

Una aproximación epistemológica al concepto de entropía: un análisis a la transición de Clausius  
a Boltzmann

Jhon Sebastián Hernández Aguilera

2013246031

Asesor: Giovanni Sierra Vargas

Línea: Enseñanza de las ciencias desde una perspectiva cultural


Universidad Pedagógica Nacional

Facultad de Ciencia y Tecnología

Departamento de Física Licenciatura en Física

Bogotá D. C.

2019

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <small>ANÁLISIS DE LA REALIDAD</small>	<b>FORMATO</b>	
	<b>RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE</b>	
<b>Código: FOR020GIB</b>	<b>Versión: 01</b>	
<b>Fecha de Aprobación: 10-10-2012</b>	<b>Página 2 de 55</b>	

<b>1. Información General</b>	
<b>Tipo de documento</b>	Trabajo de grado
<b>Acceso al documento</b>	Universidad Pedagógica Nacional. Biblioteca Central
<b>Título del documento</b>	Una Aproximación Epistemológica Al Concepto Entropía: Un Análisis A La Transición De Clausius A Boltzmann
<b>Autor(es)</b>	Hernández Aguilera, Jhon Sebastián
<b>Director</b>	Sierra Vargas, Giovanni.
<b>Publicación</b>	Bogotá, Universidad Pedagógica Nacional, 2019. 53 p.
<b>Unidad Patrocinante</b>	Universidad Pedagógica Nacional
<b>Palabras Claves</b>	Termodinámica, Entropía, Estudios Histórico Críticos, Segunda Ley, Clausius, Boltzmann

<b>2. Descripción</b>
<p>Trabajo de grado en el que el autor hace uso de un análisis histórico crítico del concepto entropía, en el que se presenta, mediante el estudio de documentos originales de Rudolf Julius Emmanuel Clausius, Ludwig Eduard Boltzmann y demás autores que soportan los estudios alrededor de la entropía, uno de los aspectos que ha generado tensión en el estudio de la termodinámica, en el cual se evidencia la poca relación existente entre la física microscópica y la física macroscópica. Para esto se exponen los diferentes autores que aportaron de forma relevante al desarrollo del concepto, haciendo principal énfasis en los dos anteriormente mencionados: Clausius y Boltzmann. Se busca a través de este análisis dar una comprensión de la entropía, más allá de lo matemático, mostrando</p>

de forma implícita los estudios histórico-críticos como una propuesta para la enseñanza y comprensión de la segunda ley de la termodinámica.

### 3. Fuentes

- Arias, M., & Navarro, M. (2017) Epistemología, Ciencia y Educación Científica: premisas, cuestionamientos y reflexiones para pensar la cultura científica. Actualidades investigativas en Educación. Vol. 17(3). Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/319438469\\_Epistemologia\\_Ciencia\\_y\\_Educacion\\_Cientifica\\_premisas\\_cuestionamientos\\_y\\_reflexiones\\_para\\_pensar\\_la\\_cultura\\_cientifica](https://www.researchgate.net/publication/319438469_Epistemologia_Ciencia_y_Educacion_Cientifica_premisas_cuestionamientos_y_reflexiones_para_pensar_la_cultura_cientifica)
- Ayala, M. (2006) Los análisis histórico-críticos y la recontextualización de saberes científicos. Construyendo un nuevo espacio de posibilidades. Pro-Posições. Vol 17 (1) pp. 19 – 37. Recuperado de [https://www.fe.unicamp.br/pf-fe/publicacao/2343/49\\_dossie\\_ayalammam.pdf](https://www.fe.unicamp.br/pf-fe/publicacao/2343/49_dossie_ayalammam.pdf)
- Boltzmann, L. (1964) Lectures on gas theory. (Stephen G. Brush, trad.) New York: Dover Publications, Inc. (Obra original publicada en 1896 - 1898). Recuperado de [https://books.google.com.co/books?id=-I7QzCXnstEC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ViewAPI&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.co/books?id=-I7QzCXnstEC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ViewAPI&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
- Boltzmann, L. (1986) Escritos sobre mecánica y termodinámica. (Francisco Ordoñez, trad.) Editorial Alianza. pp. 166 – 197
- Bunge, M. (1980) Epistemología: Curso de actualización. México D. F.: Siglo 21 Editores. Recuperado de <http://josemramon.com.ar/wp-content/uploads/BUNGE-Epistemologia.pdf>

- Calvo, G. (2017). Antoine Lavoisier y la revolución química. (Trabajo fin de grado). España: Universidad de la Rioja. Recuperado de [https://biblioteca.unirioja.es/tfe\\_e/TFE002689.pdf](https://biblioteca.unirioja.es/tfe_e/TFE002689.pdf)
- Calzetta, E. (2009). Entropía. Colección “Las ciencias naturales y la matemática” (1 ed.) Buenos Aires: Ministerio de Educación de la Nación. Instituto Nacional de Educación Tecnológica. Recuperado de <http://www.bnm.me.gov.ar/giga1/documentos/EL001915.pdf>
- Carnot, S. (s. f.) Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego. España: Alianza Universidad.
- Clausius, R. (1879) The mechanical Theory of Heat. (Walter R. Browne, trad.) London: Macmillan And Co. (Obra original publicada en 1880). Recuperado de <https://www3.nd.edu/~powers/ame.20231/clausius1879.pdf>
- Duhem, P. (1969). To Save the Phenomena (trad. Edmund Doland and Chaninah Maschler) Chicago: University of Chicago
- Faires, V. M., & Simmang, C. M. (1994). Termodinámica (No. 536.7 FAI).
- Flores, F. & Ulloa-Lugo, N. (2014) ¿Cómo enseñan la entropía los profesores universitarios? Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias Vol. 13 (2) pp. 201 – 221. Recuperado de [http://reec.uvigo.es/volumenes/volumen13/REEC\\_13\\_2\\_5\\_ex827.pdf](http://reec.uvigo.es/volumenes/volumen13/REEC_13_2_5_ex827.pdf)
- Forero, S. (2014) Sadi Carnot y la segunda ley de la termodinámica. La historia de la Ciencia como Pedagogía Natural. [Tesis doctoral]. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional. Recuperado de <http://repository.pedagogica.edu.co/bitstream/handle/20.500.12209/81/TO-17327.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gonzales, J. (2007) Ludwig Boltzmann. Pionero de la ciencia del siglo XX. Revista CENIC Ciencias Químicas. Vol 38 (1) pp. 254 – 261. Recuperado de <https://revista.cnic.edu.cu/revistaCQ/sites/default/files/articulos/CQ-2007-1-254-261.pdf>

- Kuhn, T. (1971) La estructura de las revoluciones científicas. (Agustín Contin, trad.) México D. F.: Fondo de Cultura Económica. (Obra original publicada en 1962). Recuperado de <https://materiainvestigacion.files.wordpress.com/2016/05/kuhn1971.pdf>
- Oliveira, M. (2019). The two parts of the second law of thermodynamics. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 41 (1). Recuperado de <http://www.scielo.br/pdf/rbef/v41n1/1806-9126-RBEF-41-1-e20180174.pdf>
- Pérez, J. (2009) La termodinámica de Carnot a Clausius. Las ciencias antes de la gran guerra. España: Universidad de la Laguna. pp 32 – 50. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/237573865\\_La\\_Termodinamica\\_de\\_Carnot\\_a\\_Clausius](https://www.researchgate.net/publication/237573865_La_Termodinamica_de_Carnot_a_Clausius)
- Pérez, R.A. (1999) Kuhn y el cambio científico. México: Fondo De Cultura Económica.
- Planck, M. (1909a). Reversibilidad e irreversibilidad. 1ª Conferencia de la serie Eight lectures on Theoretical Physics. Universidad de Columbia.
- Planck, M. (1909b) La teoría atómica de la materia. (Juan Carlos Orozco, trad.) 3ª Conferencia de la serie Eight lectures on Theoretical Physics. Universidad de Columbia.
- Planck, M. (1915). Eight lectures on Theoretical Physics. (A. P. Wills, trad.) New York: Columbia University (Obra original publicada en 1909).
- Sánchez, J. (2016) Una reflexión sobre el principio de equivalencia de las transformaciones para la enseñanza de la termodinámica. [Tesis de maestría]. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional. Recuperado de <http://repository.pedagogica.edu.co/bitstream/handle/20.500.12209/341/TO-20681.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Uffink, J. (2001) Bluff your way in the Second Law of Thermodynamics. Netherlands: Utrecht University. Recuperado de <https://www.physik.uni-augsburg.de/theo1/hanggi/Uffink.pdf>

Ulloa-Lugo, N. (2006) Origen y evolución del concepto de entropía. Representaciones e implicaciones para la enseñanza. (Tesis doctoral). Universidad Pedagógica Nacional. México D. F., México. Recuperado de <http://explora.ajusco.upn.mx:8080/explora-pdf/23524.pdf>

#### 4. Contenidos

El presente trabajo está escrito en tres capítulos diferentes que permitirán tener un acercamiento más oportuno al problema de investigación; el primero expone un acercamiento al problema y a la metodología de estudio, el segundo muestra una construcción histórica del concepto de entropía desde los planteamientos de Clausius y Boltzmann, soportándose en los estudios previos de Carnot y Maxwell respectivamente y el tercero muestra a través de gráficos comparativos las similitudes y diferencias entre los dos autores tomados como referentes adicional de un análisis de la noción de cambio de paradigma planteada desde Kuhn para los autores cambiados.

En busca de hacer un claro acercamiento al problema, se sugiere que se piense que responde a las siguientes preguntas:

¿Ha cambiado el significado de la entropía en relación a cómo se originó desde Clausius y Boltzmann? ¿Es relevante el tomar una postura desde los dos autores fundamentales al momento de estudiar la segunda ley de la termodinámica? ¿Cómo, el estudio de la entropía, ayuda a que el escoger una postura determinada, no implique excluir la otra? ¿Se dio, con los estudios de Clausius y Boltzmann, un cambio de paradigma?

Para dar respuesta a estas preguntas, se expone una aproximación epistemológica del concepto entropía, mediante la cual se muestra en el marco de la física del siglo XIX, su aporte al estudio de la termodinámica desde los desarrollos dados por Rudolph Clausius y Ludwig Boltzmann.

## 5. Metodología

Los análisis histórico-críticos de los diferentes documentos originales permiten elaborar y poner de relieve concepciones de mundo, formas de abordar, problemas centrales y sistemas conceptuales en torno a los fenómenos analizados, así como destacar la fenomenología que es compatible con cada planteamiento teórico (Ayala, 2006) entendiéndolos así, como una recontextualización del saber en el que no se realice solo una lectura de documentos antiguos, sino que se pueda entrar en un diálogo constante con el autor, para poder entender la intencionalidad del concepto.

Para esto se desarrolló un rastreo de los diferentes momentos que aportaron a la construcción del concepto “entropía”, con una línea de tiempo en la que se evidencie la segunda ley como un objeto generador de diálogo entre las perspectivas de las que se ocupa el trabajo. Adelantar el análisis epistemológico requirió que, como ruta de trabajo, se realizaran diferentes fases en las que se dieron los elementos necesarios para la conclusión del mismo; fue necesario pasar por una etapa de recolección y lectura de documentos oportunos para nutrir la bibliografía, delimitando los autores que hablan acerca del problema de la entropía, dejando textos escritos por Carnot, Clausius, y Boltzmann como principales referentes

Es así que, con los textos estudiados se hizo una construcción histórica de la entropía, pero en búsqueda de querer darle claridad y entender todas sus implicaciones con la segunda ley de la

termodinámica, se evidencia que un análisis histórico simple, en el que se haga un único recuento temporal del concepto, es insuficiente para cumplir con el objetivo propuesto, para ello, se realiza un acercamiento al concepto entropía haciendo uso de la epistemología; reconociendo la noción de ciencia desde Khun (1971) en la que se proponen problemas que remiten a enunciados de hechos de la naturaleza y que suponen abordajes conceptuales, teóricos y metodológicos propios de una comunidad.

Con esto, se permitió resaltar cuáles fueron los momentos significativos que aportaron a la construcción de la segunda ley de la termodinámica, mostrando conceptos que son abordados al realizar el estudio, tales como calor, trabajo y entropía; durante ese proceso, se irán develando los aportes experimentales que se dieron en torno a la construcción del segundo principio de la termodinámica.

## 6. Conclusiones

1. Se destaca el provecho de los estudios histórico críticos, dando una metodología que permite a través de la recontextualización de saberes estar inmerso en el contexto del cual surge el concepto para poder entender todos los factores que precedieron y que estuvieron involucrados para la concepción del mismo.
2. Para responder a ¿Qué tan relevante es abordar una de las dos perspectivas? se expone la mirada de Boltzmann como una solución a la tensión propuesta; ya se mencionó en un principio que la entropía es aquel elemento que permite hacer conexión entre ambas miradas, yendo un poco más se concluye que la entropía es un elemento de dialogo constante entre



ellas en el que al querer abordar alguna de las dos como referencia, indudablemente se tendrá que llegar a la otra si se quiere tener una comprensión íntegra de ella.

3. Se entiende que hubo un cambio de paradigma porque tras los avances dados por Boltzmann, sí se generó una diferencia en relación a los compromisos y bases establecidas previamente por la comunidad científica (Ulloa-Lugo, N, 2006), y adicional le da una nueva importancia al problema de entender los fenómenos desde un punto de vista microscópico y la forma de darles solución a través de la colisión de partículas; dando la perspectiva microscópica como una referencia para el ¿qué se está estudiando? Y ¿cómo se está estudiando?

<b>Elaborado por:</b>	Hernández Aguilera, Jhon Sebastián
<b>Revisado por:</b>	Sierra Vargas, Giovanni

<b>Fecha de elaboración del</b>			
<b>Resumen:</b>	16	09	2019

## Tabla de contenido

Capítulo 1: Presentación del problema, método de investigación y objetivo de estudio. ....	12
1.1. Presentación .....	12
1.2. Objetivos .....	12
1.3. Metodología .....	14
1.4. Antecedentes.....	16
1.5. Presentación del problema.....	18
1.6. Justificación .....	19
Capítulo 2. Construcción histórica: origen y desarrollo del concepto entropía .....	21
2.1. Introducción .....	21
2.2. Construcción histórica del concepto entropía.....	21
2.2.1. Sadi Carnot.....	21
2.2.2. Rudolph Clausius .....	26
2.2.3. Ludwig Boltzmann .....	34
CAPÍTULO 3: CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES .....	43
3.1. Análisis comparativo de las aproximaciones de Clausius y Boltzmann.....	43
3.2. ¿Se da con alguno de los autores expuestos un cambio de paradigma?.....	48
3.2.1. Cambio de paradigma.....	48
3.3. Conclusiones.....	49
4. Referencias bibliográficas.....	52

## Tabla de tablas

Tabla 1.....	41
--------------	----

## Tabla de figuras

Figura 1 .....	17
Figura 2 .....	22
Figura 3 .....	23
Figura 4 .....	29

### Tabla de gráficos

<b>Gráfico 1</b> .....	38
<b>Gráfico 2</b> .....	39

### Tabla de ecuaciones

<b>(1)</b> .....	24
<b>(2)</b> .....	25
<b>(3)</b> .....	25
<b>(4)</b> .....	32
<b>(5)</b> .....	32

## **Capítulo 1: Presentación del problema, método de investigación y objetivo de estudio.**

### **1.1. Presentación**

El presente trabajo es desarrollado haciendo uso de un análisis histórico crítico del concepto entropía, en el que se presenta, mediante el análisis de documentos originales de Rudolf Julius Emmanuel Clausius, Ludwig Eduard Boltzmann y demás autores que soportan los estudios alrededor de la entropía, uno de los aspectos que ha generado tensión en el estudio de la termodinámica, en el cual se evidencia la poca relación existente entre la física microscópica y la física macroscópica.

Para esto se exponen los diferentes autores que aportaron de forma relevante al desarrollo del concepto, haciendo principal énfasis en los dos anteriormente mencionados: Clausius y Boltzmann.

Se busca a través de este análisis dar una comprensión de la entropía, más allá de lo matemático, mostrando de forma implícita los estudios histórico-críticos como una propuesta para la enseñanza y comprensión de la segunda ley de la termodinámica.

### **1.2. Objetivos**

En busca de hacer un claro acercamiento al problema, se sugiere que se piense que responde a las siguientes preguntas:

- ¿Ha cambiado el significado de la entropía en relación a cómo se originó desde Clausius y Boltzmann?
- ¿Es relevante el tomar una postura desde los dos autores fundamentales al momento de estudiar la segunda ley de la termodinámica?

- ¿Cómo, el estudio de la entropía, ayuda a que el escoger una postura determinada, no implique excluir la otra?
- ¿Se dio, con los estudios de Clausius y Boltzmann, un cambio de paradigma?

Para dar respuesta a estas preguntas, se expone una aproximación epistemológica del concepto entropía, mediante la cual se muestra en el marco de la física del siglo XIX, su aporte al estudio de la termodinámica desde los desarrollos dados por Rudolph Clausius y Ludwig Boltzmann.

Al estudiar diferentes documentos, es posible identificar una tensión entre la perspectiva microscópica y macroscópica del concepto, así lo planteaba Planck cuando hablaba de la reversibilidad y la admisibilidad de la irreversibilidad en distintos procesos termodinámicos, en donde proponía que el aceptar la irreversibilidad estaba limitado a la capacidad mental del hombre, ya que, su aceptabilidad está desligada de la técnica y para poder comprenderla es necesaria la existencia de un experimento mental en el que un físico ideal que puede contemplar todo lo que sucede a nivel microscópico de un sistema y puede desarrollar las condiciones perfectas en las que la teoría atómica es aceptada (Planck, M., 1909b), de donde genera la incógnita: *¿qué tan suficiente resultan para esto las medidas ideales del físico?*; y pone de manifiesto un punto en el que, es de dificultad, dar compatibilidad a la perspectiva fenomenológica de un observador macroscópico y la mirada ideal de un físico microscópico.

Esto presentaba un problema a la segunda ley, ya que requería una mejora a lo planteado por Clausius acerca de la entropía, donde se habla que la entropía es medida por medio de un cierto proceso reversible; es así como resulta del trabajo de Boltzmann, el perfeccionamiento de la segunda ley en el que pudiera ser entendida por separado desde el punto experimental del hombre.

Entendiendo las dos perspectivas como Planck (1909b) lo estaba haciendo en el desarrollo de su tercera conferencia: *La Teoría Atómica De La Materia*, hablando de lo macroscópico desde el análisis fenomenológico y experimental que es posible hacer alrededor de la segunda ley, y lo microscópico como la aceptación de la teoría atómica de la materia.

Para entender a profundidad los trabajos de Clausius y Boltzmann y cuál es el desarrollo de esta tensión, es necesario soportarse en diferentes autores y así evidenciar aspectos importantes tales como la forma en que Clausius utiliza los trabajos de Carnot alrededor de las máquinas térmicas para su interpretación del calor y cómo Boltzmann utiliza los planteamientos de Maxwell para el perfeccionamiento de su teoría.

Adicional, se pretende, a partir del análisis histórico crítico, establecer si los autores presentados realizan un cambio de paradigma, entendiendo la idea de paradigma desde lo planteado por Pérez (1999) y considerando la estructura de las ciencias expuesta por Khun (1975) y así con esta idea, determinar cómo los trabajos de Clausius y Boltzmann aportaron de manera significativa a la termodinámica.

Durante el desarrollo del trabajo, serán destacados los elementos de orden epistemológico que hacen de la entropía un concepto en el que se manifiesta el diálogo entre las perspectivas microscópica y macroscópica del estudio de los fenómenos térmicos, tomando como referencia la segunda ley de la termodinámica.

### **1.3. Metodología**

Pierre Duhem (1969) plantea que el método más legítimo, seguro y provechoso para preparar al alumno para recibir una hipótesis física es el método histórico, es por esto que entendiendo el proceso para clarificar la discusión en torno a la física microscópica y la física

macroscópica de la entropía, como un proceso de aprendizaje para todo aquel que lea el presente documento, se decide utilizar una metodología histórico-crítica, ya que cuando es aplicada a estudios científicos, permite establecer antecedentes que muestran la interacción que siempre ha existido entre las ciencias y su surgimiento, estableciendo así vínculos que permitan dar sentido al significado actual del concepto de estudio (Rivero, 2008).

Los análisis histórico-críticos de los diferentes documentos originales permiten elaborar y poner de relieve concepciones de mundo, formas de abordar, problemas centrales y sistemas conceptuales en torno a los fenómenos analizados, así como destacar la fenomenología que es compatible con cada planteamiento teórico (Ayala, 2006) entendiéndolos así, como una recontextualización del saber en el que no se realice solo una lectura de documentos antiguos, sino que se pueda entrar en un diálogo constante con el autor, para poder entender la intencionalidad del concepto.

Para esto se desarrolla un rastreo de los diferentes momentos que aportaron a la construcción del concepto “entropía”, con una línea de tiempo en la que se evidencie la segunda ley como un objeto generador de diálogo entre las perspectivas de las que se ocupa el trabajo.

Adelantar el análisis epistemológico requirió que, como ruta de trabajo, se realizaran diferentes fases en las que se den los elementos necesarios para la conclusión del mismo; fue necesario pasar por una etapa de recolección y lectura de documentos oportunos para nutrir la bibliografía, delimitando los autores que hablan acerca del problema de la entropía, dejando textos escritos por Carnot, Clausius, y Boltzmann como principales referentes.

Es así que, con los textos estudiados se busca hacer una construcción histórica de la entropía, pero en búsqueda de querer darle claridad y entender todas sus implicaciones con la

segunda ley de la termodinámica, se evidencia que un análisis histórico simple, en el que se haga un único recuento temporal del concepto, es insuficiente para cumplir con el objetivo propuesto, para ello, se realiza un acercamiento al concepto entropía haciendo uso de la epistemología; reconociendo la noción de ciencia desde Khun (1971) en la que se proponen problemas que remiten a enunciados de hechos de la naturaleza y que suponen abordajes conceptuales, teóricos y metodológicos propios de una comunidad.

Con esto, se permitió resaltar cuáles fueron los momentos significativos que aportaron a la construcción de la segunda ley de la termodinámica, mostrando conceptos que son abordados al realizar el estudio, tales como calor, trabajo y entropía; durante ese proceso, se irán develando los aportes experimentales que se dieron en torno a la construcción del segundo principio de la termodinámica.

Es así que intencionalmente, se toma la epistemología como la rama de la filosofía que estudia la investigación y el conocimiento científico y permite ir al contexto del cual surge un concepto, para conseguir entender, a través de un análisis histórico más profundo, cómo se dio origen y cuáles fueron los factores determinantes para el surgimiento del mismo (Arias, M., & Navarro, M., s. f.).

#### **1.4. Antecedentes.**

- UNA REFLEXIÓN SOBRE EL PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA DE LAS TRANSFORMACIONES PARA LA ENSEÑANZA DE LA TERMODINÁMICA  
**JESSYCA SUSANA SÁNCHEZ FORIGUA**

Este trabajo realiza una reflexión de corte histórico sobre el principio de equivalencia de las transformaciones y las problemáticas que lo configuraron, desde los planteamientos de Carnot, Clapeyron, Thomson, Joule, Mayer y Clausius; aportando en la metodología y en el



desarrollo de los documentos de Clausius, donde se toman puntos a tratar en el presente documento, tales como la entropía.

- SADI CARNOT Y LA SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA. La Historia de la Ciencia como Pedagogía Natural

### **SANDRA MILENA FORERO DÍAZ**

Esta tesis doctoral, tiene como objetivo mostrar la aparente contradicción entre la hipótesis de Carnot de que el calórico no disminuye al pasar de una temperatura mayor a una temperatura menor y la hipótesis de Joule de que sí disminuye y que esta disminución es proporcional al trabajo realizado por la máquina, como un problema vital para el aprendizaje de la segunda ley de la termodinámica; para esto, busca por medio de un análisis histórico crítico dar una conciliación a las perspectivas de Carnot y Joule, aportando el detallado análisis que se hace alrededor de los estudios de Carnot, dando una perspectiva en la que es importante la recontextualización de saberes y el estudio de documentos originales para la comprensión de algún concepto.

- ORIGEN Y EVOLUCIÓN DEL CONCEPTO ENTROPÍA. Representaciones e implicaciones para la enseñanza.

### **NORMA YOLANDA ULLOA LUGO**

Esta tesis doctoral trata la entropía como un elemento útil para exponer la diferencia entre la forma en que se dio el origen de un concepto y la manera en que se enseña, para esto, hace una construcción histórica de la entropía en la se dan los constructores como aquellos que dieron origen al concepto y los continuadores como aquellos que siguieron su estudio, su objetivo mostrar con un análisis histórico cómo ha cambiado el concepto en su enseñanza y a través de esto mostrar el beneficio de los análisis históricos para su comprensión.

### **1.5. Presentación del problema.**

La entropía, es un concepto que emerge en la segunda mitad del siglo XIX, viene como resultado de la investigación de varios científicos, entre ellos Clausius y Boltzmann, y trae consigo el perfeccionamiento de lo que hoy conocemos como segunda ley de la termodinámica.

Aún 50 años después de su surgimiento, seguía rodeada de tanta confusión que fue necesaria la intervención de The British Association for the Advancement of Science (La Asociación Británica Por Los Adelantos En Ciencias) para designar un comité con la tarea especial de traer claridad acerca del significado de la misma, y señala Uffink, J. (2001) que después de no haber sido cumplido el objetivo del comité, la clarificación de la segunda ley sigue siendo tan oscura como en un principio, y que cincuenta años después, alrededor de esta idea hay tantas formulaciones, como discusiones en torno a la misma.

Una de sus varias discusiones es la tensión conceptual que describe la problemática que suele presentarse entre la física macroscópica y su difícil relación con la microscópica, sumándole la compleja tarea de la unificación de ambas, permitiendo así que, al estudiar algún concepto, en este caso la entropía, sea necesario tomar una postura específica para interpretarla, ya que, aparentemente los mismos métodos empleados para analizar alguna, no generan los mismos resultados para ambos

La entropía es el resultado de un conglomerado de estudios que abordan no solo uno de estos puntos de vista, sino que, de alguna forma tras el trabajo de Boltzmann, logra unificarlos, y verla desde dos puntos separados, permite que se aleje del sentido original de la misma.

Brosseau y Viard hablan de la poca relevancia que se le ha dado al estudio original del concepto entropía y cómo esto ha contribuido a una pobre comprensión y a la confusa noción que

puede encontrarse hoy día al estudiarla, con esto, el presente trabajo conduce también a la indagación del contexto desde el cual surge la entropía.

### **1.6. Justificación**

Ayala (2006) afirma que la ciencia es concebida como una actividad de comprensión del mundo que, de acuerdo a contextos socio-culturales específicos y dando respuesta a éstos, por esto puede decirse que la producción científica está ligada al contexto del cual es producto y que las condiciones históricas son determinantes al momento de asignar una interpretación a algún concepto. En ese orden de ideas, el estudio de la entropía, alejado del contexto del cual surgió, genera confusión al intentar entenderla, ya que no se están considerando aquellos factores cruciales en el entorno de los constructores para darle un sentido que concuerde con su sentido original.

Es allí donde se ve el provecho del estudio histórico-crítico a la entropía, que busca no cumplir con la tarea de resignificar el concepto, ni unificar teorías que han sido expuestas durante años, sino que, en su lugar busca exponer el contexto del cuál surge, para dar mayor comprensión a la discusión planteada y entender la entropía, no desde dos perspectivas separadas, sino como el resultado de la unificación de ambas.

Por medio de una aproximación al sentido original del concepto puede realizarse un aporte a la enseñanza de las ciencias, en el que se expone el significado de la entropía y todo lo que esta implica alrededor de la segunda ley de la termodinámica, haciendo especial énfasis en la tensión que se generó históricamente con la misma por su interpretación desde lo macroscópico y lo microscópico.

Adicional, el análisis histórico crítico permite dar cuenta de los distintos aspectos de orden conceptual, metodológico, contextual y científico que estuvieron involucrados en el escenario tras el cual se desarrolla el concepto entropía que es fundamental para la realización de la segunda ley de la termodinámica, que se caracteriza por un momento en el que se dispone de la visión de conjunto para llenar de contenido físico matemático el concepto.

Hacer un rastreo de los momentos que aportaron a la construcción del concepto, muestra cómo el análisis teórico e histórico del mismo, facilitan su comprensión, ya que permiten entender en contexto las problemáticas y circunstancias bajo las cuales surge la entropía, generando un diálogo constante entre las perspectivas, diálogo que expone lo que Boltzmann hizo al cuantificarla bajo un estudio probabilístico, en el que se relacionan los dos puntos de vista de los que trata el presente trabajo.

La entropía ha sido limitada a entenderse como la explicación al flujo de calor al poner sistemas en equilibrio, diciendo que la entropía es hablar del flujo de calor de un cuerpo caliente a uno no tan caliente, pero más allá de ello, es un concepto que pese a que sí hace referencia a eso, es un elemento de conexión entre la física microscópica y la física macroscópica y da sentido a otras variables.

Pensando en por qué la entropía es un elemento útil para disolver la tensión ya expuesta, es necesario ver cómo siguiendo el desarrollo histórico de la misma, se irá presentando la lucha entre las dos perspectivas y las diferencias al momento de abordarlas, hasta llegar al trabajo de Boltzmann, que será expuesto de forma breve para mostrarlo como la culminación de esta discusión y expondrá el provecho del análisis histórico crítico como una solución al problema expuesto.

## **Capítulo 2. Construcción histórica: origen y desarrollo del concepto entropía**

### **2.1. Introducción**

Para dar desarrollo a las ideas y estudios de los autores ya mencionados, es necesario entender cuáles fueron los cimientos que permitieron que ellos llegaran a la conclusión de sus estudios. Es por esto que, para sentar los precedentes adecuados, es oportuno empezar por Sadi Carnot; aunque su preocupación principal fue la búsqueda de la máxima eficiencia, sus trabajos e ideas permitieron que científicos como Clausius pudieran establecer que: “No es posible sin gasto de fuerza de ningún tipo pasar calor de un cuerpo frío a un cuerpo caliente” (Carnot, S., s. f.)

Proposición que se convertiría en una descripción fundamental para la comprensión y estudio de la entropía; aunque Carnot no habló de entropía, e históricamente el concepto no se daría sino hasta aproximadamente medio siglo después, sí fue vital para que Clausius pudiera proponer el término por primera vez y Boltzmann, utilizando los estudios de Clausius y Maxwell pudiera perfeccionarla.

### **2.2. Construcción histórica del concepto entropía**

#### **2.2.1. Sadi Carnot**

Sadi Carnot (1796-1832), fue un científico francés que, aunque su rama principal era la física, siempre se vio más inclinado a la aplicación de ella, siendo también reconocido como un gran e importante ingeniero del siglo XIX.

Siempre recibió la mejor educación, rodeado de un contexto en el que el desarrollo de las ciencias y técnicas era de gran importancia en la formación de los jóvenes (Boltzmann, L., 1986). Para finales del siglo XVIII, empezaba a tomar fuerza la construcción y uso de las máquinas térmicas, donde el principal objetivo era la optimización de la eficiencia en la máquina construida, es por esto que los ingenieros optaban por soluciones muy empíricas para ir

mejorando el rendimiento y la eficacia de las máquinas (Carnot, S., s. f.), Carnot contaba con los trabajos previos realizados por Thomas Savery (1650-1715), Thomas Newcomen (1663- 1729) y James Watt. Pese a su prematura muerte, lo que hoy se conoce de Carnot fue totalmente significativo para la historia de las ciencias.

Todo este surgimiento tecnológico, además de ser clave para el inicio de la revolución industrial, es el que le permite a Carnot interesarse y formarse en un contexto en el que era importante el aprovechamiento de los conceptos termodinámicos. Es allí, en París en 1824, donde aparece la obra *“Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas diseñadas para desarrollar dicha potencia”* que, con apenas 26 años de edad, escribiría el joven Sadi Carnot, en la que quería trabajar solo de forma general el tema de la transformación del calor en potencia motriz.

Para la época, el primero en hacer un análisis matemático al estudio de calor había sido Jean-Baptiste Joseph Fourier (Carnot, S., s. f.), estudiando la disipación del calor a lo largo de una varilla metálica, hecho de gran importancia, en su esfuerzo por teorizar la transformación del calor en trabajo, había sido corto en el uso de las matemáticas es por esto que los escritos de Carnot podían dejar sorprendido a cualquier científico de la época, en un contexto en el que la solidez de su trabajo, debía estar ligada a la innovación no solo teórica, sino también matemática con que pudiera explicarlo.

### **El calor para Carnot.**

Pese a que en su obra se tocan algunos puntos de orden matemático y conceptual, se evidencia que la preocupación de Carnot está enfocada en entender y explicar de forma teórica, cuáles son los elementos que permiten que la máquina funcione (Cruz, J., 2009); no sobra recordar que para comienzos del siglo XIX, el gran desarrollo de la técnica, hacía lucir quedado

el desarrollo de la ciencia, es por esto que su planteamiento va más allá de solo estudiar la máquina térmica, sino que planteó un problema que permitía tratar los asuntos que involucraban la transformación de calor en trabajo (Carnot, S., s. f.).

En su trabajo se evidencia que, para él, el calor aún sigue siendo entendido como lo planteaba Lavoisier, quien habla del calórico en el Tratado Elemental de la Química (1789) diciendo:

“supondré en esta memoria y en las que le seguirán, que el planeta que habitamos está rodeado por todas partes de un fluido muy sutil que penetra, al parecer sin excepción, a todos los cuerpos que le componen; que este fluido, al que llamaré fluido ígneo, material del fuego, del calor y de la luz tiende a ponerse en equilibrio en todos los cuerpos , pero sin penetrarlos a todos con igual facilidad, en fin, que este fluido existe tanto en estado de libertad como bajo forma fija y combinada de los cuerpos” (Lavoisier, A. 1789, citado en Calvo, G., 2017)

De allí se perfecciona la idea del calórico que trabajaría Carnot, un fluido hipotético que permea la materia y es el responsable de su calor; idea muy importante para Carnot, ya que para él, la producción de movimiento en las máquinas de vapor va siempre acompañada del restablecimiento en el equilibrio en el calórico, esto implica que la potencia motriz en las máquinas de vapor se debe no a un consumo del calórico, sino a su transporte.

Esto pone de manifiesto el hecho de que para Carnot el calórico es transferido de un cuerpo a otro, originando una idea que sería fundamental para Clausius al momento de formular la entropía: el flujo de calor.

## Carnot y las máquinas térmicas.

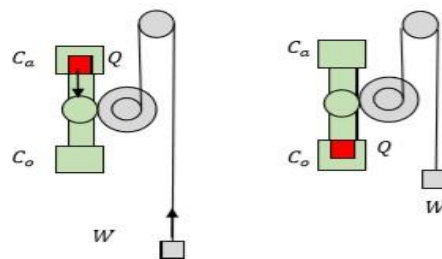
Carnot expone una idea que más adelante sería pilar fundamental para el planteamiento del trabajo de Rudolph Clausius, ya que, de los trabajos de Carnot, es de donde surge el teorema de Clausius, fundamental para lo que más adelante se conocería como entropía.

El Ciclo de Carnot es un ciclo reversible que consta de cuatro etapas: dos a temperatura constante y otros dos sin absorción ni cesión de calor, para explicar el objetivo de su funcionamiento, Sandra Forero expone que:

“Para que haya realización de trabajo se requiere de cambio de volumen y todo cambio de volumen debido al calor supone un cambio de temperatura. Supóngase un gas encerrado en un cilindro, si se calienta el cilindro, el gas se expande pudiendo realizar un trabajo exterior. Si se entiende por eficiencia el cociente del trabajo exterior realizado y el calor transferido por el agente, entonces es evidente que la máxima eficiencia se obtiene cuando todo el calor transferido se emplea exclusivamente en el cambio de volumen, y no, por ejemplo, en calentar el recipiente antes de que tenga lugar la expansión o contracción del gas” (Forero, S., 2014)

### Figura 1

*Funcionamiento de una máquina térmica, según los postulados de Carnot*



*Tomado de Sandra Forero, 2014*



La figura 1 representa una máquina térmica de acuerdo a lo que Carnot había planteado; el trabajo realizado se debe a la caída de la cantidad de calor ( $Q$ ) del foco caliente o caldera ( $Ca$ ) al foco frío ( $Co$ ), de una manera semejante a la rueda de un molino, donde el trabajo realizado se debe a la caída del agua de la represa a el desagüe. (Forero, 2014)

Así, Carnot empieza a poner de manifiesto la idea del flujo de calor de un foco a otro, de donde habla acerca del restablecimiento del equilibrio del calórico tras ese flujo; Carnot propone que el restablecimiento de equilibrio en el calórico es su paso de un cuerpo, en el cual la temperatura es más o menos elevada, a otro en el cual es más pequeña.

“El calórico liberado en el fogón por efecto de la combustión del carbón, atraviesa las paredes de la caldera penetrando en ella, produce vapor y de alguna manera se incorpora en él. Este lo transporta primero en el cilindro, donde lleva a cabo alguna función, y de ahí al condensador donde se licúa en contacto con el agua fría que allí se encuentra. Entonces, como resultado final, el agua fría del condensador toma posesión de calórico liberado en la combustión.” (Cruz, J., 2009)

Para que la máquina efectivamente funcione es necesario tanto un cuerpo caliente, como un cuerpo frío al cual sea transportado el calórico; esto permite inferir que la generación de trabajo depende de la temperatura de los cuerpos que generen ese transporte de calórico.

Tras haber dado a luz estas teorías acerca del funcionamiento de las máquinas térmicas; desde la publicación de su obra “*Réflexions sur la Puissance Motrice du Feu*” hasta su muerte en 1832, Carnot no dio muestras de ningún otro escrito, es por eso que su obra se limita al “sencillo” pero determinante análisis del funcionamiento de las máquinas térmicas.

Pese a eso, fueron grandes los aportes que Carnot realiza a lo que más adelante utilizaría Clausius para proponer la entropía, tras haber acompañado su trabajo técnico alrededor de las máquinas térmicas de un detallado desarrollo matemático, Carnot pone de manifiesto el problema de la eficiencia, que Clausius tomaría para decir que no existe una máquina de Carnot con una eficiencia del 100%.

### **2.2.2. Rudolph Clausius**

Clausius fue un físico y matemático alemán, demostró que existía una contradicción entre el principio de Carnot y el concepto de conservación de la energía, además reformuló su planteamiento acerca de las máquinas térmicas, así mismo, fue el primero en proponer y formalizar el concepto entropía. Se ubica históricamente en una época posterior a los trabajos presentados por Carnot (comienzos del siglo XIX) lo que le permite tomar como referente lo que se había construido sobre la mecánica del calor. (Ulloa-Lugo, N., 2006)

Su trabajo en *“La teoría mecánica del calor, aplicaciones a la máquina de vapor y a las propiedades físicas de los cuerpos”* muestra el carácter particular que Clausius tomaba al estudiar el calor; planteamiento que nace a raíz del razonamiento que se realiza al intentar determinar matemáticamente las transformaciones que sufre un cuerpo al realizar transferencias de calor con otro cuerpo o con el exterior.

Clausius toma como base el principio de equivalencia entre el calor y el trabajo, y el enunciado de la entropía del que se ocupa el presente trabajo: “el trabajo puede transformarse en calor y viceversa” y “el calor no puede pasar de sí mismo de un cuerpo frío a uno caliente”.

En la consideración de un cuerpo cuando realiza un ciclo cerrado, se plantea todas las transformaciones posibles: aquellas en las que las fuerzas externas realicen trabajo sobre el

cuerpo o aquellas en las que el calor del cuerpo realiza trabajo venciendo todas las fuerzas externas, generando una pérdida de calor y aquellas transformaciones que resultan del intercambio de calor de un cuerpo a otro. (Ulloa-Lugo, N., 2006)

Cuando Clausius propuso lo que hoy conocemos como desigualdad de Clausius, toma como base el trabajo exterior a un cuerpo y las transformaciones por transferencia que pueden producirse y se pregunta “¿cuáles son los fenómenos por medio de los cuales el calor contenido en un cuerpo puede producir trabajo mecánico?” (Clausius, R., 1879)

Su trabajo de Clausius se centró en el desarrollo de la teoría de los gases y en la formulación adecuada del segundo principio de la termodinámica. Además, se destacó por su notable desarrollo de teorías antes que a la experimentación. (Forero, S., 2014)

### **La mirada de Clausius.**

Clausius se encuentra con la formulación de la entropía, al retomar los trabajos de Carnot y estudiar la equivalencia entre Calor y Trabajo con la función de Carnot; equivalencia que más adelante solucionaría dando una nueva función a la que llamaría entropía. (Forero, S., 2014)

Para estudiar la entropía desde Clausius, es necesario mirar un par de conceptos que permiten identificar cuál era la forma en la que él estaba entendiéndola y así tener una postura clara en cuanto a la mirada que toma, bien sea desde una perspectiva macroscópica o una perspectiva microscópica.

Cuando Clausius habla de la expresión  $Q/T$ , que será desarrollada más adelante para hablar de entropía, habla de  $Q$  como una cantidad de calor que fluye de un fluido a otro; así Clausius empieza a mostrarse entendiéndola la noción de calor como substancia; manteniendo una concepción dual: la concepción de calórico expuesta por Carnot y la del calor como el

movimiento de partículas planteada por él mismo en el análisis de los gases. Con la expresión  $Q/T$  empieza a referirse a la cantidad de calor y a la temperatura producida por el trabajo exterior que se está realizando sobre el cuerpo, y es precisamente a partir de este, que Clausius llega a la deducción de la hoy conocida “desigualdad de Clausius”, que establece que un sistema que intercambia calor con depósitos externos y experimenta un proceso cíclico, es uno que finalmente devuelve un sistema a su estado original.

Ya enfocándose en el trabajo interior, la pregunta a resolver por Clausius va dirigida a determinar: ¿cuáles son aquellos fenómenos que permiten que a través del calor contenido en un cuerpo se pueda producir trabajo mecánico? Para resolver esto, Clausius acude a una perspectiva microscópica y explica que esto es posible, porque el trabajo lo realiza el calor a costa de que se modifique el arreglo de las partículas que constituyen el cuerpo (Ulloa-Lugo, N., 2006), tomándolo como microscópico, ya que, se está estudiando desde la teoría atómica que presenta la materia.

Para abordar esta perspectiva microscópica introduce el término “disgregación”, que habla de ese arreglo de partículas que es mencionado o “el grado de división de los cuerpos”; al utilizar la disgregación, Clausius quiere hablar de que la acción del calor hace que disminuya la cohesión entre las moléculas; cuando disminuye esa cohesión, aumenta su disgregación.

(Clausius, R., 1850)

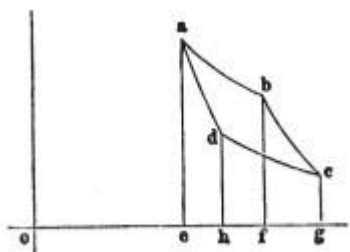
Dándole solución a esto, Clausius plantea que el trabajo mecánico que el calor pueda realizar mediante la modificación del arreglo de un cuerpo es proporcional a la temperatura, relacionando el calor a la temperatura; adicional a esto se entiende que toda producción de trabajo necesita consumir una cantidad correspondiente de calor y que toda producción de calor, necesita consumir una cantidad correspondiente de trabajo. (Ulloa-Lugo, N., 2006)

## Entropía para Clausius.

Clausius empieza el tercer capítulo de su libro: *On The Mechanical Theory Of Heat* presentando los planteamientos con los que empezaría a abordar la entropía, mostrando como variables para su análisis, la presión y el volumen dentro de un proceso cíclico, exponiendo así su análisis desde un punto de vista fenomenológico donde los resultados, se dan en relación a magnitudes medibles (Clausius R. , 1870).

### Figura 2

*Explicación de Clausius para un proceso a isotérmico*



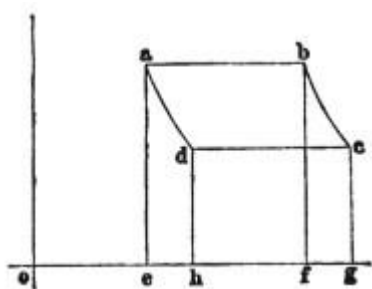
*Tomado de On The Mechanical Theory Of Heat*

Con la figura 2, Clausius expone que el punto de las abscisas **e** corresponde a un volumen inicial, en donde su correspondiente ordenada **a** representa la presión inicial, donde se asume que el cuerpo se expande sin realizar ningún cambio de temperatura, si se expande, lo lógico es que el cuerpo se enfríe, pero para garantizar esto, se pone en contacto con un cuerpo **K** actuando como una reserva de temperatura, con la misma temperatura **T**, que permite que no sea apreciable como variable para el proceso; con esto Clausius garantiza un proceso isotérmico en el que se realice la expansión de un gas, sin realizar ningún cambio de temperatura.

Él realiza el mismo análisis para un cuerpo que está compuesto en parte líquido y en partes gas, y busca de la misma forma garantizar un proceso isotérmico, encuentra que la curva que describe la expansión del cuerpo está dada por una línea que es paralela a la abscisa.

### Figura 3

*Explicación de Clausius para un proceso a isotérmico que es en parte gas y en parte líquido*



*Tomado de On The Mechanical Theory Of Heat*

Tras haber hecho diferentes análisis alrededor de los procesos cíclicos y de haber utilizado la mirada de Carnot alrededor de los mismos, Clausius llega a la importante conclusión de que la cantidad de calor convertida en trabajo dentro de un proceso, es independiente de la naturaleza que conforma el medio de la transferencia.

Luego de haber hecho un detallado desarrollo matemático alrededor de los planteamientos expuestos, Clausius llega a uno de los puntos de interés en el presente trabajo: *presentación de los procesos cíclicos en los que se realiza un intercambio de calor, pero adicional un cambio de temperatura de manera simultánea.*

Clausius hace un análisis en el que no es posible tomar un solo punto para la representación gráfica del proceso, sino que al contrario dice que son demasiadas las variaciones en las que se realiza cambio de temperatura y transferencia de calor simultáneamente:

“Luego, podríamos considerar una variación hecha de un gran número de muy pequeñas variaciones en las cuales tomemos alternadamente cambio de temperatura sin tomar calor y toma de calor, sin cambio de temperatura” (Clausius, R, 1979, p. 88)

Para esto, Clausius presenta una suma de cantidades de calor infinitesimalmente pequeña, la cual expresa a través de

$$\int \frac{dQ}{T} = 0 \quad (1)$$

Clausius habla esta ecuación explicándola como:

“Si en un ciclo reversible, cada elemento del calor tomado (positivo o negativo) es dividido por la temperatura absoluta de la cual es tomando, y el diferencial formado es integrado por el curso del proceso, la integral obtenida es igual a cero” (Clausius , R, 1979, página 90)

Si la integral planteada es siempre igual a cero, esto significa que el sistema siempre retoma a sus condiciones originales, dejándolo como una cantidad que depende únicamente del estado actual en el cual se encuentra el cuerpo y que es independiente de las condiciones que la hicieron llegar al punto en el que se encuentra.

Y es así como Clausius termina el capítulo 3, de esta forma Clausius introduce esta expresión a la que propone denominar con la letra S

$$\frac{dQ}{T} = dS \quad (2)$$

(3)

$$dQ = TdS$$

Aunque existen muchas maneras de enunciar la segunda ley de la termodinámica, los enunciados de Kelvin-Planck y Clausius son los más frecuentes en el campo de las aplicaciones, ya que se ajustan de manera más acertada a los comportamientos reales de los dispositivos.

“Es imposible que un dispositivo cíclico funcione de tal manera que el único efecto sea transferir calor desde un cuerpo frío a otro de mayor temperatura” (Atkins, P., 1992)

El enunciado de Clausius concuerda con la experiencia común de que el calor no se transfiere espontáneamente de una región fría a una región caliente, manteniendo implícita esta condición aun cuando se utilice un dispositivo que ayude a la transferencia y no se observen cambios en el dispositivo o en sus alrededores. Esta exigencia describe entonces a un dispositivo que, para que transfiera energía térmica desde una región de baja temperatura a una región de alta temperatura, funcione cíclicamente y realice trabajo

Con esto, Clausius centra su atención en ciclos reversibles, y como ya se ha mencionado antes, propone que el trabajo que el calor de un cuerpo puede efectuar, se realizará a través de un arreglo de las partículas constituyentes del cuerpo y de la transformación del calor existente en el cuerpo. (Ulloa-Lugo, N., 2006)

La solución de las transformaciones era sencilla para los procesos reversibles, en cambio para los no reversibles propone que toda modificación del sistema está ligada a una transformación no compensada: la entropía.

Es así como a través del estudio de transformaciones energéticas que Carnot da origen al término entropía, acerca de esto, dice:



“yo propongo llamar a la cantidad  $S$  la entropía del cuerpo, tomando la palabra griega  $\epsilon\nu\tau\rho\omicron\pi\acute{\iota}\alpha$ , “transformación”. El diseño que yo he formado con la palabra entropía, lo hice de manera que se asemejara tanto como fuera posible a la palabra energía” (Clausius R., 1850)

Es así como Clausius presenta formalmente el concepto entropía, y muestra la importancia de las transformaciones energéticas para la comprensión del mismo.

Junto con la entropía, Clausius plantea un total de 6 cantidades que, tienen en común, el hecho de que para determinarlas se toma en cuenta el estado actual en el que se encuentran y no el cómo llegaron a estar en ese estado (Borja, E., 2016). Estas cantidades son:

1. El contenido de calor,  $Q$ .
2. El contenido de trabajo,  $W$ .
3. La suma de estas dos cantidades o energía,  $U=Q+W$ .
4. El valor de la transformación del contenido de calor,  $Y$ .
5. La disgregación,  $Z$ .
6. La entropía,  $S$  (contenido de transformación).

Claramente para Clausius, el planteamiento de la entropía no está ligado solo a la temperatura del cuerpo, lo está también al arreglo de las partículas del mismo, al hablar de disgregación, se permite entender que Clausius ya no tiene como soporte una mirada en la que se estudie el calor como lo hacía Carnot (donde el calor se movía de un cuerpo a otro como un fluido, el calórico), sino que ya va siendo importante el análisis microscópico que se realiza en torno a la entropía, ya que pone de manifiesto el análisis interno de lo que sucede en la materia a nivel de partículas para la explicación de ciertos procesos.

### **2.2.3. Ludwig Boltzmann**

Ludwig Boltzmann (1844-1906) fue un físico austriaco, formando en un seno familiar con bastantes comodidades, tras su experiencia como docente y como científico, puede verse que es demasiado famoso para todo aquel que intente acercarse al estudio de la termodinámica, pero es muy desconocido en relación a la importancia que debería dársele. Mientras fue profesor de la universidad de Graz, desarrolló sus trabajos sobre la teoría cinética de los gases de Maxwell. Sus trabajos se fundamentaron en considerar que la materia tenía una estructura atómica, e introdujo nociones de probabilidad y estadística para solución de sus estudios.

Durante su desempeño como docente tuvo que enfrentarse a hechos que aportaron a sus episodios depresivos, que muy seguramente fueron impulsados por la muerte de su primer hijo, y que fueron potencializados por la crítica y la controversia que su trabajo tuvo en la comunidad científica del momento, Ernst Mach, un reconocido físico y filósofo de las ciencias, era un claro opositor de su teoría atómica de la materia.

En 1904 es cuando Boltzmann, después de una serie de ataques depresivos decide ponerle fin a su vida, lo hace sin alcanzar a conocer que desde esa fecha los estudios teóricos y experimentales que se adelantaban en la comunidad científica, daban prueba de que su teoría atómica de la materia era cierta. (Borja, E., 2016)

#### **Los cimientos de Maxwell.**

En términos de lo que se ha estado hablando durante el desarrollo del trabajo, se puede determinar cuál es la visión que tomó Boltzmann al estudiar la termodinámica, así que la ocupación en este momento no será solo evidenciar que él está mirando los sistemas de forma microscópica, sino más bien sentar las bases y mostrar aquellos conceptos que le permitieron tomar esa perspectiva.

Ya se ha planteado que los trabajos de Clausius fueron esenciales para el planteamiento de Boltzmann, pero si él los hubiese tomado en el punto en que Clausius los dejó, muy seguramente el trabajo que hoy se leería de la entropía para Boltzmann podría parecer incompleto a la luz de los nuevos avances (Ulloa-Lugo, N., 2006), lo claro es que fue esencial la participación de Maxwell y su estudio en torno a los gases para que Boltzmann desarrollara su teoría desde la mecánica analítica.

Daniel Bernoulli (1700 - 1782) y Rudolph Clausius (1822 - 1888) se encargaron de conformar una idea inicial de lo que es hoy el estudio de los gases, pero sus planteamientos estaban limitados al hecho de que para poder dar solución a sus ecuaciones, hubiera varios elementos constantes que no podían ser determinados, elementos como el número de átomos o moléculas en un gas, la masa molecular de las mismas, el tamaño o radio de las moléculas del gas, entre otros valores que por evidentes razones no podían ser determinados de forma directa; planteando una gran limitación para el análisis microscópico de las sustancias.

A este tipo de limitaciones, Maxwell tuvo la idea de utilizar la viscosidad del gas y relacionarla con el número de moléculas del gas, su velocidad y su masa molecular, permitiendo así que, aquella faltante para el desarrollo microscópico de las sustancias fuera respondida desde la viscosidad y el volumen, magnitudes que pueden ser medidas fácilmente en un laboratorio.

(Borja, E., 2016)

Para Maxwell, la explicación de los gases hablaba de la interacción de partículas, entre las cuales no solo existían colisiones entre ellas y con el recipiente que las contenía, sino que adicionalmente se presentaban otras interacciones de corto alcance, como atracciones y repulsiones, de lo contrario se trataría de un gas ideal; y para no asumir la estructura interna de

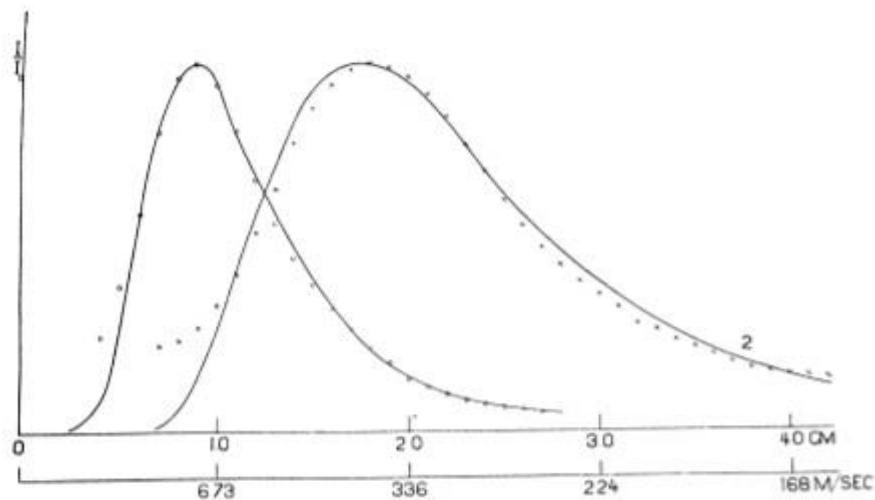
las mismas, era necesario no suponer que las partículas se comportaban como esferas rígidas que no se deforman.

Aparte de estos planteamientos, para Maxwell era importante que a diferencia de cómo lo planteaba Clausius, todas las partículas tenían velocidades diferentes; y no dejándose superar por el problema de tener que tratar con miles de partículas en las que cada una presente una velocidad diferente, Maxwell utilizó su gran capacidad matemática para que a través de herramientas de estadística y probabilidad pudiera dársele solución al problema.

Es así como surgen las distribuciones de velocidades de Maxwell, una función que determinaba que, para una temperatura dada, existe un máximo de la distribución, es decir, hay una velocidad que es compartida por un mayor número de partículas.

#### **Figura 4**

*Distribución de velocidades de Maxwell*



*Tomado de Mecánica estadística 2017 TEOREMA H*

Es así que Maxwell logra poner un referente, que es luego trabajado por Boltzmann en el desarrollo de la entropía. A partir de ella, se pueden deducir todas las propiedades macroscópicas de interés en un gas.

Con esto Boltzmann generalizó una distribución de velocidades a situaciones fuera del equilibrio como una función que dependía del tiempo de la distribución de las velocidades dadas.

### **La mirada de Boltzmann.**

En sus “*escritos de mecánica y termodinámica*”, Boltzmann deja claro que su “puerta de entrada” a los diferentes estudios, es la mecánica analítica, la que según él “es la teoría de las leyes que rigen el movimiento de los cuerpos” (Boltzmann, L., 1986)

Al pensar en esto, él planteaba que los fluidos están constituidos de pequeñas partículas que se mueven con independencia unas de otras y en sus escritos pone de manifiesto la simplicidad que estudiar las sustancias de esta manera trae.

Boltzmann dice que la tarea de las ciencias, es aclarar las cosas más complicadas a partir de las más simples y es por esto que el estudio del sonido, la luz, el calor, el magnetismo y la electricidad se ha reducido al análisis del movimiento de las partículas más pequeñas que conforman los cuerpos.

Efectivamente, Boltzmann busca estudiar los gases desde un postulado que sostiene que el calor es un movimiento molecular, en su libro “*Lectures on gas theory*” dedica un espacio a plantear lo que él llama “una analogía mecánica” (A mechanical analogy) en la que propone:

*“tomamos primero el punto de vista moderno de una descripción pura y aceptaremos las conocidas ecuaciones diferenciales para los movimientos internos de cuerpos sólidos o fluidos. por ejemplo, colisiones de dos cuerpos sólidos, movimiento de fluidos en recipientes cerrados, etc..., en los que tan pronto como la forma del cuerpo se desvía un poco de una figura geométrica sencilla, surgen ondas las cuales se cruzan una a la otra aleatoriamente. De tal manera que la energía cinética del movimiento visible original*

*debe finalmente ser disuelto en movimiento ondulatorio invisible. Esta consecuencia matemática de las ecuaciones que describen los fenómenos lleva a la hipótesis de que todas las vibraciones de las partículas más pequeñas en las cuales las ondas se transforman deben ser idénticas con el calor que observamos se produce y que el calor generalmente es un movimiento en pequeñas regiones invisibles para nosotros. Así surge la vieja perspectiva de que el cuerpo no llena el espacio continuamente en el sentido matemático, sino que consiste en moléculas discretas inobservables por su pequeño tamaño.” (Boltzmann, L., 1964)*

Allí Boltzmann, más allá del complejo de su analogía, lo que quiere es presentar cómo, la analogía mecánica entre los hechos que se basa la segunda ley y las leyes estadísticas del movimiento de las moléculas de un gas, es más que una semejanza superficial.

Hoy día se sabe que las leyes que rigen el movimiento de partículas son las leyes de la mecánica cuántica, y aunque hoy pueda no parecer lo más acertado, para ese momento las leyes de la mecánica se ajustaban perfectamente para la descripción que Boltzmann quería hacer para los sistemas microscópicos. (Borja, E., 2016)

### **Boltzmann y la entropía.**

Intentando responder a la pregunta que limitaba los planteamientos de Maxwell (¿cómo llega un gas al equilibrio donde las distribuciones de Maxwell de velocidades son válidas?), Boltzmann generalizó, como ya se mencionó anteriormente, una distribución de velocidades a situaciones fuera del equilibrio como una función que dependía del tiempo de la distribución de las velocidades dadas.

Para resolver esto, Boltzmann formuló un término (H):

$$H(t) = \int f \log(f) dw \quad (4)$$

Esta es la integral de la función de distribución ( $f$ ) multiplicada por el logaritmo de la misma, pero: ¿para qué es esta ecuación útil y qué se puede obtener de ella? Cuando Boltzmann integra la ecuación 4 señala que  $-H$  representa el logaritmo de la probabilidad del estado del gas considerado (Boltzmann, 1964) y después de hacer un delicado desarrollo matemático, encuentra que existen semejanzas entre la entropía ( $S$ ) y  $-H$  (Ulloa-Lugo, N., 2006). A partir de su teorema, encuentra que:

$$\frac{dH}{dt} < 0 \quad (5)$$

En otras palabras, determina que  $H$  es una función decreciente con el tiempo y se detiene en el momento en que  $dH/dt = 0$ , es decir, cuando  $H$  alcanza su valor mínimo posible. Cuando  $H$  llega a su valor mínimo, la distribución de velocidades que se encuentra es la distribución de Maxwell en el equilibrio y es así como Boltzmann logra explicar cómo un gas alcanza el equilibrio. (Borja, E., 2016)

Tras la conclusión de Boltzmann, en la que las innegables similitudes en el análisis de  $-H$  le hacía pensar en esta magnitud como la entropía, se viene una gran tormenta de críticas, críticas que surgieron a raíz de su habilidad para aplicar las leyes de Newton al movimiento corpuscular.

Boltzmann había determinado la existencia de una magnitud  $H$  que decrecía en función del tiempo, entonces a partir de su evolución era posible determinar si el tiempo estaba corriendo en una dirección o en otra, planteamiento que dio surgimiento a dos críticas: una a la reversibilidad y otra a la recurrencia.

El problema surge debido a que las leyes de Newton funcionan de la misma forma con el tiempo marchando en el sentido contrario, cosa que no sería distinguible al hablar de partículas, no habría noción de progreso en el tiempo al estudiarlas; al hablar de la descripción dinámica o cinemática de un cuerpo, es suficiente un signo negativo para determinar en qué sentido se está yendo, diferente caso cuando se piensa en el movimiento de partículas, si se analizara el transcurrir de un sistema microscópico en el que las partículas choquen unas con otras, sería indistinguible el hecho de que se mirase en el sentido natural del tiempo(hacia adelante, del hecho que se mirase como si se reprodujera en reversa.

Boltzmann había determinado la existencia de una magnitud  $H$  que decrecía en función del tiempo, entonces a partir de su evolución era posible determinar si el tiempo estaba corriendo en una dirección o en otra, planteamiento que dio surgimiento a dos críticas: una a la reversibilidad y otra a la recurrencia.

Planck trata este problema hablando de un observador macroscópico que puede evidenciar de forma fenomenológica, y un observador microscópico que puede ver de forma íntima todo el desarrollo particular que se da en los gases, acerca de esto, menciona los cambios de estado de un sistema físico como punto de comparación para el análisis desde los dos observadores.

Al respecto dice que ambos observadores darán respuestas muy diferentes al analizar el mismo punto, por su parte, el observador microscópico hablará de la posición y las velocidades de todos los átomos individuales, presentando para cada átomo las tres coordenadas y las tres componentes de la velocidad; por su lado, el observador macroscópico requerirá menos información para él, el análisis determinado por la densidad, la velocidad visible y la temperatura en cada punto del gas, y esperará que, cuando estén dadas estas cantidades y el progreso del



proceso, éste coincide completamente por lo determinable por las dos leyes de la termodinámica (Planck, 1909b).

Para Boltzmann era importante el hecho de diferenciar los estados microscópicos, de los estados macroscópicos, los macroestados (estados macroscópicos) eran determinados por las variables presión, volumen, temperatura, entre otros y para hablar del microestado (estados microscópicos del cuerpo) se debe hablar de la posición y la velocidad de cada una de las partículas en cada instante del tiempo, considerado que es un gran número de valores el que habría que manejar para los microestados, Boltzmann plantea que si se deja un macroestado cuyos valores de presión, volumen y temperatura son fijos, ¿cuáles son los microestados que son compatibles con esos valores fijos? Es así que determina que la entropía no es más que el número de microestados compatibles con un macroestado dado. (Borja, E., 2016)

No dejándose opacar por las críticas, Boltzmann hizo un esfuerzo por hablar de la entropía, esta vez sin colocar como referente las leyes de Newton, las cuales al parecer eran la causa de discusión en la comunidad científica.

Un poco más allá del planteamiento matemático, se ha hecho un trabajo por intentar entender qué era lo que él estaba pensando al proponer la entropía de manera probabilística, puede ser sorpresa que la famosa ecuación  $s = k \ln W$ , que se encuentra grabada en su tumba, no fue realmente planteada por Boltzmann, sino por Max Planck, quien tomando como referente el desarrollo de los trabajos de Boltzmann aplicado a la radiación de cuerpo negro, pudo determinar un valor para la denominada constante de Boltzmann, acuñando así la ecuación  $s = k \ln W$  como fundamento para la mecánica estadística.

Es así como queda de manifiesto la perspectiva que tomó Boltzmann en torno a la entropía, generando un cambio de paradigma para lo que en el siglo XIX se vivía en la comunidad científica, se expuso que no fue fácil para él optar por un punto de vista que iba en contra a lo que todos querían estudiar, pero de no haber sido así, la entropía e incluso la termodinámica, no habría tomado el rumbo que tomó para formarse hasta el lugar desde el cual se le conoce hoy día; es de gran admiración la forma en que a través de su teoría, logra unificarse por medio de la termodinámica el análisis de sistemas microscópicos y macroscópicos.

Para entender esto se debe analizar todos los microestados (descripción de variables microscópicas) que pertenecen a un determinado macroestado (descripción de variables macroscópicas) y que aquellos casos especiales en los que condiciones excepcionales especiales existen entre las configuraciones de átomos interactuando no ocurren en la naturaleza, debido a que estos están en un constante desorden. con esto Planck (1909b) explicaba que:

“Por lo tanto, no es la distribución atómica, sino más bien la hipótesis del desorden elemental, la que forma el núcleo real del principio de incremento de la entropía y, por tanto, la condición preliminar para la existencia de la entropía. Sin desorden elemental no hay entropía ni proceso irreversible.” (Planck, 1909b)

## CAPÍTULO 3: CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

### 3.1. Análisis comparativo de las aproximaciones de Clausius y Boltzmann

Principalmente se habla de la perspectiva que cada uno de ellos toma para entender el calor, y cuál es la forma que están utilizando al estudiarlo, ya ha sido claro que Boltzmann toma los trabajos de Clausius para poder desarrollar sus estudios, lo importante ahora es notar cuáles son aquellos puntos en los que difiere, e interpretar qué de aquellas cosas que después planteó Boltzmann, entran en discusión por lo expuesto por Clausius.

Para comparar los estudios realizados por los dos autores principales, los aspectos que se evalúan surgen desde aquellos que posibilitan una interpretación adecuada de la entropía:

1. La utilización de estudios previos para poder realizar el planteamiento de una urgencia investigativa, esto podría responder a la pregunta ¿Qué querían responder cuando desarrollaron su estudio en torno a la entropía?
2. La manera en que desarrollaron cada uno de sus estudios y cuál es la utilización que le dan a los diferentes conceptos utilizados. ¿Cómo lo desarrollaron?
- 3.Cuál fue la perspectiva que tomaron al momento de desarrollar diferentes estudios en torno a la entropía y cómo esta influyó para la descripción de la segunda ley de la termodinámica o en la definición de la misma entropía.
4. Enunciado de la segunda ley de la termodinámica. ¿cómo define cada uno de ellos la entropía?

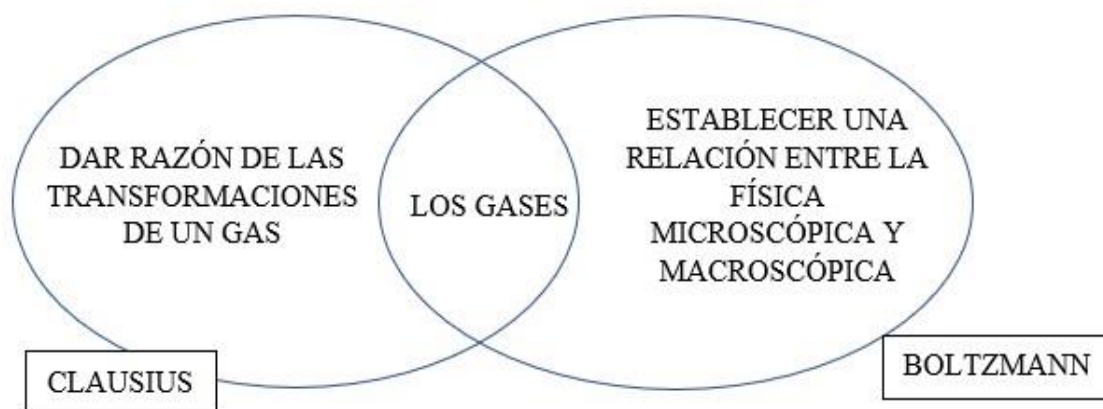
¿Qué querían responder cuando desarrollaron su estudio en torno a la entropía? Para responder esto se plantea como punto de unión el hecho de que ambos utilizan el estudio de los gases para hacer desarrollo a cada una de sus teorías, por su parte Clausius quiere hacer descripción del estado físico de un gas cuando sufre transformaciones, pero su necesidad es

responder a la insuficiencia de información al momento de describir esas transformaciones; quiere poder dar explicación a esos puntos que habían quedado a la deriva tras los planteamientos de Carnot.

Para Boltzmann dar explicaciones físicas en torno a los gases va más allá de lo planteado por Clausius, y es que, pese a que los aportes de Clausius ya sentaban un precedente, Boltzmann quería ir más allá estableciendo una relación entre la física microscópica y la física macroscópica, relación planteada desde el estudio de las partículas en un gas.

### Gráfico 1

*Descripción de las diferencias y similitudes para la problemática de estudio de Clausius y Boltzmann*



*Creación propia a partir de los planteamientos de Clausius y Boltzmann*

Para hacer el desarrollo de cada uno de sus estudios, ambos utilizaron un delicado uso de la matemática, uso que para Clausius se vio limitado al momento de encontrar variables que le permitían relacionar la perspectiva macroscópica con la microscópica, Clausius debía describir para la entropía el número de partículas, la masa molecular, el tamaño de las moléculas, la distancia media libre y la relación entre la velocidad de las moléculas y la temperatura del gas.

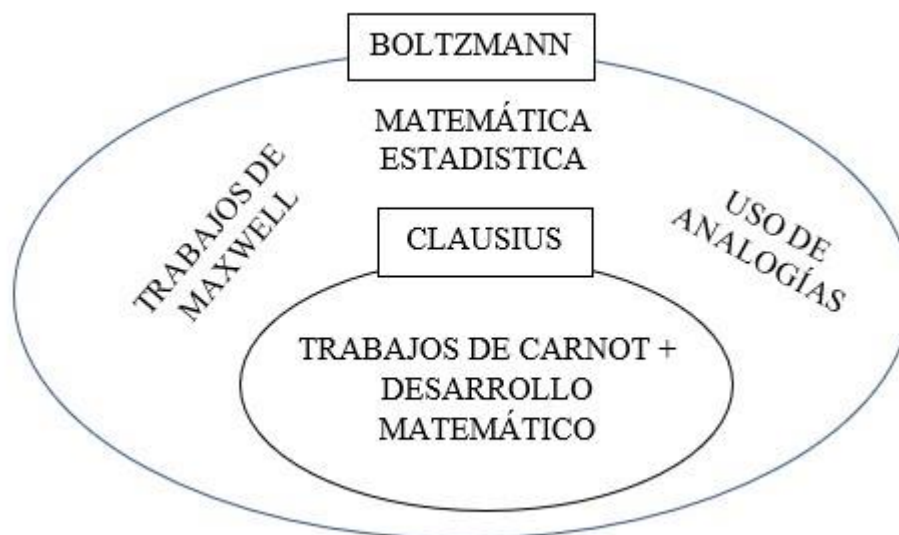
Estas no eran cantidades medibles de forma directa y solo era posible la utilización de magnitudes macroscópicas tales como la temperatura, la presión, el volumen, entre otras cosas.

La limitante surge en el punto en el que se plantea la obligatoriedad de una relación diferente para cada una de esas magnitudes y se encuentra el hecho de que Clausius solo contaba con la solución para cuatro de las seis anteriormente mencionadas; limitante que solucionó Boltzmann al encontrar una relación entre estas magnitudes y la viscosidad del gas (Borja, E, 2016)

Esto permitió que Boltzmann pudiera hacer una explicación matemática más compleja de los gases, contando con el aporte de los trabajos de Maxwell. Boltzmann da origen a la mecánica estadística como una solución clara al estudio de la entropía; adicional en sus textos se evidencia el claro uso de analogías para la descripción del sentido físico de lo que propuso.

## Gráfico 2

*Descripción de las diferencias y similitudes para el proceder de estudio de Clausius y Boltzmann.*



*Creación propia a partir de los planteamientos de Clausius y Boltzmann*

Pese que para Clausius aún no era completo el desarrollo del calor desde una perspectiva microscópica, puede decirse que su estudio estuvo permeado, por dos puntos de vista, uno desde lo fenomenológico y otra particular, en sus explicaciones se logra evidencia que está pensando el calor como lo planteó Carnot, en los que el calor era explicado como una sustancia (calórico) y no como para Boltzmann: un movimiento de partículas.

Clausius tuvo que hacer una distinción entre la visión microscópica y macroscópica hablando de lo macro con la teoría general del calor, y de lo micro con la teoría especial del calor, Boltzmann, por el contrario, no buscó hacer distinción para poder hablar de las visiones, sino que buscó una forma de establecer conexión entre ellas viéndola como un movimiento de partículas.

Finalmente, después de haber establecido las ideas y herramientas que Clausius y Boltzmann utilizaron para el desarrollo de sus trabajos, es posible determinar cómo fue que cada uno de ellos entendieron la entropía, como se abordó anteriormente, que Clausius expuso la segunda ley en términos de la imposibilidad que presenta el flujo de calor para pasar de un cuerpo cualquiera a uno más caliente, pese a eso, y viendo el sentido en el que quiso dar origen al término es posible afirmar que él propuso la segunda ley en términos de las posibles transformaciones de un cuerpo, hablando por una parte en términos de la temperatura y por otro lado en términos del arreglo de partículas que el cuerpo presente.

Para Boltzmann, la segunda ley está determinada no solo por el logaritmo natural de la probabilidad de los estados posibles, sino también por el teorema H, (véase ecuación 10) del que surge la entropía, que es la distribución de energía de las moléculas en un instante de tiempo.

Resumiendo lo anterior se encuentra:

**Tabla 1**

*Cuadro comparativo resumen de los puntos importantes para la descripción de la entropía por Clausius y Boltzmann.*

PLANTEAMIENTO	RUDOLPH CLAUSIUS	LUDWIG BOLZTMANN
¿Qué querían responder?	Dar explicación de las transformaciones de un gas.  ¿Qué ocurre en un cuerpo cuando en un cierto estado recibe o cede calor?	Establecer una relación entre la visión microscópica y macroscópica de la entropía.
¿Cómo lo hicieron?	Haciendo desarrollo matemático, haciendo uso de los trabajos de Carnot.	Haciendo uso de la mecánica analítica, donde utilizó los planteamientos de Clausius y Maxwell
¿Qué perspectiva tomaron?	Utiliza el calor como movimiento de partículas y como un fluido, pero distingue la visión microscópica y macroscópica de la termodinámica.	Utiliza el calor como movimiento de partículas y plantea una relación entre la visión macroscópica y la visión microscópica de la termodinámica.
Segunda ley	El valor de las transformaciones de un cuerpo.	El logaritmo de la probabilidad de los estados posibles.

*Creación propia a partir de la información recolectada y analizada en el presente documento.*

### **3.2. ¿Se da con alguno de los autores expuestos un cambio de paradigma?**

En ciencias, un paradigma es caracterizado porque aquellos que son participes del estudio están soportados bajo el mismo marco de ideas básicas (Pérez, 1999). Para Kuhn (1975) , la estructura de las ciencias está reflejada en las siguientes etapas (Lugo, 2006):

1. Preparadigmática
2. Paradigmática
3. De crisis
4. Revolución de la ciencia
5. Cambio y aceptación de otro paradigma

En la etapa paradigmática es donde una comunidad se unifica de acuerdo al mismo marco de conceptos básicos, Kuhn lo plantea como una dinámica circular, que él explica así:

“Un paradigma es lo que comparten los miembros de una comunidad científica y, a la inversa una comunidad científica consiste en unas personas que comparten un paradigma”  
(Kuhn, T, 1975).

Esto lo hace para poner dar ayuda a la comprensión de todo lo que sucede en esa estructura de las ciencias que ya fue expuesta, pero un paradigma no es solo dado, para que este sea establecido, es porque previo fue puesto en cuestión de acuerdo a los objetos, procedimientos y problemas de estudio (Ulloa-Lugo, N, 2006).

#### **3.2.1. Cambio de paradigma**

Un cambio de paradigma es aquel en el que se da una transición a una nueva forma de ver y manipular el mundo, que puede dar lugar a nuevos fenómenos y problemas (Pérez, J., 1999).



Con esto como referente se propone estudiar las bases bajo las cuales Clausius y Boltzmann empezaron a construir sus teorías y a partir de eso responder a la pregunta de si realmente se da con cada uno de ellos una nueva forma de ver y manipular el mundo.

Ya se ha visto antes, que el desarrollo de Clausius va muy acorde a lo que se había establecido desde Carnot, toma una perspectiva similar del calor e intenta abordarlo desde lo particular, diferente a Boltzmann que utiliza esa idea particular y la establece como referencia para la comprensión de la entropía y para dar respuesta a esto introduce una nueva forma de analizarlo, dando origen a la mecánica estadística como elemento fundamental para la comprensión de la entropía.

Este ya es un elemento suficiente para afirmar que Boltzmann fue participe de lo que se está definiendo como un cambio de paradigma, ya que estableció dentro de la comunidad científica una nueva forma de estudiar el mundo, en este caso tomando como referencia la entropía mostró una forma de comprender el mundo (la teoría atómica) como válida para toda la comunidad.

Si de ubicar a los autores en alguna de las etapas planteadas como estructura para las ciencias, aunque Boltzmann esté en ese punto en que se da un cambio de paradigma, esto no habría sido posible si Clausius no hubiese aportado a esa etapa de crisis en la que sus limitaciones permiten cuestionar la eficacia del paradigma vigente para dar solución a nuevos problemas tales como la correspondencia entre una perspectiva microscópica y una perspectiva macroscópica.

### **3.3. Conclusiones**

Al hablar en torno a la entropía, desde un análisis más allá de lo matemático, se puede ver su provecho desde un punto de vista metodológico en el que se muestran diferentes factores que

permitieron entenderla como un elemento que aporta a un proceso de aprendizaje y que da claridad en relación a las metas que fueron planteadas como objetivos desde el principio del trabajo.

- Por esto que principalmente se destaca el provecho de los estudios histórico críticos, dando una metodología que permite a través de la recontextualización de saberes estar inmerso en el contexto del cual surge el concepto para poder entender todos los factores que precedieron y que estuvieron involucrados para la concepción del mismo.
- Habiendo estudiado la entropía desde un punto de vista fenomenológico y desde una perspectiva microscópica en donde se busca la comprensión de un sistema desde la teoría atómica planteada por Planck, se busca responder al: ¿Qué tan relevante es abordar una de las dos perspectivas? Para lo cual se expone la mirada de Boltzmann como una solución a la tensión propuesta; ya se mencionó en un principio que la entropía es aquel elemento que permite hacer conexión entre ambas miradas, yendo un poco más se concluye que la entropía es un elemento de dialogo constante entre ellas en el que al querer abordar alguna de las dos como referencia, indudablemente se tendrá que llegar a la otra si se quiere tener una comprensión integra de ella.

Si se quisiera abordar los fenómenos térmicos, solo desde lo fenomenológico, se tendría que llegar a lo microscópico al querer resolver problemas como la admisibilidad de la reversibilidad de los procesos, tal como le sucedió a Clausius, o si se quisiera empezar desde lo microscópico, se llegaría a la reflexión que se expuso de Planck en la que es

relevante el tener que hacer coincidir lo que se expone microscópicamente, con lo que sucede fenomenológicamente.

- Basado en la noción de paradigma dada por Kuhn, se entiende que los trabajos de Boltzmann dan origen a un cambio de paradigma, en el que se da una nueva forma de ver y estudiar el mundo, en este caso se le da gran magnitud a la mecánica analítica utilizada por Boltzmann y a la mecánica estadística a la que él da origen, y se le atribuye gran magnitud porque serán elementos claves para lo que hoy se conoce como mecánica cuántica, a la que se le atribuye origen por las explicaciones termodinámicas que Planck hizo de la radiación de cuerpo negro (Borja, E., 2016).

Adicional, se entiende que hubo un cambio de paradigma porque tras los avances dados por Boltzmann, sí se generó una diferencia en relación a los compromisos y bases establecidas previamente por la comunidad científica (Ulloa-Lugo, N, 2006), y adicional le da una nueva importancia al problema de entender los fenómenos desde un punto de vista microscópico y la forma de darles solución a través de la colisión de partículas; dando la perspectiva microscópica como una referencia para el ¿qué se está estudiando? Y ¿cómo se está estudiando?

#### 4. Referencias bibliográficas

- Arias, M., & Navarro, M. (2017) Epistemología, Ciencia y Educación Científica: premisas, cuestionamientos y reflexiones para pensar la cultura científica. Actualidades investigativas en Educación. Vol. 17(3). Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/319438469\\_Epistemologia\\_Ciencia\\_y\\_Educacion\\_Cientifica\\_premisas\\_cuestionamientos\\_y\\_reflexiones\\_para\\_pensar\\_la\\_cultura\\_cientifica](https://www.researchgate.net/publication/319438469_Epistemologia_Ciencia_y_Educacion_Cientifica_premisas_cuestionamientos_y_reflexiones_para_pensar_la_cultura_cientifica)
- Ayala, M. (2006) Los análisis histórico-críticos y la recontextualización de saberes científicos. Construyendo un nuevo espacio de posibilidades. Pro-Posições. Vol 17 (1) pp. 19 – 37. Recuperado de [https://www.fe.unicamp.br/pffe/publicacao/2343/49\\_dossie\\_ayalammam.pdf](https://www.fe.unicamp.br/pffe/publicacao/2343/49_dossie_ayalammam.pdf)
- Boltzmann, L. (1964) Lectures on gas theory. (Stephen G. Brush, trad.) New York: Dover Publications, Inc. (Obra original publicada en 1896 - 1898). Recuperado de [https://books.google.com.co/books?id=-I7QzCXnstEC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ViewAPI&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.co/books?id=-I7QzCXnstEC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ViewAPI&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
- Boltzmann, L. (1986) Escritos sobre mecánica y termodinámica. (Francisco Ordoñez, trad.) Editorial Alianza. pp. 166 – 197
- Bunge, M. (1980) Epistemología: Curso de actualización. México D. F.: Siglo 21 Editores. Recuperado de <http://josemramon.com.ar/wp-content/uploads/BUNGE-Epistemologia.pdf>

- Calvo, G. (2017). Antoine Lavoisier y la revolución química. (Trabajo fin de grado). España: Universidad de la Rioja. Recuperado de [https://biblioteca.unirioja.es/tfe\\_e/TFE002689.pdf](https://biblioteca.unirioja.es/tfe_e/TFE002689.pdf)
- Calzetta, E. (2009). Entropía. Colección “Las ciencias naturales y la matemática” (1 ed.) Buenos Aires: Ministerio de Educación de la Nación. Instituto Nacional de Educación Tecnológica. Recuperado de <http://www.bnm.me.gov.ar/giga1/documentos/EL001915.pdf>
- Carnot, S. (s. f.) Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego. España: Alianza Universidad.
- Clausius, R. (1879) The mechanical Theory of Heat. (Walter R. Browne, trad.) London: Macmillan And Co. (Obra original publicada en 1880). Recuperado de <https://www3.nd.edu/~powers/ame.20231/clausius1879.pdf>
- Duhem, P. (1969). To Save the Phenomena (trad. Edmund Doland and Chaninah Maschler) Chicago: University of Chicago
- Faires, V. M., & Simmang, C. M. (1994). Termodinámica (No. 536.7 FAI).
- Flores, F. & Ulloa-Lugo, N. (2014) ¿Cómo enseñan la entropía los profesores universitarios? Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias Vol. 13 (2) pp. 201 – 221. Recuperado de [http://reec.uvigo.es/volumenes/volumen13/REEC\\_13\\_2\\_5\\_ex827.pdf](http://reec.uvigo.es/volumenes/volumen13/REEC_13_2_5_ex827.pdf)
- Forero, S. (2014) Sadi Carnot y la segunda ley de la termodinámica. La historia de la Ciencia como Pedagogía Natural. [Tesis doctoral]. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional. Recuperado de <http://repository.pedagogica.edu.co/bitstream/handle/20.500.12209/81/TO-17327.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Gonzales, J. (2007) Ludwig Boltzmann. Pionero de la ciencia del siglo XX. Revista CENIC Ciencias Químicas. Vol 38 (1) pp. 254 – 261. Recuperado de <https://revista.cnic.edu.cu/revistaCQ/sites/default/files/articulos/CQ-2007-1-254-261.pdf>
- Kuhn, T. (1971) La estructura de las revoluciones científicas. (Agustín Contin, trad.) México D. F.: Fondo de Cultura Económica. (Obra original publicada en 1962). Recuperado de <https://materiainvestigacion.files.wordpress.com/2016/05/kuhn1971.pdf>
- Oliveira, M. (2019). The two parts of the second law of thermodynamics. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 41 (1). Recuperado de <http://www.scielo.br/pdf/rbef/v41n1/1806-9126-RBEF-41-1-e20180174.pdf>
- Pérez, J. (2009) La termodinámica de Carnot a Clausius. Las ciencias antes de la gran guerra. España: Universidad de la Laguna. pp 32 – 50. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/237573865\\_La\\_Termodinamica\\_de\\_Carnot\\_a\\_Clausius](https://www.researchgate.net/publication/237573865_La_Termodinamica_de_Carnot_a_Clausius)
- Pérez, R.A. (1999) Kuhn y el cambio científico. México: Fondo De Cultura Económica.
- Planck, M. (1909a). Reversibilidad e irreversibilidad. 1ª Conferencia de la serie Eight lectures on Theoretical Physis. Universidad de Columbia.
- Planck, M. (1909b) La teoría atómica de la materia. (Juan Carlos Orozco, trad.) 3ª Conferencia de la serie Eight lectures on Theoretical Physis. Universidad de Columbia.
- Planck, M. (1915). Eight lectures on Theoretical Physics. (A. P. Wills, trad.) New York: Columbia University (Obra original publicada en 1909).
- Sánchez, J. (2016) Una reflexión sobre el principio de equivalencia de las transformaciones para la enseñanza de la termodinámica. [Tesis de maestría]. Bogotá: Universidad Pedagógica

Nacional. Recuperado de

<http://repository.pedagogica.edu.co/bitstream/handle/20.500.12209/341/TO-20681.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Uffink, J. (2001) Bluff your way in the Second Law of Thermodynamics. Netherlands: Utrecht

University. Recuperado de <https://www.physik.uni-augsburg.de/theo1/hanggi/Uffink.pdf>

Ulloa-Lugo, N. (2006) Origen y evolución del concepto de entropía. Representaciones e

implicaciones para la enseñanza. (Tesis doctoral). Universidad Pedagógica Nacional.

México D. F., México. Recuperado de

<http://xplora.ajusco.upn.mx:8080/xplorapdf/23524.pdf>