

La atomística de Boltzmann como hipótesis mecánica en la organización de los fenómenos
térmicos: un análisis de corte histórico a la física teórica de finales del siglo XIX.

Nicolás Andrés Márquez Ramírez

Asesor:

Juan Carlos Castillo Ayala

Línea de investigación:

La 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

2020

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, amigos y a mi alma mater la Universidad Pedagógica Nacional a quienes me acompañaron en este proceso y contribuyeron para que se orientara la investigación, en serio a cada una de estas personas, gracias. Al maestro Juan Carlos Castillo Ayala por su acompañamiento, su tiempo y todo su esfuerzo, sin su ayuda no se habría construido un trabajo de tal naturaleza, tal vez el camino habría sido más estrepitoso de lo esperado, quizás más seguro disciplinalmente y por tanto no hubiese sido tan enriquecedor para mi formación.

Tabla de contenido

Capítulo I: Ubicación del trabajo	8
Contexto problemático	8
Objetivo general	12
Objetivos específicos	12
Metodología	13
Antecedentes	18
Capitulo II: La situación de la física teórica en la segunda mitad del siglo XIX entorno al atomismo	20
De lo particular a lo general, la forma de abordar las cuestiones trascendentales la ciencia	24
De la conservación de la energía y las sensaciones	25
La teoría mecánica del calor y los procesos.....	31
Inevitabilidad del atomismo en las teorías físicas XIX.....	32
Sobre los métodos de la física teórica y las organizaciones mecánicas	34
Capitulo III: La teoría cinético molecular y la segunda ley de la termodinámica	38
Sobre la teoría física y la introducción a la teoría de gases	40
Naturaleza del calor, naturaleza de la materia	43
La atomística y la teoría de gases.....	43
La presión de un gas.....	45

Significado matemático de la cantidad H	47
Leyes de Boyle – Charles – Avogadro.....	50
La temperatura como medida de movimiento molecular.....	54
Calor específico y el significado físico de la cantidad H	55
Equipartición de la energía.....	56
Algunos efectos en el camino libre de la ciencia	63
Capítulo IV: Los estudios históricos y la importancia en la enseñanza de las ciencias.....	64
La historia de las ciencias y los análisis conceptuales	65
La recontextualización de saberes y la enseñanza de las ciencias	68
Ciencia, como producto y proceso	70
Conclusiones	71
Bibliografía	73
Anexos	78
Anexo 1. Síntesis de los antecedentes locales.....	78
Anexo 2. Deducción de la presión desde la teoría cinética de los gases.....	80
Anexo 3. Leyes de Boyle Charles Avogadro	83
Anexo 4. Deducción de la entropía como ley de probabilidad y el significado físico de H	88

Tabla de ilustraciones

Ilustración 1.	44
---------------------	----

Ilustración 2.	46
Ilustración 3.	52

Lista de tablas

Tabla 1.	45
Tabla 2	54
Tabla 3.	59

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se centra en un análisis de corte histórico sobre la teoría mecánica del calor y el uso de hipótesis atomísticas que, por un lado, son referentes sobre la existencia de los átomos, en pro de una naturaleza discontinua de los cuerpos y por otro, concluyen en la interpretación de la segunda ley de la termodinámica como una ley de probabilidad, alrededor de la organización de los fenómenos térmicos realizada por Ludwig Boltzmann en el siglo XIX. En este trabajo se hace un análisis de una serie de escritos de autores de la época como Maxwell, Boltzmann, Mach, Planck y Lenin; para dar cuenta del desarrollo científico que conduce a la consolidación de la mecánica estadística, y que es uno de los estadios de las teorías atómicas de la física; además, permite una comprensión más profunda de la física y brinda elementos al maestro de ciencias para su formación y para la estructuración de propuestas para la enseñanza. Este tipo de estudios de corte histórico, hace uso de textos originales¹ y de fuentes secundarias, cuyos esfuerzos, son entre otros, significar el papel de la historia de la ciencia en su propio proceder y en su enseñanza. Los cuales proveen elementos que dan cuenta de una imagen de la actividad científica. En este sentido, los estudios de corte histórico-crítico y la recontextualización de saberes, son esclarecedores sobre las diferentes problemáticas teóricas, fenomenológicas y filosóficas, entre otras, a las que se enfrentan los científicos de una determinada época, aspecto que contribuye a los procesos de recontextualización para la enseñanza de las ciencias.

El texto consta de cuatro capítulos, el primero presenta la ubicación del trabajo así como la perspectiva teórica desde la cual se realizan los análisis de los textos, la orientación metodológica, los objetivos y alcances del trabajo. El segundo capítulo, presenta una reflexión

¹ Se consideran como originales, las traducciones del idioma original de los escritos al inglés y español por parte de los científicos en sus correspondientes lenguas maternas.

sobre la situación problemática de la física teórica de finales del siglo XIX en Alemania, entorno al uso de hipótesis mecánicas y atomistas en las teorías físicas y los principios de la mecánica que son discutidos en las organizaciones de los fenómenos termodinámicos, así como de la naturaleza de la materia. El tercer capítulo ilustra aspectos de la teoría cinético molecular de los gases como una teoría mecánica del calor, la cual implica hacer una interpretación probabilística del concepto de entropía. El cuarto capítulo muestra la relevancia de los estudios de corte histórico para la enseñanza de las ciencias, particularmente de la física desde una perspectiva que asume los procesos de enseñanza como recontextualización de los saberes científicos, con el fin de promover la consolidación de un conocimiento, a propósito de problemáticas de la ciencia, en el aula para finalizar con unas cortas pero contundentes conclusiones.

CAPÍTULO I: UBICACIÓN DEL TRABAJO

Contexto problemático

La formación de maestros, tradicionalmente en lo que respecta a la educación en ciencias se ha orientado hacia la asimilación de conceptos y teorías que son presentados como definiciones y ecuaciones que son usadas como herramientas de cálculo, además de ser planteadas desde una imagen estática de ciencia (Castillo, 2008), con escasa reflexión en torno a los contenidos que se presentan, es decir, no se posibilita de entrada, una discusión sobre las organizaciones y consideraciones que dieron lugar a las teorías, los conceptos y las formas en que tanto los conceptos como las teorías son presentados en la clase de ciencias.

Lo anterior corresponde a una imagen de ciencia centrada únicamente en los productos de la misma, que invisibiliza: los procesos de producción de conocimiento científico, las problemáticas de investigación y los fenómenos, *factores* que están en constante comunicación y configuran el sistema de discusión, que da lugar a tales productos de la actividad científica (Ayala, 2006); ello puede llevar a que el maestro aborde los procesos de enseñanza de las ciencias desde una perspectiva que omita la relación con la historia de las ciencias y la enseñanza de la ciencia (Sánchez, 2016), aspecto que puede causar en los estudiantes de cursos introductorios de física, la impresión de que las teorías científicas y las organizaciones de los fenómenos se llevan a cabo sin ninguna relación con el modo de pensar y entender el mundo, el contexto y sus problemáticas (Ayala, 2006).

Esta imagen de ciencia, en la que se omiten los elementos que configuran el contexto de producción de conocimiento, ha prevalecido durante mucho tiempo en la enseñanza, ejemplos de ello, se encuentran en la literatura que usualmente se utiliza para la enseñanza de la física, particularmente de la termodinámica; generalmente, se presenta la termodinámica desde el punto

de vista fenomenológico, pero a la hora de formalizar los fenómenos se hace, acudiendo a la teoría cinético molecular, sin establecer un contexto teórico y mucho menos histórico de esta forma de explicar los fenómenos termodinámicos, que está mucho más vinculada con la organización teórica de la mecánica estadística (Alonso & Finn, 1971). Por otra parte, en *Elementos de Mecánica Estadística* de (Campos, 2006) se presentan los contenidos de la termodinámica, en lo que respecta a caracterizar variables de estado de un sistema termodinámico, haciendo uso de notaciones diferenciales, (propias de la organización fenomenológica del siglo XIX), sin embargo se prosigue con la mecánica estadística, sin hacer ilustración del cómo, ni del porqué, esa organización tiene lugar y su importancia para la física teórica de finales del siglo XIX y comienzos del siglo XX.

Por medio de un estudio de corte histórico, en el cual se revisa el contexto en el que L. Boltzmann propone su descripción mecánica de esta ciencia, se reconoce como entra en conflictos con sus pares académicos en Europa (Gulín, 2007), donde su organización y el uso de hipótesis atómicas, son objeto de debate científico en la segunda mitad del siglo XIX, esto se configura en el ambiente de discusión, sobre los métodos de la física teórica, el objeto de estudio (*naturaleza*), así como el papel de las hipótesis, que buscan *caracterizar o pensar* los fenómenos físicos, y el rol de la experiencia como método de conocimiento del mundo físico natural.

Por tanto, el reconocimiento de la investigación científica, como pilar de una sociedad próspera, la cual está en capacidad de proveer a sus ciudadanos las condiciones que motivan seguir esta tarea investigativa, en pro de un proyecto de país; descansa en una concepción científica del mundo, es decir, involucra hacer reflexión de los procesos que tienen lugar, en la formación fundamental de los maestros en ciencias. Para el caso de atención, la naturaleza atómica de la

materia², ha sido aceptada en la comunidad científica y, por tanto, tenida en cuenta en la enseñanza de las ciencias hasta el día de hoy, en no hace poco más de un siglo.

Lo anterior, es producto de numerosos trabajos teóricos y experimentales, los cuales tienen como cúspide, por ejemplo, la explicación al movimiento browniano³ hecha por Einstein en 1905 (Moreno, 2006). En el proceso de esta aceptación por parte de algunos miembros de la comunidad científica centroeuropea de la época, como Ostwald⁴; el trabajo de Ludwig Boltzmann, sobre la caracterización de los gases y la teoría mecánica del calor, labró el camino, con el fin de ofrecer los argumentos teóricos, que soportaran a la teoría atómica y a la posterior física moderna que empezaba a ver su luz con los trabajos de Max Planck, sobre la radiación de cuerpo negro.

La falta de argumentos teóricos sobre la existencia de los átomos, en términos de su naturaleza. Fue para ese entonces, el principal problema que los detractores de las hipótesis atomísticas, usaron para desestimar las organizaciones mecánicas hechas por Boltzmann sobre la termodinámica, cuya consecuencia, implicaba interpretar el carácter probabilístico de la entropía. Ya que, aceptar la naturaleza discreta de la materia, significaba hacer descripciones de lo perceptible, en términos de lo no perceptible, dando un aire de artificioso, incluso de metafísico (Mach, 1914), al asunto de proceder en una ciencia exacta y hasta el momento experimental, como la física.

Es desde esta perspectiva de conocimiento enmarcada en el Empiriocriticismo o positivismo lógico, que tienen lugar las réplicas a la teoría atómica, ofrecidas por dos movimientos

² Si bien se puede rastrear su origen, hasta los antiguos griegos como Leucipo y Demócrito, el atomismo al que se alude no es el mismo, por cuanto no es sobre lo indivisible, sino por la cantidad mínima para las composiciones químicas (Levinas, 2001; Orozco, 1999).

³ Del cual, (Zarate, 2013) construye el problema de la continuidad o discontinuidad de la materia alrededor de la enseñanza de ciencia.

⁴ Quien fue reconocido detractor de la teoría atómica, por hacer uso de hipótesis metafísicas refiriéndose a los átomos, además de ser abanderado del movimiento que pretendía sumir a la mecánica en la energética.

reconocidos como: fenomenistas y energetistas, cuyas posturas (ontológicas, epistemológicas y metodológicas) eran contrarias a las organizaciones mecánicas, en especial, las que incluían a los átomos. Esto a causa de la filosofía de la ciencia predominante, la cual se hace necesaria entender para dar cuenta del entramado científico.

En *Analysis of Sensations* (Mach, 1914), procede a caracterizar a las sensaciones, (colores, olores, sonidos, temperaturas, presiones) como lo simple, donde sus relaciones funcionales y permanencias relativas en el espacio y el tiempo, son los llamados *cuerpos*. Intrínsecos a los cuerpos, se encuentran los núcleos, que son inaccesibles para nosotros, por tanto sólo tenemos conocimiento de las sensaciones, que son los efectos de los núcleos sobre el yo o ego.

Para Mach, las hipótesis de los átomos y moléculas, son ayudas intelectuales, de las cuales no se puede esperar más, de lo que nosotros le ponemos a ellas, además de lo que la experiencia misma pueda conseguir, como cita (Artigas, 1991), en *El significado filosófico de la historia de la ciencia para Mach y Duheim*.

Por otra parte, Duheim reconocido pionero historiador de la ciencia. Cuyo trabajo alrededor de la historia de la ciencia, fue el de deshacer el cliché predominante de oscurantismo científico en la edad media (Artigas, 1991). Esto le llevó a concluir que en la edad media, en varios centros académicos, por ejemplo en la Universidad de Paris, se desarrollaron los conceptos que, posteriormente fueron sistematizados en la ciencia moderna del siglo XVII⁵. Su epistemología se considera instrumentalista, diferenciada de la que Mach consideraba al igual que la ciencia, más que una explicación, es una descripción.

⁵ (Lombardi, 1997), discute la pertinencia de la historia en la enseñanza de la ciencia, entre otras cosas, sobre una discusión de la continuidad y la discontinuidad en el pensamiento físico desde Aristóteles a Galileo, se refiere a este último, sobre su imagen de científico racional y experimentador. para lo cual se hace, también relevante el uso de la historia o más precisamente, de las historias y las conclusiones que se pueden sacar de este recurso.

Duheim afirmó que ser positivista, implica admitir que no hay otro método lógico sino el de las ciencias, y que aquello que no pueda ser contrastado por este método es pues, incognoscible, en el cual hay lugar para la metafísica (no en su función explicativa), en cierta medida, debido a sus convicciones espirituales. Es por esto, que las discusiones llevadas a cabo, en los determinados contextos de producción, sobre la teoría atómica, incluyen aspectos filosóficos, metodológicos, etc., que no dejan de ser vigentes, si la enseñanza de las ciencias, contempla en su práctica docente, reflexiones a los conceptos (Ayala, 2017), lo cual conduce a la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo un análisis de corte histórico sobre la atomística de L. Boltzmann, brinda a los maestros de ciencias, elementos para comprender el papel de la imagen mecanicista del mundo físico, en relación con la teoría mecánica del calor, para la enseñanza de la termodinámica?

Objetivo general

Realizar un estudio de corte histórico en torno a la atomística de Ludwig Boltzmann, que permita dar cuenta de la importancia de la imagen mecanicista en la teoría mecánica del calor, con el fin de aportar elementos de comprensión para la enseñanza de la termodinámica, desde una perspectiva cinético molecular.

Objetivos específicos

- Realizar un análisis de algunos textos originales que contribuyan a la investigación sobre el concepto de átomo de L. Boltzmann y su importancia para la física teórica del siglo XX, con el fin de ilustrar una discusión sobre el papel de las hipótesis atómicas, los métodos de estudio de los fenómenos y la validez de las teorías que se hacen a partir de los procesos de investigación, discusión reconocida en el siglo XIX.
- Ejemplificar mediante algunos aspectos de los trabajos teóricos de L. Boltzmann, las características de dicha organización de la teoría mecánica del calor, de tal manera que se

permita dar cuenta de la validez y alcances de tal interpretación atómica de la materia, que conduce a la entropía como ley de probabilidad en su interpretación moderna.

- Dar cuenta del papel de la historia y la importancia de estos estudios, que contribuyan a nuevas formas de plantear la enseñanza de los conceptos y las teorías, en los niveles introductorios de cursos de física.

Metodología

La historia de las ciencias, tiene dos formas predominantes de ser entendida, como respuesta de ciertas preguntas potenciadoras, que para efectos metodológicos es de interés, la siguiente en particular: ¿Qué imagen de ciencia es posible construir a partir del uso de la historia de las ciencias en la enseñanza y en la formación de maestros? (Castillo, 2008)

La primera imagen, se limita únicamente a hacer una organización cronológica de los productos de la ciencia y de los científicos, limitándose únicamente a contar los hechos a modo de información; separando los productos científicos de los contextos a los cuales pertenecen. La otra forma de pensar la historia puede ser entendida como una construcción crítica de los hechos, que implica tener en cuenta los productos de la ciencia, las problemáticas que dieron origen a tales productos y los contextos mismos de producción de conocimiento científico; así, en la enseñanza a la historia se le atribuye un papel activo en tanto se entiende como parte estructural de los procesos de organización de problemáticas y fenomenologías a abordar en el aula, ya que no se puede separar el contexto y las problemáticas de los productos de la ciencia; la imagen de ciencia, que está a la base de esta perspectiva de la historia, sería una imagen dinámica de los procesos de producción y difusión del conocimiento científico, esto es lo que llamamos actividad científica.

Así, los estudios de corte histórico, como el que se propone son de vital importancia para la enseñanza de la ciencia, en tanto que hacen reflexiones en torno a las problemáticas, fenómenos,

controversias y argumentos, entre otros aspectos, que propiciaron los productos científicos, particularmente, en este trabajo se hace una reflexión, a la luz de la historia de las ciencias, sobre la concepción de átomo, las consideraciones, motivos epistemológicos, culturales y de carácter ontológico, que se vieron reflejados en la teoría cinético molecular de L. Boltzmann en la segunda mitad del siglo XIX, como descripción de los fenómenos termodinámicos y de transporte, dando lugar a las discusiones sobre los métodos de la física teórica a finales del siglo XIX y principios del XX.

Desde esta perspectiva de La historia de las ciencias, se debe dejar de pensar en las teorías científicas como productos separados e independientes de la actividad científica y asumir una posición crítica frente a la idea de ciencia como herramienta para la productividad, promovida por organismos internacionales como el Banco Mundial, el FMI, los cuales naturalizan que en los espacios educativos se hable desde un ámbito productivo mercantil, es decir, reducir el proceso educativo y su relación con la producción de conocimiento, a competencias, y referirse al aprendizaje de los contenidos en términos de calidad. Para así, al igual que con la historia, ver que se trata pues, de una actividad histórico-científica, la cual no es estática, ni universal, sino que es respuesta y hace parte de diferentes preocupaciones, motivaciones de orden filosófico y epistemológico, intrínsecas a quienes hacen parte de la dinámica de producción de conocimiento (Castillo, 2008). Entendiendo esto como cultura, relacionada así, al contexto.

Lo anterior se concatena metodológicamente con la postura de (Chamorro & Marulanda, 2003, p. 10), según la cual para los investigadores (en la que se incluyen científicos y maestros de ciencias), más útil que saber manipular unas técnicas, es conocer y reflexionar sobre los contextos en los que se visualizan y se escogen los problemas, las hipótesis y las técnicas mismas para su aplicación razonable y su contrastación en el ámbito de las investigaciones científicas.

Por lo cual, tras admitir que se pueden asumir diversas posturas respecto de la historia y su relación con la ciencia, además de la tradición positivista lógica (cuyas raíces se pueden rastrear en el Círculo de Viena, y algunos de sus difusores son autores como: Carnap, Popper, entre otros). Se pretende hacer uso de la historia, a la luz de uno de los fundamentos filosóficos de Kuhn, como expone (Mayoral de Lucas, 2007) sobre que: ni cada problema de investigación, ni las técnicas están atadas a un ámbito específico de fenómenos, es decir no son rígidas en cuanto a la definición de cada uno de sus aspectos. Por lo que, una de las bases del método histórico de Kuhn, es la reconstrucción de la perspectiva subjetiva del investigador dentro de su contexto histórico. En relación con esto, se tiene la influencia de la perspectiva histórica de la ciencia de Conant⁶, quien fue maestro de Kuhn en Princeton y con quien comparte el ideal de enseñar a ver con los *ojos* de un científico.

En este sentido, es importante para el maestro de ciencias que hace uso de la historia, conocer los lugares de una teoría científica en un determinado contexto científico. El centrarse en los aspectos vagos, y diferenciarlos de los errores de dicha teoría en un momento histórico determinado. Ello implica, no limitarse a los hechos bien conocidos (*lo que funciona de la teoría*). Ya que los problemas de conocimiento, tienen su origen, más exactamente en esos aspectos vagos (Mayoral de Lucas, 2007).

Los estudios históricos críticos, buscan establecer diálogos con los autores a través de los escritos originales, los cuales dan cuenta de la estructura (*formal y práctica*) de dichos fenómenos abordados; cuyas intencionalidades en la enseñanza, son entre otras, la de definir núcleos

⁶ La postura de Conant, tenía motivaciones en la enseñanza de la ciudadanía, para lo cual hace hincapié en desarrollar la visión de un científico. Comprender la ciencia, para él, estaba centrado en entender cómo se enfrenta un científico a los problemas que la ciencia le plantea, más que conocer la imagen actual de ciencia, ni construirla a través de su posible estructura formal, para lo cual el método histórico es importante, para esta tarea.

problemáticos, de caracterizar formas de aproximación y formas y niveles de explicación, para posteriormente, diseñar rutas de tratamiento en el aula (Ayala, 2006).

A este respecto, la metodología de investigación de corte histórico crítico provee elementos que permiten entender la situación científica que tuvo lugar cuando Boltzmann realiza sus discusiones a la física teórica, por medio de la organización mecánica de su teoría cinético molecular de los gases, haciendo uso de hipótesis atómicas.

El proceso de investigación tiene como primera etapa, dar una imagen de la historia y la filosofía de la ciencia y su relación con la enseñanza, para dar un horizonte al trabajo. A partir de una revisión de algunos libros de texto, que abordan la teoría cinético molecular de los gases, en los cuales usualmente, no se presentan los argumentos teóricos necesarios para dar cuenta del uso de hipótesis atómicas, teniendo en cuenta que no es algo dado. Por lo que, se vio la necesidad de revisar libros originales de L. Boltzmann (*Lectures on gas theory, Escritos de mecánica y termodinámica*) como de J. C Maxwell (*Theory of Heat*), siendo éstas, unas de las fuentes primarias, específicamente del estudio de corte histórico entorno a la teoría cinético molecular. Para dar cuenta del contexto científico, se acudió a fuentes secundarias, las cuales dieran perspectivas sobre la situación de la física en la que Boltzmann realizó sus trabajos teóricos, entorno al atomismo y las consecuencias de éste. Así como textos de orden filosófico, epistemológico y metodológicos de la ciencia, cuyas fronteras son más difusas de lo que cabe esperar. Todo lo anterior con la intención de conocer la situación científica de finales del siglo XIX, con el fin de reconocer las problemáticas y controversias científicas, y los argumentos teóricos que dieran cuenta del uso de tales hipótesis atómicas, como las presentadas por Boltzmann y su relevancia en la física de principios de siglo XX.

Por lo que, en pro de establecer los elementos que contribuyen en la consolidación de la mecánica estadística, bajo la imagen de un nuevo atomismo, la cual se enmarca en la teoría cinética del calor. Se procede a rastrear los lugares teóricos, para dar cuenta del estado de la física teórica entorno a la organización mecanicista de los fenómenos termodinámicos. Esto es, hacer revisión de las cartas, ensayos y conferencias de L. Boltzmann en sus reflexiones de mecánica y termodinámica (Boltzmann, trad. en 1986), cuya meta es dar cuenta del contexto de producción, de dicha organización. Para articular la imagen de ciencia actual con la imagen de ciencia en la cual el conocimiento tiene como fuente la analogía mecánica y la experiencia sensible, en igual medida; esto es, construir una imagen de ciencia como sistema cultural (Elkana, 1983).

En este sentido, una vez establecida la controversia y reconociendo como las discusiones no fueron menores, respecto de las hipótesis atómicas, y sus diferentes dimensiones, se procede a ejemplificar, como este proceder mecánico, corresponde a unas formas de organizar el conocimiento científico, a modo de reconstrucción, por lo que si bien, la teoría cinética de los gases, está en discordancia con una serie de hechos, corresponde de manera adecuada a otra serie de fenómenos y problemas científicos. Que ilustran, los problemas científicos que se tienen en una comunidad, y corresponden a las diferentes imágenes de conocimiento, en la que se incluyen, imágenes de la naturaleza, de dicha comunidad.

Por último, es necesario para esta tarea, significar el papel que la historia de la ciencia tiene para el trabajo, la actividad docente, y en general, para la actividad científica misma. Para lo cual, se consideran la recontextualización de los saberes, los análisis conceptuales, el reconocimiento de los procesos de la actividad científica, entre otros; que son referentes para el presente trabajo, para tener una imagen de historia y su relación en la actividad científica y por tanto en su enseñanza.

Antecedentes

Los documentos antecedentes recogidos que aportan de manera provechosa al proyecto se organizan como sigue:

Trabajo Antecedente	Forma en la que aporta al presente trabajo
<p>Brush, S. G. (2004). History of the Kinetic Theory of Gases. <i>Istituto Della Enciclopedia Italiana</i>, 1–31.</p> <p>Hernandez, J. S. (2019). <i>Una aproximación epistemológica al concepto de entropía: un análisis a la transición de Clausius a Boltzmann</i>. Universidad Pedagógica Nacional.</p> <p>Gulín, J. (2007). Ludwig Boltzmann. Pionero de la ciencia del siglo XX. <i>Revista CENIC</i>, 38(1). https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181621661011</p> <p>Moreno, A. (2006). ATOMISMO versus ENERGETISMO : Controversia científica a finales del siglo xix. <i>Historia y Epistemología de La Ciencias</i>, 24(3), 411–428.</p>	<p>Estos aportes dan perspectivas del contexto de la teórica cinética en el momento en el que Boltzmann realiza sus trabajos y organizaciones mecánica en la física del siglo XIX y del concepto de entropía como una ley de probabilidad.</p>

<p>Sánchez, J. S. (2016). <i>Una reflexión sobre el principio de equivalencia de las transformaciones para la enseñanza de la termodinámica.</i> Universidad Pedagógica Nacional.</p>	<p>Este trabajo orienta a la metodología de corte histórico, utilizada en el presente trabajo. Y da perspectivas de las diferentes imágenes de la historia de la ciencia que construyen los maestros en formación de ciencias.</p>
<p>Zarate, C. A. (2013). <i>Lo Continuo y lo Discreto, una discusión desde el movimiento browniano.</i> [Universidad Pedagógica Nacional].</p>	<p>Se reconoce el atomismo de Boltzmann como parte fundamental para la argumentación teórica en la explicación del movimiento browniano, de la cual se hace un valioso trabajo en el aula.</p>

CAPITULO II: LA SITUACIÓN DE LA FÍSICA TEÓRICA EN LA SEGUNDA MITAD DEL SIGLO XIX

ENTORNO AL ATOMISMO

La termodinámica como ciencia fenoménica constituida entorno a los hechos, tomó un proceder mecánico, cuya intención era eliminar las contradicciones entre los procesos reversibles de la mecánica y los procesos termodinámicos que se reconocían como irreversibles, según Clausius para la segunda ley de la termodinámica⁷. Existe una distinción, a partir de los años sesenta del siglo XIX, entre las organizaciones de los fenómenos termodinámicos, las cuales son; la termodinámica general y la especial⁸, que no constituían en sí, una dicotomía teórica.

Boltzmann se permite discutir sobre las formas en las que se organizan las teorías, sobre el proceder científico, la cuestión en torno a la degradación de la energía, consecuencia de la transformación y distribución de la energía en su estado más probable, y la relevancia de los análisis mecánicos en el siglo XIX, presentes en los tratamientos realizados por Kirchoff, Maxwell y Hertz, entre otros, el trabajo de Boltzmann dio como resultado, novedades en el ámbito científico, ya que a través de hipótesis atómicas mecanicistas da solución teórica a asuntos cuya explicación se limitaba únicamente a sus aspectos puramente fenomenológicos, como la radiación térmica, el movimiento browniano (Ordoñez, 1986).

⁷ Los fenómenos asociados a cada distinción son relacionados con los hechos que tienen lugar en la naturaleza, en la cual se establece una direccionalidad en la evolución temporal de los fenómenos. Se tiene que, la fricción, la conducción de calor, la emisión de la luz y la radiación del calor, son ejemplos de procesos irreversibles; mientras que, el movimiento de los planetas, la caída libre en el *vacío*, el movimiento no *amortiguado* de un péndulo, las vibraciones no *amortiguadas*, son ejemplos claros de procesos reversibles (Planck, 1909).

⁸Autores como (Gulín, 2007; Moreno, 2006) reconocen esta distinción, que se centra en la termodinámica y su proceder. Por una parte, la tradición continental europea, en especial de los Germanos y la que se hace en Inglaterra. La primera, se hace a partir de caracterizar al sistema en términos de lo perceptible, como actitud esencial en la ciencia y el contacto con la realidad, también llamada física macroscópica. La segunda, procedente de la tradición newtoniana, daba lugar a la admisibilidad de hipótesis, para la explicación de los fenómenos térmicos, llamada también física microscópica.

El interés hacia la historia de la ciencia, y los estudios de corte histórico, sirven: por una parte, para entender los marcos donde los llamados “descubrimientos” tienen lugar y por otra, dar cuenta de una trama científica que emerge de una determinada sociedad. Por esto, la concepción de las teorías científicas como imagen de la realidad es fundamental para este reconocimiento de ciencia como actividad. En este sentido el atomismo de Boltzmann, corresponde como es de esperar, a una visión mecánica del mundo físico (materia y movimiento), tal que basta con diferentes tipos de átomos, según el campo fenomenológico a considerar, electricidad, calor, gravedad, estos pueden ser, átomos de éter o de materia, ya que el éter también se considera como uno de los ejes direccionales de la organización mecánica del mundo (*constitución de la materia*)⁹. Si bien hay un atomismo primitivo que se promueve como rezago de las organizaciones mecánicas desarrolladas en el siglo XVIII (Romero & Ayala, 1996, p. 12), que para el siglo XIX en Europa tiene difusores como (R Clausius, Maxwell), por lo que existen, imágenes variadas de átomos, como la de Stefan (maestro de Boltzmann) y su realismo ingenuo o las diferentes organizaciones por parte de los ingleses, por ejemplo: Faraday, Lord Kelvin, etc. Estas perspectivas se encuentran en disputa con la corriente energetista defendida por Ostwald, Duheim, Helm, Rankine, sobre la teorización de los fenómenos y cómo ese proceso involucra necesariamente una limitación de conocimiento (*sensación*), que conlleva a la imagen de los sentidos como mediadores de lo que acontece en el mundo, y de cómo se organiza una determinada comunidad científica, es decir, implica una imagen de conocimiento, de sus fuentes y métodos (Elkana, 1983).

En vista de lo anterior, las organizaciones mecánicas de los fenómenos térmicos, entendiéndose estos, como aquellos hechos *naturales* cuya base organizacional, está en la

⁹ Esta categorización corresponde al atomismo primitivo, usado en los diferentes ámbitos de la física, el cual fue considerado por Boltzmann en sus explicaciones mecánicas.

experiencia cotidiana y las relaciones que se establecen (*causales*) con los cambios que experimentan las sustancias o los cuerpos bajo procesos que involucran a lo térmico (dilatación volumétrica de las sustancias al calentarse, transpiración del cuerpo humano, etc.) (Castillo & Pedreros, 2013, p. 7); se encuentran en consonancia con el hecho de entender el calor como movimiento molecular y no como sustancia o algo más allá de lo material (*metafísica*), esta controversia científica es abordada por (Moreno, 2006), donde se da cuenta de cómo enseñar ciencias a través de los casos de estudio y las controversias científicas revela el papel humano, en ocasiones invisibilizado, de la actividad científica. Tratar estas controversias en sus tiempos correspondientes, se configura como fuente de conocimiento sobre la elaboración de ciencia y su papel en cada momento, sobre las convicciones, incertidumbres y temores que los científicos han de afrontar (Moreno, 2006, p. 415).

En primera medida, es importante reconocer las dos concepciones y sus diferencias, ya que los interrogantes que suscita y la discusión que se desarrolla, tiene implicaciones sobre el propio ser de la física, ya que en el contexto en que tiene lugar las dos visiones de los fenómenos térmicos (mecánica-termodinámica), cabe preguntarse: **¿Cuál es el objetivo real de la física? ¿cuál es la relevancia y los límites de los modelos físicos?** (Moreno, 2006, p. 418)

Ya que para comienzos del siglo XX, se ubica el tránsito entre lo que se suele reconocer como física clásica (mecánica, termodinámica y electromagnetismo) y la física moderna (mecánica cuántica y relatividad general), con los trabajos de Planck usando como solución la cuantización de la energía, en el sistema radiación electromagnética de cuerpo negro, como réplica hacia los energetistas, quienes refutaban la organización atómica de Boltzmann, sobre el segundo principio de la termodinámica, como una ley de probabilidad.

Así, la función del átomo es inventiva y metodológica para la construcción de teorías (Gulín, 2007), Ostwald, abanderado de los energetistas, pretendía sumir a la mecánica en la energética, ya que lo fundamental desde este punto de vista, es el principio de conservación de la energía. Además, que la mecánica hace uso, de hipótesis metafísicas, inverificables (bajo la experiencia sensible), refiriéndose a los átomos. Luego, para Ostwald, su postura radical se resume en: “*La energía es el motor que mueve el mundo de los fenómenos*” (Boltzmann, trad. en 1986). La naturaleza, bajo esta lupa fenomenológica, parece estar escrita en diferentes contextos bajo las mismas ecuaciones diferenciales, haciéndose referencia a la relación de las matemáticas y la física como cuando se habla de lenguaje matemático. Así, la fe puesta en cierta medida sobre las ecuaciones y sus descripciones de los hechos resulta contraproducente, por cuanto éstas son construidas en torno a los fenómenos y no al contrario como se mostrará más adelante. Sobre la discusión de la naturaleza de esta relación, si es de constitución o constitutiva y qué implicaciones tiene ello, se refiere (Lévy-Leblond, 1988) en *Física y matemáticas*.

Como se mostrará en el capítulo 3, el trabajo de Maxwell entorno a la teoría cinético molecular, fue guía para las analogías consideradas por Boltzmann y su admisibilidad en las teorías físicas. Así, el conocimiento mismo, desde este enfoque, no es otra cosa que el hallazgo de las analogías adecuadas, que permitan, conocer el mundo físico, por medio de comparaciones (esto a priori, parece lógico si uno descubre en tanto conoce) (Elkana, 1983). Boltzmann resalta su preocupación por el rechazo tan apresurado a estas organizaciones atómicas, por parte de sus colegas en Centroeuropa (Austria y Alemania principalmente), por ejemplo, Ostwald, Mach, entre otros.

De lo particular a lo general, la forma de abordar las cuestiones trascendentales la ciencia

Entre las consideraciones de Boltzmann sobre la teorización de la física, se encuentra la importancia de los avances científicos, su relación en la sociedad contemporánea (austriaca) de finales del siglo XIX, ya que reconoce que, los filósofos e historiadores tenían un *contacto* social en mayor grado, en comparación con aquel cuya actividad principal fuese ser científico de la naturaleza, es decir, químicos, físicos, fisiólogos, etc.

El problema con la metafísica (aquello que va más allá de la experiencia) y su papel en la teoría física, radica en que parece ser un regreso a las costumbres antiguas, qué para ese entonces, eran vistas con malos ojos por quienes defendían el fenomenismo como forma válida de conocer y organizar el mundo, de acuerdo a las distinciones entre filósofos naturales y científicos, propuesta por Whewell en 1833 (Levinas, 2001), diferenciados por su forma de proceder para conocer la naturaleza.

Luego, en relación con los campos de conocimiento científico, para ese entonces se reconocían tendencias de adentrarse en una de las ramas de conocimiento o incluso una parte de ellas, que optar a conocerlas todas, por el hecho de que hay limitaciones humanas y las dinámicas cambian también en el tiempo. Sin olvidar que las fronteras entre los saberes son cada vez más difusas, se hace la invitación al trabajo colaborativo entre diferentes ramas, para dar luz sobre las cuestiones fundamentales, es decir, hacia un trabajo interdisciplinar de las ciencias.

Dejando en claro que es importante tratar lo general, no se puede negar como los avances de la ciencia experimental, se concretan en los instrumentos prácticos y las ventajas que proveen en la sociedad de finales del siglo XIX. Si bien, se pueden abordar problemas particulares de un cierto dominio de conocimientos o tratar cuestiones generales a los campos. Hay una actividad más fructífera que otra, ya que estudiar los hechos particulares, da pie para poder organizar y hablar

de las cuestiones generales. En este sentido, se aclara que *la filosofía*, es la reconocida por ser la rama que trata estas cuestiones generales (trascendentales) tales como ¿De dónde venimos? o ¿A dónde iremos? (Boltzmann, trad. en 1986).

Entorno a las ramas de las ciencias, se pueden clasificar para ese entonces, en dos grupos: las descriptivas y las explicativas. En este segundo grupo, se encuentran: la física, la química, la astronomía, la fisiología, las matemáticas, la geometría y con particular interés, la mecánica. Esta última se caracteriza, de acuerdo a Kirchhoff en (Boltzmann, trad. en 1986, p. 60) por describir los fenómenos del mundo, del modo más fácil posible, por lo que las explicaciones que se obtienen de la mecánica son meras descripciones de los hechos. Por esto, si los movimientos son consecuencia de las fuerzas, y éstas provienen de las cosas en sí mismas, se deduce que en la explicación hay que hacer uso de elementos nuevos, fuera de los objetos a explicar; en el proceder científico, las cosas sencillas se articulan, para hablar de las leyes complicadas y generales de forma más simple, esto es, el método analítico de la ciencia lógico-deductiva, de modo sintético.

De la conservación de la energía y las sensaciones

La existencia de las cosas en cuanto al ser, es inferida gracias al contacto con nuestros sentidos y es gracias a los instrumentos de observación (por ejemplo, el telescopio) que uno infiere pues la existencia de cuerpos celestes fuera de la tierra, por ejemplo, su dimensión y localización. Como pilar de la organización mecánica de los fenómenos de la termodinámica, se encuentra la conservación de la energía, desarrollada por R. Mayer. Ya que la energía que se asocia a un sistema, siendo una forma de ésta, movimiento visible de los cuerpos, tiene otras formas en las cuales transformarse y por tanto causas, como son el calor y el trabajo puro. El trabajo realizado sobre el sistema depende de la configuración y de las condiciones iniciales, donde si se realiza trabajo, es a causa de una energía potencial presente en el sistema. Respecto de la convertibilidad

de trabajo y energía cinética en calor, es decir, movimiento molecular, esta puede darse sin límite. Sin embargo, el caso opuesto, en el cual el calor es transformado en movimiento visible, o en trabajo puro no es posible en su totalidad.

Es decir, en términos analíticos, con $K =$ energía cinética del sistema, $U =$ energía potencial y $Q =$ el calor asociado en el sistema. Los subíndices indican final (f) e inicial (o) en momentos diferentes:

$$\Delta K + \Delta U + \Delta Q = 0 \quad (1)$$

De acuerdo con la ecuación (1) si $\Delta Q > 0$; se tiene que $\Delta K + \Delta U < 0$, es decir:

$$K_f + U_f < K_o + U_o \quad (2)$$

En estos términos, hay una categorización de las formas de energía, esto es, hay una degradación o unas formas más probables respecto a otras.

En los movimientos térmicos que se dan en una variedad tridimensional de una población de partículas (en un lugar del espacio), no se puede asegurar que todas las partículas tengan la misma velocidad, bajo este modelo, cada molécula sigue su *camino* independiente. Uno puede pensar, *a la ligera* que una barra sólida debería calentarse “espontáneamente” en uno de sus extremos o qué, si un gran número de moléculas se mueven en una dirección en un mismo instante, la densidad local, debería aumentar. Por supuesto que, la experiencia da cuenta que estos hechos no se dan, es porque la caracterización se hace de acuerdo, a las leyes de los grandes números, es decir, se corresponde una organización estadística de la entropía, además de la configuración que tienen los sólidos y los gases, en términos del arreglo de sus constituyentes.

Así, a cada distribución de energía le corresponde una probabilidad. Esto es, la entropía propuesta por Clausius hacia el año 1850. A fin de tener un concepto claro sobre la entropía, como medida de la transformación, piénsese, por ejemplo que: una máquina utiliza una potencia motriz,

para vencer una resistencia, el caso en el que la potencia motriz es igual en magnitud a la resistencia, hay un cierto equilibrio, hace falta un aumento en la potencia motriz para romper la resistencia, (Boltzmann, trad. en 1986). Análogamente sucede en la teoría mecánica del calor, ya que las transformaciones de la energía que tienen lugar, se consideran reversibles una con otra. Es decir, formas de energía equiprobables, no hay pues, un aumento en la entropía. Por otra parte, si una transformación en el sistema considera una forma que es más probable que otra, la transformación se da, tal que la energía se degrada en la forma más probable, por tanto, el equilibrio es roto y se tiene un aumento en la entropía retomando la equivalencia de las transformaciones de Clausius.

De acuerdo con esta organización del mundo físico, se reconocen unas ventajas en diversos dominios del conocimiento, esto es, el atomismo metodológico descrito por Boltzmann en su lectura sobre el estado de la física teórica para la segunda mitad del siglo XIX, ya que la atomística va a soportar a la física teórica desde el momento en que se considera pertinente el uso de estas hipótesis.

De los argumentos que los opositores de la existencia de los átomos utilizaron, se encuentra que no hay relación con las sensaciones, siendo éstas las que soportan a los modelos, en términos de los hechos comprobables. Es decir, está a la base una organización fenomenológica del mundo, e implica asignarle a la materia, una realidad mediada por los sentidos. Pero ¿son las sensaciones algo simple? Es decir, no se tiene una definición de las sensaciones, sólo se tiene, por ejemplo, que la sensación de rojo es diferente a la sensación de azul, es decir, “podemos sentir el rojo, pero no podemos sentir lo que es una sensación” (Boltzmann, trad. en 1986, p. 82).

A fin de discutir, lo que se tiene por sensación, Boltzmann pretende, con ejemplos como la revolución de Copérnico respecto del heliocentrismo¹⁰, deshacer el carácter de dogma de esta corriente de pensamiento, ya que conocer por medio de la experiencia parece ser, un camino un tanto limitante.

De las posturas contrarias a las de Boltzmann, se puede considerar la de Ernst Mach uno de propulsores de la corriente fenomenológica, al igual que Duheim (Malagón et al., 2013); para su tiempo se reconocía bien la controversia respecto del uso de hipótesis que no tuvieran su relación causal directa con los hechos, junto a Ostwald quien se reconocía como energetista.

Por otra parte, desde esta postura materialista y evolutiva, teniendo en cuenta que las ideas de Darwin sumaban simpatizantes, las cuales tuvieron difusión y recepción en los científicos de la época, en buena parte debido a su éxito para la explicación del mundo natural y su alterabilidad en el tiempo (Levinas, 2001, p. 313), entre los cuales se encuentra Boltzmann (Ordoñez, 1986) y su explicación del desarrollo y evolución de las leyes del pensamiento (Gulín, 2007); teniendo en cuenta la relación, que él establece, por una parte, las leyes generales que no se consideran inmutables y bajo analogías de comportamiento humano y el comportamiento animal (*en relación con el instinto*), se tenía por otra parte a la evolución. Se añade que los estudios acerca de la fisiología, como rama de la ciencia natural; había pasado por avances de magnitud considerable tal que para Boltzmann, los átomos de pensamiento parecen estar asociados a la idea de neurona, triunfo producto de las neurociencias, en el cual se enmarca en la fisiología y las posturas fenomenológicas de la época.

¹⁰ De la cual, autores como (Russell, 1970) hacen un estudio de la teoría copernicana, la cual presenta el tránsito de las ideas sobre la tierra como centro del universo y en reposo, a una tierra que rota en su eje una vez al día y gira alrededor del sol, completando su movimiento (traslación) una vez al año.

Estos estudios no tienen menor relevancia, puesto que, así como los algebraistas nombran las magnitudes de acuerdo con criterios, como las primeras letras de las palabras. Al desarrollo de estos signos memorísticos, se le llama conciencia. Por tanto, si lo que se quiere es eludir a la metafísica, las sensaciones, que son lo más simple, dan pie para el establecimiento de hipótesis. Luego, las hipótesis en este sentido buscan responder a los fenómenos, pensados estos como preguntas, por quien pretende conocer (Boltzmann, trad. en 1986).

La tarea del investigador teórico, es según las convicciones del poeta Goethe: *“Así cada cual sin parar, ocupación que nunca flaquea, que se produce lentamente pero que nunca destruye, que enriquece grano a grano, el edificio de las eternidades, pero que, borra la gran deuda del tiempo, minutos, días, años”* (Boltzmann, 1886/1986, p. 83).

En este sentido, el pensamiento de toda época es un producto histórico, está revestido, como las siluetas que reconocía Hertz, de distintas formas y asume contenidos muy distintos, en función de los lugares y tiempos donde se desarrolla. Es decir, la construcción de la ciencia tiene un carácter dialectico. Implica que no hay pues, verdad eterna, a la luz de la lógica formal, objeto de discusión desde Aristóteles hasta Hegel. Por más repulsiva que resulte, no es posible, sin ese pensamiento teórico, relacionar dos hechos naturales o adentrarse en la relación existente entre ellos (Engels, trad. en 1961).

En este sentido, la teoría es una construcción de una imagen interna del mundo. Esta construcción debe ser, por tanto, lo más parecida al mundo exterior, contrastada con la experiencia, trabajos como los de Faraday, R. Mayer y Coulomb dan cuenta del poder la teoría, y como estos han sido determinantes en el progreso científico. Es decir, la construcción del pensamiento teórico es tan real, como los hechos mismos.

Es claro, como el atomismo es una imagen susceptible de ser mejorada o desechada, los modelos tienen significado en términos de los fenómenos a explicar. Para el caso particular, la caracterización de los gases y como aquellas propiedades medibles directamente, son construidas a partir de lo no perceptible.

Por su parte Ostwald en 1869, hace diferentes réplicas de esta concepción teórica, como señala (Boltzmann, trad. en 1986), ya que para la corriente energetista, es preciso teorizar haciendo uso de la menor cantidad de hipótesis, lo que es entendido como el principio de economía del pensamiento.

Es decir, la hipótesis de átomos como puntos agregados de materia, si bien no era vigente para ese entonces, aun desconociendo esto, se sabe muy bien, que deben ser tratados conforme a las leyes de la mecánica, aun cuando esta organización esté en contradicción con los hechos que son bien conocidos como la irreversibilidad de los fenómenos térmicos y en general, a todos.

La hipótesis de que los elementos están compuestos de partículas, parte del hecho observable de acuerdo con los procesos a los que estos son sometidos, por ejemplo, cuando se hace la composición de óxido de hierro se le asocian propiedades diferentes a las que tiene el hierro y el oxígeno por separado, por lo que, si bien la suposición es considerable, la cual las moléculas son algo cualitativamente diferente a los cuerpos, la división tiene un límite. En este sentido, las demás hipótesis deben estar concatenadas a esta o deben ser modificadas. La preocupación sobre lo perceptible, sin ir más allá de la experiencia, tiene como pilar la memoria y por tanto, es posible caer en un solipsismo (Lenin, trad. en 1974).

Es necesario admitir que se sacan conclusiones sobre lo no perceptible, ya que relacionar hechos es en sí, una teorización, es decir, la organización de los fenómenos es susceptible de ser corregida, evolucionar o ser desechada en el caso que ésta, se encuentre en contradicción con las

percepciones directas en relación con la experiencia sensible y los hechos (Boltzmann, trad. en 1986).

La teoría mecánica del calor y los procesos

Los procesos que ocurren en la naturaleza son organizados en términos de las transformaciones del ser; de acuerdo con la ley del trueque de la cualidad en cantidad y viceversa, para cada caso singular, los cambios cualitativos sólo tienen lugar mediante la adición o sustracción cuantitativas de materia o energía (Engels, 1961)¹¹ desde el punto de vista materialista.

Por esto, cada una de las diferentes ramas del conocimiento científico tienen unas determinadas formas de caracterizar a los cuerpos, que para la teorización, se precisa en asociar las energías que están involucradas, lo que se llama definir el sistema en un lugar del espacio y en un tiempo determinado. En el quehacer físico de la segunda mitad del siglo XIX, se tenía un buen avance a nivel práctico, aquellos que se dieron a la tarea de explicar los fenómenos físicos, reconocieron la irreversibilidad de tales fenómenos; consecuencia de utilizar conceptos tales como energía, y su conservación, calor, presión, densidad, los cuales son magnitudes propias de la termodinámica, rama que pone de presente los inconvenientes de las teorías mecánicas.

Por otra parte, la mecánica clásica tiene como principio teórico la conservación de la energía¹². Además, hay que tener en cuenta las condiciones iniciales y no sólo las ecuaciones diferenciales, como reconoce Boltzmann en su exposición de la inevitabilidad del atomismo en la física teórica.

¹¹ Contemporáneo al materialismo científico, en específico la tarea de reinterpretar a Hegel, sobre la dialéctica de la naturaleza en oposición a la metafísica y en general, al idealismo alemán.

¹² Por ejemplo, el teorema de Liouville – Gibbs toma en consideración, el espacio de fases de la mecánica analítica, enmarcada en la tradición del continuo, esta se encuentra adscrita a la teoría de campos; pone en términos de la incomprensibilidad de un fluido en este espacio, que el volumen de esta región se conserva, o lo que es lo mismo, el hamiltoniano del sistema, también.

Si es de ver problemas en las teorías, Boltzmann acusa a la energética de tener problemas, en términos de su comprensión, esta presenta dificultades en las expresiones que se usan. Si bien, las hipótesis atomísticas reconocen, a la energía y su conservación como un concepto importante. Se tiene que, la relación de cada corriente organizacional, con lo dado y sus problemas ontológicos, se exponen como sigue:

Mecánica —————> Fuerza como lo dado, los cuerpos en movimiento son consecuencia de la fuerza. Dualidad materia-fuerza.

Energética —————> Masa como lo dado, los cuerpos ocupan continuamente el espacio. Dualidad masa-energía.

Inevitabilidad del atomismo en las teorías físicas XIX

El atomismo como hipótesis en la teoría mecánica del calor. Además de presentar al calor como propiedad de los cuerpos, muestra como el átomo-molécula como la unidad mínima de la materia, es decir, discretización de la materia. Teniendo en cuenta, los esfuerzos teóricos alrededor de la termodinámica y su organización, como los trabajos de Boyle, Marriote, Lavoisier, Charles, Fourier, Avogadro, Carnot, Capleyron, por nombrar algunos; son fundamentados entre otras cosas, en términos matemáticos, como las conocidas ecuaciones diferenciales, que se apoyan en el concepto de continuo del cálculo, para dar lugar a las corrientes fenomenológicas y energetistas, las cuales rechazaban la teoría atómica como imagen del mundo físico. (Boltzmann, trad. en 1986) en esta conferencia, intenta mostrar como las reglas de la naturaleza, es decir las matemáticas, tienen riesgo de elevarse a dogma a la fenomenología, que, implica, por un lado, que se desechen los átomos y su existencia, por el hecho de no tener experiencia sensible con estos y, por otra parte, un peligro a futuro, para la física teórica y sus métodos a finales del siglo XIX y principios del siglo XX.

Sobre este hecho, existe la tarea de reconocer que las ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento de determinados sistemas, como reglas, son como el atomismo, representaciones mentales para explicar, es decir, describir para luego predecir.

Así, si se realizan imágenes en términos de un continuo, entonces el atomismo va más allá de la experiencia, desde el otro punto de vista, el discreto; la fenomenología, es la que va más allá. Es de acuerdo con Boltzmann, según cómo se hace la organización de los hechos, es decir, una no es más verdadera que otra.

Sobre la organización continua de los fenómenos de transporte de Fourier¹³, Boltzmann expone que su significado necesita de los átomos para hacer inteligible el fenómeno de la conducción de calor en un sólido ya que la imagen de continuo no es clara. Esto está a la base de que los átomos de materia son pues, ese límite. Sin esta imagen, la explicación con geometría y cálculo, es tomada como analogía y no como descripción directa de los fenómenos, experiencia. Es decir, no es deducida por medio de los hechos, demanda que se hace desde la fenomenología, a las teorías. Existe pues, una relación entre las concepciones atomísticas con la idea de límite. Donde Boltzmann precisa que: *“Nunca será posible la diferencia entre hechos y valores límite”*, donde se reconoce una restricción de la experiencia respecto de los fenómenos que pretende explicar.

¹³ Tomando la ecuación inicial, que representa como la temperatura $U(x, t)$ cambia en una barra: $\frac{\partial U}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}$. Dadas las condiciones iniciales: $U_0 = U(x, y, z, 0)$ se tiene que, en un tiempo posterior, la temperatura es $U(x, t + \Delta t)$ corresponde con la media aritmética de las partículas vecinas espacialmente, que conforman dicha barra. Si este proceso, es repetido con $\Delta t \rightarrow 0$, así como los diferenciales de masa, es decir, $\Delta m \rightarrow 0$. Luego se obtiene el límite en el que $\Delta U \approx 0$, es decir, el equilibrio térmico. Implica, que este proceso es finito, los Δm son en este sentido, diferentes de los ΔV puesto que estos últimos están referidos al espacio y los Δm tienen como unidad mínima a los átomos. Nótese que en el equilibrio térmico, la ecuación de conducción de Fourier queda $\frac{\partial U}{\partial t} = 0 \rightarrow U(x) = a + bx$; donde a y b se determinan de las condiciones de frontera con las temperaturas en los extremos de la barra.

Es así como no todas las integrales, implican una suma de continuos y el **límite** mostrado anteriormente, admite pues la suposición de un número muy grande de elementos, pero **finito**; como la imagen más simple de explicación, lo cual tiene sentido, si se tiene en cuenta, los procederes mecánicos, considerados *antiguos* para la época.

De acuerdo con la fenomenología y los problemas del atomismo metodológico de Boltzmann, radica en que, según se mostró. Debido a que las ecuaciones diferenciales, modelan distintos fenómenos, resulta conveniente atribuir ciertas características a los átomos para cada dominio particular. Donde el principal problema radica en que los átomos que explican la conducción de calor pueden ser diferentes a los que explican los fenómenos eléctricos, o los de la teoría elástica, que estudia las deformaciones reversibles de los sólidos. Por esto, la unificación de los diferentes atomismos resulta infructuoso, por el hecho del desconocimiento del dominio particular, que da lugar a cada atomismo, y sus consideraciones metodológicas. El fin de esta forma mecánica de organizar los fenómenos, es descomponer en sus constituyentes, las propiedades de los átomos, que son necesarias para explicar las diferentes ramas de conocimiento físico, de modo que sirvan simultáneamente para varios dominios particulares (Boltzmann, trad. en 1986), sin necesidad de que sean todos.

Es en este sentido, que se precisa que la teoría puede ser solamente una indicación, como fue la atomística a finales del siglo XIX, para construir una imagen del mundo físico. Es así, como los conceptos del cálculo son, sin la atomística, metafísicos (Boltzmann, trad. en 1986; Kraft, 1966).

Sobre los métodos de la física teórica y las organizaciones mecánicas

Si se tiene la imagen de ciencia como ciudad, en esta última, corresponde a una organización de las sociedades. En este sentido, lo que se organiza y construye, son los

conocimientos. Así, la visión holística de organizar el mundo se había perdido, (Boltzmann, trad. en 1986, p. 131), sobre este respecto, en (Collini, 2009), C.P Snow muestra los peligros que encierra la categorización de los saberes, tal que se entra en episodios oscuros por los cuales la actividad científica se separa de la cultura, además de establecerse polarizaciones de las diferentes ramas de conocimiento, es decir por un lado, están los intelectuales literarios y por el otro, los científicos, en cabeza de la física. Hasta el momento en que Boltzmann, propone sus hipótesis atomísticas, la física experimental y los avances industriales, habían tenido gran desarrollo, en esa construcción de ciencia como ciudad. Donde es pues, la epistemología, saber desde muy antiguo, que cargaba un lastre de metafísica, visto esto como problemático para finales del siglo XIX en los principales centros conocimiento científico de Europa, porque parece ser, que no se está estudiando algo con lo cual se tuviera experiencia sensible.

Se tiene por ejemplo, un problema de tipo pedagógico en el proceder de la física teórica, porque sobre los resultados que ésta provee, en términos de los productos científicos, son fáciles de entender cuando se explican, pero los métodos y los criterios que orientan dichas organizaciones parecen tratarse con más cuidado y detalle (Boltzmann, trad. en 1986)¹⁴, siendo vigentes estas consideraciones, esto debido a la forma con la que se suelen tratar los conceptos en la clase de ciencias. Por lo que para la época de finales del siglo XIX, se reconocían dos posturas sobre los métodos de la teoría en relación con la mecánica, éstas son: los clásicos y los liberales. Los primeros no querían desestimar a la atomística, mientras que los segundos sí, por la razón que era lastre de los procederes antiguos, a su vez que, había que darle paso a la energía, como principio

¹⁴ Es así como, se reconoce una representación histórica del desarrollo de la ciencia, el cual es discontinuo, además de no seguir el camino más corto sobre los determinados problemas de investigación con los se encuentra una comunidad científica, (Mayoral de Lucas, 2007) reparan en el papel de la historia en la formación de científicos y como es que se puede considerar una tradición kuhniiana, dentro del programa de historia y filosofía de la ciencia de Princeton, HPS por sus siglas en inglés. En la cual, muestra a cuyos propulsores de esta tradición, los mismos que resultaron ser sus principales críticos, tales como Earman, Laudan, Kitcher.

y sumir la mecánica en la energética. Los hechos dan cuenta que esto no pasó. Es más, el mismo Ostwald, líder del movimiento energetista, acepta la existencia de los átomos, para 1909. “A *costa de quitarle muchas de sus propiedades*” (S. G. Brush, 1964, p. 17). Por lo que, la física teórica del siglo XIX había avanzado mucho en las explicaciones de los fenómenos eléctricos y magnéticos, con los trabajos de Weber, Maxwell, Faraday, Hertz entre otros, reconocidos como teóricos. Si se toma como referencia la teorización de Weber, sobre la acción eléctrica esta es a distancia, y depende del movimiento relativo de los cuerpos, esta se hace en términos de los fluidos eléctricos, en contraposición de la organización de Maxwell, donde la acción eléctrica, tiene un límite de propagación y por tanto afecta en primera medida, a los cuerpos más cercanos, esto es, el campo eléctrico como lo dado.

Se sigue pues, que la fuerza como lo dado, tiene su discusión en referencia a la mecánica, desarrollada hasta entonces, por Hertz y Kirchoff respectivamente, como cita (Boltzmann, trad. en 1986) en los principios de la mecánica. En este sentido, la materia es puesta como la causa mientras que la fuerza, es pues consecuencia de la materia. Mientras Kirchoff pasa por alto esta discusión, tratando a la mecánica como la explicación del movimiento, bajo el estudio de los puntos materiales, significando a la fuerza como recurso *algebraico* para la descripción del movimiento. Por su parte Hertz, llama la atención sobre un tema filosófico, en torno a las teorías como imágenes mentales de los fenómenos si bien, no son algo idéntico y parejo a la naturaleza; se trata pues, de trabajar no con imágenes correctas, sino con las más *simples* sobre los fenómenos. En este sentido, como resuelve Boltzmann; el fenomenismo, debe advertir sobre ir mucho más allá de la experiencia, en lugar de *extralimitarla* (Boltzmann, trad. en 1986).

En estos términos, las teorías son construcciones del pensamiento que dan cuenta, sobre las formas en las que se organiza el mundo natural y la construcción de fenomenologías, la

experiencia en este sentido, en lugar de los hechos, es fundamental para la concreción de estos productos científicos, luego las discusiones sobre los problemas de conocimiento, son las que dan luz sobre el porqué ideas fundamentales pertenecientes a la actividad científica en el curso de la historia, han sido aceptadas o dejadas en su difusión y divulgación, por ejemplo, la naturaleza discreta de la materia, responde a unos fenómenos y se enmarca dentro de unos límites teóricos, para lo cual, una ejemplificación de la teoría cinética de los gases, en específico, la distribución de velocidades moleculares y el concepto de entropía como ley de probabilidad, pone de presente, los cambios por los que pasa un determinado concepto, como la irreversibilidad de los procesos, siendo este tan importante para la ciencia, como en su enseñanza (Collini, 2009; Hernandez, 2019; Stewart, 2003).

CAPITULO III: LA TEORÍA CINÉTICO MOLECULAR Y LA SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA

Al hacer revisión del contexto en el que Ludwig Boltzmann expone sus cuestiones sobre los fenómenos termodinámicos, se tuvo en cuenta el libro *Lectures on gas theory* (Boltzmann, trad. en 1964) el cual es la traducción al inglés y recopilación de las dos partes escritas por Boltzmann en 1896 y 1898 con el nombre de *Vorlesungen über Gastheorie*, para lo cual se tratará por su traducción libre al español como *Teoría de gases*.

Los trabajos sobre la teoría mecánica del calor, que hasta la fecha habían sido desarrollados por diferentes autores y en diferentes épocas, están en coherencia filosófica y epistemológica con lo que es conocido como la teoría cinético molecular; es esta teoría una de las partes fundamentales de la concreción de la física moderna por diferentes razones, como son: brindar condiciones conceptuales para los contextos de estudio del efecto fotoeléctrico y la radiación de cuerpo negro y experiencias de principio del siglo XX.

Según (S. G. Brush, 1964), a partir de una organización mecánica, “*Boltzmann redujo los fenómenos de calor, luz y magnetismo a ser pensados como materia y movimiento, por medio de modelos atómicos que se soportaban en la mecánica clásica*”. Esto es de especial interés, ya que, al reducir como acción para la comprensión, se prescinde de algunos elementos del sistema a estudiar y la explicación sigue siendo válida dentro de un campo teórico. En la explicación de los fenómenos termodinámicos, la última palabra no estaba dicha, ya que faltaba dar una razón precisa de por qué las capacidades caloríficas de los gases diatómicos o dicho más claro, su relación; no concordaban con los resultados experimentales. Boltzmann concluye que: “por alguna razón desconocida, los posibles movimientos internos no tienen una equipartición de la energía”,

refiriéndose a las configuraciones poliatómicas de las moléculas, que son los cuerpos constituyentes de las sustancias más complejas.

Algunas de las explicaciones mecánicas en los fenómenos en el siglo XVII, dieron con un problema de investigación, fue la caracterización del vacío con trabajos, por ejemplo, de Pascal y Torricelli. Lo que produjo un cambio de razonamiento, a uno mecánico corpuscular, es decir, una cuestión de “Materia y movimiento”.

Por su parte, (Bernoulli, 1738), en el siglo XVIII propone una de las imágenes actuales de los átomos como bolas de billar, para dar cuenta de la leyes de los gases. De aquí, Herapath cuyos trabajos sobre la teoría cinética entre 1820-1821, fueron rechazados y archivados por Humphry Davy, quien era presidente de la Royal Society para ese entonces, debido a que eran muy “especulativos”; hasta que fueron leídos por Lord Rayleigh y tenidos en cuenta a finales de siglo. Krönig, químico y físico alemán en 1856, junto a Clausius, Maxwell y Boltzmann independientemente, aportaron a la teoría cinética de los gases, tomando como principio la conservación de la energía, es así, que estudiaron los fenómenos de transporte, para caracterizar por ejemplo la viscosidad, la difusión y la conducción de calor como equivalente de energía cinética de las pequeñísimas moléculas.

La teoría cinética de los gases contempla en sus formulaciones, a la función de distribución de velocidades, propuesta por Maxwell en 1859, la cual cuya tarea es estimar el número de moléculas que tienen una velocidad determinada. Su estudio permitió caracterizar los coeficientes de los fenómenos de transporte en pleno auge de la teoría cinética de los gases. Ésta se diferencia de las organizaciones de Boltzmann, porque aun cuando la distribución de Maxwell trata con magnitudes más generales, el trabajo de Boltzmann va más allá, porque introduce la magnitud H , de su función de distribución, esta magnitud bajo ciertas consideraciones, permanece constante o

decrece, como medida de la probabilidad del estado de las moléculas constituyentes de un gas en un recipiente, la cual puede ser identificada como el negativo de la entropía.

Al acudir a la mecánica para la explicación de los hechos, aquellos que pensaban en sumir a la mecánica en la energética, los llamados *Energetistas*, tomaron como argumento la paradoja de la reversibilidad, para desestimar estas explicaciones mecánicas a fenómenos cuya evolución en el tiempo, está determinada por la segunda ley de la termodinámica, o aumento de la entropía, es decir, donde se reconoce, qué suceso fue antes y cual después.

Debido a la imposibilidad de la mecánica, para dar cuenta de cada uno y todos los fenómenos, que, para ese entonces, era algo que se le requería a una teoría física, creció una reacción al Materialismo Científico y a su vez, el movimiento para reemplazar la teoría atómica, por descripciones teóricas basadas en los observables, impulsado por Ernst Mach. Éste atacó la teoría atómica, debido a “la economía del pensamiento” como se explicó anteriormente.

El valor del modelo mecánico, se le puede atribuir a Boltzmann como expone (S. G. Brush, 1964), porque por él, se describen ciertas propiedades de los gases, que dan cuenta de su composición u organización molecular, estas propiedades se relacionan con los grados de libertad de las moléculas; La analogía mecánica propuesta por Boltzmann, indica que es posible por este medio, y no de forma directa como habría de esperar, interactuar con las verdaderas propiedades de las pequeñas partículas que constituyen los cuerpos.

Sobre la teoría física y la introducción a la teoría de gases

En su carta a *Nature* en 1895 de acuerdo con (S. G. Brush, 1964, p. 15), Boltzmann expone dos cuestionamientos sobre la física teórica, menciona algunas limitaciones de la energética y las propias del atomismo respectivamente, que se interpretan de la siguiente forma:

¿Es la teoría de gases, una teoría física tan válida como cualquier otra teoría física?

¿Qué se le demanda a cualquier teoría física?

Las convicciones de Boltzmann son positivas a la primera pregunta, citando, una de las imágenes predominantes de los átomos, como los átomos de materia de Boscovich, como puntos materiales, así como el éter. Donde muestra que: esta imagen es refutada por diferentes ramas de la física, como se verá más adelante, y la teoría de gases no es la excepción.

Las refutaciones son a priori, porque las predicciones de la teoría (átomos como puntos materiales) no concuerdan con los hechos bien conocidos, si este punto de vista no es suficientemente diciente, entonces cabe preguntarse ¿Qué más son? ¿Son un movimiento, una cosa, un vórtice o un punto de inercia? Son preguntas con mucha oscuridad, y al no usar la palabra de entidad para caracterizar el éter, deja en claro que es para no llamarlo cuerpo o sustancia. Aun cuando, desde mucho antes se le caracterizó con las propiedades de una sustancia, la cual permea el espacio y a los cuerpos en él.

Boltzmann se refiere a Hertz no en pocas ocasiones, con motivo de apoyar sus puntos de vista mecanicista en la construcción de teorías, por ejemplo: En (S. G. Brush, 1964, p. 16) Boltzmann precisa qué: *“Ni la teoría de gases, ni otra teoría física puede ser tranquila y congruente con los hechos”*, tal que espera que Mr. Brian esté en la capacidad de deducir todos los fenómenos de espectroscopía a partir de la teoría de la luz; tarea que sabía de antemano infructuosa, y coincide con Hertz respecto a una analogía, *“El rigor de la ciencia requiere distinguir bien la figura de la ciencia sin ser drapeada, de la vestimenta alegre con la que la vestimos nosotros”* refiriéndose a los científicos, donde pone de presente un materialismo científico, corriente de pensamiento, desde muy antiguo bien conocida. Esta *“preferencia por la desnudez”* no alcanza su máximo, si se desestiman todas las hipótesis, por lo que si bien, todas las hipótesis deben proveer resultados indudables, estos pueden apoyarse de las suposiciones

mecánicas por métodos matemáticos. Si los resultados coinciden con una extensa serie de hechos debemos contentarnos, aun cuando la naturaleza de los hechos no haya sido puesta de manifiesto del todo.

Resuelve que la segunda *pregunta*, es de otro dominio de conocimiento, por lo menos de la física ordinaria “*orto-física*” y que entra en escena, la *metafísica* para explicar las causas primeras, la dualidad (fuerza - materia) desde un punto de vista mecanicista. De hecho, sobre la respuesta a esta segunda pregunta, se pueden recoger sus reflexiones filosóficas a lo largo de su vida académica, donde hace una recontextualización del estado de la física teórica tratados en el capítulo 2. De los problemas con los cuales no vale la pena tratar, se encuentran por ejemplo, estimar el número de moléculas, sus dimensiones, es decir, sería poco productivo, darse a esa tarea. Pero, ¿puede esto ser esperado con seguridad, que (los átomos) se comporten como agregados de fuerza, o como los cuerpos rígidos de la mecánica?

Para el tiempo en que se publica la teoría de gases, Boltzmann reconoce que las relaciones entre las ramas de la ciencia habían cambiado, refiriéndose a la física, la mecánica (si, por separado), la química y la fisiología, todas éstas se habían adelantado en el siglo XIX de forma, se podría decir, acelerada. A través de analogías y diferencias, entre las propiedades de la energía, que se exhiben en los fenómenos físicos, surge la física fenomenológica. Sobre esta postura de conocimiento, se encontraron muchos adeptos, entre los cuales se destacan, Ostwald, Helm, Duhem y Mach, así como aquellos que no la apoyaban, por ejemplo, R. Mayer, Sommerfeld, Maxwell, Heaviside y Boltzmann, por nombrar algunos, aun cuando los protagonistas de dicha trama científica son más.

Naturaleza del calor, naturaleza de la materia

En un tránsito de pensamiento, de lo visible a lo invisible, (Boltzmann, trad. en 1964, p. 27) propone esta imagen del calor como movimiento: *“Debido a las pequeñas perturbaciones en un fluido, las ondas deben surgir, éstas se cruzan entre sí, aleatoriamente. Por lo que, la energía cinética de la perturbación original se verá convertida en movimiento de la onda visible. Esta consecuencia matemática de las ecuaciones, que describen los fenómenos de los medios continuos, a la hipótesis de que todas las vibraciones de las partículas pequeñas, en el que las ondas son siempre decrecientes deben transformarse, tal que debe ser idéntico al calor que vemos, es producido”*. Esto bajo el contexto de la experiencia de Joule sobre la equivalencia de trabajo mecánico en calor en el siglo XIX.

La atomística y la teoría de gases

La justificación de las organizaciones mecánicas radican en que, el estudio de los hechos y las simétricas relaciones entre los cuerpos discretos, pertenecen a las características más esenciales que durarán más que todas nuestras ideas cambiantes sobre ellas; aun cuando, estas relaciones de simetría puedan considerarse como hechos establecidos (Boltzmann, trad. en 1964, p. 27). Además que, a favor de las analogías mecánicas está, por ejemplo, que no se puede desestimar, el modelo por el cual, las estrellas como cuerpos gigantescos, muy lejanos, son similarmente vistos, por medio de una analogía mecánica, para la representación de la acción del sol y la imperceptible acción de otros cuerpos celestes, se puede refutar esta teorización, porque *“reemplaza al mundo de nuestras percepciones, por uno de objetos imaginarios”*; lo anterior, es un modelo y en ese sentido, cualquiera puede hacer el tipo de suposiciones que considere, siempre que esté en concordancia con los hechos experimentales. La teoría como representación del mundo

físico, se relaciona por supuesto, con la naturaleza, como los signos, las letras a los sonidos. Son pues construcciones, así como la imagen de calor como movimiento permanente de las moléculas.

Sobre los estados de agregación de la materia, se tiene que los cuerpos sólidos, son arreglos,

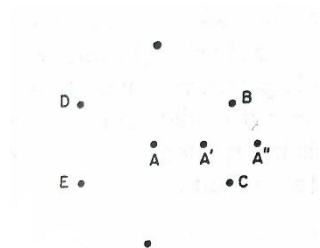


Ilustración 1. Puntos de los centros de gravedad de las moléculas que conforman a un cuerpo sólido. Si por ejemplo, la molécula en A, cambia su posición ligeramente, ubicándose en A'; las moléculas en B y C la repelerán, mientras que las moléculas ubicadas en D y E, la atraerán hacia la posición de equilibrio inicial en A. Tomada de (Boltzmann, trad. en 1964, p. 29)

donde cada molécula vibra respecto a una posición de equilibrio (ver Ilustración 1..Puntos de los centros de gravedad de las moléculas que conforman a un cuerpo sólido. Si por ejemplo, la molécula en A, cambia su posición ligeramente, ubicándose en A'; las moléculas en B y C la repelerán, mientras que las moléculas ubicadas en D y E, la atraerán hacia la posición de equilibrio inicial en A. Tomada de (Boltzmann, trad. en 1964, p. 29)), producto de las fuerzas intermoleculares (capaces de repeler o atraer) que, se proponen como resortes que unen a las moléculas cercanas unas con otras. Las fuerzas intermoleculares, son caracterizadas por Clausius en 1857, respecto del calor latente y los estados de agregación de las sustancias, como una analogía del equivalente mecánico del calor, en términos del trabajo que dichas fuerzas ejercen en las moléculas para mantenerlas lo *suficientemente* próximas las unas a las otras (S. G. Brush, 2004, p. 12). Debido al movimiento térmico, las posiciones de reposo de las moléculas estarán más separadas unas de las otras, por lo que el cuerpo se expandirá un poco. Ahora, si el movimiento molecular aumenta más allá de un límite, algunas moléculas individuales en la superficie pueden ser “*arrancadas*” del arreglo y volar libremente por el espacio, esta es la explicación mecánica-atómica de Boltzmann del fenómeno de

evaporación, y la explicación del porqué una barra sólida, no se calienta espontáneamente, bajo la imagen discreta de la materia.

La presión de un gas

En esta imagen, en la que las moléculas obedecen las leyes de la mecánica y en la que, el principio de conservación de la energía cinética debe satisfacerse en los choques de las moléculas con otras moléculas y con la pared del recipiente. Es claro que puede haber imágenes variadas de las moléculas, con diferencias en las propiedades internas de éstas, en términos de su forma, rigidez, elasticidad; mientras cumplan las dos leyes de la mecánica.

La más simple que puede hacerse, consiste en el que las moléculas son elásticas, donde la energía cinética se conserva, y cuya deformación es despreciable.

Por lo que se procede a definir las variables del sistema:

Símbolo	Lo que representa
Ω	Región del volumen del gas en el recipiente
φ	Área transversal
M	Masa del pistón
q_i	Fuerzas moleculares
U	Velocidad positiva del pistón
P	Fuerza que se ejerce en dirección negativa, normal a φ

Tabla 1 Variables para considerar en la caracterización de un gas contenido en un recipiente.

$$M \cdot \frac{dU}{dt} = -P + \sum_i q_i \quad (3)$$

En este sentido, habrá una cantidad $n_i\Omega$ - moléculas cuya masa será m_i , con sus respectivas componentes de velocidad en el intervalo de tiempo t . Éstas contribuyen a la presión, por el hecho de tener la velocidad que tienen en el momento justo para chocar con el pistón.

Donde, a esta relación (4) se le conoce como fuerza por unidad de área. Es decir, la presión en unidades mecánicas en términos de la velocidad de las moléculas.

$$p = \frac{1}{3}\rho\overline{c^2} \quad (4)$$

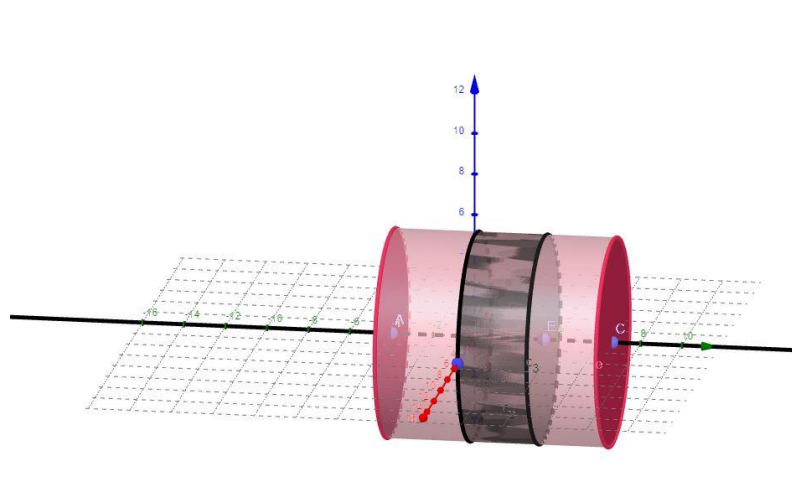


Ilustración 2. Región de un gas contenido en un recipiente cilíndrico, con la capacidad de empujar un pistón. Elaboración propia

donde ρ y $\overline{c^2}$ corresponden a la densidad del gas en estudio y la velocidad cuadrática media de las moléculas que componen el gas, respectivamente.

En la ecuación anterior se relaciona, una magnitud de estado del gas, como es la presión, con una magnitud hasta al momento de naturaleza teórico mecánica, esta relación había sido propuesta por Joule (Maxwell, 1902, p. 321).

Bajo la imagen de moléculas como esferas elásticas, cuyo movimiento visible y fuerzas externas están ausentes, se construye la explicación de las leyes de Charles y Avogadro como

sigue; es esta misma imagen, la considerada por (Maxwell, 1902, p. 340) en *Theory of Heat*, de 1871. Para esto, Boltzmann plantea un espacio de velocidades de tres dimensiones, dado un tiempo t donde:

$$f(\xi, \eta, \zeta, t) d\xi d\eta d\zeta = f d\omega \quad (5)$$

Representa el número de m - moléculas cuyas componentes de la velocidad, están entre los límites ξ y $\xi + d\xi$, η y $\eta + d\eta$, ζ y $\zeta + d\zeta$.

Así mismo, sea:

$$F(\xi_1, \eta_1, \zeta_1, t) d\xi_1 d\eta_1 d\zeta_1 = F d\omega_1 \quad (6)$$

El número de m_1 - moléculas con sus correspondientes límites en las componentes de las velocidades en el volumen $d\omega_1$.

Donde se condiciona que las m - moléculas pueden colisionar con las m_1 - moléculas. Así, una magnitud H , se relaciona con las funciones anteriores, de la siguiente forma:

$$H = \int f \ln f d\omega + \int F \ln F d\omega_1 \quad (7)$$

Si esta magnitud cambia, es por varias razones: Una de ellas, es que cambie en un tiempo dt , donde haciendo los desarrollos geométricos correspondientes se obtiene que, H permanece constante (si los términos en las integrales se cancelan), o decrece, teniendo en cuenta, que la distribución de velocidades propuesta corresponde a un sistema molecularmente desordenado en principio, es decir, está fuera del equilibrio. (Boltzmann, trad. en 1964, p. 55) destaca que, por esta razón, H debe decrecer según la distribución propuesta por Maxwell.

Significado matemático de la cantidad H

En su teoría de gases, Boltzmann establece en primera medida, el significado matemático de H , por el cual esta magnitud tiene carácter *probabilístico*, y se relaciona directamente con este campo y su proceder.

Si tenemos un recipiente con una gran cantidad de esferas negras y la misma cantidad de esferas blancas e idénticas en todo lo demás, considerando el caso en donde se sorteen 20 bolas al azar. La probabilidad de que se hayan sorteado esferas negras solamente no es ni por un pelo probable en comparación a haber sacado primero una esfera negra, luego una blanca, y la tercera una esfera negra, etc. Por el hecho de, que el segundo caso, tiene más formas de darse, respecto al evento donde se sorteen sólo 20 esferas negras, la probabilidad relativa de un caso respecto a otro, están en relación de: $\frac{20!}{10!10!}$ que representa cuantas permutaciones pueden hacerse en términos de series de 10 esferas blancas y negras, tratando a las bolas blancas como idénticas entre sí y de igual forma a cada una de las diferentes bolas negras. Cada una de esas permutaciones representa un evento que tiene la misma probabilidad que uno en donde solo estén las bolas negras (Boltzmann, trad. en 1964).

Así como en este simple ejemplo anterior propuesto por (Boltzmann, trad. en 1964, p. 55), el evento en donde estén todas las moléculas en un gas con la misma velocidad en la misma dirección, es muy improbable respecto al caso en el que cada molécula tiene una dirección y magnitud de velocidad particular en un instante de tiempo dado. Para las colisiones que se dan entre las moléculas, y su velocidad está entre un volumen infinitesimal $d\omega$ (en el espacio de velocidades) previo al choque, vemos que estará dentro del volumen después del choque, si se divide este espacio en iguales celdas de volumen ω , que están equi-probablemente distribuidas se obtiene:

$$Z = \frac{n!}{(n_1\omega)!(n_2\omega)! \dots} \quad (8)$$

Representa la probabilidad relativa propuesta, donde $n = (n_1 + n_2 + n_3 + \dots)\omega$ es el número total de moléculas en el gas, $n_i\omega$ representa el número de moléculas con velocidad c_i . De la anterior expresión se tiene que, si todas las moléculas tuvieran la misma velocidad se tendría

que $Z = \frac{n!}{n!} = 1$; es decir, no hay otra forma de *permutar* los elementos, no hay lugar a otra forma de configurar el sistema.

Debido a que se supone hay un gran número de moléculas, resulta conveniente trabajar con reglas de los grandes números, y que mejor que la función logaritmo natural en la siguiente aproximación:

$$p! = \sqrt{2p\pi} \left(\frac{p}{e}\right)^p \quad (9)$$

Con la consideración, por supuesto que: ω , n , y toda la energía cinética son constantes, en el sistema.

La distribución de velocidades más probable de las moléculas, será cuando $\ln Z$ sea máximo, es decir, cuando $\omega(n_1 \cdot \ln n_1 + n_2 \cdot \ln n_2 + n_3 \cdot \ln n_3 + \dots)$ sea máxima.

Las expresiones anteriores, se relacionan así:

$$f(\xi, \eta, \zeta) = \Sigma n_i \quad (10)$$

Luego la suma de discretos *se vuelve* una integral:

$$\begin{aligned} &\omega(n_1 \cdot \ln n_1 + n_2 \cdot \ln n_2 + n_3 \cdot \ln n_3 + \dots) \\ &= \int f(\xi, \eta, \zeta) \cdot \ln f(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta \end{aligned} \quad (11)$$

Que coincide con la expresión de H de la ecuación (7) dada anteriormente.

Si esta magnitud decrece, es debido a que luego de tantas colisiones, el sistema se acerca cada vez más a la distribución más probable.

Las réplicas de Loschmidt (1821-1895) para 1876, sobre la paradoja de la reversibilidad radican principalmente en que si se supone un gas encerrado herméticamente y al recipiente con paredes elásticas. Para el caso en el que inicialmente se encuentra en un estado improbable, todas

las moléculas tienen la misma velocidad; pasado un tiempo t , la dirección de cada molécula es revertida, las moléculas van a pasar por los estados precedentes hasta ese punto en el tiempo, donde el sistema se va a encontrar en un estado menos probable que el inicial, luego H debe incrementar. Este hecho no contradice las leyes de la probabilidad. Porque aun cuando se trate de improbabilidad, no implica que sea imposible.

Es decir, (Boltzmann, trad. en 1964, p. 59), concluye que: “*Sería un gran error, aseverar que cualquier movimiento donde H decrezca, es equiprobable con uno en el que las velocidades se inviertan y H por otra parte, incremente*”.

Si en un movimiento molecular, H decrece en un tiempo t_0 a un tiempo t_1 , si se revierten las velocidades al tiempo t_0 , no se obtiene un incremento de H , por el contrario, esta probablemente siga decreciendo. Es cuando se invierten las velocidades en el tiempo t_1 , que se tiene que H incremente, pero lo hace en un intervalo $\Delta t = t_1 - t_0$, pasado este tiempo, H vuelve a decrecer.

Leyes de Boyle – Charles – Avogadro

En este sentido, las funciones $f = f(\xi, \eta, \zeta)$ y $F = F_1(\xi_1, \eta_1, \zeta_1)$ son pues:

$$f = ae^{-hmc^2} \quad (12)$$

$$F_1 = Ae^{-hm_1c_1^2} \quad (13)$$

Que son solución de la ecuación (7).

La función de distribución de las moléculas en términos de las velocidades es:

$$dn_c = fd\omega \quad (14)$$

Donde (14) representa el número de m - moléculas por unidad de volumen, cuyas velocidades están entre los límites c y $c + dc$ en la distribución de equilibrio. Se obtiene:

$$n_c = \int_0^{\infty} a e^{-hmc^2} 4\pi c^2 dc \quad (15)$$

Con $d\omega = 4\pi c^2 dc$; por lo que no existe una dirección en la que haya más moléculas con una determinada velocidad respecto a las otras, se considera la distribución por medio de una simetría isotrópica en el espacio de velocidades. Se tiene que por condición de normalización:

Es decir,

$$f = n \sqrt{\frac{h^3 m^3}{\pi^3}} \cdot e^{-hmc^2} \quad (16)$$

Por otra parte,

$$F = n_1 \sqrt{\frac{h^3 m_1^3}{\pi^3}} \cdot e^{-hm_1 c_1^2} \quad (17)$$

son pues, la cantidad de m -moléculas y m_1 -moléculas por unidad de volumen respectivamente.

La expresión (14), queda finalmente:

$$dn_c = 4nc^2 \sqrt{\frac{h^3 m^3}{\pi}} \cdot e^{-hmc^2} dc \quad (18)$$

Multiplicando por c^2 en ambos lados de la expresión y dividiendo por $\int dn$ se obtiene:

$$\overline{c^2} = \frac{\int_0^{\infty} c^2 dn_c}{\int_0^{\infty} dn_c} = \frac{3}{2hm} = \frac{3RMT}{m} \quad (19)$$

Donde $\overline{c^2}$, es el valor de la velocidad cuadrática media de las moléculas que conforman un gas en el estado de equilibrio¹⁵.

¹⁵ Autores como (Perez Bustamante & Hidalgo de Cisneros, 1989) reconocen las ambigüedades presentes en la interpretación y uso de las magnitudes como: velocidad cuadrática media $\overline{c^2}$, velocidad media \bar{c} y la velocidad más probable c_w , en numerosos libros de textos universitarios y de secundaria básica de termodinámica estadística en inglés y español. Por lo que se procede a interpretar la notación de Boltzmann para $c_{rms} = \sqrt{\overline{c^2}}$, (con *rms*= *root mean square*) cuya traducción al español, es *la raíz del*

Por otra parte, se tiene que:

$$\bar{c} = \frac{\int_0^{\infty} c \cdot dn_c}{\int_0^{\infty} dn_c} = \frac{2}{\sqrt{\pi h m}} = \sqrt{\frac{8 R M T}{\pi m}} \quad (20)$$

Donde \bar{c} , representa el valor de la velocidad media de las moléculas cuya velocidad esté entre c y $c + dc$.

Al representar la distribución en el plano, donde el eje de las abscisas corresponde a las velocidades y el eje de ordenadas a la cantidad de moléculas por unidad de volumen con una determinada velocidad, en un tiempo t lo suficientemente grande para que el gas se encuentre en la distribución de Maxwell, es decir, la distribución de equilibrio.

Cuando se representa la distribución como función de la velocidad y se obtiene la abscisa para la cual se encuentra un máximo, es pues la velocidad más probable designada por c_w .

La distribución de velocidades y las velocidades caracterizadas anteriormente se muestran en la siguiente ilustración:

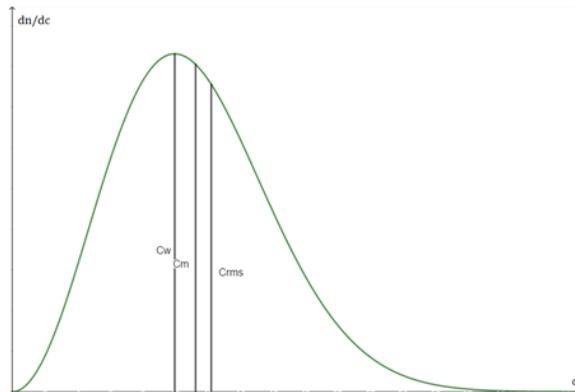


Ilustración 3. Distribución de velocidades moleculares para el gas monoatómico.

Elaboración propia

cuadrado medio. Notación que ilustra sobre el carácter estadístico de la magnitud a su vez que la distingue de la velocidad cuadrática media.

En una mezcla de gases, en equilibrio térmico de la expresión (19). Con h igual para los dos gases, se tiene:

$$m\overline{c^2} = m_1\overline{c_1^2} \quad (21)$$

Es decir, en el equilibrio térmico, una molécula del gas m tiene la misma energía cinética media que una molécula del gas m_1 . Por otra parte, si estos dos gases se separan por una frontera que permita la conducción de calor, aun cuando tengan diferentes densidades; éstos se encuentran a la misma temperatura. Así, la temperatura del gas, debe ser función de la energía cinética media de las moléculas.

De la expresión anterior se deduce que:

$$n = n_1 \quad (22)$$

Es decir, el número de moléculas por unidad de volumen n y n_1 para los dos gases, es el mismo. Esta es, la **ley de Avogadro**¹⁶

De acuerdo con los datos de las velocidades cuadráticas medias, presentadas por (Boltzmann, trad. en 1964, p. 35). Para el caso de los gases diatómicos, como son el oxígeno, nitrógeno e hidrogeno, los cuales se encuentran a temperatura de 0 °C, se obtienen los pesos moleculares en función de c_{rms} , como se ilustra en la siguiente tabla:

Gas	c_{rms} $\frac{m}{s}$	$\overline{c^2}$ $\frac{J}{kg}$	$\mu = \frac{m}{m_1}$
Oxigeno (O_2)	461	212521	16

¹⁶ Este resultado es importante, ya que para la termodinámica general esta es una definición, mientras que en la teoría cinética de los gases, es como se ve, una consecuencia necesaria, sobre esto (Planck, 1915, p. 52) muestra la situación de la física teórica a principios del siglo XX.

Nitrógeno (N_2)	492	242064	14
Hidrogeno (H_2)	1844	3400336	1

Tabla 2. Relación de los gases con la raíz del cuadrado medio de las velocidades y su peso molecular correspondiente. Los datos de las dos primeras columnas, fueron tomados de (Boltzmann, trad. en 1964 p. 35).

Por otra parte, si m es la misma para los dos gases, a la misma temperatura, la presión y la densidad son directamente proporcionales, $p_1 \propto \rho_1$ y $p \propto \rho$, esta es la **Ley de Boyle – Marriotte**.

La temperatura como medida de movimiento molecular

Si se escoge como gas normal, o de referencia al hidrogeno y se designan sus propiedades físico - moleculares (por ejemplo, la presión, número de moléculas por unidad de volumen, masa, volumen, densidad, velocidad cuadrática media, velocidad media, etc.), por las letras y símbolos del gas de m_1 – moléculas, en adelante denotadas en mayúsculas y se compara con otro gas, cuyas propiedades se denotan con los símbolos en minúsculas. Se sabe qué, para el gas normal, se cumple la siguiente relación.

$$P = P \frac{\overline{C^2}}{3} \quad (23)$$

Que, a densidad constante, la relación de presión y temperatura es proporcional; por tanto, la temperatura es proporcional a $\overline{C^2}$. Esta relación se denota por:

$$\overline{C^2} = 3RT \quad (24)$$

Con R , como constante independiente de la densidad; es decir, a diferentes densidades, a una temperatura dada, para el gas normal, el valor de $\overline{C^2}$ es el mismo¹⁷.

¹⁷ Esta constante se puede determinar como la diferencia, por ejemplo, de la temperatura de congelación con la temperatura de evaporación del agua y escogerse como 100. Para la temperatura absoluta es válida esta diferencia, para lo cual se halla que la

Así para otro gas a la misma temperatura, se tiene que:

$$m\overline{c^2} = M\overline{C^2} \quad (25)$$

Con $\mu = \frac{m}{M}$, es la relación de las masas moleculares de un gas con el gas normal, llamado peso molecular.

$$p = \frac{R}{\mu}\rho T = r\rho T \quad (26)$$

Donde r corresponde a una constante que depende del gas en consideración. Así estos elementos se relacionan de tal forma, que se concluye que la expresión anterior corresponde a la **ley de Boyle-Charles-Avogadro**.

Calor específico y el significado físico de la cantidad H

De acuerdo con (Boltzmann, trad. en 1964, p. 68) para exponer una explicación plausible, sumada a la matemática enunciada brevemente, sobre la cantidad H . Se debe tener en cuenta una explicación que involucre a los átomos como cuerpos constituyentes de las moléculas ya que pueden tener muchas formas en su sentido más general, o como es el caso, consistir en varios átomos que se mueven uno respecto al otro. En consecuencia, si se tiene presente una contribución de calor dQ medido en unidades mecánicas¹⁸. Considerando un gas que ocupa un volumen Ω , esto hace que aumente la temperatura dT y al mismo tiempo hay un incremento de volumen $d\Omega$. El calor suministrado se divide en: $dQ = dQ_1 + dQ_4$, aquí dQ_1 representa el calor que fue usado en incrementar la energía molecular mientras que dQ_4 es el que se usa haciendo trabajo externo. Si

temperatura en la que se derrite el hielo es 273. Esta constante R es válida para cualquier gas ideal en consideración. Por lo que $R = 4151.81 \frac{J}{kg \cdot K}$.

¹⁸ Sobre este respecto se reconoce una relación de las magnitudes que se utilizan en mecánica cuántica, de acuerdo a Schmid en (Ayala et al., 2004, p. 6), las referentes magnitudes son más cercanas al estudio de la termodinámica, como es el caso, la teoría mecánica del calor.

las moléculas son esferas perfectamente suaves, en los choques no actúan fuerzas que produzcan rotación, la suposición es que, si tiene lugar esto, en general se le considera muy pequeña. Así la totalidad de dQ_1 , se usará en incrementar la energía cinética con la que se mueven las moléculas unas entre otras, esto hasta este momento, ya que se debe tener en cuenta la suposición de que en general, hay presente: un movimiento progresivo, un movimiento intramolecular y un trabajo ejercido en contra de las fuerzas moleculares que mantienen a los átomos juntos, es decir, (trabajo intramolecular). Luego $dQ_1 = dQ_2 + dQ_3$, donde dQ_2 representa el calor usado en aumentar el movimiento progresivo, es decir, la energía cinética de una molécula, se refiere Boltzmann a que a la energía cinética de la masa de la molécula, se considera concentrada en su centro de masa, condición necesaria desde el punto de vista de materia y movimiento; por otra parte dQ_3 es el calor usado en aumentar el movimiento intramolecular y en realizar trabajo intramolecular.

Equipartición de la energía

Se ha mostrado que cuando tiene lugar un aumento de volumen a temperatura constante, la energía cinética del movimiento progresivo dQ_2 y la distribución de velocidades $dn_c(c)$ permanece constante. Así, en términos generales, se tiene que tanto las energías cinéticas de movimiento progresivo, de movimiento intramolecular y la energía potencial de movimiento intramolecular, dependen sólo de la temperatura.

Por tanto, un aumento de estas energías implicará un aumento de la temperatura dT multiplicado por una función de la temperatura β ¹⁹.

$$dQ_3 = \beta dQ_2 \quad (27)$$

Por otra parte:

¹⁹ A una temperatura determinada β tiene un valor fijo, es decir $\beta = \beta(T)$. Así mismo, si se trata de nuevo con esferas perfectamente lisas $\rightarrow \beta = 0$.

$$dQ_2 \propto \frac{nm\Omega}{2} \overline{c^2} \quad (28)$$

Donde $n\Omega$ es la cantidad de moléculas en un volumen Ω , con $k = nm\Omega = \rho\Omega$, como la masa total del gas que no cambia, queda:

$$dQ_2 = \frac{k}{2} d\overline{c^2} \quad (29)$$

Se sigue,

$$dQ_1 = \frac{3kR}{2\mu} (\beta + 1) dT \quad (30)$$

El trabajo externo dQ_4 medido en unidades mecánicas es:

$$dQ_4 = \frac{Rkp}{\mu} d\left(\frac{T}{p}\right) \quad (31)$$

Y a su vez,

$$dQ_4 = \frac{Rk\rho}{\mu} T d\left(\frac{1}{\rho}\right) \quad (32)$$

A modo de reconstrucción y cohesión de los términos expuestos anteriormente, dQ se expresa de dos formas, según sea el proceso térmico:

$$dQ = \frac{3kR}{2\mu} (\beta + 1) dT + \frac{Rkp}{\mu} d\left(\frac{T}{p}\right) \quad (33)$$

Y bajo condiciones de cómo se desarrolla esta contribución de calor (*naturaleza del proceso*), se tiene también que:

$$dQ = \frac{3kR}{2\mu} (\beta + 1) dT + \frac{Rk\rho T}{\mu} d\left(\frac{1}{\rho}\right) \quad (34)$$

Si el volumen es constante,

$$dQ_v = \frac{3kR}{2\mu} (\beta + 1) dT \quad (35)$$

Al definir el calor específico como la cantidad de calor agregado por unidad de masa y de temperatura, para aumentar la temperatura un grado (medida en temperatura absoluta).

Para volumen constante, el calor específico es:

$$\gamma_v = \frac{dQ_v}{kdT} = \frac{3R}{2\mu}(\beta + 1) \quad (36)$$

Ahora, si la presión es la que permanece constante se tiene que:

$$dQ_p = \frac{kR}{2\mu}(3(\beta + 1) + 2)dT \quad (37)$$

Cuyo calor específico corresponde a:

$$\gamma_p = \frac{dQ_p}{kdT} = \frac{R}{2\mu}(3(\beta + 1) + 2) \quad (38)$$

Los calores específicos como se puede notar, son respectivamente función de β , ya que los otros términos son constantes, resulta pues, que este término tiene en cuenta el movimiento intramolecular de los átomos, la diferencia de los calores específicos es siempre la misma para un valor fijo de $\beta(T)$, es decir:

$$\gamma_p - \gamma_v = \frac{R}{\mu} = r \quad (39)$$

Por otra parte, la proporción en la que están los calores específicos es:

$$\kappa = \frac{\gamma_p}{\gamma_v} = 1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{(\beta + 1)} \quad (40)$$

De acuerdo con lo anterior, se tiene que los calores específicos en función de κ , son respectivamente:

$$\gamma_p = \frac{\kappa r}{\kappa - 1} \quad (41)$$

$$\gamma_v = \frac{r}{\kappa - 1} \quad (42)$$

Como el gas normal (hidrogeno) está compuesto por moléculas diatómicas, así como los otros presentados anteriormente, ver *Tabla 2*. Relación de los gases con la raíz del cuadrado medio de las velocidades y su peso molecular correspondiente. Los datos de las dos primeras columnas, fueron tomados de (Boltzmann, trad. en 1964 p. 35). es decir, $\kappa = \frac{7}{5}$. Se tiene que a 0 °C las propiedades de los gases²⁰, en términos de los procesos por los cuales son sometidos se ilustran en la *Tabla 3*.

Gas	c_{rms} $\frac{m}{s}$	$\overline{c^2}$ $\frac{J}{kg}$	$\mu = \frac{m}{M}$	r $\frac{J}{kg \cdot K}$	γ_p $\frac{J}{kg \cdot K}$	γ_v $\frac{J}{kg \cdot K}$
Oxígeno (O_2)	461	212521	16	259.49	908.22	648.725
Nitrógeno (N_2)	492	242064	14	296.56	1037.96	741.4
Hidrogeno (H_2)	1844	3400336	1	4151.81	14531.33	10379.56

Tabla 3. Relación de los gases con la raíz del cuadrado medio de las velocidades, la media de las velocidades cuadráticas, su peso molecular, la diferencia de sus calores específicos y sus calores específicos respectivamente. Los datos de las dos primeras columnas, fueron tomados de (Boltzmann, trad. en 1964 p. 35). Elaboración propia

²⁰ Cuyos calores específicos pueden ser contrastados, por ejemplo, con los registrados en la plataforma tecnológica educativa de la comunidad de Madrid (Educamadrid), la cual dispone de recursos virtuales para la comunidad educativa madrileña con el fin de contribuir a la enseñanza y aprendizaje de uso libre y gratuito. Ver más en: <http://herramientas.educa.madrid.org/tabla/properiodicas/calorespecifico.html>

Donde, si se considera la analogía mecánica de esferas que chocan unas con otras elásticamente, relación válida para un gas monoatómico (sin estructura interna), $\beta = 0$, luego κ equivale a:

$$\kappa = 1 \frac{2}{3} \quad (43)$$

Que se corresponde con la medida experimental que, por una parte Kundt y Warburg en 1876, habían obtenido para el gas de mercurio y posteriormente la obtenida por Ramsay para los gases de argón y helio en 1895, como se lee en (Boltzmann, trad. en 1964, p. 72). Es decir, esta imagen del calor como movimiento es, hasta el momento, plenamente válida.

En relación con el calor suministrado, si bien no se trata de un diferencial completo sino de una variación que depende del proceso, se tiene que:

$$\int \frac{\delta Q}{T} = \frac{Rk}{\mu} \cdot \ln \left(\frac{T^{\frac{3}{2}(\beta+1)}}{\rho} \right) + C \quad (44)$$

La expresión anterior corresponde a la entropía de un gas, la cual había sido planteada por Clausius, en favor de los trabajos previos de Carnot, que atribuía al estudio del calor, como sustancia para la termodinámica general (hechos bien comprobados por la fenomenología) y como movimiento para la termodinámica especial. Luego, la entropía tiene un carácter de magnitud extensiva, ya que, sea propuesto un recipiente con varios gases separados por contenedores, así la cantidad total de calor es la suma de las cantidades de calor que fueron agregadas a cada gas, aún si están a la misma temperatura o no, la entropía es igual a la suma de las entropías por separado de cada gas. Esto es claro, debido a la relación de Clausius; ahora si varios gases son mezclados en un contenedor de volumen Ω cuyas masas, densidades y presiones se diferencian son subíndice numérico para el gas i -ésimo, son respectivamente: $(k_1, k_2, k_3, \dots, \rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, p_1, p_2, p_3, \dots)$, la energía molecular es la suma de las energías de cada gas que compone la mezcla, luego la entropía total en términos de las sumas con el diferencial de calor, se tiene:

$$\Delta S = \int \frac{\delta Q}{T} = R \sum \frac{k}{\mu} \cdot \ln \left(\frac{T^{\frac{3}{2}(\beta+1)}}{\rho} \right) + C \quad (45)$$

Por otra parte, para el caso de $\kappa = 1\frac{2}{3}$ de (43), se tiene que la expresión (7) que para el estado estacionario caracterizado por la ecuación (16) se halla que \mathbf{H} se expresa de la forma:

$$\mathbf{H} = n \cdot \ln \left(\rho^{-1} T^{\frac{3}{2}} \right) \quad (46)$$

Haciendo una comparación se ve que $-\mathbf{H}$ es el logaritmo de la probabilidad del estado del gas considerado, ahora como la probabilidad de que varios eventos tengan lugar en simultaneo es el producto de las probabilidades de los eventos; el logaritmo por sus propiedades, define a estos como la suma; así en un sistema que dobla su volumen, el logaritmo de la probabilidad es $-2\mathbf{H}$, queda en general que para un volumen Ω , resulta $-\Omega\mathbf{H}$. El logaritmo de la probabilidad \mathbf{W} del arreglo de las moléculas y la distribución de estados entre ellos en varios gases es:

$$\ln \mathbf{W} = - \sum \Omega \mathbf{H} = - \sum \Omega n \ln \left(\rho T^{-\frac{3}{2}} \right) \quad (47)$$

Al multiplicar por una constante a los dos términos, como lo es, el producto de RM , que están referidas al gas normal, donde M representa la masa de una molécula del gas normal, se sigue:

$$\Delta S = RM \ln \mathbf{W} = R \sum \frac{k}{\mu} \ln \left(\rho^{-1} T^{\frac{3}{2}} \right) \quad (48)$$

Naturalmente, la tendencia de las transformaciones es siempre ir de los estados menos probables a los más probables. Así, si \mathbf{W} es más pequeña en un estado (1), en comparación a un estado (2), entonces para facilitar la transformación del primer estado al posterior, la acción de otro cuerpo puede ser necesaria (*proceso espontaneo*), pero esta transformación será aun posible sin cambios permanentes de otros cuerpos. Por otra parte, si \mathbf{W} es más pequeña en el estado (2), la

transformación del estado inicial al final tiene lugar, sólo si otro cuerpo está en un estado más probable. Es pues $RM \cdot \ln W$, la entropía total del sistema, para el caso en que la relación de los calores específicos sea válida con (43) .

La razón por la cual, la entropía tiende a mostrar que se maximiza en todas las interacciones que se pueden estudiar de los gases (difusión, conducción de calor, etc.), son los conocidos fenómenos de transporte, se ve que las moléculas individuales tienden a mostrar un comportamiento probabilístico cuando estas interacciones tienen lugar.

La segunda ley de la termodinámica se encuentra que es una ley de probabilidad, aún si uno da validez a la teoría de gases sólo como modelo mecánico, Boltzmann creía plenamente en su concepto de la entropía, según se explicó anteriormente.

Respecto a la teoría cinética de los gases, la cual es parte fundamental de la concreción de la física moderna, ejemplo de ello, la espectroscopia, el estudio de la radiación de cuerpo negro, el efecto fotoeléctrico.

El proceder de Boltzmann o según se deduce, atomismo metodológico, alrededor del calor como movimiento, hace considerar a la molécula como un sistema, cuya naturaleza, sabemos no más que los cambios de configuración que están determinados por las ecuaciones de la mecánica general analítica, es esta forma de organizar los fenómenos sumado a la *hipótesis ergódica*²¹, los referentes teóricos que orientan los estudios de Boltzmann entorno a la atomística y su inevitabilidad en la física teórica de segunda mitad del siglo XIX.

²¹ En la mecánica estadística, ésta se relaciona con la equiprobabilidad de los estados en el espacio de configuración, que sean consistentes con la energía total del sistema.

Algunos efectos en el camino libre de la ciencia

La repercusiones en la actividad científica de principio de siglo XX, a causa de las discusiones entorno a las organizaciones de Boltzmann sobre la mecánica estadística de los fenómenos termodinámicos, se pueden ver direccionadas a la unificación de los campos teóricos que tenían lugar para la época (Planck, 1909), sobre este respecto muchos son los esfuerzos que buscan darle a la física un proceder lógico que tenga como principio rector la experiencia (Asociación Ernst Mach, 2002). Esta actitud sobre el conocimiento, se enmarca en las distinciones que se hacen de lo científico y lo no científico; donde el proceder científico se caracteriza por aplicar, en general, el *formalismo lógico deductivo* (Lorenzano, 2011). Entre las limitaciones que acarrea este positivismo y sus críticas, se pueden nombrar, como expone (Lorenzano, 2011, p. 9) en *La teorización filosófica del siglo XX: “el análisis de los aspectos comunes de la ciencia, haciendo abstracción de las especificidades y particularidades de las diferentes disciplinas, proponiendo análisis de supuesta validez universal, pero con escasos ejemplos de tratamiento de casos científicos particulares, aun cuando esos “aspectos comunes” a todas las ciencias fueron propuestos fundamentalmente a partir de la reflexión sobre la física; la casi total circunscripción de los análisis a los aspectos sincrónicos de la ciencia, con insuficiente o nula consideración de los diacrónicos.”*

CAPITULO IV: LOS ESTUDIOS HISTÓRICOS Y LA IMPORTANCIA EN LA ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS

Las dinámicas de nuestra sociedad democrática dan cuenta de que, en la medida, en que cada individuo se informa y educa, tiene elementos para la toma de decisiones sobre su territorio. La ciencia y su relación con la sociedad, tiene gran valor cuando en el proceso de enseñanza - aprendizaje, este provee, el mayor espectro de herramientas, posturas, ideas, etc., ya que propende por el fortalecimiento de una perspectiva crítica además de desarrollar un rol activo de lo que en su sociedad acontece (Nussbaum, 2010). Así, aquellos que están en la tarea de enseñar ciencias, se pueden formar en diversas perspectivas que obedecen a distintos fines educativos; la enseñanza de las ciencias desde una perspectiva cultural, en el que la historia tiene un papel fundamental, es uno de ellos.

Se considera que la historia de las ciencias en sus diferentes dimensiones, se configura en un pilar estructurante de la enseñanza de las ciencias, de acuerdo con Mathews en (Orozco, 2005), debido a cómo se construye la ciencia, se pone de presente las múltiples formas en las cuales la historia pasa de tener un carácter anecdótico, a brindar elementos que más que culminar en un producto concluyente de la actividad de aprender - enseñar ciencia, sea la historia posibilitadora para la comprensión de los conceptos y de forma sintetizadora, la comprensión de las teorías en las que, los conceptos se enmarcan²².

Es importante tener claro las intencionalidades que hay al enseñar ciencias, por cuanto, una de ellas es reconocer su naturaleza dinámica, debido a su desarrollo, su objeto de estudio, sus

²² Los fundamentos de la física, los objetivos y métodos, entre los cuales se destacan el uso de hipótesis en las estructuraciones de las teorías, han sido de los temas de discusión, con especial interés desde finales del siglo XIX. El círculo de Viena representa una de las posturas de esta discusión, como muestra la historia, se ve caracterizada por posiciones comunes, entorno a una concepción científica del mundo, cuyo objetivo es el de unificar campos de ciencia, así como el de adoptar una visión anti-metafísica con fuertes rasgos positivistas (Kraft, 1966).

formas de proceder se enmarcan en la actividad científica, desde esta perspectiva contraria a las positivistas, las personas involucradas en el proceso científico incluyen a profesores, estudiantes, investigadores y administradores, se organiza la comunidad alrededor de la ciencia (Lorenzano, 2011). En este sentido, deben darse reflexiones, entorno a pensar en cuan asertivo resulta plantearse la enseñanza de las ciencias, en relación con la historia, y lo que podemos entender por contexto (Garay, 2011). El asumir los procesos de recontextualización de saberes, más que resituar un conocimiento en otro espacio-tiempo en el cual fue producido, es tomar consideraciones sobre las diferencias y relaciones que hay en las formaciones de los enseñantes en ciencias, y quienes hacen parte de la actividad científica, en términos de su producción.

Todas las consideraciones, que han sido puestas de manifiesto, enriquecen la actividad de enseñar ciencias, para que así los profesores se propongan un quehacer que contemple elementos no tenidos en cuenta en la educación tradicional, según se reconoce como “*transmisión de conocimiento*” que le quita en su mayor medida, lo humano que existe en los procesos de construcción de conocimiento y por ende en su enseñanza. Ya que de las tareas llevadas a cabo en el departamento de física de la Universidad Pedagógica Nacional ha sido la de significar: a la historia, el contexto de producción y su relación, en los procesos de enseñanza y aprendizaje de la actividad científica.

La historia de las ciencias y los análisis conceptuales

A este respecto, resulta de gran interés, los estudios histórico - críticos, siendo entendidos desde su papel reconstructivo, ya que según (Orozco, 2005):

“desde este tipo de estudios que se contribuye en la organización de cómo los sistemas teóricos y sus rutas de trabajo no están desarticuladas de la historia y la filosofía, dando pie a

comprender de buena forma los problemas que en dicho contexto de construcción de conocimiento, se vieron procedidos por los científicos”.

Así desde las diferentes perspectivas por las cuales se entienden los análisis conceptuales, que por su parte Robert Cohen pone de presente en (Orozco, 2005), los conceptos tienen un carácter dinámico que: de por sí, no se “*desecha*” lo que no le sea conveniente un atributo a la luz de la lógica de dicho concepto, y que por el contrario no se trata de ser alimentado en términos acumulativos, sino que estos se pueden ver relacionados con las determinadas formas de organizarlo y situarlo en la esfera científica, esto es, la teoría como imagen del conocimiento de una comunidad científica. Por lo que, la teoría como sistema organizador de los conceptos debe tener entre sus tareas, responder a las problemáticas por las cuales determinada comunidad bien sea científica o no, se ve imbuida, en un contexto específico. Tiene pues, que ser reconocida de cierta forma que den luz sobre la trascendencia de ésta, en otros dominios de conocimiento científico y como esa teoría se sitúa en una determinada cultura científica.

La importancia de la historia de las ciencias, que a mediados del siglo XX se reconoce en la tradición americana, ubica a la Universidad de Harvard como centro pionero de esta actividad histórica autocrítica del quehacer científico (Garay, 2011). Por su parte, los estudios meta-científicos, de esta naturaleza, tienen un sentido epistemológico, los cuales se pueden rastrear primeramente en su relación con la actividad productiva del Circulo de Viena y su difusión en Europa y Norteamérica, con la descentralización del mismo, consecuencia de la migración de sus miembros en la década de los años treinta y cuarenta (Kraft, 1966). Las teorías, como la actividad científica a las cuales están enmarcadas se disponen a ser formalizadas y, por tanto, discutidas y repensadas, tanto como sea necesario, en virtud de los investigadores, que tienen pues, la tarea de proveerse de nuevos elementos, adentrarse en otros dominios de conocimiento, por medio del

estudio de cuestiones generales que relacionan el papel del científico en la cultura, muestra el carácter humano de ciencia, a su vez que, para la enseñanza se da cuenta de una actividad científica.

Desde este punto de vista dinámico de la actividad científica, se corresponde de manera conveniente y no casual, la importancia de los estudios histórico- críticos en la formación de los profesores de ciencias, en específico de la física, teniendo en cuenta como a lo largo del tiempo, la física se construyó y se consolidó como ciencia, todo esto desde la tradición europea que se relaciona con la evolución de esta civilización, y sus problemáticas contextuales.

Por ello, en la medida en que está evolución científica (*asociada al cambio*) en términos de pensar la naturaleza, como objeto de estudio, y nuestra relación con ella, no es discreta, es decir, con tiempos de total quietud intelectual, y qué a alguno que otro “se le prendió el bombillo y sacó una teoría mejor”, por el contrario, esta es continua y altamente articulada al contexto espacio-temporal en el que esta surge y se formaliza, resulta importante poner sobre la mesa, elementos de lo histórico para que se configuren propuestas de enseñanza más significativas, no sobre los resultados obtenidos, en términos de productos científicos, sino en algo más importante, esto es, no empobrecer la visión de ciencia a los estudiantes con los cuales se tiene interacción (Orozco, 2018)²³.

Esto con el fin, de aproximar a los estudiantes a la actividad científica, reconocer su papel en la sociedad actual, con sus implicaciones sociales, políticas y económicas. Para qué, desde las diferentes formas en las que se entienden los fenómenos, estos sean organizados, entendidos y por ende explicados para que así, lo hechos cotidianos y lo que acontece en el día a día, se contrasten con hipótesis construidas, que están contempladas desde la experiencia, incluido el conocimiento

²³ (Orozco, 2018) Seminario de historia y filosofía de la ciencia, Departamento de física- Licenciatura en Física, Universidad Pedagógica Nacional. Bogotá D.C.

de quien hace la hipótesis, y cuyo fin es articular eso que se aprende en la escuela, con los hechos que tienen lugar, fuera de ella. Si el proceso de enseñanza de la ciencia es algo que está en más que una clase, una visita a un museo de ciencia, sería pertinente preguntarse: ¿Qué papel tiene la ciencia en la vida? En efecto, esta pregunta se puede abordar desde enfoques más positivos que culturales, pero para los fines deseados, la historia, el contexto y la cultura, son aportes para dilucidar ideas generales sobre lo que la ciencia ha sido, es, y más en territorios como Colombia, donde se supone en muchas ocasiones que aquí, se consume y enseña la ciencia que hacen otros, más idóneos, y en lugares más propicios para el desarrollo de ésta (Ayala, 2006).

Debido a las dificultades que existen entre definir contexto y cultura, unos aspectos que favorecen a entender el porqué del uso de estos términos, (Garay, 2011) aporta en su trabajo sobre el Contexto Cultural en la enseñanza de las ciencias, qué: *“Entre otras cosas, su dificultad radica en los procesos de interpretación que están inmersos en las formas de definir Contexto, Cultura, y su relación, ya que los esfuerzos para esta tarea se remontan desde por lo menos el siglo XX, y en diferentes ramas del conocimiento: (Sociología, Antropología e Historia de ciencias)”* con relación a que, de acuerdo a (Forquín, 1993) citado en (Garay, 2011) se entienda que no se transmite la cultura intacta, sin un proceso crítico y que involucra pues, un dialogo y construcción de saberes (Epistemes), ideologías y por supuesto, relaciones simbólicas en una relación de sujeto a sujeto o sujeto – comunidad.

La recontextualización de saberes y la enseñanza de las ciencias

En Colombia, uno de los esfuerzos según se reconoce sobre la enseñanza de las ciencias, y sus múltiples problemáticas en el proceder y sus intenciones, se aborda en la formación de los enseñantes, en específico de los maestros en Física, así desde la Universidad Pedagógica Nacional, en el departamento de Física, se viene discutiendo y abordando desde aproximadamente 1980,

puntos de vista que permitan de manera efectiva, la enseñanza para orientarla de una forma diferente, que involucre elementos históricos, que den cuenta de un panorama dinámico de la actividad científica y su construcción.

La maestra María Mercedes Ayala, en su texto: *Los análisis histórico- críticos, y la recontextualización de saberes científicos* (Ayala, 2006); expone una serie de aspectos epistemológicos, educativos, pedagógicos, que aportan a la educación en ciencias y como, es planteada por los maestros en formación. De aquí se sigue, que pareciera condición necesaria pero no suficiente; que, para enseñar una disciplina, hay que apropiarse de ella, es decir, aprenderla, así que es conveniente, tener orientaciones sobre lo que es saber física, teniendo en cuenta, que es esa rama del conocimiento, la que se pretende enseñar. Luego, las exigencias que existen para los maestros de ciencias en formación, se tiene la idea por ejemplo, que esta formación es de tipo técnico – instrumental además de una pedagógica, en la que esa física, se enseña *aprobemática* y termina poniéndose de manifiesto en la capacidad de resolución de problemas de libro de texto; en relación de cómo se transmite y de la forma que se instruye a la solución de estos problemas cuando tiene lugar, la práctica docente, que sin un proceso de constructo, se convierte en un problema de orden matemático, desconociendo un panorama más amplio, de cómo es esa construcción de ciencia y sus presuntos problemas (Ayala, 2006).

Luego, esto desencadena en inevitablemente en una educación-enseñanza de la disciplina física en un sistema estático a lo largo de los años, y se va a producir la visión de enseñanza de las ciencias, que por cierto pulula en las escuelas, que es anticuada, y por tanto descontextualizada a los procesos de ciencia actuales y sus dinámicas. Entonces, parece que el conocimiento de la física ya está hecho y por tanto organizado, es decir lo que se enseña en las clases, es transmisión de algo que alcanzó en términos térmicos, su “estado de equilibrio” y que, esa unificación de cuerpos

teóricos: entre lo que se conoce como Física Cuántica y Teoría General de la Relatividad, es intentar casar lo irreconciliable. Dando la sensación de que son esfuerzos perdidos, o que de lograrse, debido a su *complejidad conceptual*, su enseñanza no tiene lugar, en la sociedad.

Bajo esta postura, se logra evidenciar que es mucho más rico, revelar diferencias conceptuales inscritas a las teorías, que enseñar las teorías como productos lógicos- formales sin cohesión cultural con quienes, y en donde se desarrollan, que se pueden pensar como dogmas, tanto para quien la enseña- como para quien la aprende (Ayala, 2006; Mayoral de Lucas, 2007).

Reconocer las motivaciones que están inscritas en los contextos de producción de conocimiento científico, resulta importante para el enseñante, por cuanto se pretende destacar preguntas, métodos y respuestas, que den cuenta del carácter dinámico de la construcción de la física, es muy importante esto, porque humaniza la actividad científica, la pone en niveles de comprensión más dicentes sobre los fenómenos y la conceptualización de estos.

Es decir, según (Ayala, 2006, p. 8): *“Y dado que el planteamiento, la persistencia o no de los problemas y de enfoques o formas de abordar los fenómenos dependen de las condiciones del contexto sociocultural específico en que esto se da, la actividad científica como tal comienza a desplazar sus productos y a emerger a un primer plano.”* Esto, abre un sinfín de caminos en términos de plantearse la clase de Física, por cuanto se libera de una dirección para el proceso de aprendizaje de la disciplina física, y se puede pensar, que el desarrollo de la actividad científica está correlacionado con el desarrollo de la sociedad (Ayala, 2006). Y como no hay una sola sociedad, no hay una sola actividad científica.

Ciencia, como producto y proceso

A este respecto, se han hecho grandes y continuados trabajos por mucho tiempo, y en diferentes partes del mundo sobre la intencionalidad de la enseñanza de la Física y su construcción.

Y qué mejor elemento que dé cuenta de este carácter de la Física y sus procesos de enseñanza y aprendizaje, que las historias en torno a la actividad científica, porque se deja en claro, que sí, el proceso en la formalización de los cuerpos teóricos cambia, los productos (teorías científicas) en consecuencia, también lo harán.

La tarea de entender, la enseñanza y aprendizaje de la física, involucra cada vez más elementos de orden comunicativo, así están detrás procesos argumentativos y pensar entonces en lo que se aprende en términos autocríticos, se refleja en diversas formas de concebir el mundo, en lo que en él acontece, organizar pues, la experiencia y relacionarla a su contexto para la toma de decisiones a nivel individual y colectivo en sus territorios.

Por supuesto esta tarea no es sencilla, por las condiciones iniciales en la formación de los estudiantes para los cuales está dirigida la clase de ciencia. Pero es por cuanto hay una intencionalidad de imagen de ciencia, y quienes se plantean otra forma de enseñar ciencia, que se asume esta tarea con total compromiso, es a través de la forma en que uno se permite repensar su actividad docente teniendo en cuenta el papel transformador que la educación juega en la sociedad, en asociación con la ciencia que se puede pensar como la actividad científica y su enseñanza como motor de desarrollo de la sociedad (Castillo et al., 2011).

Conclusiones

Los estudios de corte histórico aportan de manera significativa a la enseñanza de las ciencias, ya que los conceptos, los cuales son tratados en la clase de física, pueden ser vistos como contruidos de una actividad científica en un contexto específico y se les reconozca una estructura en su proceso de formulación (Kraft, 1966) la cual no es rígida, es decir, los conceptos no son algo dado. Es importante reconocer cómo se enmarcan éstos con las teorías científicas y los problemas de conocimiento asociados; ejemplo de ello, es la mutabilidad de las hipótesis planteadas para

explicar los fenómenos en determinados contextos de producción de conocimiento, en los que tanto conceptos como teorías pasaron, antes de ser reconocidas y aceptadas por la comunidad científica (Levinas, 2001), esto es parte fundamental para la enseñanza de la ciencias desde una perspectiva cultural (Ayala, 2006), como la propuesta en este trabajo.

Las organizaciones mecánicas, entorno a la teoría cinética de los gases, como la de Boltzmann, viene dotada de unos significados y unas perspectivas del mundo, que hacen de tales organizaciones, una perspectiva relevante para el conocimiento científico, por la cantidad de elementos que son puestos de presente entre los cuales se encuentran: referentes teóricos, procedimentales, contextuales, para ser abordados en la enseñanza de las ciencias. Además de valorar los distintos esfuerzos en las intencionalidades alrededor de, no sólo describir los hechos sino de explicarlos. Así como ver el modo en que las diferentes organizaciones tienen puntos comunes no son necesariamente causa o efecto de los fenómenos), y que no implican para la explicación, una u otra postura determinada, las cuales dan cuenta de la ciencia como actividad humana, hecho invisibilizado, por ejemplo, por quienes ven el avance de la física teórica, en la medida que sus conceptos y leyes, abandonan la naturaleza antropomórfica por la cual, fueron caracterizados (Planck, 1909).

Por medio del estudio de corte histórico, se construyen redes entre nodos de conocimiento, por lo que, el concepto de átomo, como constituyente discreto de la materia, tiene una significación, un contexto teórico, entorno a organizar el mundo desde el mecanicismo, una imagen que contempla la probabilidad de los sistemas a ser configurados, por medio de analogías y uso de hipótesis auxiliares que buscan hacer comprensible e inteligible las ecuaciones diferenciales que describen a los fenómenos; por lo que, esa forma matemática en específico que adoptan los conceptos en sus correspondientes formulaciones, da cuenta de esa relación entre física

y matemática para ese contexto, si bien los productos tienen una naturaleza matemática, es una parte componente de los conceptos, pero no los define completamente en su proceso de formalización. Por su parte las teorías, entre sus principales tareas no está el unificar campos científicos, sino que reconociendo sus límites explicativos, se invita a los trabajos colaborativos, para el abordaje de problemas más generales. Es decir, la construcción de las teorías, pasa por un trabajo constante de discusión entre las diferentes imágenes de conocimiento, las cuales orientan el sentido que se les da a las organizaciones del mundo físico y de sus fenómenos asociados, en función de una o más formas de ver el mundo físico, por ejemplo esta organización mecánica, es decir, la entropía como ley de probabilidad.

BIBLIOGRAFÍA

- Alonso, M., & Finn, E. (1971). *Física Vol. III: Fundamentos cuánticos y estadísticos* (C. A. Heras & J. A. Barreto, trad.). Fondo Educativo Interamericano S.A.
- Artigas, M. (1991). E. Mach y P. Duhem: El significado filosófico de la historia de la ciencia. *Física y Religión En Perspectiva*, 99–119.
- Asociación Ernst Mach. (2002). La concepción científica del mundo: el Círculo de Viena. *Redes*, 9(18), 103–149. <https://ridaa.unq.edu.ar/handle/20.500.11807/659>
- Ayala, M. M. (2006). Los análisis histórico-críticos y la recontextualización de saberes científicos. Construyendo un nuevo espacio de posibilidades. *Pro-Posições*, 17(1), 19–37.
- Ayala, M. M. (2017). LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA PARA LA FORMACIÓN DE PROFESORES DE FÍSICA. *TED: Tecné, Episteme y Didaxis*, 6. <https://doi.org/10.17227/ted.num6-5663>
- Ayala, M. M., Romero, A., & Malagón, F. (2004). De la mecánica newtoniana a la actividad de organizar los fenómenos mecánicos. *Preimpresos*, 65–78.

- Bernoulli, D. (1738). Sectio Decima. In Stephen G. Brush (Ed.), *Hydrodynamica*.
- Boltzmann, L. (1964). *Lectures on Gas Theory* (S. G. Brush, trad.). Dover Publications, Inc.
<https://doi.org/10.1063/1.3051862>. Obra original publicada en 1896 y 1898
- Boltzmann, L. (1986). *Escritos de mecánica y termodinámica* (F. Ordoñez, trad.). Alianza Editorial S.A.
- Brush, S. G. (1964). Translator's Introduction. In *Lectures on gas theory*. University of California.
- Brush, S. G. (2004). History of the Kinetic Theory of Gases. *Istituto Della Enciclopedia Italiana*, 1–31.
<http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=Kj3ljgFG42sC&oi=fnd&pg=PA171&dq=Foundations+of+kinetic+theory&ots=UfJvGF-96u&sig=8bfRbu1-0yO7nHvv0zcu9cxYCo%5Cnhttp://www.punsterproductions.com/~sciencehistory/pdf/ITALENC.pdf>
- Campos, D. (2006). *Elementos de Mecánica Estadística* (Issue 14). Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Castillo, J. C. (2008). La historia de las ciencias y la formación de maestros: la recontextualización de saberes como herramienta para la enseñanza de las ciencias. *Rollos Nacionales*, 3(25), 73–80.
- Castillo, J. C., Chaparro, C. I., Valencia, F., Castrillón, A., & Barragán, J. E. (2011). *Lineamientos para la Enseñanza de las Ciencias y Educación Ambiental*. Universidad Pedagógica Nacional.
- Castillo, J. C., & Pedreros, R. I. (2013). *Notas de Termodinámica*. Universidad Pedagógica Nacional.
- Chamorro, C., & Marulanda, J. (2003). *Fundamentos metodológicos en ciencias*. 155.

- Collini, S. (2009). Las dos Culturas. In *Avances en Recursos Hidráulicos* (Issue 20).
- Elkana, Y. (1983). La ciencia como sistema cultural: Una aproximación antropológica. *Boletín de La Sociedad Colombiana de Epistemología*, 3(10–11), 17–29.
- Engels, F. (1961). *Dialéctica de la Naturaleza* (W. Roces, trad.). Editorial Grijalbo.
<https://doi.org/10.16309/j.cnki.issn.1007-1776.2003.03.004>
- Garay, F. R. (2011). Perspectivas de historia y contexto cultural en la enseñanza de las ciencias: discusiones para los procesos de enseñanza y aprendizaje. *Ciência & Educação (Bauru)*, 17(1), 51–62. <https://doi.org/10.1590/s1516-73132011000100004>
- Gulín, J. (2007). Ludwig Boltzmann. Pionero de la ciencia del siglo XX. *Revista CENIC*, 38(1).
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181621661011>
- Hernandez, J. S. (2019). *Una aproximación epistemológica al concepto de entropía: un análisis a la transición de Clausius a Boltzmann*. Universidad Pedagógica Nacional.
- Kraft, V. (1966). *El círculo de Viena* (F. Gracia, trad.). Taurus Ediciones.
- Lenin, V. I. (1974). Materialismo y Empiriocriticismo. In Akal Editor (Ed.), *Obras Completas. Tomo XIV* (Cartago, E). Editorial Ayuso. Obra original publicada en 1909.
- Levinas, M. (2001). Filosofía y ciencias de la naturaleza en el siglo XIX. In *La Filosofía del Siglo XIX* (Vol. 23, pp. 303–335). Editorial Trotta.
- Lévy-Leblond, J.-M. (1988). Física y matemáticas. In *Pensar La Matematica*. Tusquets Editores.
- Lombardi, O. I. (1997). La pertinencia de la historia en la enseñanza de las ciencias: argumentos y contraargumentos. *Historia y Epistemología de Las Ciencias*, 9(1), 343–349.
- Lorenzano, P. (2011). La teorización filosófica sobre la ciencia en el siglo XX. *Discusiones Filosóficas*, 12(19), 131–154. <http://www.scielo.org.co/pdf/difil/v12n19/v12n19a07.pdf>
- Mach, E. (1914). *The analysis of sensations, and the relation of the physical to the psychical* (C.

- M. Williams & S. Waterlow, trad.). Open Court Publishing Company.
<https://archive.org/details/analysisofsensat00mach/page/6/mode/2up>
- Malagón, F., Ayala, M. M., & Sandoval, S. (2013). *Construcción de fenomenologías y procesos de formalización: un sentido para la enseñanza de las ciencias* (1st ed., Issue 1). Universidad Pedagógica Nacional.
- Maxwell, J. C. (1902). *Theory of Heat*. Longmans, Green, & CO.
- Mayoral de Lucas, J. V. (2007). Cómo ser un buen historicista: Thomas Kuhn y el Programa HPS de Princeton. *Daimon Revista Internacional De Filosofía*, 1, 113–119.
<https://revistas.um.es/daimon/article/view/120851>
- Moreno, A. (2006). ATOMISMO versus ENERGETISMO : Controversia científica a finales del siglo xix. *Historia y Epistemología de La Ciencias*, 24(3), 411–428.
- Nussbaum, M. C. (2010). *Sin fines de lucro. Por qué la democracia necesita de las humanidades* (M. V. Rodil, trad.). Katz Editores.
- Ordoñez, F. (1986). Introducción. In *Escritos de mecánica y termodinámica* (pp. 7–45). Alianza Editorial S.A.
- Orozco, J. C. (1999). *La teoría atómica y el debate sobre la estructura de la materia en las inmediaciones del siglo XIX*.
- Orozco, J. C. (2005). Atajos y desviaciones. Los estudios historico-críticos y la enseñanza de las ciencias. *Revista Tecné, Episteme y Didaxis, Extraordin(70)*.
- Perez Bustamante, J. A., & Hidalgo de Cisneros, J. L. (1989). Velocidades moleculares en sistemas gaseosos macroscopicos: Aclaración de errores. *Enseñanza de Las Ciencias*, 96(2), 72–76.
- Planck, M. (1909). Reversibilidad e Irreversibilidad. In (J. C. Orozco, trad.), *Eight lectures on Theoretical Physics*. Dover Publications, Inc.

- Planck, M. (1915). *Eight lectures on theoretical physics, delivered at Columbia University in 1909* (A. P. Wills (ed.)). Columbia University Press.
- Romero, A. E., & Ayala, M. M. (1996). La mecánica de Euler: ¿Una mecánica del continuo? *Física y Cultura: Cuadernos Sobre Historia y Enseñanza de Las Ciencias*, 3, 11–18.
- Russell, B. (1970). La revolución copernicana. *Revista de La Universidad Nacional (1944-1992)*, 5, 237–254. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/revistaun/article/download/11779/12461>
- Sánchez, J. S. (2016). *Una reflexión sobre el principio de equivalencia de las transformaciones para la enseñanza de la termodinámica*. Universidad Pedagógica Nacional.
- Stewart, I. (2003). *17 ecuaciones que cambiaron el mundo*. DRACONTOS. <https://doi.org/10.16309/j.cnki.issn.1007-1776.2003.03.004>
- Zarate, C. A. (2013). *Lo Continuo y lo Discreto, una discusión desde el movimiento browniano*. [Universidad Pedagógica Nacional]. <http://repository.pedagogica.edu.co/bitstream/handle/20.500.12209/2100/TE-16438.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

ANEXOS

Anexo 1. Síntesis de los antecedentes locales

Los antecedentes locales recogidos que aportan de manera provechosa al proyecto se organizan como sigue:

- *Un acercamiento a la equipartición de la energía para el modelo del cuerpo negro*, de **Jhon Wilson Calderón Devia**, 2014.

Se realiza una contextualización de los trabajos de Maxwell y Boltzmann, en términos de las velocidades de las moléculas de un gas monoatómico y diatómico, en donde por medio de grados de libertad, se modelan las propiedades macroscópicas, por ejemplo, la temperatura. Así, se presenta la problemática cuando se estudian los gases poliatómicos, cuyos datos experimentales no concordaban con la teoría, poniendo en discusión un pilar de la ciencia del siglo XIX, el cual es: “El teorema de equipartición de la energía”, el cual, por medio de discusiones impulsadas por Lorentz, debido a su malestar sobre los trabajos de Max Planck y su significado físico para la solución del modelo de cuerpo negro.

Resulta importante rescatar este trabajo de grado, ya que sitúa al lector en una sección del espacio y el tiempo determinada, donde se muestran los estudios, discusiones y problemáticas del contexto de producción, el cual, en concordancia con el presente proyecto, se reconoce la relación de la construcción de la ciencia y el contexto en donde son formalizadas, para brindar nuevas formas de enseñarla a estudiantes de cursos introductorios de física.

- *Una reflexión sobre el principio de equivalencia de las transformaciones para la enseñanza de la termodinámica*, de **Jessyca Susana Sánchez Forigua**, 2016

El trabajo tiene como objetivo, configurar aspectos que permitan ampliar su conocimiento acerca del principio de equivalencia de las transformaciones, entorno a los planteamientos

desarrollados por Carnot, Capleyron, Thomson, Joule, Mayer y Clausius; haciendo un análisis de corte histórico de los trabajos realizados por parte de este último. El cual es importante para el presente trabajo en el sentido metodológico, ya que presenta perspectivas sobre los diferentes papeles de la historia que pueden tener los maestros de ciencia, en su práctica docente.

- *Una Aproximación epistemológica al concepto entropía: un análisis a la transición de Clausius a Boltzmann, de Jhon Sebastián Hernández Aguilera. 2019*

El autor realiza un análisis histórico crítico del concepto de entropía, reconociendo que es un término de difícil comprensión. Haciendo una breve contextualización del estado de la termodinámica en la primera mitad del siglo XIX. Prosigue con establecer los puntos filosóficos comunes y divergentes de Clausius y Boltzmann entorno a la entropía, en el que concluye en que hubo un cambio de paradigma, de un autor respecto a otro.

Anexo 2. Deducción de la presión desde la teoría cinética de los gases de (Boltzmann, trad. en 1964, p. 30)

A partir de la ecuación (3) se tiene que:

Con $\Delta U \approx 0$, como un pequeño cambio de la velocidad del pistón, la ecuación (3) queda:

$$0 = -Pt + \sum \int_0^t q dt \quad (49)$$

$$P = \frac{1}{t} \sum \int_0^t q dt \quad (50)$$

La presión, es el valor medio de las pequeñas presiones debidas a las moléculas que chocan con el pistón.

De donde, las contribuciones de fuerza en cada momento del choque es la misma que el pistón ejerce sobre cada molécula y las hace rebotar elásticamente, cambiando la dirección de la velocidad, quedando

$$\int_0^t q dt = 2m\xi \quad (51)$$

$$P = \frac{2}{t} \sum m\xi \quad (52)$$

En este sentido, habrá una cantidad $n_i\Omega$ - moléculas cuya masa será m_i , con sus respectivas componentes de velocidad en el intervalo de tiempo t :

$$c_i^2 = \xi_i^2 + \eta_i^2 + \zeta_i^2 \quad (53)$$

Ya que no se puede garantizar que todas las moléculas tengan la misma velocidad.

Habrà un número dv de moléculas en un dt , con componente de velocidad ξ , en el eje de las abscisas. Que por proporcionalidad se tiene:

$$dv = n\Omega \quad (54)$$

$$dv = n\varphi\xi dt \quad (55)$$

Estas contribuyen a la presión, por el hecho de tener la velocidad que tienen en el momento justo para chocar con el pistón.

Donde, a esta relación se le conoce como fuerza por unidad de área. Es decir, la presión en unidades mecánicas:

$$p = \frac{P}{\varphi} = \sum n_k m_k \xi_k^2 \quad (56)$$

La cual es válida para todas las moléculas, al considerar que no viajan necesariamente, en la misma dirección.

Teniendo en cuenta que:

El valor medio de la variable g de una muestra tomada en una población es:

$$\bar{g} = \frac{\sum n_k g_k}{\sum n_k} \quad (57)$$

Con $\sum n_k = n$, que corresponde a el número total de moléculas, en el recipiente.

Se tiene, que:

$$p = \sum m_k \cdot n_k \xi_k^2 \quad (58)$$

Si todas las moléculas tienen la misma masa como condición necesaria²⁴, queda:

$$p = mn\bar{\xi}^2 \quad (59)$$

²⁴ Como hipótesis atómica, en relación con los trabajos realizados por Dalton, entorno a la naturaleza del agua en estado vapor en la atmósfera. Los cuales son base para el desarrollo de la teoría cinética, de acuerdo con (Orozco, 1999).

Ya que no hay nada que condicione una predilección en alguna componente de la velocidad, es esperable que:

$$\overline{\xi^2} = \overline{\eta^2} = \overline{\zeta^2} \quad (60)$$

$$\overline{c^2} = 3\overline{\xi^2} \quad (61)$$

Resultando:

$$\mathbf{p} = \frac{1}{3}\rho\overline{c^2} \quad q.e.d$$

Anexo 3. Leyes de Boyle Charles Avogadro (Boltzmann, trad. en 1964, p. 62)

En este sentido, las funciones $f = f(\xi, \eta, \zeta)$ y $F = F_1(\xi_1, \eta_1, \zeta_1)$ son pues:

$$f = ae^{-hmc^2} \quad (62)$$

$$F_1 = Ae^{-hm_1c_1^2} \quad (63)$$

Que son solución de la ecuación (7).

Así,

$$dn_c = f d\omega \quad (64)$$

Donde (14) representa el número de m - moléculas por unidad de volumen, cuyas velocidades están entre los límites c y $c + dc$ en la distribución de equilibrio. Se obtiene:

$$n_c = \int_0^{\infty} ae^{-hmc^2} 4\pi c^2 dc \quad (65)$$

Con $d\omega = 4\pi c^2 dc$; debido a que no existe una dirección en la que haya más moléculas con una determinada velocidad respecto a las otras, se considera la distribución por medio de una simetría isotrópica en el espacio de velocidades.

Se tiene luego:

$$n = a \cdot \sqrt{\frac{\pi^3}{h^3 m^3}} \quad (66)$$

Es decir,

$$f = n \sqrt{\frac{h^3 m^3}{\pi^3}} \cdot e^{-hmc^2} \quad (67)$$

Por otra parte,

$$F = n_1 \sqrt{\frac{h^3 m_1^3}{\pi^3}} \cdot e^{-hm_1 c_1^2} \quad (68)$$

son pues, la cantidad de m – moléculas y m_1 – moléculas por unidad de volumen respectivamente.

La expresión (14), queda de la forma:

$$dn_c = 4nc^2 \sqrt{\frac{h^3 m^3}{\pi}} \cdot e^{-hmc^2} dc \quad (69)$$

Multiplicando por c^2 en ambos lados de la expresión y dividiendo por $\int dn$ se obtiene:

$$\overline{c^2} = \frac{\int_0^\infty c^2 dn_c}{\int_0^\infty dn_c} = \frac{3}{2hm} \quad (70)$$

Donde $\overline{c^2}$, es el valor de la velocidad cuadrática media de las moléculas.

Por otra parte, se tiene que:

$$\bar{c} = \frac{\int_0^\infty c \cdot dn_c}{\int_0^\infty dn_c} = \frac{2}{\sqrt{8\pi hm}} \quad (71)$$

Donde \bar{c} , representa el valor de la velocidad media de las moléculas cuya velocidad esté entre c y $c + dc$.

La razón entre $\overline{c^2}$ y $(\bar{c})^2$ es, en el equilibrio térmico:

$$\frac{\overline{c^2}}{(\bar{c})^2} = \frac{3\pi}{8} \quad (72)$$

De la velocidad cuadrática media se tiene que:

$$\frac{\overline{c^2}}{3} = \frac{1}{2hm} \quad (73)$$

Y para las m_1 - moléculas es también válida la expresión anterior; es decir, para la *mezcla* de gases con independencia de sus densidades, se tiene que:

$$\frac{\overline{c_1^2}}{3} = \frac{1}{2hm_1} \quad (74)$$

Con h igual para los dos gases, se tiene:

$$m\overline{c^2} = m_1\overline{c_1^2} \quad (75)$$

Es decir, en el equilibrio térmico, una molécula del gas m tiene la misma energía cinética media que una molécula del gas m_1 . Por otra parte, si estos dos gases se separan por una frontera que permita la conducción de calor, aun cuando tengan diferentes densidades. Estos se encuentran a la misma temperatura. Así, la temperatura del gas, debe ser función de la energía cinética media de las moléculas.

Si, además, están a la misma presión (4), la expresión de equivalencia, que relaciona a los dos gases es:

$$\rho = \rho_1 \quad (76)$$

$$\rho = nm \quad (77)$$

$$\rho_1 = n_1m_1 \quad (78)$$

De la expresión (76), queda:

$$n = n_1 \quad (79)$$

Es decir, el número de moléculas por unidad de volumen n y n_1 para los dos gases, es el mismo. Esta es, la **ley de Avogadro**²⁵

Por otra parte, si m es la misma para los dos gases, a la misma temperatura, la presión y la densidad son directamente proporcionales, $p_1 \propto \rho_1$ y $p \propto \rho$, esta es la **Ley de Boyle – Marriotte**.

Se sabe que para el gas normal, se cumple la siguiente relación.

$$P = P \frac{\overline{C^2}}{3} \quad (80)$$

Que, a densidad constante, la relación de presión y temperatura es proporcional; por tanto, la temperatura es proporcional a $\overline{C^2}$. Esta relación se denota por:

$$\overline{C^2} = 3RT \quad (81)$$

Con R , como constante independiente de la densidad; es decir, a diferentes densidades, a una temperatura dada, para el gas normal, el valor de $\overline{C^2}$ es el mismo.

Así, la ecuación de presión queda:

$$P = RPT \quad (82)$$

Así para otro gas a la misma temperatura, se tiene que:

$$m\overline{c^2} = M\overline{C^2} \quad (83)$$

²⁵ Este resultado es importante, ya que para la termodinámica general esta es una definición, mientras que en la teoría cinética de los gases, es como se ve, una consecuencia necesaria, sobre esto (Planck, 1915, p. 52) muestra la situación de la física teórica a principios del siglo XX.

$$\overline{c^2} = 3 \frac{M}{m} RT = \frac{3RT}{\mu} \quad (84)$$

Con $\mu = \frac{m}{M}$, es la relación de las masas moleculares de un gas con el gas normal, llamado peso molecular.

$$p = \frac{R}{\mu} \rho T = r \rho T \quad q.e.d$$

Donde r corresponde a una constante que depende del gas en consideración y es inversamente proporcional al peso molecular.

Así estos elementos se relacionan de tal forma, que se concluye que la expresión anterior corresponde a la **ley de Boyle-Charles-Avogadro**.

Anexo 4. Deducción de la entropía como ley de probabilidad y el significado físico de H

A partir de la ecuación:

$$dQ_1 = dQ_2 + dQ_3 \quad (85)$$

$$dQ_3 = \beta dQ_2 \quad (86)$$

donde β depende de la temperatura, para gases poliatómicos equivale a la unidad, para gases diatómicos $\beta = \frac{2}{3}$ y para los monoatómicos $\beta = 0$.

Por otra parte,

$$dQ_2 \propto \frac{nm\Omega}{2} \overline{c^2} \quad (87)$$

Donde $n\Omega$ es la cantidad de moléculas en un volumen Ω , con $k = nm\Omega = \rho\Omega$, como la masa total del gas, que además no cambia, queda:

$$dQ_2 = \frac{k}{2} d\overline{c^2} \quad (88)$$

Diferenciando (84) se tiene,

$$d\overline{c^2} = \frac{3R}{\mu} dT \quad (89)$$

Según (27) el movimiento intramolecular es:

$$dQ_3 = \frac{3kR}{2\mu} \beta dT \quad (90)$$

Se sigue,

$$dQ_1 = \frac{3kR}{2\mu} (\beta + 1) dT \quad (91)$$

El trabajo externo dQ_4 medido en unidades mecánicas es:

$$dQ_4 = \mathbf{p} * d\Omega \quad (92)$$

$$d\Omega = kd \left(\frac{1}{\rho} \right) \quad (93)$$

Como

$$\frac{1}{\rho} = \frac{R}{\mu} \cdot \frac{T}{\mathbf{p}} \quad (94)$$

$$dQ_4 = \frac{Rkp}{\mu} d \left(\frac{T}{\mathbf{p}} \right) \quad (95)$$

Y a su vez,

$$dQ_4 = \frac{Rk\rho}{\mu} T d \left(\frac{1}{\rho} \right) \quad (96)$$

A modo de reconstrucción y cohesión de los términos expuestos anteriormente, dQ se expresa de dos formas, según sea el proceso térmico:

$$dQ = dQ_1 + dQ_4 \quad (97)$$

$$dQ = \frac{3kR}{2\mu} (\beta + 1) dT + \frac{Rkp}{\mu} d \left(\frac{T}{\mathbf{p}} \right) \quad (98)$$

Y bajo condiciones de cómo se desarrolla esta contribución de calor (*naturaleza del proceso*), se tiene también que:

$$dQ = \frac{3kR}{2\mu} (\beta + 1) dT + \frac{Rk\rho T}{\mu} d \left(\frac{1}{\rho} \right) \quad (99)$$

Según validez de:

$$p \cdot d \left(\frac{T}{p} \right) = \rho T d \left(\frac{1}{\rho} \right) \quad (100)$$

Si el volumen es constante, $d\Omega = k \cdot d\left(\frac{1}{\rho}\right) = 0$.

$$dQ_v = \frac{3kR}{2\mu}(\beta + 1)dT \quad (101)$$

Si se define como el calor específico, a la cantidad de calor agregado por unidad de masa y de temperatura, para aumentar la temperatura un grado (temperatura absoluta), resulta que para volumen constante es:

$$\gamma_v = \frac{dQ_v}{kdT} = \frac{3R}{2\mu}(\beta + 1) \quad (102)$$

Ahora, si la presión es la que permanece constante se tiene que:

$$dQ_p = \frac{kR}{2\mu}(3(\beta + 1) + 2)dT \quad (103)$$

Cuyo calor específico corresponde a:

$$\gamma_p = \frac{dQ_p}{kdT} = \frac{R}{2\mu}(3(\beta + 1) + 2) \quad (104)$$

Los calores específicos como se puede notar son función de $\beta(T)$, ya que los otros términos son constantes, resulta pues, que este término tiene en cuenta el movimiento intramolecular de los átomos, la diferencia de los calores específicos es siempre la misma para un valor fijo de $\beta(T)$, es decir:

$$\gamma_p - \gamma_v = \frac{R}{2\mu}(3(\beta + 1) + 2) - \frac{3R}{2\mu}(\beta + 1) \quad (105)$$

$$\gamma_p - \gamma_v = \frac{R}{\mu} = r \quad (106)$$

Donde se ve qué:

$$\mu(\gamma_p - \gamma_v) = R \quad (107)$$

Por otra parte, la proporción en la que están los calores específicos es:

$$\kappa = \frac{\gamma_p}{\gamma_v} = 1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{(\beta + 1)} \quad (108)$$

De acuerdo con lo anterior, se tiene que los calores específicos en función de κ , son respectivamente:

$$\gamma_p = \frac{\kappa r}{\kappa - 1} \quad (109)$$

$$\gamma_v = \frac{r}{\kappa - 1} \quad (110)$$

Donde, si se considera la analogía mecánica de esferas que chocan unas con otras elásticamente, relación válida para un gas monoatómico $\beta = 0$, luego κ es:

$$\kappa = 1 + \frac{2}{3} \quad (111)$$

En relación con el calor suministrado, si bien no se trata de un diferencial completo sino de una variación que depende del proceso, se tiene que:

$$\int \frac{\delta Q}{T} = \frac{Rk}{\mu} \left[\frac{3}{2} (1 + \beta) \int \frac{dT}{T} + \int \rho d \left(\frac{1}{\rho} \right) \right] \quad (112)$$

$$\int \frac{\delta Q}{T} = \frac{Rk}{\mu} \left[\frac{3}{2} (1 + \beta) \ln T + \ln \frac{1}{\rho} + C \right] \quad (113)$$

$$\int \frac{\delta Q}{T} = \frac{Rk}{\mu} \cdot \ln \left(\frac{T^{\frac{3}{2}(\beta+1)}}{\rho} \right) + C \quad (114)$$

La expresión anterior corresponde a la entropía de un gas, la cual había sido planteada por Clausius, en favor de los trabajos previos de Carnot, que atribuía al estudio del calor, como sustancia para la termodinámica general (hechos bien comprobados por la fenomenología) y como movimiento para la termodinámica especial.

Luego, la entropía tiene un carácter de magnitud extensiva, ya que, sea propuesto un recipiente con varios gases separados por contenedores, así la cantidad total de calor es la suma de

las cantidades de calor que fueron agregadas a cada gas, aún si están a la misma temperatura o no, la entropía es igual a la suma de las entropías por separado de cada gas. Esto es claro, debido a la relación de Clausius; ahora si varios gases son mezclados en un contenedor de volumen Ω cuyas masas, densidades y presiones se diferencian son subíndice numérico para el gas i -ésimo, son respectivamente: $(k_1, k_2, k_3, \dots, \rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, p_1, p_2, p_3, \dots)$, la energía molecular es la suma de las energías de cada gas que compone la mezcla, luego la entropía total en términos de las sumas con el diferencial de calor, se tiene:

$$\Delta S = \int \frac{\delta Q}{T} = R \sum \frac{k}{\mu} \cdot \ln \left(\frac{T^{\frac{3}{2}(\beta+1)}}{\rho} \right) + C \quad (115)$$

Por otra parte, para el caso de $\kappa = 1\frac{2}{3}$ de (43), se tiene que la expresión (7) que para el estado estacionario caracterizado por la ecuación (16) se halla que:

$$H = \ln a \int f d\omega - hm \int c^2 f d\omega \quad (116)$$

$$h = \frac{1}{2RMT} \quad (117)$$

Procediendo, teniendo en cuenta la ecuación (66):

$$\mathbf{H} = n \left(\ln a - \frac{3}{2} \right) \quad (118)$$

Resulta obviando ciertas constantes, que \mathbf{H} se expresa de la forma:

$$\mathbf{H} = n \cdot \ln \left(\rho^{-1} T^{\frac{3}{2}} \right) \quad (119)$$

$$\ln \mathbf{W} = - \sum \Omega H = - \sum \Omega n \ln \left(\rho T^{-\frac{3}{2}} \right) \quad (120)$$

$$RM \ln \mathbf{W} = R \sum \frac{k}{\mu} \ln \left(\rho^{-1} T^{\frac{3}{2}} \right) \quad q.e.d$$