

REFLEXIONES EN TORNO AL PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA DE LAS
TRANSFORMACIONES Y EL CONCEPTO DE ENTROPÍA PARA LA
ENSEÑANZA DE LA TERMODINÁMICA

PRESENTADO POR: DANIELA CAMARGO ROMERO

ASESOR: JUAN CARLOS CASTILLO AYALA

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS DESDE UNA
PERSPECTIVA CULTURAL

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
LICENCIATURA EN FÍSICA

2022

REFLEXIONES EN TORNO AL PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA DE LAS
TRANSFORMACIONES Y EL CONCEPTO DE ENTROPÍA PARA LA
ENSEÑANZA DE LA TERMODINÁMICA

TRABAJO DE GRADO PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADO EN FÍSICA

PRESENTADO POR: DANIELA CAMARGO ROMERO

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS DESDE UNA
PERSPECTIVA CULTURAL

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
LICENCIATURA EN FÍSICA

2022

Agradecimientos

A Dios por darme las fuerzas necesarias para la
culminación de este trabajo investigativo.

A mis padres Nohora y Gabriel por haberme dado la vida.

Al gran amor de mi vida Diego Molano,
porque sin sus palabras y las circunstancias nada de esto estaría escrito,
y al querido profesor Juan Carlos Castillo
por creer en mí durante todos estos años
y hasta el último minuto.

“El temor de Jehová es el principio de la sabiduría,

Y el conocimiento del Santísimo es la inteligencia.

Porque por mí se aumentarán tus días,

Y años de vida se te añadirán.

Si fueres sabio, para ti lo serás;

Y si fueres escarnecedor, pagarás tu solo”.

Proverbios 9: 10-12

Tabla de contenido

<u>INTRODUCCIÓN</u>	5
<u>PLANTEAMIENTO Y UBICACIÓN DEL PROBLEMA</u>	7
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
OBJETIVOS	9
OBJETIVO GENERAL	9
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
JUSTIFICACIÓN	9
ANTECEDENTES	10
MARCO TEÓRICO	14
METODOLOGÍA	14
<u>LA MÁQUINA TÉRMICA Y EL PRINCIPIO DE CARNOT</u>	16
QUÉ ES UNA MÁQUINA TÉRMICA	16
CARNOT Y LA POTENCIA MOTRIZ DEL FUEGO	19
PRINCIPIO DE CARNOT	21
<u>DEL PRINCIPIO DE CARNOT A LA SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA</u>	24
¿EL PRICIPIO DE CARNOT ES UNA LEY DE LANATURALEZA?	24
EL PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA DE LAS TRANSFORMACIONES Y LA ENTROPÍA	28
<u>ALGUNAS CONSIDERACIONES PARA LA ENSEÑANZA DE LA TERMODINÁMICA</u>	31
<u>CONCLUSIONES</u>	34
<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	36

INTRODUCCIÓN

Este trabajo se encuentra situado en el marco del análisis, una serie de reflexiones y horas de diálogo con los autores en torno a los planteamientos de Carnot en relación con las máquinas térmicas, que conllevaron a la configuración del principio de Carnot, y las búsquedas por tratar de entender por qué existen leyes universales bajo las cuales se rige el universo y por qué no es un simple asunto de aleatoriedad, más allá de entender que existe un orden privilegiado en el que se dan los procesos termodinámicos y que esto lleva a su vez al planteamiento de la segunda ley de la termodinámica, por consiguiente al concepto de entropía.

En segundo lugar, se hace un esfuerzo enorme por poner sobre la mesa los elementos que están a la base del desarrollo del concepto de potencia motriz del fuego y el papel que juega en la configuración de elementos teóricos sobre el principio de Carnot, y su relación con la configuración la segunda ley de la termodinámica, y el papel que cumpliría en la enseñanza de la Termodinámica. De igual forma, al final del trabajo investigativo se hace hincapié en por qué es sumamente relevante partir de este problema de conocimiento, ir a los contextos de producción de conocimiento particularmente de la historia y desarrollo de la Termodinámica como disciplina, y porqué la segunda ley de la termodinámica se convierte en un problema de conocimiento para hablar de una de las leyes fundamentales de la naturaleza.

Posterior a esto, y en relación con las situaciones problemáticas de estudio planteadas en el tercer capítulo, se centran unas búsquedas básicas, digamos así, por comprender acerca de la importancia de hablar de la entropía como medida de la transformación y no sobre “la medida del desorden” como suele llamársele de manera errónea comúnmente; además sobre si existe un vínculo con la segunda ley de la termodinámica y si, a su vez este tiene algún tipo de relación con el trabajo de Carnot, bien sabido documentado por Clapeyron.

Se evidencia desde luego, un esfuerzo personal por intentar entender qué hay detrás y cuáles eran los conocimientos y los cuestionamientos a la base del principio de equivalencia de las transformaciones que dieron paso a la construcción del concepto de

Entropía, todo esto relacionado con el trabajo de documentación que Clapeyron hace a su vez del trabajo de Clausius.

Surge entonces la necesidad de responder preguntas como, por ejemplo, si todo lo mencionado anteriormente es tan importante a la hora de abordar una clase de termodinámica de educación media, o ¿cómo es posible abordar la información de los libros de texto convencionales cuando hay todo un asunto de construcción de conocimiento a la base del concepto de Entropía, que va incluso más allá de los razonamientos que surgieron a partir del análisis de la máquina térmica?

Se plantean reflexiones constantes con relación a la existencia de leyes fundamentales bajo las cuales se rige la naturaleza, y no se trata sólo de entender que se rigen bajo leyes cualquiera sino, que existe un orden y no es como se mencionaba al inicio, un asunto de aleatoriedad. Surge la necesidad de pensar los fenómenos físicos asociados a la teoría del calor, pero también a ir a los contextos de producción de conocimiento y ver los fenómenos culturales, sociales y políticos a la base de las teorías de construcción de conocimiento. Yendo desde las antiguas sociedades agrícolas y las necesidades capitalistas de una revolución agrícola, provocando el aumento de producción y transporte de la mercancía, conlleva a la necesidad de desarrollar maquinarias que le permitieran al hombre desplazar su fuerza a las máquinas, a sentar lo que hoy día se conoce como la segunda ley de la termodinámica.

El presente documento puede no reflejarlo, pero si es una lucha gigante por hacer una lectura de años de algunos de los trabajos investigativos situados en el campo de la enseñanza de la termodinámica, en el marco del desarrollo de la línea de investigación Cultural del Departamento de Física de la Universidad Pedagógica Nacional, en dónde se hace evidente la importancia de la historia y la filosofía de las ciencias como base para la construcción de significados y explicaciones, cosa que a su vez ha permitido un espacio que da lugar a la construcción de una serie de configuraciones de propuestas de enseñanza, en torno a problemáticas que dieron origen a los productos del quehacer científico.

CAPITULO 1

PLANTEAMIENTO Y UBICACIÓN DEL PROBLEMA

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La irreversibilidad y la entropía están relacionadas con el principio de equivalencia de las transformaciones (Sánchez Forigua, 2016), el cual surge de la necesidad de establecer una formalización relacionada con la medida de la transformación en los procesos termodinámicos, es decir que se trata de establecer el efecto neto-transformación-en relación con la causa-acción- involucrada en procesos, generalmente cíclicos, de tal forma, que si el proceso es reversible la transformación en el ciclo esté compensada, pero si el ciclo es irreversible la transformación da cuenta de cuan irreversible es el ciclo. En este orden de ideas, el principio de equivalencia de las transformaciones es un principio que establece las condiciones en las cuales un proceso es posible, ya que pone una condición adicional al principio de conservación de la energía, al igual que el principio de conservación de momentum, momentum angular complementa la conservación de la energía en los casos mecánicos.

El principio de equivalencia de las transformaciones se refiere a la medición del efecto, además establece una magnitud con la cual es posible dar cuenta de la medida de la transformación, que es la entropía. Ahora bien, para el caso de los procesos reversibles hay una compensación perfecta en las transformaciones que se da en un ciclo por lo cual la variación de la entropía es cero, mientras que para el caso de procesos irreversibles las transformaciones no se compensan y por lo tanto la variación de la entropía en el ciclo es diferente de cero (Castillo Ayala J. C., 2019). En ese sentido, el presente documento pretende abordar la relación entre la entropía y el principio de equivalencia de las transformaciones, que está relacionado con la sistematización teórica que hace Clausius en relación con los procesos termodinámicos y que llevan al planteamiento de la segunda ley de la termodinámica con la finalidad de aportar elementos para la construcción de rutas para la enseñanza de la Termodinámica situando los problemas de conocimiento a los contextos culturales en los cuales se originan.

Por otro lado, la manera como es abordada la explicación de los procesos termodinámicos

comúnmente se hace mediante la definición muy sintética de algunas magnitudes como la energía, el calor y la entropía, esta última asociándola con la medida del desorden del sistema, sin que esta definición se relacione con los procesos termodinámicos; así, la entropía no se presenta vinculada directamente con un principio físico, aunque se menciona que tiene que ver con la segunda ley de la termodinámica, simplemente es presentada como una magnitud muy extraña que no explica cosa en relación con los procesos termodinámicos.

Desde el ámbito de la enseñanza de la ciencia, ¿cómo se puede hablar de la termodinámica y de la entropía como problema de un ámbito para la enseñanza de la física? Es decir, si la entropía y la termodinámica son lugares teóricos o temáticas para abordar la enseñanza de la física ¿qué proponen los textos?, Si bien es cierto que existen unos contextos de producción del desarrollo de la segunda ley de la Termodinámica muy relacionado con los planteamientos de Carnot, ¿existe una íntima relación de estos con el desarrollo de la segunda ley de la Termodinámica y la construcción del concepto de entropía?, ¿qué se ha dicho en relación con la enseñanza de la entropía y porqué es importante investigarla para la enseñanza de la física?

En ese sentido se vuelve importante reconocer la historia de las ciencias en relación con poder dar cuenta de los problemas y los fenómenos físicos en los contextos de desarrollo de la Termodinámica, situados en la urgencia de analizar el trabajo de Carnot que conllevan al tan importante planteamiento de la segunda ley de la Termodinámica, así como revisar los orígenes del principio de equivalencia de las transformaciones y la entropía.

Lo anterior permite plantear la siguiente pregunta como orientación del problema a investigar: *¿Qué problemáticas están a la base del Principio de Carnot y la segunda ley de la Termodinámica con relación a la configuración del Principio de equivalencia de las transformaciones y del concepto de entropía, y que situaciones de estudio posibilitan abordarlo para la enseñanza de la termodinámica?*

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Realizar un no tan exhaustivo estudio de corte histórico de algunos trabajos sobre Carnot y Clausius, acerca del Principio de Carnot y la segunda ley de la Termodinámica en relación con la configuración del Principio de equivalencia de las transformaciones y cómo éste está relacionado a su vez con el concepto de entropía, con el fin de aportar elementos para la configuración de propuestas de enseñanza de la termodinámica en la educación básica.

Objetivos específicos

- Identificar las problemáticas y debates en relación con el funcionamiento de la máquina térmica que están a la base del principio de Carnot y la segunda ley de la termodinámica.
- Reconocer las discusiones en relación con los procesos termodinámicos que están a la base del trabajo de Clausius sobre el principio de equivalencia de las transformaciones.
- Realizar una reflexión sobre los análisis que están a la base del principio de equivalencia de las transformaciones y el concepto de entropía con el fin de configurar posibles problemáticas y situaciones de estudio para la enseñanza de la termodinámica.

JUSTIFICACIÓN

¿Qué problemáticas y fenómenos están relacionados con la configuración teórica del principio de equivalencia de las transformaciones y el concepto de entropía que permitan establecer situaciones de estudio para la enseñanza de la termodinámica? El trabajo tiene un interés relacionado en pensar en que cuando se abordan los problemas de la enseñanza de la física aparece el maestro que debe desarrollar criterios disciplinares para generar propuestas de la enseñanza de la física. En este ámbito, los análisis que acuden a la historia del desarrollo de la física y los análisis de corte conceptual para la enseñanza se vuelven importantes como elementos para la construcción de criterios para las propuestas de enseñanza de la física y dar un sentido a la enseñanza de la física, dado que permite construir unos elementos constitutivos a esas propuestas de enseñanza, que por supuesto

permiten ir a la física y pensarla.

Desde el ámbito de la enseñanza en términos de lo que se ha investigado sobre el principio de equivalencia de las transformaciones y el concepto de entropía y aterrizado en un análisis histórico, realizar un estudio desde una perspectiva histórica permiten elaborar y poner de relieve concepciones de mundo, formas de abordar, problemas centrales y sistemas conceptuales en torno a los fenómenos analizados, así como destacar la fenomenología que es compatible con cada planteamiento teórico. El análisis de éstos a su vez es una fuente de elementos para proponer estructuraciones de la disciplina que respondan a las condiciones cognitivas de los estudiantes, así como a los desarrollos disciplinares, y que permitan hacer evidentes los nexos con los esquemas del conocimiento común. (Ayala Manrique, 2006, pág. 29)

ANTECEDENTES

La naturaleza del trabajo acude a unas necesidades teóricas y metodológicas que están orientadas hacia la revisión, el análisis y la reflexión de algunas de las investigaciones sobre los procesos y funcionamiento de las máquinas térmicas, el principio de Carnot y el planteamiento de la segunda ley de la Termodinámica que le permiten a Clausius construir una serie de reflexiones que llevan a la construcción de un pensamiento profundo sobre un principio de equivalencia de las transformaciones, y el “elemento” que permitiría medir la transformación de los procesos termodinámicos, es decir, la entropía, aterrizadas en un análisis que permitan abordar los problemas en contextos de la enseñanza de la Termodinámica y el concepto de la entropía que en la mayoría de ocasiones se presenta totalmente descontextualizada.

A su vez estos documentos hacen parte de la consolidación del trabajo investigativo en la medida en que aportan una serie de elementos teóricos, conceptuales, metodológicos y disciplinares. En general, estos aportes permiten realizar una serie de análisis y reflexiones que permiten llevar a cabo la sistematización de análisis y la construcción del informe de investigación. El material bibliográfico revisado en torno al principio de Carnot, la segunda ley de la Termodinámica y su relación con el principio de equivalencia de las transformaciones y el concepto de entropía se presentan en la Tabla No. 1.

Tabla No. 1. Investigaciones a nivel local

Trabajo de grado	Descripción	Aporte al proyecto
<p data-bbox="181 443 499 584">“Significado físico de la entropía en la enseñanza de la termodinámica”</p> <p data-bbox="181 663 499 913">Derlly Beltrán Garzón, (2009) Tesis de pregrado. Universidad Pedagógica Nacional.</p>	<p data-bbox="547 360 1046 1003">El trabajo es un estudio del concepto de entropía que hace una organización conceptual respecto al significado que tiene la misma en el contexto termodinámico. Se hace un recorrido histórico de los orígenes del concepto y se desarrollan los aspectos metodológicos como una herramienta para el establecimiento del diálogo crítico y permanente sobre la acción en el aula, finalizando con la sistematización de experiencias.</p>	<p data-bbox="1094 499 1444 857">El trabajo es un referente teórico dado que permite identificar algunas problemáticas en relación con el concepto de entropía en el contexto termodinámico.</p>
<p data-bbox="181 1106 499 1301">“Equilibración térmica y flujo de calor: Un análisis para la enseñanza de la termodinámica”</p> <p data-bbox="181 1379 499 1686">Ana María Sarmiento Bohórquez, (2010) Tesis de pregrado. Universidad Pedagógica Nacional.</p>	<p data-bbox="547 1023 1046 1771">Parte del análisis sobre la enseñanza de la termodinámica en la construcción conceptual de equilibración térmica y flujos de calor y su relación. Del estudio de esta relación nace el concepto de entropía, el cual es asociado a la irreversibilidad de los procesos que ocurren en la naturaleza. Usa el estudio de antecedentes y resultados de la investigación y práctica docente como metodología para delimitar el problema en termodinámica respecto a tales conceptos.</p>	<p data-bbox="1094 1189 1444 1608">Este trabajo es una base teórica debido a las reflexiones construidas en torno a la equilibración térmica y flujos de calor, y la relación con la irreversibilidad de los procesos termodinámicos.</p>

<p>“Reflexiones sobre la entropía para la enseñanza de la termodinámica”</p> <p>Jessyca Susana Sánchez Forigua, (2012)</p> <p>Tesis de pregrado. Universidad Pedagógica Nacional.</p>	<p>El trabajo explora los orígenes del concepto de entropía y las problemáticas que fundamentaron el concepto, construyéndolo y haciendo una representación matemática del mismo, exponiendo la íntima relación entre los efectos de las transformaciones y la definición del concepto de entropía como magnitud física.</p>	<p>El documento permite identificar algunas de las problemáticas en torno a la relación del concepto de entropía y los efectos de las transformaciones, que están a la base del trabajo de Clausius.</p>
<p>“Análisis de los procesos de equilibración en la máquina térmica: Una alternativa para introducir el concepto de irreversibilidad en la enseñanza de la segunda ley de la termodinámica”</p> <p>July Milena Velandia Garzón y Néstor Andrés Ibáñez Cañón, (2015)</p> <p>Tesis de pregrado. Universidad Pedagógica Nacional.</p>	<p>El trabajo lleva a cabo una exploración acerca de los factores y consideraciones que posibilitaron la conceptualización de la irreversibilidad, haciendo uso de la historia de las ciencias para rescatar las ideas y aspectos relevantes que hicieron posible la distinción entre procesos irreversibles e irreversibles y la necesidad de dar cuenta de la transformación de la energía útil en energía inútil en la introducción del concepto de entropía mediante la segunda ley de la termodinámica.</p>	<p>Es un referente teórico debido al análisis que el trabajo realiza en torno a los elementos que posibilitaron la conceptualización de la idea de irreversibilidad. En ese sentido, el trabajo es importante para rescatar los aspectos relevantes en torno a la construcción de la relación entre el concepto de entropía y el principio de equivalencia de las transformaciones.</p>

<p>“Una reflexión sobre el principio de equivalencia de las transformaciones para la enseñanza de la termodinámica”</p> <p>Jessyca Susana Sánchez Forigua, (2016) Tesis de posgrado. Universidad Pedagógica Nacional.</p>	<p>Es una reflexión de corte histórico sobre el principio de equivalencia de las transformaciones y las problemáticas que lo configuraron desde los planteamientos de Carnot, Clapeyron, Thomson, Joule y Clausius.</p>	<p>Su pertinencia conceptual y metodológica respecto a las reflexiones en torno al principio de equivalencia de las transformaciones en este caso es importante, pues pone a la base unos elementos que permiten llevar a cabo una reflexión de la relación del principio de equivalencia de las transformaciones con el concepto de entropía para la enseñanza de la termodinámica.</p>
<p>“Reflexiones en torno a la configuración del concepto de entropía: Un análisis para la enseñanza de la entropía”</p> <p>Germán Andrés Cuellar Estévez, (2017) Tesis de pregrado. Universidad Pedagógica Nacional.</p>	<p>Este trabajo formula algunos criterios de enseñanza que configuran una ruta de enseñanza del concepto de entropía partiendo del problema ligado a la enseñanza de dicho concepto en la educación media y media vocacional, por medio de la recontextualización de saberes. El trabajo hace un abordaje conceptual desde los antecedentes del concepto de entropía y lleva a cabo un análisis de los ciclos termodinámicos de transformación de trabajo en calor y viceversa y el principio de conservación de las transformaciones de Clausius.</p>	<p>Es un referente conceptual y metodológico pues aborda elementos que permiten hacer un análisis del problema ligado a la enseñanza de la entropía, lo que posibilita formular criterios de enseñanza para configurar una ruta en torno a la enseñanza de dicho concepto.</p>

Acudir a los antecedentes permite además de hacer un barrido histórico, conceptual y teórico, llevar a cabo una serie de reflexiones no tan rigurosas ni extensas de los problemas de conocimiento situados en unos contextos históricos específicos,

permitiendo así mismo llevar procesos de comprensión de los fenómenos físicos, es decir, de los sistemas térmicos, como es el caso del funcionamiento de las máquinas térmicas, lo que permite entender el orden en que se dan los procesos térmicos que van más allá de pensar en una naturaleza aleatoria y si en reflexionar en una naturaleza de orden que obedece a unas leyes universales, totalmente ligado al concepto de entropía.

En la medida en que los antecedentes configuran una ruta que guía la exploración y construcción del contenido teórico del presente trabajo de investigación, se vuelven importantes al plantear una serie de caminos del conocimiento y de historia que incitan a pensar los problemas de conocimiento de la física anclados a los problemas de la enseñanza de las ciencias, brindando así la formulación de propuestas de construcción de situaciones de estudio para la enseñanza de la Termodinámica, muy pertinentes por cierto.

MARCO TEÓRICO

Los elementos teóricos presentes en el desarrollo del trabajo investigativo se encuentran situados en aspectos históricos del desarrollo de las máquinas térmicas, su perfeccionamiento y la preocupación que llevó a Carnot a pensar en torno a su funcionamiento, lo que lo llevó a la construcción del concepto del calórico y la potencia motriz del fuego. Pasando, además, por los procesos cíclicos y el contexto que conllevó a la concepción de la segunda ley de la termodinámica, permitieron la decantación del principio de equivalencia de las transformaciones y la relación con el concepto de entropía.

METODOLOGÍA

La metodología está orientada a un análisis de corte histórico-crítico con un enfoque de corte conceptual, lo que pretende desarrollar el trabajo desde una perspectiva de recontextualización de saberes. Un análisis de corte histórico permite, como lo menciona (Castillo Ayala J. , 2016) usar la historia de las ciencias en la enseñanza de las mismas como proveedora de condiciones para que tanto el estudiante como el maestro se puedan involucrar en los diferentes procesos de recontextualización de saberes, de manera tal que la recontextualización posibilite de manera determinante la configuración de problemáticas, construcción de fenómenos y estructuración de explicaciones; y se constituyan espacios propicios para producir conocimiento de la misma forma que la

investigación científica produce también.

Por otro lado, en relación con la física “la recontextualización de saberes es entonces una actividad constructiva y dialógica en busca de elementos para la elaboración o solución de un problema o la construcción de una imagen de una clase de fenómenos, que depende inevitablemente de los intereses, conocimiento y experiencia de quienes la realizan. La generación de tales condiciones implica hacer consideraciones de diferente índole: en relación al entorno social y cultural del país; en relación al espacio escolar; en relación al desarrollo del conocimiento individual” (Ayala Manrique, 2006, pág. 28).

Del mismo modo, los estudios histórico-críticos son procesos de recontextualización de saberes científicos, que buscan establecer “un *diálogo* con los autores a través de los escritos analizados, con miras, a construir una estructuración particular de la clase de fenómenos abordados y una nueva mirada que permita ver viejos problemas con nuevos ojos” (Ayala Manrique, 2006, pág. 29).

CAPITULO 2

LA MÁQUINA TÉRMICA Y EL PRINCIPIO DE CARNOT

Para el desarrollo del trabajo se hace necesario revisar algunos aspectos teóricos de la teoría de la termodinámica, como la termodinámica de los procesos, las máquinas térmicas, los procesos cíclicos y la segunda ley de la termodinámica. Dichos elementos son parámetros conceptuales y teóricos para realizar un estudio acerca del principio de equivalencia de las transformaciones y la relación con el concepto de entropía. Estos aspectos permiten pensar cuales son las situaciones de estudio, fenómenos o problemas de conocimiento pertinentes o posibles hacer una configuración conceptual del principio de equivalencia de las transformaciones y de la entropía como magnitud termodinámica para la enseñanza de la física.

Se suele pensar en la existencia de un vínculo íntimo entre la ciencia y la tecnología y que, fruto de éste proviene el quehacer científico, a su vez se encuentra vinculado con los productos que resultan de la actividad científica; sin embargo, las máquinas térmicas son prueba de que no siempre fue así. Éstas fueron “piezas clave” en el desarrollo científico y tecnológico, llegando a solucionar no sólo algunas de las necesidades económicas, políticas y sociales de la época (de la revolución industrial), sino también consolidando la termodinámica como una ciencia física ya que a través de extensos análisis alrededor de la máquina térmica se logra plantear una termodinámica basada en principios o leyes de la naturaleza y no solamente leyes experimentales.

QUÉ ES UNA MÁQUINA TÉRMICA

La máquina térmica se constituyó en un avance importante en relación con los medios de producción y de transporte ya que no solamente logró substituir la fuerza de los animales e incluso la mano de obra del hombre, sino generar mayor efectividad en tanto la cantidad y la rapidez de producción como el transporte, aspecto que fue crucial para la revolución industrial. Artefactos como productos de las épocas consiguieron generar impactos dentro de los medios de producción industrial y de conocimiento, muy relacionado no con un

asunto de curiosidad sino con unas necesidades propias de los momentos históricos y de los contextos sociales y culturales, dando como resultado grandes avances importantes que conllevaron grandes transformaciones en las ideas (Sánchez Forigua J. , 2016, pág. 27)

En ese sentido, un aspecto importante a poner de presente es que los procesos de comprensión acerca del funcionamiento de la máquina térmica con el fin de mejorarla y de hacerla más eficaz para su uso práctico se constituyeron también en un avance en relación con la constitución de la ciencia física que en su momento se conocía como la mecánica del calor, hoy en día Termodinámica, ya que a través de estos procesos fue posible el planteamiento de la segunda ley de la termodinámica y de una definición no termométrica de la temperatura.

Debido a que la máquina térmica permite producción de movimiento a partir del calor, es decir, producción de potencia motriz, se podría decir que la máquina térmica marcó un hito importante en el desarrollo científico de la misma, ya que permitió el desarrollo del trabajo útil partiendo del uso del calor y adecuarlo a ciertas necesidades de la época, permitiendo grandes avances no sólo tecnológicos sino culturales, ya que aunque al comienzo se trataba de un dispositivo fabricado por Herón de Alejandría para fines netamente de entretenimiento, sentó más adelante uno de los mayores precedentes para la consolidación de la teoría de la Termodinámica tal como se le conoce hoy en día.

Fue el inglés Thomas Savery (1650-1715) quien desarrolla la primera máquina para el uso industrial con fines mecánicos a partir de la generación y condensación del vapor, tal como lo era para bombear agua de las minas de carbón. El enfriamiento del vapor inyectado en una cámara provocaba la succión de agua en la misma desde el fondo del pozo, con el fin de que el vapor la desalojara hacia la superficie con ayuda de un sistema de válvulas. Y aunque el dispositivo de Savery es estático, sólo permitía la disminución el agua. Problema que fue resuelto por el inglés Thomas Newcomen (1663-1729) quien diseñó una máquina donde la cámara de Savery se encontraba dotada de un pistón, el cual experimentaba un movimiento de retroceso, enfriando el vapor al interior del cilindro debido al descenso de la presión, restableciéndose a su posición inicial con la ayuda de un contrapeso. Y aunque este modelo predominó principalmente en las minas de Inglaterra, fue el diseño de James Watt (1736-1819) el que se impuso en Europa y

América. Watt reparó una réplica de la máquina de Newcomen, llamando la atención de ésta última dada la gran cantidad de vapor que consumía. Rápidamente notó que una gran parte del vapor se condensaba al ingresar al cilindro al contacto con las paredes frías de éste, por lo que la mayor parte del poder calorífico del carbón consumido era invertido en los procesos de calentamiento y enfriamiento de las paredes del cilindro, sin éxito a producir algún efecto mecánico sobre el movimiento del pistón.

Fue donde intentó cuantificar la cantidad de vapor gastado y si había alguna forma de minimizar dicho gasto. Calcular el vapor gastado de más no fue fácil, puesto que era necesario calcular el volumen del vapor que dicha cantidad de agua era capaz de generar, por lo que acudió a la ayuda de Joseph Black (1728-1799) y concluye que la relación entre el volumen del agua líquida y el vapor a presión atmosférica es del orden de 1800. Lo que le permitió deducir que la máquina de Newcomen consumía 8 cilindros de vapor, donde un cilindro producía un efecto mecánico mientras que la séptima parte restante era invertida en calentar las paredes del cilindro.

Los intentos por optimizar este efecto dieron como fruto la incorporación de un condensador al cual ingresaba el vapor inyectado, cosa que permitió mayor operatividad y fiabilidad en la máquina. Más adelante Watt destaca la idea de cuantificar la potencia mecánica de la máquina; para esto incorporó un trazador que ejercía movimiento en un eje proporcionalmente a la presión en el interior del cilindro, y en el otro con el recorrido del pistón, lo cual ofrecía directamente un diagrama presión volumen del vapor contenido en el pistón permitiendo evaluar el trabajo realizado en términos del área encerrada en la gráfica de dicho diagrama presión-volumen, el cual cobraría gran importancia en estudios teóricos posteriores. (Pérez Cruz, 2007)

Fue dentro de todo este marco de desarrollo tecnológico, en medio de todo tipo de mejores, optimizaciones, nuevos diseños y una constante lucha por mejorar la eficiencia de las máquinas de vapor que aparecen en 1824 las *“Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas diseñadas para desarrollar dicha potencia”* de Sadi Carnot (1796-1832), abriendo brecha a la construcción de las bases de las leyes fundamentales que gobiernan los procesos de la naturaleza en los que se involucran transformaciones de trabajo en calor.

Hijo de Lazare Carnot, uno de los fundadores de la escuela politécnica francesa, prestigioso científico y matemático de la época, Carnot inicia su obra haciendo una ovación al poder y alcance de las máquinas, y las transformaciones y el impacto que estaban produciendo y producirían. Su obra, toda una reflexión teórica cimentada en algunos datos experimentales, es el lugar desde donde se plantea la pregunta con relación a cuáles son los principios elementales que hacen que una máquina funcione, y cuál es la mejor forma de sacarle el mayor provecho posible.

De acuerdo con Carnot, la producción de potencia motriz es posible mediante el restablecimiento del equilibrio en el calórico que implica el transporte de calórico de una fuente que se encuentra a alta temperatura hacia una fuente que se encuentra a baja temperatura (Salinas Cardona D. , 2018, pág. 31).

CARNOT Y LA POTENCIA MOTRIZ DEL FUEGO

El cuestionamiento de Carnot es en relación con la producción de potencia motriz y cuál es la mejor forma de producirla; y si es posible cuantificarla, lo realmente importante es evidenciar el proceso mediante el cual se produce dicha potencia motriz. De manera que Carnot llega a la conclusión de que la producción de potencia motriz del fuego es debida gracias al restablecimiento del equilibrio en el calórico. Para ello, deben existir dos fuentes de temperatura en la máquina térmica, una fuente a alta temperatura y una fuente a baja temperatura, y además un dispositivo que transporta el calórico de una fuente a otra, lo que a su vez permite el restablecimiento del equilibrio en el calórico. Por lo que, en sí, no es sólo necesaria la existencia de las dos fuentes de temperatura para la producción de potencia motriz, sino el proceso mediante el cual se da ese restablecimiento del equilibrio. (Salinas Cardona, 2018, pág. 32).

La producción de potencia motriz es debida al restablecimiento de equilibrio térmico en el calórico que a su vez es debido al transporte del calórico de una fuente que se encuentra a alta temperatura hacia una fuente de baja temperatura. Pero es sólo cuando la variación de temperatura es debida únicamente a una variación de volumen, de la sustancia de trabajo, y que los flujos de calórico no implican equilibración térmica, que se alcanza el máximo de producción de potencia motriz en una máquina térmica (Salinas Cardona D. L., 2018, pág. 37). Ahora bien, la potencia motriz será lo suficientemente eficiente cuando

al generar variaciones considerables de temperatura éstas impliquen cambios significativos de volumen en la barra, cosa que es bastante difícil de conseguir en un sólido por lo que los cuerpos sólidos son poco adecuados para realizar dicha potencia motriz (Salinas Cardona, 2018, pág. 37)

Por lo que el vapor de agua es entonces un medio seguro para la producción de potencia motriz, debido a que se puede calentar y enfriar fácilmente, se puede cambiar su temperatura y romper el equilibrio del calórico cuantas veces se desee. Con el fin de generar potencia motriz Carnot da cuenta del funcionamiento de la máquina de vapor partiendo de dos cuerpos A y B mantenidos a temperatura constante, siendo A el fogón y B el condensador dónde la temperatura de A es mayor que la de B, y se toma el calórico del cuerpo A para formar vapor, es decir, que el vapor está a la misma temperatura del cuerpo A. El vapor de agua es transportado al cilindro dotado del émbolo aumentando su volumen, por lo que desciende espontáneamente de temperatura hasta llegar a la temperatura del cuerpo B, condensándose al ponerse en contacto con el cuerpo B. Es donde Carnot afirma que dicha condensación se determina gracias a la diferencia de temperatura por pequeña que sea, de los cuerpos A y B.

Y de manera opuesta, se podría generar vapor de agua a costa del calórico del cuerpo B y comprimir dicho cuerpo hasta llegar a la temperatura de A con la finalidad de ser condensado y continuar la compresión hasta la licuefacción completa. Es decir que, si el calórico se transporta de un cuerpo caliente a uno frío como consecuencia se tiene potencia motriz, pero si es en sentido opuesto, transportarlo de un cuerpo frío a uno caliente, hay consumo de potencia motriz y retorno del calórico del cuerpo frío al cuerpo caliente.

Y a pesar de que en el proceso anterior se evidenció el proceso mediante el cual se tomó calórico del cuerpo A para producir vapor, para finalmente llegar a la temperatura del cuerpo B es decir, el vapor se enfrió, basta con poner en contacto los dos cuerpos que están a temperaturas diferentes, es decir, la temperatura del cuerpo A con la del cuerpo B, para poder empezar nuevamente el ciclo. Ahora bien, como esto implica un contacto directo de dos cuerpos a diferentes temperaturas, el flujo directo del calórico sólo daría como resultado un restablecimiento inútil del equilibrio en el calórico, por lo tanto, pérdida de potencia motriz.

Y aunque no sólo en este caso habría pérdida de potencia motriz, sino también en el momento en que la caldera fuera alimentada con agua más fría que la contenida en la caldera; una manera de solucionar las pérdidas anteriores sería, primero, suponer que las diferencias de temperatura del cuerpo A y del cuerpo B son infinitamente pequeñas, o alimentar la caldera con agua caliente, de manera tal que no habría un restablecimiento inútil del equilibrio y por lo tanto no habría pérdida de potencia motriz, aunque esto implicaría una máquina auxiliar de la máquina térmica.

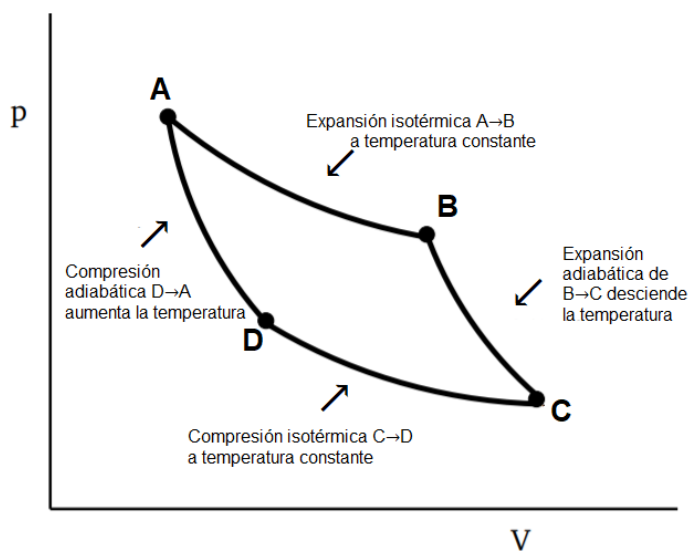
Ahora bien, se sabe que la sustancia que transporta el calórico de la fuente A de temperatura más alta a la fuente B de menor temperatura debe cumplir unas características específicas, como por ejemplo tener capacidad de fluidez, ser deformable, cambiar de manera fácil su volumen al ser sometida a cambios de temperatura, etc. Y aunque hay toda una serie de características que debe cumplir la sustancia para ser parte del proceso de producción de potencia motriz, lo que importa no es la sustancia en sí, sino todo el proceso que le toma a ésta transportar el calórico de una fuente a otra. Pues como dice Carnot “la potencia motriz del calor es independiente de los agentes que intervienen para realizarla; su cantidad se fija únicamente por la temperatura de los cuerpos entre los que se hace, en definitiva, el transporte del calórico” Carnot, 1824, pág. 55.

PRINCIPIO DE CARNOT

A continuación, se abordará citando la detallada descripción que Salinas Cardona (2018) hace sobre el proceso que da lugar a la producción de potencia motriz en la máquina de vapor centrada en el comportamiento del gas dentro del cilindro.

Se tiene vapor de agua encerrado en un vaso cilíndrico *abcd* provisto de un émbolo *cd*, y dos cuerpos A y B mantenidos a temperatura constante siendo la temperatura de A mayor que la de B. 1) Supongamos que el cuerpo A se pone en contacto con las paredes del cilindro transmitiéndole calórico al agua allí contenida, de forma que al producirse vapor de agua éste tiene la misma temperatura de A. 2) El vapor se expande por causa del aumento de temperatura hasta alcanzar la posición *ef* manteniendo su temperatura debido a que mantiene contacto con A.

3) El vapor de agua detiene su contacto con el cuerpo A pero se sigue expandiendo hasta alcanzar la posición *gh* debido al calórico que mantenía al estar en contacto con A. A pesar de ello, su temperatura desciende hasta llegar a la temperatura del cuerpo B. 4) Al estar en contacto con el cuerpo B el vapor de agua se comprime hasta llegar a la posición *cd*. Por lo cual su temperatura no aumenta dado que cede el calórico restante al cuerpo B. 5) El vapor de agua deja de estar en contacto con el cuerpo B y continua su compresión hasta llegar a la posición *cd*. Es donde su temperatura aumenta hasta llegar a la misma temperatura de A. Es decir que las condiciones son las mismas a las condiciones iniciales, termina el ciclo y empieza nuevamente. 6) El vapor es colocado en contacto de nuevo con el cuerpo A y el émbolo asciende a la posición *ef* pero su temperatura no varía debido a que la fuente de temperatura A le proporciona el calórico. Esto es, el mismo proceso del numeral 2, por lo que el proceso se repite sucesivamente.



Esto lleva a pensar que un restablecimiento inútil en el calórico es la razón por la cual no se dé el máximo de producción de potencia motriz, dado a que cualquier cambio de temperatura que no se deba a un cambio de volumen se debe al contacto directo entre cuerpos a temperaturas diferentes, es decir, al paso del calórico de un cuerpo caliente a uno frío. Por lo que, al

mirar detenidamente los 6 pasos mencionados anteriormente, se encuentra que se cumplen todas las condiciones del máximo de eficiencia en la máquina, pues nunca se da pérdida de potencia motriz ya que no hay contacto directo entre los cuerpos A y B, y tampoco hay restablecimiento inútil del equilibrio en el calórico.

¡Esto es, el ciclo de Carnot! pues se tiene un sistema llevado a cabo en la máquina térmica, dónde es posible llegar al máximo de producción de potencia motriz. El vapor de agua experimenta 4 procesos reversibles, dos isotérmicos y dos adiabáticos. 2) Se da una expansión isotérmica $A \rightarrow B$ dado que el gas se dilata, pero su temperatura permanece constante. 3) Se produce una expansión adiabática $B \rightarrow C$ aun cuando hay variaciones de

temperatura sin flujo de calor, pues el vapor de agua continúa dilatándose aun cuando no hay contacto con la fuente que le proporciona el calor. 4) Enseguida se da una compresión isotérmica $C \rightarrow D$ puesto que el vapor de agua se contrae, pero su temperatura permanece constante cediendo el calor restante a la fuente; 5) por último se produce una compresión adiabática $D \rightarrow A$ en la que el vapor no tiene ningún tipo de contacto con la fuente y eleva su temperatura, para nuevamente continuar el ciclo.

En el ciclo de Carnot las transferencias de calor se efectúan exclusivamente en condiciones de equilibrio entre la fuente de temperatura y el vapor de agua, es decir, en los procesos isotérmicos, por esta razón resulta ser el ciclo más sencillo dado que sólo se utilizan dos fuentes de temperatura, una más caliente que la otra, haciendo más fácil el funcionamiento.

CAPITULO 3

DEL PRINCIPIO DE CARNOT A LA SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA

Carnot llevó a cabo todo un esfuerzo al realizar su estudio acerca de las máquinas de fuego o máquinas de vapor, considerando en primer lugar que el calor produce potencia motriz, y que el objeto de las máquinas térmicas de fuego es desarrollar esa potencia, adecuarla para nuestros usos (Sánchez Forigua, 2016, pág. 29), cosa que lo ayudaría más adelante a llevar a cabo el desarrollo de una teoría general que pudiera explicar su funcionamiento, de manera tal que se pudieran plantear leyes universales, aunque no era esa su intención inicialmente.

Uno de los razonamientos aplicables, de los que habla Carnot, es el restablecimiento del equilibrio en el calórico, es decir, su paso de un cuerpo cuya temperatura es más o menos elevada, a otro cuya temperatura es más baja, este aspecto se aclara cuando él hace la primera descripción de una máquina a vapor idealizada de la siguiente manera (Sánchez Forigua, 2016):

El calórico desarrollado en el fogón atraviesa las paredes de la caldera, da lugar a la formación de vapor, al que de alguna manera se incorpora. El vapor, arrastrándolo consigo, lo lleva primero al cilindro, donde cumple una función determinada, y después lo transporta al condensador, donde se licua por el contacto con el agua fría que allí se encuentra. En el último extremo el agua fría del condensador se apodera del calórico desarrollado en la combustión. Se calienta por medio del vapor, como si hubiese estado situada directamente en el fogón. (Carnot, 1824, pág. 40)

Es en ese punto, donde Carnot pone de presente la existencia del restablecimiento del equilibrio en el calórico, debido al ya mencionado transporte del calórico de un cuerpo de mayor temperatura a uno de menor temperatura. Y da paso al ciclo de Carnot, el cual permite poner de presente el cuestionamiento referente a la potencia motriz máxima del fuego, producido por la máquina de vapor.

Citando las suposiciones cuantitativas que lleva a cabo (Sánchez Forigua, 2016), podremos entender a lo que se refiere Carnot, por ejemplo, si es calor invertido por el cuerpo A fue de 20 unidades y gracias a su transporte se produce una potencia motriz de 10 unidades, el restante de calor, que son 10 unidades respectivamente, son cedidos al cuerpo B. En el caso contrario, el transporte del calórico del cuerpo B de 10 unidades más un trabajo consumido de 10 unidades, daría 20 unidades de calor que se transportan hasta el cuerpo A, que era el que poseía inicialmente. Mostrado de otra forma, el calor transportado Q_A , es igual a $Q_B + W_1$, y el calor devuelto Q_B es igual a $Q_A - W_2$. Con lo que se concluye que no se produce potencia motriz neta ya que tanto la potencia motriz producida W_1 y la potencia motriz consumida W_2 son iguales, es decir $W_1 = W_2$, y haciendo la suma algebraica de los trabajos tenemos que $W_1 - W_2 = 0$ (Sánchez Forigua, 2016)

Por lo que Carnot plantea el hecho de poder generar una potencia motriz neta diferente de cero donde otro esto se destacaría por utilizar de una manera más ventajosa el calor que se transporta. Entonces, cuantitativamente se supone que con esas mismas 20 unidades de calor se van a producir 15 unidades de potencia motriz y de alguna forma se transportan al cuerpo de menor temperatura 10 unidades de ese calórico. En las transportaciones inversas para este caso se transportan 10 unidades de calórico hasta el sistema y debió a una potencia motriz consumida se obtienen otras 10 unidades de calórico para un total de 20 unidades que se transportan hasta el cuerpo de mayor temperatura. (Sánchez Forigua, 2016)

Se hace evidente que al hacer la diferencia entre las potencias motrices ya no daría cero sino cinco, es decir, $W_1 - W_2 = 5$ unidades, lo que significa que se produjo trabajo de la nada, sin un gasto de calórico u otro agente, lo que pasa la física es algo absurdo ya que se debe seguir las leyes establecidas por la mecánica en este caso la conservación de energía, a lo que Carnot concluye que *...el máximo de potencia motriz que se obtiene empleando el vapor es también el máximo de potencia motriz realizable por cualquier otro procedimiento* (Carnot, 1824, pág. 46). Se presenta el mayor rendimiento obtenido, cuando de manera muy hábil se utiliza el transporte del calórico de tal forma que logre mover más el émbolo y por lo tanto producir más fuerza motriz (Sánchez Forigua, 2016).

Por lo que la condición necesaria para que se dé el máximo de potencia motriz, *que no se realice en los cuerpos empleados para realizar la potencia motriz del calor ningún cambio de temperatura que no se deba a un cambio de volumen* (Carnot, 1824, pág. 47), es decir, como se mencionaba en el anterior capítulo, solo en un recipiente dotado de un émbolo, se puede variar su temperatura, por tanto, el volumen que ocupa, (Sánchez Forigua, 2016)

Carnot aporta dos principios que en la época no fueron tomados en cuenta pero que más adelante llegarían a ser muy importantes en los estudios y análisis realizados por Clapeyron y para la consolidación del principio de equivalencia de las transformaciones por Clausius. Primeramente, la diferencia de temperatura entre los cuerpos que da lugar al transporte del calórico transportado por el calórico; y en otro lugar, el establecimiento de las condiciones de las condiciones que da lugar al máximo de potencia motriz producida, o mejor dichos por Carnot:

- *La producción de potencia motriz en las máquinas de vapor se debe no a un auténtico consumo del calórico, sino a su transporte de un cuerpo caliente a un cuerpo frío* (Carnot, 1824, pág. 41).
- El máximo de potencia motriz bajo la condición: *que no se realice en los cuerpos... ningún cambio de temperatura que no se deba a un cambio de volumen* (Carnot, 1824, pág. 47).

¿EL PRINCIPIO DE CARNOT ES UNA LEY DE LA NATURALEZA?

Los principios anteriormente mencionados fueron relevantes también, porque del análisis del trabajo de Carnot, surge el término de entropía, dado que éste supone dos variaciones dentro de un proceso cíclico, que son llamadas posteriormente transformaciones, éstas mantienen una dependencia, dado que la existencia de la una presume la existencia de la otra (Sánchez Forigua, 2016). Lo que sería en palabras de Clausius refiriéndose a dichas dos transformaciones: “...en un simple proceso cíclico dos variaciones con respecto al calor toman lugar, a saber, que una cierta cantidad de calor es convertido en trabajo (o genera trabajo exterior), y otra cantidad de calor pasa desde un cuerpo caliente a otro frío (o viceversa). Se encontró que entre la cantidad de calor transformado en trabajo y la cantidad de calor transferido, debe haber una relación definida, la cual es independiente de la naturaleza del cuerpo variable, y por lo tanto solo puede depender

de la temperatura de los dos cuerpos que sirven como fuentes de calor” (Clausius, 1879, pág. 91). Elementos que se abordará más adelante.

Respecto a los aportes realizados por Clapeyron acerca del principio de equivalencia de las transformaciones, y en consecuencia al principio de Carnot, íntimamente relacionado con la expresión de la segunda ley de la termodinámica, serían publicados sólo diez años más tarde, en donde Clapeyron puso otras nuevas formas de ver el razonamiento de Carnot, ya que lo que hoy día se conoce como la representación gráfica del ciclo de Carnot (gráficas que relacionan variables de estado como presión, volumen y temperatura) fue hecha por el propio Clapeyron. Éste analizó los razonamientos de Carnot relacionados al paso a paso de cada una de las operaciones que realizaba la máquina térmica, tanto los que se refieren a la producción de potencia motriz en las operaciones primarias como en las inversas y trazó una gráfica que pudiese dar cuenta del comportamiento del ciclo y la relación entre estas tres variables, que por cierto no podían ser otras ya que Clapeyron no se apartó de los principios establecidos por Carnot (Sánchez Forigua, 2016, pág. 45).

Clapeyron también realiza uno de los grandes aportes deducidos de sus gráficas, el cual consiste en clarificar que todas las operaciones primarias como las inversas que lleva a cabo la máquina de Carnot cumplen con un ciclo cerrado, lo que significa que en todo el proceso no hay ninguna pérdida de calor ni trabajo, por tanto se puede afectar el sistema, modificar sus condiciones iniciales, y también asocia a cada actividad realizada por el vapor de agua en la máquina térmica, una curva en la gráfica asociada a los cambios en las variables de estado, como la presión, el volumen y la temperatura.

Los esfuerzos de Clapeyron acerca de las consideraciones hechas por Carnot permitieron llevar a Clausius a la consolidación del análisis relacionado con el principio de equivalencia de las transformaciones, quien al retomar los aportes que realiza Carnot tal como que, en un proceso reversible, las transformaciones deben compensarse, es decir, que el calor transformado en trabajo debe compensarse con el trabajo transformado en calor (Sánchez Forigua, 2016, pág. 45).

EL PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA DE LAS TRANSFORMACIONES Y LA ENTROPÍA

Viendo la Ilustración 1, al observar la fase del proceso cíclico $A \rightarrow B - B \rightarrow C$ hay un calor correspondientemente transformado en trabajo; y la fase del proceso cíclico $C \rightarrow D - D \rightarrow A$ corresponde entonces al trabajo transformado en calor, siendo como fue mencionado sutilmente en el capítulo anterior, sólo los procesos isotérmicos los que toman mayor relevancia, pues están allí presentes las acciones térmicas las cuales son transformadas. Por lo tanto, se tiene que la curva $A \rightarrow B$ corresponde a un calor que como se mencionó previamente, se transformó el trabajo, y otra curva $C \rightarrow D$ que corresponde al proceso inverso donde el trabajo se transforma en calor Q_2 . Y si se tiene en cuenta que ocurrieron dos procesos inversos, que deberían ser compensados, esto no ocurre si sólo se tienen en cuenta las acciones térmicas, debido a que $Q_1 > Q_2$ por lo que se debe incluir otro aspecto donde se pueda obtener tal compensación (Sánchez Forigua, 2016, pág. 46)

Según Clausius *“por la forma de estas dos variaciones nosotros hemos empleado la palabra “transformación”, en la medida en que dijimos, cuando el trabajo se gastó y el calor de este modo se produjo, o a la inversa cuando el calor se gastó y el trabajo de este modo se produjo, que el uno se había “transformado en el otro”. Se utiliza la palabra “transformación” también en la segunda expresión de variación (la cual consiste en el paso de calor desde un cuerpo a otro, el cual puede estar más frío o caliente que el primero), en la medida en que se puede decir que el calor a una temperatura se “transforma” en sí mismo en calor a otra temperatura.”* (Clausius, 1879, pág. 91). Lo que lleva a pensar que el otro aspecto a tener en cuenta son las temperaturas de las fuentes de calor, diciéndolo Clausius de la siguiente forma: *“Se encontró que entre la cantidad de calor transformado en trabajo y la cantidad de calor transferido, debe haber una relación definida, la cual es independiente de la naturaleza del cuerpo variable, y por lo tanto solo puede depender de la temperatura de los dos cuerpos que sirven como fuentes de calor”* (Clausius, 1879, pág. 91).

Por consiguiente, lo importante aquí es el proceso mediante el cual se dan las transformaciones de calor en trabajo y viceversa y no como se pensaría, el cuerpo variable. Es decir, son las transformaciones en el ciclo de Carnot y los procesos isotérmicos, como también la variable, tenidos en cuenta, así como el calor o trabajo que

se transforma y también las temperaturas a las cuales se dan dichas transformaciones para la medida de estas.

Se tiene Q_1 de un cuerpo que está a una temperatura T_1 y Q_2 a un cuerpo de temperatura T_2 , siendo $T_1 > T_2$, por tanto, se puede llegar a la siguiente igualdad a costa de las acciones y las temperaturas de las fuentes de calor,

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

Donde,

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$$

Y es con esta igualdad que Clausius supone la compensación de la transformación de la primera fase con la transformación de la segunda fase para un proceso reversible, que cumple,

$$\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

Sin embargo, en el caso que esta diferencia no diera igual a cero supone que el proceso es irreversible, $\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} \neq 0$. A lo que se puede concluir que, según lo que en algún momento también dijo Carnot, las acciones son independientes al tipo de sustancia utilizada en la transformación, sino que las acciones dependen de los procesos. Por otro lado, este principio de la equivalencia de las transformaciones a la larga no centra su estudio en cuanto fue el calor transformado en trabajo o cuanto trabajo se transformó en calor sino cuanto fue la transformación total en todo el ciclo, a lo cual Clausius llamó entropía y lo definió como $\frac{Q}{T} = S$ donde S es la letra que corresponde a la entropía que por las características del proceso y lo que mide es una variable de estado (Sánchez Forigua, 2016, pág. 47)

Estas reflexiones ponen a la base, que la transformación es un hecho que Carnot ya había abordado cuidadosamente, que desde luego es importante para el principio de equivalencia de las transformaciones por la cantidad de transformación total que se da en las dos transformaciones presentes en los procesos cíclicos. Por otro lado, es de importancia resaltar del trabajo de Clausius el protagonismo que cobra el proceso cuando se vinculan las temperaturas a las que se producen las transformaciones y no como se

pensaría, en las transformaciones que sufren los cuerpos, las sustancias o lo que Clausius llama el cuerpo variante.

Si bien, grosso modo se abordan ciertos elementos que permiten entender los problemas de conocimiento y los contextos de producción de las teorías físicas que están a la base del principio de equivalencia de las transformaciones y la entropía, también se presentan de modo detallado una serie de criterios para la enseñanza de la termodinámica y el concepto de entropía, que muchas veces no es claro por las diferentes formas en que se aborda. Estos criterios se presentan de forma conceptual centrados en las problemáticas que constituyeron un hecho y no en el producto de la ciencia. Reflexiones que a su vez enriquecen los conocimientos y las experiencias en la labor docente abordado a continuación.

CAPITULO 4

ALGUNAS CONSIDERACIONES PARA LA ENSEÑANZA DE LA TERMODINÁMICA

Cuando se plantea la recontextualización (de saberes) se acude a los textos originales, con el fin de establecer algunas problemáticas de estudio en términos de dos miradas relevantes: la primera en relación con los problemas que abordan los científicos, particularmente, los problemas que abordó Carnot en su época alrededor de las máquinas térmicas; y la segunda, en relación con los problemas de conocimiento y de enseñanza alrededor de las ciencias, específicamente la termodinámica (Salinas Cardona D. L., 2018, pág. 46).

En relación a las problemáticas planteadas por Carnot, se evidencia una necesidad urgente en su época relacionada con el esclarecer la necesidad del máximo rendimiento posible de las máquinas térmicas, y aunque parecía mucho ser un problema de carácter técnico, el trabajo de Carnot lo transforma totalmente en un problema de orden científico, puesto que llega al principio general del funcionamiento pero además al problema de la máxima eficiencia en una máquina térmica reversible, que más adelante viene a ser expresado por Clapeyron no sólo como un principio de funcionamiento, sino que constituye una ley de la naturaleza, para luego ser expresada como una ley de irreversibilidad en los procesos, es decir, la segunda ley de la termodinámica.

Lo anterior pone de presente la construcción de hechos científicos, teorías, problemáticas y conceptos inmersos en unos contextos culturales y sociales ligados a los contextos de producción de conocimiento, tomando varios matices durante la construcción de análisis y reflexiones; es por esta razón que la ciencia es vista como una actividad en la cual emergen intereses políticos, económicos y sociales por supuesto. Lo que pone de presente el papel que cumple la historia de las ciencias en la enseñanza de las ciencias, como lo menciona la profesora María Mercedes Ayala,

“Se ha visto la historia como una forma de incidir o transformar la imagen que de la ciencia tienen los maestros, teniendo en cuenta el importante papel que ésta desempeña en la orientación de su labor pedagógica. En ese sentido, hay quienes han

encontrado en los enfoques contextuales de la historia de la ciencia, desarrollados por autores como Stephen Shapin, y los estudios socioculturales de la ciencia, como los realizados por Bruno Latour, una manera de mostrar la ciencia totalmente diferente. Más que como una colección de productos conceptos, teorías, procedimientos, etc. la ciencia es presentada como la actividad misma de construcción de dichos productos, ligada consecuentemente, a los contextos en los que se realiza y respondiendo a las exigencias e intereses generados en esos contextos específicos; donde los denominados “hechos científicos” a partir de los cuales edificamos nuestra certeza y designamos lo que llamamos realidad tienen una historia de constitución y son ante todo hechos sociales: en algún momento fueron solamente enunciados, la mayoría de las veces polémicos, que lograron imponerse a través del despliegue en términos de Shapin de toda una tecnología de socialización; difuminándose, así las fronteras entre las ciencias sociales y naturales. (Ayala M., 2004)

De esta forma, es evidente cómo la historia de las ciencias afecta el quehacer docente como la visión de ciencia del docente, pues ya no puede más ver la ciencia como un conjunto de conceptos y ecuaciones que se dictan y los estudiantes memorizan, sino que se transforma en una actividad emancipadora, pues pone de presente unos diálogos con la historia de un hecho científico para dar paso a la reconstrucción, transformación, cambiar la mirada que se tiene del asunto y poder escudriñar la problemática que hay detrás de un concepto y realizar la actividad del mismo científico pero con otros intereses, dirigidos en este caso al planteamiento de criterios de enseñanza para que los estudiantes en lugar de repetir y memorizar comprendan y reflexionen en torno a los fenómenos.

Si se deja de hacer la separación habitual entre la actividad científica y los productos que se generan con ella y se comienza a ver los productos de la ciencia en íntima conexión con los contextos y actividad de producción y de resignificación, tanto la manera de entender que es la física como la problemática de su enseñanza se transforma significativamente. (Ayala Manrique, 2006, pág. 27)

Es pues la ciencia, como lo dice más adelante (Ayala Manrique, 2006) una forma de comprensión del mundo, que hace parte de una comunidad que se viene constituyendo históricamente, legitimándose socialmente, generando tradiciones y recomponiéndose de acuerdo con las dinámicas de las condiciones históricas (Ayala Manrique, 2006, pág. 47).

Por lo que la dinámica de trabajo se transforma, así como los criterios, dónde finalmente es el lugar en el cual se legitiman y validan los conocimientos, luego el desarrollo de la ciencia dependerá de la comunidad misma como del desarrollo de la actividad científica dado en los mismos contextos.

En ese sentido, *el problema de la enseñanza de la física se convierte, entonces, en un problema fundamentalmente cultural.* (Ayala Manrique, 2006, pág. 28). Y resaltando lo que menciona (Sánchez Forigua, 2016, pág. 51) *se fomenta en el aula de clase la actividad científica en entornos culturales que legitiman estos procesos de construcción de conocimiento según el contexto propio en el que se ven involucrados.*

Por lo que todas estas formas de ver y actuar frente a la ciencia y su enseñanza, y puntualmente, la física, suministra unas condiciones para que las personas desarrollen procesos de recontextualización de saberes científicos que permite la construcción de representaciones del mundo natural, social y científico, que sirven para ampliar, reorganizar las experiencias y establecer criterios de acción (Ayala Manrique, 2006, pág. 28).

En consecuencia, esta investigación se encuentra enmarcada, particularmente en abordar la problemática alrededor del principio de equivalencia de las transformaciones descrito por Clausius y cómo éste está relacionado con el concepto de entropía, aportando elementos para la configuración de propuestas de enseñanza y un estudio histórico del trabajo de Clausius y demás trabajos producidos alrededor del qué hacer científico y del desarrollo termodinámico de la máquina térmica y la segunda ley de la termodinámica.

CONCLUSIONES

A partir del presente trabajo investigativo, se hace evidente la importancia de la historia de las ciencias en la enseñanza de estas, puntualmente el caso de la física, y se ponen de presente diferentes posturas y formas de entender los fenómenos físicos. El trabajo está cimentado en un análisis de corte conceptual para la enseñanza que acude a la historia. En ese sentido, el documento se encuentra enfocado hacia una serie de reflexiones haciendo uso de la historia de las ciencias en la enseñanza y cómo ésta permitió el abordaje de las diferentes obras científicas, como la consideración de una serie de elementos importantes para llevar a cabo una recontextualización de saberes para la enseñanza de la termodinámica enmarcado en el establecimiento de los diversos problemas de conocimiento permitieron la estructuración de algunas consideraciones en torno a cómo se aborda la enseñanza de la máquina térmica, los procesos cíclicos y lo más relevante, cómo se aborda el concepto de entropía, estableciendo de ese modo un diálogo con los aportes y problemas que Carnot planteó así como los problemas de conocimiento identificados a lo largo del capítulo 2, que estuvieron a la base de los problemas que luego, plantearía Clapeyron y Clausius, para así identificar finalmente la manera en cómo se aborda la máquina térmica y cómo esto dio lugar a la consolidación del principio de equivalencia de las transformaciones, por consiguiente al concepto de Entropía.

En consecuencia, partiendo del análisis conceptual de corte histórico realizado respecto al trabajo de Carnot, en relación con las máquinas térmicas y los procesos termodinámicos, y la relación con el principio de equivalencia de las transformaciones, se identifican los aspectos más relevantes relacionados con el restablecimiento del equilibrio en el calórico y los procesos a partir de los cuales se da dicho restablecimiento, esto vinculado al análisis que Clausius lleva a cabo a partir de toda la documentación realizada por Carnot, en dónde se evidencia la estrecha relación entre el principio de equivalencia de las transformaciones y las acciones independientes que dan lugar a las transformaciones en los procesos, con el fin de evidenciar los problemas de conocimiento dado en los contextos de producción del conocimiento.

Poniendo de presente el papel del establecimiento del equilibrio, y dónde la imposibilidad de un contacto directo entre cuerpos a temperaturas diferentes juega un papel crucial pues

se encuentra totalmente vinculado con la pérdida de movimiento y dónde partiendo de los procesos térmicos que experimenta el medio es que se logra, la máxima eficiencia en una máquina térmica.

En ese orden de ideas y, por otro lado, el principio de equivalencia de las transformaciones permite presentar de manera clara el concepto de entropía, dado que fija su atención en las transformaciones configuradas en un proceso cíclico donde se transforma respectivamente el calor en trabajo y trabajo en calor, mencionado en el capítulo 3, pues lo importante es la equivalencia que se da en las dos transformaciones, y cuánto se transformó, cuánto se afectó el entorno y el sistema, idea ligada a los procesos reversibles e irreversibles, y el hecho de que es totalmente independiente la sustancia presente en el proceso, por lo que lo que realmente cobra relevancia es la diferencia entre las temperaturas de las fuentes de calor.

Finalmente, cobra relevancia el hecho de poder articular la enseñanza de la física, en particular, de la termodinámica, y el conocimiento en torno a una problemática general que permita la comprensión de los fenómenos físicos por parte del estudiante, construyendo a su vez explicaciones, se lleven procesos de cuestionamiento y se deseche la enseñanza centrada en los contenidos que lo que realmente hacen es alejar el conocimiento físico del mundo que nos rodea y las realidades que vivimos.

Bibliografía

- Ayala Manrique, M. M. (2006). Los análisis histórico-críticos y la recontextualización de saberes científicos. Construyendo un nuevo espacio de posibilidades. *Proposições*, 19-37.
- Beltrán Garzón, D. (2009). *Significado físico de la entropía en la enseñanza de la termodinámica*. Bogotá D.C: Universidad Pedagógica Nacional.
- Carnot, S. (1824). Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas diseñadas para desarrollar dicha potencia. En J. Sanchez Forigua, *Una reflexión sobre el Principio de equivalencia de las transformaciones para la enseñanza de la Termodinámica* (pág. 31). Bogotá.
- Castillo Ayala, J. (2016). La historia de las ciencias y la formación de maestros: la recontextualización de saberes como herramienta para la enseñanza de las ciencias. *Nodos y Nudos*, 5(41), 73-80.
- Castillo Ayala, J. C. (26 de abril de 2019). Asesoría de proyecto de trabajo de grado. (D. Camargo Romero, Entrevistador)
- Cuellar Estévez, G. A. (2017). *Reflexiones en torno a la configuración del concepto de entropía: Un análisis para la enseñanza de la entropía*. Bogotá D.C: Universidad Pedagógica Nacional.
- Perez Cruz, J. R. (2007). La termodinámica de Carnot a Clausius. *Conferencia impartida en el curso "La ciencia europea antes de la Gran Guerra"*, (pág. 4).
- Salinas Cardona, D. (2018). *Análisis de corte histórico para la recontextualización del trabajo de Carnot, acerca de la máquina térmica en la enseñanza de la Termodinámica*. Bogotá.
- Salinas Cardona, D. (2018). *Análisis de corte Histórico para la recontextualización del trabajo de Carnot, acerca de la máquina térmica, en la enseñanza de la Termodinámica*.
- Salinas Cardona, D. L. (2018). *Análisis de Corte Histórico para la recontextualización del trabajo de Carnot, acerca de la máquina térmica, en la enseñanza de la Termodinámica*. Bogotá.
- Sánchez Forigua, J. (2016). *Una reflexión sobre el Principio de equivalencia de las transformaciones para la enseñanza de la Termodinámica*.
- Sánchez Forigua, J. S. (2012). *Reflexiones sobre la entropía para la enseñanza de la termodinámica*. Bogotá D.C: Universidad Pedagógica Nacional.
- Sánchez Forigua, Y. S. (2016). *Una reflexión sobre el principio de equivalencia de las transformaciones para la enseñanza de la termodinámica*. Universidad Pedagógica Nacional. Bogotá: Departamento de Física.
- Sarmiento Bohorquez, A. M. (2010). *Equilibración térmica y flujo de calor: Un análisis para la enseñanza de la termodinámica*. Bogotá D.C: Universidad Pedagógica Nacional.
- Velandia Garzón, J. M., & Ibáñez Cañón, N. A. (2015). *Análisis de los procesos de equilibración en la máquina térmica: Una alternativa para introducir el concepto de irreversibilidad en la enseñanza de la segunda ley de la termodinámica*. Bogotá D.C: Universidad Pedagógica Nacional.