motor térmico y el cálculo de su rendimiento. El motor de combustión interna, la máquina de vapor y la máquina frigorífica ocupan un lugar preponderante en el desarrollo teórico.

La justificación del funcionamiento de las máquinas térmicas y los motores, realizando procesos reversibles e irreversibles, constituidos por ciclos de funcionamiento periódico de la sustancia que trabaja; la existencia de dos focos caloríficos; la entrega y absorción de calor; la realización y entrega de trabajo; y todas las transformaciones realizadas, confluyen para definir el rendimiento del motor térmico y la eficiencia de la máquina frigorífica. Estas consideraciones conducen al Segundo Principio de la Termodinámica, expresado a través del enunciado de Kelvin-Planck para el motor térmico y el enunciado de Clausius para la máquina frigorífica, que se expresan en el texto del siguiente modo:

“Es imposible construir un motor que funcionando según un ciclo no produzca otro efecto que extraer calor de un foco y realizar una cantidad equivalente de trabajo” (p.156).

“Es imposible construir un dispositivo que funcione según un ciclo y no produzca otro efecto que el paso de calor de un cuerpo a otro más caliente” (p. 157).

El abordaje de los fenómenos reversibles e irreversibles ocupa un espacio interesante de discusión, cuyo objetivo es demostrar que, como consecuencia del segundo principio, todos los procesos naturales son irreversibles y determinar en qué condiciones puede realizarse un proceso reversiblemente. Describir y explicar el comportamiento del motor ideal de Carnot mediante un análisis detallado del ciclo es considerado un elemento clave, ya que del mismo es posible deducir la temperatura absoluta. Mediante un diagrama de trabajo generalizado que considera un proceso reversible, surge el Teorema de Clausius, la

formulación matemática del Segundo Principio de la Termodinámica y la definición de Entropía como una función de variables termodinámicas de un sistema, cuyo valor en el estado final menos su valor en el estado inicial es igual a la integral

$$\int_i^f \frac{\partial Q}{T} = S_f - S_i \quad (1)$$

Reconocidos los aspectos distintivos de este enfoque, identificamos a continuación los elementos del significado en relación al objeto entropía. Las situaciones problema que son promotoras y contextualizadoras de la actividad están claramente definidas por los procesos espontáneos irreversibles que tienen lugar en la naturaleza. Estas son las situaciones desde donde emerge el objeto entropía para dar respuesta a la imposibilidad de convertir íntegramente calor en trabajo y la imposibilidad de que se produzca un flujo espontáneo de calor de un cuerpo frío a otro más caliente.

La formulación del Segundo Principio de la Termodinámica en términos de Kelvin y de Clausius, el teorema de Carnot, el teorema de Clausius son los principales componentes teóricos o discursivos que integran el logos. En torno a ellos, se desarrollan conceptos centrales como los de rendimiento, eficiencia, ciclo, foco térmico, procesos cuasiestáticos y entropía.

Las acciones (técnicas, operaciones), que constituyen la praxis del significado, incluyen el cálculo de rendimientos de motores térmicos y de eficiencia de máquinas frigoríficas. Comprenden también el cálculo de diferencia de entropía para procesos isotérmicos, isobáricos e isocóricos y su aplicación para el cálculo en procesos irreversibles.

El lenguaje, como elemento constitutivo e intrínseco del objeto entropía, está presente tanto en el logos como en la praxis. El lenguaje matemático utilizado es el correspondiente al análisis matemático de varias variables, tanto en su forma integral como diferencial. Se incluyen representaciones gráficas, como las representaciones cartesianas de procesos y ciclos (diagramas P-V, diagramas T-S). En cuanto al lenguaje icónico, se incluyen esquemas de motores térmicos y máquinas frigoríficas.

B. Enfoque microscópico

El texto de Reif (1969) es una obra representativa del enfoque microscópico. El volumen Física Estadística está dedicado al estudio de los sistemas macroscópicos compuestos de muchos átomos o moléculas y, a diferencia del texto de Zemansky, plantea los principios fundamentales de la termodinámica, y en particular el significado de la entropía, a partir de la teoría estadística. La situación estadística de mayor simplicidad es, evidentemente, la que es independiente del tiempo, es decir la que considera a un sistema aislado en equilibrio.

La base fundamental del desarrollo es, entonces, el estudio y descripción de un sistema en equilibrio compuesto por muchas partículas, en términos estadísticos. Para hacerlo viable presenta los postulados básicos de la teoría estadística.

“Si un sistema aislado se encuentra con igual probabilidad en cada uno de sus estados accesibles, está en equilibrio”(p. 120).

“Si un sistema aislado no se encuentra con igual probabilidad en cada uno de sus estados accesibles, no está en equilibrio. Tiende entonces a variar con el tiempo hasta que alcance finalmente aquella situación de equilibrio en que se encuentre con igual probabilidad en cada uno de sus estados accesibles”(p. 121).

La comprensión cuantitativa de los sistemas macroscópicos descansa esencialmente, en esta propuesta, sobre consideraciones en las que interviene el recuento de los estados accesibles a los sistemas, convirtiéndose esa idea en la de mayor utilidad. A tal efecto introduce la definición de Ω como el número de estados accesibles a cualquier sistema macroscópico y destaca que dicho número es función de la energía del sistema y aumenta rápidamente con ella. El análisis de la interacción de dos sistemas con intercambio de calor únicamente, lleva inmediatamente al concepto de entropía, considerado uno de los conceptos fundamentales de la mecánica estadística y la termodinámica.

El análisis desemboca en que el número $\Omega(E)$ de estados accesibles del sistema, mientras se intercambia energía únicamente en forma de calor entre los dos sistemas, estará dado por el producto de cada uno de los estados accesibles componentes del sistema. Dicho producto presenta un máximo muy agudo para cierto valor particular de la energía. Plantea la conveniencia de utilizar el $\ln \Omega$ e introduce,

con el nombre de entropía, la magnitud $S = k \ln \Omega$, que proporciona una medida cuantitativa del grado de aleatoriedad del sistema.

Subrayados los aspectos distintivos de este enfoque, consideramos a continuación los componentes del significado del objeto Entropía, que se ponen en juego bajo esta perspectiva.

La situación-problema característica es la explicación del comportamiento macroscópico de un sistema a partir del análisis del colectivo de partículas que lo componen.

Los componentes teóricos o discursivos están ligados a los postulados básicos de la teoría estadística y, a partir de ellos, el análisis de cómo se conforma el recuento de microestados accesibles. Los conceptos centrales son, en este caso, los de microestado, macroestado, multiplicidad y el de entropía expresada en términos de la multiplicidad.

Los elementos típicos de la praxis (acciones, técnicas, operaciones) están constituidos fundamentalmente por el cálculo de la multiplicidad de diferentes sistemas sencillos, tales como partículas en una caja o sistema de espines.

El lenguaje matemático utilizado es el correspondiente a la teoría de probabilidades y la estadística, con las representaciones gráficas asociadas (tablas de valores, histogramas, gaussianas). El lenguaje icónico incluye esquemas que representan partículas en un recipiente, sistemas de espines, etc. Se incluyen también diversas representaciones gráficas como la de entropía en función de la energía, o la de multiplicidad en función del tiempo.

C. Enfoque axiomático

El texto de Callen (1985) es una obra representativa del enfoque axiomático. El autor renuncia al desarrollo inductivo convencional a favor de un planteamiento basado en postulados, que considera los estados más que los procesos como elementos fundamentales. El planteamiento sigue los lineamientos elaborados por Laszlo Tisza, del Instituto Tecnológico de Massachusetts.

No se incluyen consideraciones sobre el ciclo de Carnot ni sobre la imposibilidad de los móviles perpetuos de diversas especies, ni consideraciones estadísticas respecto al comportamiento microscópico de las partículas que componen el sistema, sino que las funciones de estado, la energía y la entropía se convierten en conceptos básicos.

El autor parte de la observación experimental respecto a que los sistemas aislados tienden en general a evolucionar espontáneamente hacia estados finales simples (equilibrio). Consecuentemente, intenta formular la descripción del equilibrio, de modo que proporcione la base para el desarrollo teórico posterior, enunciando un primer postulado.

Postulado I: *Existen estados particulares (denominados estados de equilibrio) de los sistemas simples que, desde un punto de vista macroscópico, están caracterizados completamente por la energía interna U , el volumen V y los números de moles N_1, N_2, \dots, N_r , de los componentes químicos (p. 11).*

Postula la existencia de una función energía, macroscópica y conservativa. Sin embargo, para que esta función energía pueda ser significativa en sentido práctico, debe asegurarse de que es macroscópicamente “controlable y medible”. Demuestra a continuación que efectivamente existen métodos prácticos de medida de la energía; y al hacerlo, llega también a una definición funcional y cuantitativa del calor. Establece sucintamente, la cuestión del control y la medición de la energía del siguiente modo: existen paredes, denominadas adiabáticas, con la propiedad de que el trabajo realizado al hacer evolucionar un sistema adiabáticamente aislado entre dos estados está determinado totalmente por dichos estados, con independencia de todas las condiciones externas. El trabajo realizado es la diferencia de energía interna entre los dos estados.

El hecho de que la diferencia de energía entre dos estados cualesquiera sea susceptible de ser medida proporciona directamente una definición cuantitativa del calor: el aporte de calor a un sistema en cualquier proceso (para números de moles constantes) es simplemente la diferencia de energía interna entre los estados final e inicial menos el trabajo realizado en dicho proceso.

Formula entonces lo que considera el problema básico de la termodinámica: la determinación del estado de equilibrio final que se alcanza después de eliminar las ligaduras internas de un sistema compuesto aislado.

Sobre la base de la experiencia con muchas teorías físicas, propone que la forma más económica de expresar el criterio de equilibrio es en términos de un principio extremal. Esto es, que los valores de los parámetros extensivos en el estado de equilibrio final son simplemente aquellos que “maximizan” una cierta función. Dicha función es la entropía, que presenta en el siguiente postulado:

Postulado II: *Existe una función (denominada Entropía S) de los parámetros extensivos de cualquier sistema compuesto, definida para todos los estados de equilibrio y que tiene la propiedad siguiente: los valores que toman los parámetros extensivos, en ausencia de ligaduras internas, son aquellos que maximizan la entropía respecto al conjunto de los estados de equilibrio ligados (p. 23).*

La relación que da la entropía como función de los parámetros extensivos es denominada relación fundamental. Plantea que si se conoce la relación fundamental de un sistema particular, toda la información termodinámica imaginable concerniente al sistema puede deducirse a partir de ella: no queda un solo atributo termodinámico que no esté determinado completa y precisamente.

Destacados los aspectos que distinguen el enfoque axiomático, ponemos en relevancia a continuación los elementos del significado característicos de esta perspectiva.

La situación problema que contextualiza la actividad es la evolución espontánea de los sistemas aislados hacia el estado final de equilibrio. La formulación de la descripción del equilibrio es el problema básico del cual emerge el objeto entropía.

Los componentes teóricos están conformados por los postulados I y II y la relación fundamental de la Entropía como función de los parámetros extensivos. Plantea una función variacional que define el estado de equilibrio y se trata de un parámetro extensivo. Los principales conceptos son aquí los de sistema, estado, equilibrio, energía, ligaduras y entropía, entendida esta última como función de los parámetros extensivos, y que está definida para los estados de equilibrio.

Los principales elementos que constituyen la praxis en esta postura (acciones, técnicas, operaciones) incluyen la determinación de las ecuaciones de estado de un sistema a partir de la denominada relación fundamental.

El lenguaje matemático utilizado es el del cálculo diferencial e integral en varias variables y las representaciones gráficas asociadas con él (por ejemplo, gráficas de entropía en función de los parámetros extensivos, y representación, en dichas gráficas, de procesos particulares). Las representaciones icónicas, tipo esquemas o imágenes ilustrativas están prácticamente ausentes en el texto.

IV. COMPARACIÓN DE LAS PRESENTACIONES

Se destaca en cada enfoque los componentes del significado. Las situaciones-problemas prototípicas de los tres enfoques son los procesos espontáneos e irreversibles abordados con diferentes matices. En cada enfoque se plantean además situaciones-problemas básicas. Los tres enfoques presentados están caracterizados por enunciados fundamentales sobre los que se asientan los desarrollos posteriores que identifica cada perspectiva.

El enfoque clásico no se caracteriza por mencionar los fenómenos de los procesos cercanos al equilibrio y tampoco menciona la evolución en el tiempo, sin embargo un cálculo típico predominante y destacable es la determinación de los cambios de Entropía en procesos reversibles e irreversibles. El desarrollo del enfoque que denominamos axiomático está centrado en los procesos cercanos al equilibrio y los postulados de la teoría hacen la diferencia de la forma de expresar el Segundo Principio de la Termodinámica en la forma tradicional. La existencia del equilibrio es esencial para definir las cantidades macroscópicas termodinámicas. Zemansky destaca los puntos inicial y final de equilibrio; mientras que Callen se refiere a los procesos cercanos al equilibrio. En el enfoque microscópico el sistema termodinámico está definido desde el comienzo como un sistema con muchos grados de libertad por lo que el método estadístico es presentado como relevante desde el comienzo, para llegar a la noción de Entropía relacionándola con el concepto de probabilidad. El autor destaca la necesidad de definir un enlace con los procesos cercanos al equilibrio y analiza detalladamente las fluctuaciones.

Otra característica relevante es el lenguaje utilizado por cada uno de los autores para describir los fenómenos. En el enfoque clásico los esquemas de los motores térmicos, los esquemas de las máquinas frigoríficas y la representación gráfica de ciclos constituyen un ícono de esa literatura. En el enfoque microscópico, al ser un enfoque estadístico basado en las propiedades de un modelo discreto, es habitual encontrarse con figuras alegóricas a partículas en un recipiente, representaciones gráficas de curvas Gaussianas y diagramas de barras. En el enfoque axiomático las hipersuperficies y las curvas trazadas arbitrariamente desde un estado inicial a un estado final acercan al lector a los procesos cuasiestáticos en donde se observa la sucesión de estados de equilibrio diferenciándolos de los procesos reales donde se manifiesta una sucesión temporal de estados de equilibrio y desequilibrio.

Las expresiones matemáticas utilizadas para describir el concepto de entropía están basadas en ecuaciones integrodiferenciales en la descripción axiomática; mientras que en la descripción microscópica

la matemática de las probabilidades y el cálculo de valores medios tienen especial preponderancia. En la descripción fenomenológica prima el cálculo integral y diferencial.

V. DISCUSIÓN

Se destacan en cada enfoque los componentes del significado. Las situaciones-problemas prototípicas de los tres enfoques son los procesos espontáneos e irreversibles abordados con diferentes matices. En cada uno se plantean situaciones-problemas básicas. Los tres están caracterizados por enunciados fundamentales sobre los que se asientan los desarrollos posteriores que identifica cada perspectiva.

El enfoque clásico no se caracteriza por mencionar los fenómenos de los procesos cercanos al equilibrio y tampoco menciona la evolución en el tiempo, sin embargo un cálculo típico predominante y destacable es la determinación de los cambios de Entropía en procesos reversibles e irreversibles.

El desarrollo del enfoque que denominamos axiomático está centrado en los procesos cercanos al equilibrio y los postulados de la teoría hacen la diferencia de la forma de expresar el Segundo Principio de la Termodinámica en la forma tradicional. La existencia del equilibrio es esencial para definir las cantidades macroscópicas termodinámicas. Zemasnky destaca los puntos inicial y final de equilibrio; mientras que Callen se refiere a los procesos cercanos al equilibrio.

En el enfoque microscópico el sistema termodinámico está definido desde el comienzo como un sistema con muchos grados de libertad por lo que el método estadístico es presentado como relevante desde el comienzo, para llegar a la noción de Entropía relacionándola con el concepto de probabilidad. El autor destaca la necesidad de definir un enlace con los procesos cercanos al equilibrio y analiza detalladamente las fluctuaciones.

En el enfoque clásico los esquemas de los motores térmicos, los esquemas de las máquinas frigoríficas y la representación gráfica de ciclos constituyen un ícono de esa literatura. En el enfoque microscópico, al ser un enfoque estadístico basado en las propiedades de un modelo discreto, es habitual encontrarse con figuras alegóricas a partículas en un recipiente, representaciones gráficas de curvas Gaussianas y diagramas de barras. En el enfoque axiomático las hipersuperficies y las curvas trazadas arbitrariamente desde un estado inicial a un estado final acercan al lector a los procesos cuasiestáticos en donde se observa la sucesión de estados de equilibrio diferenciándolos de los procesos reales donde se manifiesta una sucesión temporal de estados de equilibrio y desequilibrio. Las expresiones matemáticas utilizadas para describir el concepto de entropía están basadas en ecuaciones integrodiferenciales en la descripción axiomática; mientras que en la descripción microscópica la matemática de las probabilidades y el cálculo de valores medios tienen especial preponderancia. En la descripción fenomenológica prima el cálculo integral y diferencial.

Un enfoque estadístico para abordar el concepto de entropía requiere la introducción de conceptos de probabilidad y, principalmente, un cambio en la manera como concebimos los fenómenos físicos. El requisito para pasar de modelos deterministas a modelos probabilísticos implica la posibilidad de modificar la forma de mirar la realidad y la de concebir las relaciones entre modelos, teorías y fenómenos empíricos.

En términos generales, el análisis indica que los modelos y situaciones exploradas constituyen un escenario interesante para ayudar a los estudiantes a desarrollar las ideas centrales del enfoque. Sin embargo, se observan aspectos que deberían considerarse para optimizar la implementación de la propuesta.

El enfoque ontosemiótico como marco teórico permitió abordar la entropía como “objeto” de conocimiento y su significado desde una perspectiva sistémica y pragmática, que incorpora aspectos correspondientes tanto al logos (conceptos-definiciones, proposiciones, argumentaciones) como a la praxis (situaciones-problemas y acciones). Este abordaje fue de gran utilidad, particularmente en lo que se refiere al análisis del significado institucional. Desde la perspectiva del profesor, posibilita una mirada distinta de atención en las articulaciones entre los significados personales e institucionales que ayuda a mejorar su práctica docente de manera sistémica, contemplando todos los aspectos relevantes de una intervención didáctica. Desde la perspectiva de investigación, proporciona elementos concretos para llevar adelante un análisis exhaustivo de una experiencia didáctica. Como herramienta metodológica brinda oportunidades para mejorar las prácticas docentes y tomar decisiones pedagógicas adecuadas, permitiendo la descripción de los procesos de enseñanza aprendizaje en el marco del enfoque ontosemiótico, y el análisis del grado en que un determinado proceso alcanza los fines pretendidos.

En cuanto a los aportes a la formación de los estudiantes de física, nuestra experiencia personal, y la de muchos colegas consultados, indica que los estudiantes universitarios y muchos profesores de ciencias muestran dificultades considerables en la comprensión significativa de la entropía, y que la enseñanza

tradicional del concepto resulta poco efectiva. Los libros de texto basados en el enfoque clásico desarrollan el concepto de Entropía a partir de la visión de Clausius, con particular atención en los aspectos fenomenológicos de los procesos térmicos y el rendimiento de las máquinas térmicas. Esta es precisamente la perspectiva utilizada en el clásico libro de Zemasny (1970), que reconoce como antecedentes los textos de Maxwell y de Planck de fines del siglo XIX, y que ha impregnado a autores posteriores, marcando un camino para la enseñanza del concepto. Esa perspectiva, que se apoya en el análisis de las máquinas térmicas puede ser vista como muy relevante en carreras técnicas, como por ejemplo en ingeniería, dada su utilidad para realizar cálculos concretos. Sin embargo, la típica formulación de la entropía a partir del teorema de Clausius es percibida por los estudiantes como una formulación matemática sin significado claro y preciso.

La manera clásica de definir este concepto central de la Termodinámica, si bien se organiza a partir de una elegante formulación matemática, acarrea el problema de no aportar demasiado a la comprensión de la entropía desde el punto de vista físico. La expresión clásica, en términos de $\delta Q/T$ permite realizar cálculos relevantes, pero su significado permanece, en general, oscuro y opaco para los estudiantes, e incluso para muchos profesores. Frente a las dificultades de comprensión conceptual que acarrea la perspectiva clásica, surgen voces que plantean la conveniencia de enseñar el concepto desde una perspectiva microscópica. Sugieren que la perspectiva microscópica podría ofrecer mayores ventajas para la interpretación de la entropía y proponen introducirla a partir de la formulación de Boltzmann tomando como base la noción de multiplicidad de estados. Si bien coincidimos con las apreciaciones anteriores, advertimos que un enfoque de la enseñanza del concepto de entropía planteada desde la formulación de Boltzmann tampoco está exento de problemas, y requiere de la elaboración de situaciones didácticas adecuadas para lograr una apropiación significativa por parte de los estudiantes. Particularmente, hay que tener en cuenta que la misma involucra modelos especiales y consideraciones de probabilidades y estadística que no siempre los estudiantes comprenden acabadamente. En cuanto al método de Caratheodory, el mismo tiene el inconveniente de una abstracción completa del significado de entropía y es meramente transmitido con una formalización matemática.

REFERENCIAS

- Callen, H. (1985). *Termodinámica. Introducción a la Termostática*. Madrid: A C.
- Čápek, V., Sheehan, D. (2005). Challenges to the Second Law of Thermodynamics: Theory and Experiment. Springer, Netherlands.
- García-Colín, L. (1983) Procesos irreversibles en la física contemporánea. *Colección Las Ciencias en el Siglo XX*. UNAM, México.
- Godino, J. (2002) Un enfoque ontológico y semiótico de la cognición matemática. *Recherches en Didactiques des Mathématiques*, 22 (2/3), pp. 237-284.
- Godino, J., Batanero, C. (1998). Clarifying the meaning of mathematical objects as a priority area of research in mathematics education. En A. Sierpinska y J. Kilpatrick (Eds.) *Mathematics Education as a Research Domain: A Search for Identity* (pp. 177-195). Dordrecht: Kluwer, A. P.
- Godino, J., Recio, A. (1998) A semiotic model for analysing the relationships between thought, language and context in mathematics education. En A. Olivier y K. Newstead (Eds.), *Proceedings of the 22nd Conference of the International Group for the Psychology of Mathematics Education, Vol 3, 1.8. University of Stellenbosch, South Africa*.
- Godino, J. (2003) *Teoría de las funciones Semióticas: un enfoque ontológico-semiótico de la cognición e instrucción matemática*. Departamento de Didáctica de la Matemática. Facultad de Ciencias de la Educación de la Universidad de Granada.
- Jancovici, B. (1997) *Physique Statistique et thermodynamique*. Paris: Ediscience
- Reif, F. (1969), *Física estadística*. Barcelona: Reverté
- Tarsitani, C.; Vicentini, M. (1996) Scientific mental representations of thermodynamics. *Science & Education*, 5, pp. 51-68.

Zemansky, M. (1970). *Calor y Termodinámica*, Madrid: Aguilar.