

40
209



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

"ENFOQUE HISTÓRICO EVOLUTIVO PARA EL
ESTUDIO DE LA TERMODINÁMICA"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

F I S I C O

P R E S E N T A :

LUCIANO VELÁZQUEZ PALMEÑO

Director de Tesis: M. en C. Ignacio Campos Flores



DIRECCION DE ESTUDIOS PROFESIONALES
1 9 9 6
FACULTAD DE CIENCIAS
SECCION ESCOLAR

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

M. en C. Virginia Abrín Batule
Jefe de la División de Estudios Profesionales de la
Facultad de Ciencias
P r e s e n t e

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo de Tesis: "Enfoque Histórico-evolutivo para el estudio de la Termodinámica".

realizado por Luciano Velázquez Palmeño

con número de cuenta 6015898-3 , pasante de la carrera de Física

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis

Propietario M. EN C. IGNACIO CAMPOS FLORES

Propietario DR. JUAN MANUEL LOZANO MEJIA

Propietario DR. ROBERTO ALEJANDRO RUELAS MAYORGA

Suplente DRA. SILVIA SUSANA BRAVO NUÑEZ

Suplente FIS. JOSE ERNESTO MARQUINA FABREGA

Ignacio Campos Flores
Juan Manuel Lozano Mejia
Roberto Alejandro Ruelas Mayorga
Silvia Susana Bravo Nuñez
Jose Ernesto Marquina Fabrega

Consejo Departamental de Física
DR. ROBERTO ALEJANDRO RUELAS MAYORGA
FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE FISICA

A mi madre, quien me enseñó al morir, que resucitar no es
imprescindible, para quien como ella, siempre vive en la memoria
de quienes la conocimos, eso, creo yo, es la mejor forma de ser
inmortal.

"...Cuando yo uso una palabra... significa exactamente lo que yo elijo que signifique, ni más ni menos. La cuestión es, dijo Alicia, si puede usted hacer que las palabras signifiquen tantas cosas diferentes. La cuestión es... quien es aquí el maestro; eso es todo..."

Al otro lado del espejo.
Lewis Carroll.

C O N T E N I D O

1.- INTRODUCCION	1
PROBLEMA	7
2.- EL PAPEL DE LA HISTORIA EN EL ESTUDIO DE LA FISICA	9
3.- EL ENFOQUE HISTORICO EVOLUTIVO.....	28
4.- LAS REVOLUCIONES CIENTIFICAS.....	42
5.- REVOLUCION INDUSTRIAL Y CIENTIFICA	56
5.1 ANTECEDENTES Y ORIGEN.....	59
5.2 LA MAQUINA DE VAPOR Y LA ENERGIA CALORIFICA.....	87
5.3 EL CONCEPTO DE EFICIENCIA Y EL DESARROLLO DE LA TERMODINAMICA.....	118
CONCLUSIONES	177
BIBLIOGRAFIA.....	183

I.- INTRODUCCION.

La participación que ha tenido la Física en la solución de los problemas de la humanidad y la influencia que ha ejercido sobre las transformaciones sociales ha sido determinante. Sin duda, entre los hechos más importantes de cada período histórico, los trabajos y descubrimientos realizados en esa ciencia ocupan un lugar especial. El mundo de la actualidad se caracteriza por el empleo creciente de la ciencia y la tecnología y por los grandes cambios en la sociedad y la cultura, que son de tal magnitud y variedad que nos han conducido a una de las mayores transformaciones de la historia. Sin embargo, las innumerables ventajas sociales que han sido puestas a nuestro alcance no pueden ocultar los problemas que al mismo tiempo se han ido generando, como la destrucción del medio ambiente, el uso indiscriminado de los recursos naturales o la crisis energética que se asocia con el empleo creciente de la energía en todas las ramas de la actividad tecnológica, los cuales provienen tanto de la naturaleza de la ciencia misma, como de los usos para los cuales se destina.

La notable expansión de las actividades científicas que ha seguido a la segunda guerra mundial, especialmente en los países industrializados, es tal vez el signo distintivo de los nuevos tiempos. Actualmente se reconoce que el progreso de las naciones depende, en gran medida, del uso creciente de la ciencia y la tecnología, así como de la capacidad para desarrollar y aplicar los

conocimientos de la Física y aun cuando la industrialización, que prometía emancipar al hombre por medio de la máquina no haya logrado producir hasta el momento los resultados deseados, en las sociedades modernas es cada vez más estrecha la relación entre la investigación científica, la aplicación tecnológica y la utilización industrial, que son factores clave del progreso económico y social vinculados estrechamente al desarrollo.

La sociedad contemporánea se caracteriza por una distribución desigual de la riqueza material, pues existen países altamente desarrollados que poseen un gran nivel científico, en los que la ciencia ejerce una influencia considerable sobre otros campos y en donde se establecen medidas concretas para desarrollar, organizar y utilizar su potencial científico y tecnológico; pero también hay otros donde aún no se ha logrado un desarrollo equivalente, a causa de los altos costos de la industrialización, en los que se cuenta con un deficiente nivel científico y tecnológico que los conduce a una mayor dependencia de otras naciones y contribuye a limitar su acceso a los métodos modernos de producción, pues ahí donde las ciencias naturales están escasamente desarrolladas, las ciencias aplicadas como la ingeniería o la agronomía, quedan en situación desventajosa, ya que habrán de llegar más tarde a la aplicación práctica de los descubrimientos científicos.

Algunos autores sostienen que "El desarrollo y el cambio social no se pueden lograr sin crear cierto mínimo de cultura

científica..."¹ y que el problema de transformar un país desarrollado, tiene íntima relación con las dificultades para establecer al estudio de la ciencia como una fuerza vital para el progreso; también se ha llegado a plantear que el avance científico y tecnológico puede atribuirse al hecho de que, los egresados del nivel preparatorio de ciertos países, han tomado un curso de Física por cada dos años de estudio y uno de Matemáticas por cada año cursado. Quizá no sea totalmente cierto que mientras más alumnos asistan a cursos de Física se obtendrán más y mejores científicos o ingenieros especializados, y tal vez en la actualidad ya no sea posible aceptar sin discusión que "...aquellos países que tienen la más avanzada tecnología, tienen también los sistemas educacionales más desarrollados..."² aún cuando en ellos la ciencia y la tecnología se hayan convertido en parte importante de la cultura y logren ocupar lugares preponderantes en los sistemas educativos.

La necesidad de proporcionar una mejor preparación en el terreno de la Física, a través de un sistema que suministre los conocimientos y habilidades que reflejen el estado de la ciencia contemporánea y que ponga en evidencia los nexos indisolubles con el pasado que les da origen, resulta cada vez más importante, para formar individuos de espíritu abierto, que sean capaces de percibir los problemas tanto como de resolverlos y que sean conscientes de

¹ JONES, Graham, *Ciencia y Tecnología en los países en desarrollo*, México, Fondo de Cultura Económica, 1962, 1a. reimpresión, p. 176.

² GOODLAD, J. I., *La ciencia integrada, la formación docente y el mejoramiento de la enseñanza*, en: *Nuevas tendencias en la Enseñanza Integrada de las Ciencias*, Montevideo, UNESCO, 1977, p. 127.

la responsabilidad social de quien estudia una ciencia que es un factor activo para el desarrollo económico, pero que cuenta al mismo tiempo, con un enorme potencial de destrucción. Además, el estudio de la Física también es importante como medio de popularización de la ciencia y la tecnología y porque se le considera un sujeto cultural indispensable, tanto por quien sostiene que "... ninguna persona puede ser considerada realmente educada si no conoce la segunda ley de la Termodinámica...", como por quienes argumentan que quien no llega a tener conocimientos básicos de esa ciencia, es un hombre a medio educar.

Por otro lado, si la búsqueda del conocimiento es uno de los fines mayores de la humanidad, la Física contribuye a ello de manera trascendental, en parte por sus valores prácticos, pero también por sus amplios valores intrínsecos, pues ella misma constituye una forma de conocimiento. La Física, emparentada con las ciencias de la naturaleza a través de la metodología que utilizan, coadyuva a la comprensión del mundo aportando una característica que es la base de su rigor y que la hace diferente de las demás: el uso de conceptos matemáticos para el estudio de los fenómenos.

Por todo lo apuntado anteriormente, parece evidente el hecho de que el estudio de la Física es una necesidad para quien vive en una sociedad como la nuestra; sin embargo, es preciso reconocer que

¹ SHOM, C. P. cit. por French, A. P., Fifty years of physics education, en: Physics Today, November, 1961, p. 51.

la labor que, en general, se ha realizado en ese terreno no ha sido completamente satisfactoria, pues no resulta difícil aceptar que con frecuencia se encuentran estudiantes que al término de cursos de Física donde han logrado un buen desempeño, exhiben gruesas equivocaciones, retrocesos a niveles aparentemente superados e incapacidad para aplicar los conocimientos en la solución de problemas relativamente simples.

Las evidencias parecen abrumadoras y aun cuando no se coincida totalmente con el señalamiento de que "La enseñanza de las ciencias y las técnicas en las escuelas primarias, secundarias y preparatorias es pésima..." es preciso reconocer que mucho hay de verdad en ello. Quizá la apreciación no sea del todo justa, pero ya que no se cuenta con información concreta que permitiera asegurar que el cómo se enseña la Física en estos tiempos es mejor o peor que el cómo se ofrecía veinte años antes, tal vez debiera aceptarse que una revisión crítica de lo que actualmente se realiza no necesariamente está de más. No se puede negar que una explicación de lo anterior aparece en los reportes pesimistas que indican la existencia de una declinación generalizada en todos los niveles de nuestro sistema educativo, pero no parece haber mayores argumentos para rebatir la nueva apreciación de que "... la burocrática enseñanza que se da en las escuelas de México aleja a los jóvenes del camino de las ciencias y los deforma en muchas ocasiones

⁴ PEREZ, P., Rafael, La Enseñanza de las Ciencias, en Universidad de México, Revista de la UNAM, las ciencias en la UNAM, México, UNAM, Enero-Febrero 1991, p. 12

permanentemente".⁵

Aceptemos que nuestros acercamientos a la enseñanza de la Física se han basado en gran medida en nociones intuitivas y que en algunos aspectos han carecido de rigor científico, pues aun cuando usualmente sugerimos atacar los problemas de la Física a través del uso sistemático de ciertos principios, no hemos analizado, en general, los problemas educativos con mayor rigor ni metodología. Es cierto que la enseñanza puede seguirse realizando en la forma tradicional entendiendo a la Física como un cuerpo aislado de conocimientos, lleno de hechos y teorías que solo tienen utilidad vocacional, cuyas conexiones con otras disciplinas son casi inexistentes y donde el aprendizaje se reduce a la asimilación de hechos y definiciones que deben confiarse a la memoria. Ahora se piensa que el aprendizaje requiere de algo más que la simple memorización, pues la actividad intelectual de los estudiantes cumple un papel protagónico en ese proceso y si bien se sigue reconociendo la función informativa de la Física, se aceptan también ahora sus amplios valores formativos.

⁵ PEREZ, P., Rafael, *ibid.* p. 12

PROBLEMA.

Por medio de esta investigación se pretende estudiar la forma como aparecen y se desarrollan los conocimientos de la Física, utilizando como objeto de estudio un período de la ciencia y la historia que es señalado por algunos como el origen de una de las transformaciones más fundamentales experimentadas por la humanidad. Se analizará el período en el cual se desarrolla la Revolución Industrial, incluyendo parte de sus antecedentes, para poner en evidencia las relaciones que se establecen entre la Física y la tecnología, así como la influencia que ejercen las fuerzas económicas, políticas y culturales de esas épocas. La investigación abarca desde mediados del siglo XVIII hasta la mitad del siglo XIX, aunque algunas referencias se rastrean en siglos anteriores, y en ella se realizará un estudio detallado en la historia de las ideas y se elaborará una reconstrucción conceptual que sirva para poner en evidencia los pasos esenciales que condujeron al nacimiento y desarrollo de la Termodinámica.

En la investigación se considera que el estudio de la ciencia se empobrece si se le identifica como un conjunto compacto de conocimientos que describen verdades fijas e inalterables encadenadas a la perfección y que los conceptos no surgen tal y como aparecen en los libros de texto. Por el contrario, se tratará de mostrar que los conceptos y las estructuras que los relacionan son el producto de una evolución. En el enfoque que guía la tesis,

se unen las cualidades del método heurístico que se basa en la idea de que quien estudia se convierta en redescubridor de los conocimientos, junto con el poder de información que ofrecen el estudio de la historia y el análisis de la construcción de los conocimientos de la Física, para integrar con ello un enfoque histórico-evolutivo.

2.- EL PAPEL DE LA HISTORIA EN EL ESTUDIO DE LA FISICA.

La historia de la ciencia en general y de la Física en especial, entendidas como disciplinas particulares y sistematizadas, son relativamente nuevas, a pesar de que pudiera aceptarse que el estudio de ella ha estado presente a lo largo de su desarrollo pues sus hechos son, por naturaleza, hechos históricos. Es cierto que se puede argumentar que las revisiones de los trabajos científicos de la antigüedad son estudios históricos y que han sido realizados desde tiempos remotos, pero como rama del saber, la historia de la Ciencia tiene un pasado reciente.

Quizá pudiera plantearse también que en las Academias y Sociedades Científicas que aparecen en Europa en el Siglo XVII debieron realizarse trabajos sistematizados sobre líneas históricas; sin embargo, es necesario recordar que el papel inicial de esas agrupaciones era el conocimiento de las cosas naturales, o como plantea Voltaire⁶, el restablecimiento de la verdad y el estudio por el deseo de estudiar. Posteriormente, en Francia, con el triunfo de la revolución desaparece la Academia Científica en 1793 y se crea el Instituto Nacional, que al vincularse con la Escuela Normal y la Escuela Politécnica, pone a la ciencia al servicio de la comunidad como un objetivo del Estado; por ese tiempo la Sociedad Real de Inglaterra se había ido convirtiendo en

⁶ cfr. VOLTAIRE, *El siglo de Luis XIV.* (II), España, Ediciones Orbis S. A., 1966, 2a. Edición, pp. 147-150.

un organismo burocrático, mientras que su ciencia se mantenía en el pasado⁷, aun cuando años después, en 1799, se fundara la Royal Institution.

Seguramente el nuevo enfoque para el estudio de la ciencia se empieza a gestar con los pioneros del pensamiento histórico moderno, pero sus precursores pueden encontrarse a finales del Siglo XVII; pues ya era practicado, en cierta medida, en los apartados históricos de los tratados científicos de esa época; sin embargo, su desarrollo debe relacionarse con la nueva dirección que se le imprime a la Historia, cuando el estudio de la cultura y de las ideas empieza a competir con el de las fechas y los personajes. Al siglo XVIII se le considera el siglo de la Historia pues el campo histórico extiende sus alcances en él, los historiadores de la ciencia hacen su aparición, en Francia bajo el impulso de Fontenelle y Condorcet, empezando a construir su disciplina sobre las concepciones tanto de Descartes como de Leibniz, quienes juegan un papel relevante para la historia de la ciencia que también se vuelve importante en ese tiempo.

Durante ese siglo el interés despertado por la orientación histórica se manifiesta en una bibliografía que crece poco a poco con trabajos como los de Lagrange y Montucla en matemáticas o Dutens y Priestley en Física y en la consolidación de un clima intelectual que propicia el desarrollo de los "Eloges" académicos

⁷ cfr. SONNATI, Stefano. Ciencia y científicos en la sociedad burguesa, España, Icaria Editorial S. A., 1984, 2a. Edición pp. 31-46.

que se realizan en la Academia de las Ciencias, donde se llevan a cabo investigaciones y se difunde la obra de diferentes hombres de ciencia; con el paso de los años este nuevo puente entre la sociedad y la ciencia se va reforzando a medida que los historiadores se acercan más a la ciencia y los científicos a la historia.

Las investigaciones predominantes en esta primera etapa eran de tipo bibliográfico, descripciones cronológicas de ciertas ciencias o enumeraciones de los actos de algún científico, pero en general no aparecen mayores intentos por analizar las situaciones o estudiar los factores que pudiesen influir en el desarrollo de las ideas. No puede negarse que algunos de los primeros esfuerzos académicos en este campo rindieron escasos frutos; así por ejemplo, aunque en 1841 James O. Halliwell funda "... la primera Sociedad de Historia de la Ciencia... (ésta)... desapareció después de hacer dos publicaciones..."; de manera semejante, el primer curso de historia de la ciencia creado en el College de Francia en 1892 fracasó poco después, al parecer por "... el nombramiento de profesores ineptos...".

A finales del siglo pasado y en las primeras décadas de éste, fue notable el trabajo de historiadores como M. Cantor, K. Sudhoff o P. Duhem pero debe señalarse en forma especial a P. Tannery y G.

⁴ BERNAL, J. D. y otros, *La Ciencia de la Ciencia*, México, Editorial Grijalbo, S. A., 1968, Colección UINA, p. 323.

⁵ BARTON, George, *Ensayos de Historia de la Ciencia*, México, UTEHA, 1968, Biblioteca UTEHA de historia, p. 9

Sarton que han sido considerados en Francia y Estados Unidos, como los impulsores de la idea de elaborar una historia general de las ciencias, que comprendiera el desarrollo progresivo del conocimiento humano, superara las limitaciones de los trabajos previos y que relacionara las ideas científicas con el progreso general de la civilización; Paul Tannery quien es uno de los primeros en estudiar con toda seriedad esa disciplina y de promover su enseñanza en las universidades, es reconocido también por sus valiosos trabajos de edición sobre obras antiguas y por el gran número de artículos y monografías que produjo sobre temas histórico-científicos.

Dentro de esta nueva etapa de desarrollo de la disciplina, George Sarton es sin duda una de las personalidades con mayor reconocimiento; exilado de Bélgica, se establece en Estados Unidos en 1915 e inicia ahí una labor que lo convierte en uno de los más importantes investigadores del tema, a través de su revista *Isis*, de la que entre 1913 y 1939 se habían publicado treinta volúmenes en los que se clasificaron "...por lo menos cincuenta mil publicaciones de historia y filosofía de la ciencia..."¹⁰ y de *Osiris*, publicación para artículos largos.

Sarton, que es también organizador de la nueva Sociedad de Historia de la Ciencia que renace en 1924, desarrolla su labor en diferentes universidades norteamericanas, donde imparte numerosos

¹⁰ SARTON, George, *Ibid.* p. 364.

cursos sobre el tema y realiza investigaciones diversas que le permiten publicar una docena de libros y abundantes artículos, así como su obra principal, los tres volúmenes de Introducción a la Historia de la Ciencia donde se recogen veinte años de trabajo.

Si bien en la mayoría de sus obras escribe acerca de los personajes, en ellas es evidente su preocupación por mostrar que los descubrimientos y los científicos famosos no surgen providencialmente, sino que son producto de una larga evolución y que, cualquier estudio acerca de ellos, debiera incluir referencias respecto al medio del que provienen. Las ideas de Sarton, parece evidente, lo separan en forma apreciable de sus contemporáneos y son, al mismo tiempo, la base del enfoque histórico-cultural para el estudio de la ciencia, enfoque que si bien tuvo una escasa vigencia, pues muy pronto se le tachó de deficiente, tuvo la virtud considerable de superar las limitaciones de los estudios descriptivos previos y señalar el camino para el desarrollo posterior.

A finales de los años veinte la línea de estudio continua su avance, pues en 1928 se funda la Academia Internacional de Historia de la Ciencia y el año siguiente se celebra el Primer Congreso Internacional en París, mientras la URSS ha entrado en el primer plan quinquenal de Stalin y los Estados Unidos empiezan a vivir su década de depresión. El segundo congreso internacional se celebra en Londres en 1931 y en él, la delegación soviética realiza una

aportación fundamental principalmente a través de la investigación de Boris Hessen quien, al postular que en su trabajo habría de "...utilizar el método del materialismo dialéctico y la concepción del proceso histórico creado por Marx para analizar la génesis y el desarrollo de la obra de Newton..."¹¹, señala un nuevo camino, que si bien se esbozaba desde principios de siglo, se materializa a partir de entonces.

La presentación de las ideas de Hessen fue un detonador para la formación de un grupo informal de investigadores británicos, que algunos identifican como Colegio Invisible¹², denominación que aparece también en otros momentos de la historia, quienes realizan discusiones acerca de los lazos de unión entre el desarrollo de la ciencia y las condiciones socioeconómicas que a la luz de los conceptos marxistas parecían haberse puesto en evidencia; a partir de entonces los grupos de discusión se vuelven más numerosos y la comunidad histórico científica entra en nueva actividad, la cual se vio reforzada por la crisis económica y política que fue el preludeo de la segunda guerra mundial.

En los años siguientes los científicos manifiestan actitudes que, al parecer son nuevas hacia los problemas sociales, pues si bien deben seguir realizando investigaciones para la guerra, ahora expresan abiertamente sus preocupaciones acerca de la posibilidad

¹¹ HESSEN, B. Las raíces socioeconómicas de la mecánica de Newton, en Saldaña, Juan J., compilador de introducción a la teoría de la historia de las ciencias, 2a. edición, México, U.N.A.M., 1989, p. 80.

¹² cfr. BERNAL, J. D. y otros, op. cit. p. 15.

de ella. Son las épocas de la Asociación de Trabajadores Científicos y de la constitución del Grupo Antibelicista de Científicos de Cambridge en Inglaterra y del Comité de Vigilancia que unió a científicos e intelectuales en Francia, los cuales trabajaron activamente en ambos países, alertando a la sociedad acerca de los peligros de la guerra y que hicieron germinar la idea de organizar la Federación Mundial de Trabajadores Científicos, que pudo cristalizar hasta después del término de la guerra.

A lo largo de toda la década, pero especialmente hacia su final, se puede detectar una línea específica de estudio representada por un número considerable de libros y publicaciones, que se identifica en general como externalista, la cual es generada principalmente por el grupo británico de científicos, entre los que destacan J. D. Bernal y J. Needham. Ellos elaboran en conjunto planteamientos teóricos nuevos y proponen una concepción acerca del desarrollo de la ciencia donde se plantea que las condiciones sociales y económicas ejercen una influencia directa, tanto en la dirección en que se desarrolla la ciencia, como en los problemas que debe resolver; de toda la obra generada, quizá el producto más trascendente sea "La Función Social de la Ciencia" de Bernal, que tuvo una influencia profunda en el desarrollo de la conciencia social de los científicos de su época.

El libro, que se publica en 1939 y se reedita cuatro veces durante la guerra, es para muchos la gran obra de John Desmond

Bernal, físico británico de ideología marxista que, además de una amplia labor de investigación, dedicó gran parte de su vida al estudio de las relaciones entre el desarrollo de la ciencia y los fenómenos histórico-sociales. Bajo la influencia de obras como esa y con la participación política que se desarrolla durante la guerra, la comunidad científica, que ya en épocas anteriores había manifestado preocupaciones éticas, desarrolla una mayor conciencia respecto al papel social de la ciencia incrementando su interés por los problemas sociales y la historia social de la ciencia empieza a competir con los otros enfoques.

A partir de entonces los trabajos y las investigaciones se van ampliando y con ello toman rumbos diferentes; ya no basta con examinar la vida de los grandes hombres de ciencia, es necesario analizar las sociedades en que se desarrollan, pues lo que hace a la historia es el movimiento de las masas. No es suficiente con reconstruir el pasado, las reconstrucciones se interpretan como caminos para comprender cómo evoluciona la ciencia, bajo que condiciones lo hace y cuáles son los factores que influyen en ello. El estudio de cada una de las ramas de la ciencia, los hechos que constituyen sus orígenes, la forma como cada una evoluciona y el papel que desempeñan en el desarrollo de las sociedades van siendo reconocidos como sectores importantes de análisis y nuevos elementos sociológicos se incorporan a las investigaciones históricas.

Las nuevas ideas generan formas diferentes de entender los procedimientos corrientes y el horizonte de estudio se ensancha; así por ejemplo, cuando se llega a reconocer que quien analiza la historia de alguna rama de la ciencia, asume una concepción particular acerca de ella, se abre el camino para visualizar las diferentes escuelas teóricas que orientan su desarrollo y con ello también se revelan espacios para estudiar la metodología que se utiliza en cada período o la forma como aparecen y se modifican las distintas formas de pensamiento científico.

Para el avance de ésta nueva línea histórica el aporte de Bernal es fundamental y su posición respecto al tema queda resumida al plantear que "... sólo si comprendemos el curso de la ciencia en el pasado estaremos en condiciones de controlar su acción en el presente y en el futuro..."¹³. Su contribución mayor a la disciplina parece ser el libro enciclopédico "La ciencia en la historia" donde consigue reconstruir el pasado de la humanidad, para examinar las relaciones que se establecen entre la ciencia y los fenómenos sociales; ahí concentra su interés en las ciencias naturales y la tecnología con el propósito de estudiar la influencia que ejerce la ciencia sobre los distintos componentes de la historia. A pesar de que llegó a plantear que su libro no pretendía ser una historia de la ciencia, con el paso del tiempo se ha convertido en una fuente de consulta obligada para aquellos que se interesan por el tema, reconociendo quizá con su preferencia que

¹³ BERNAL, J. D., Ciencia e Industria en el siglo XIX, Barcelona, Ediciones Martínez Roca S. A., 1971, p. 10.

"... sólo a través de la exposición... de las interacciones de la ciencia y la sociedad en el curso de la historia,... se puede empezar a comprender lo que significa la ciencia..."¹⁴.

Sobre esas bases queda establecido el enfoque que también se conoce como social, el cual, por sobre todos los defectos que le serán señalados posteriormente, constituye una gran aportación desde el punto de vista metodológico, que ha dado origen a numerosas investigaciones en historia de la ciencia. Dentro de esa concepción se han incluido estudios que van desde aquellos que aplican los criterios marxistas con rigurosidad, hasta los que reducen los complejos fenómenos del desarrollo de la ciencia al resultado directo de las relaciones sociales y económicas de una época dada, llegando a caer en un sociologismo que ha dado pie a muchas de las críticas al enfoque.

A la luz de los argumentos anteriores parece necesario reconocer que la aplicación de la teoría marxista, que adjudica a la ciencia una dimensión social y una ubicación en la historia, contribuyó notablemente a la diversificación de las investigaciones y a la expansión de un campo de estudio que, en esa época, aun privilegiaba el análisis de las grandes epopeyas y los más brillantes científicos de la historia. Sin embargo, también debe señalarse que esa orientación no ha logrado ser aceptada completamente por la comunidad científica y que los trabajos que

¹⁴ BERNAL, J. D. La ciencia en la historia, México, U.N.A.M. y Editorial Nueva Imagen, 1979, 1a. Edición, p. 72.

siguen esa línea han tenido que soportar críticas considerables desde puntos de vista alternativos, lo cual ha conducido a la disciplina al conflicto que se conoce como la controversia internalismo-externalismo, que ha ocupado la atención de los investigadores en las últimas décadas.

La controversia entre los dos enfoques se va estableciendo a través de las críticas que, principalmente, se hacen hacia la corriente social y va creciendo hasta consolidar un enfrentamiento abierto que radicaliza las posiciones y deja ver en el trasfondo, señales de la lucha entre el idealismo y el marxismo. El problema toma forma con la emergencia de una corriente contraria que habrá de aparecer como concepción teórica a finales de los años treinta y que es, en gran medida, una reacción a la influencia que llegó a ejercer el pensamiento marxista sobre los estudios histórico científicos realizados después del congreso de Inglaterra.

Este nuevo enfoque, con el cual también se pretende explicar el desarrollo científico, se opone a la teoría marxista del desarrollo de la ciencia y al enfoque histórico que la utiliza, al cual califica de externalista, por ocuparse de cuestiones que considera exteriores a la ciencia como los aspectos sociales, económicos o ideológicos y porque "... aunque exaltaba el nombre de la ciencia... era poco el énfasis que daba a la tradición intelectual que había alimentado o retardado el avance de la

ciencia..."¹⁵. Según la corriente contraria, su análisis histórico se dirige, en principio, al estudio del movimiento de las ideas, teorías y métodos científicos, adoptando una posición que se conoce como internalista, donde se piensa que la ciencia es una esfera aislada, autónoma, regida por sus propias leyes, donde todo se controla a través de la lógica del pensamiento científico y cuya evolución sólo puede ser explicada a partir de la ciencia misma.

Para el enfoque internalista existen dos tipos de factores que afectan a la ciencia, los interiores y los exteriores, que a primera vista parecen ser opuestos, como opuestas serían también las orientaciones respecto a la historia de la ciencia que resultan de basarse en ellos. Con frecuencia se ha atribuido a este enfoque el rechazo de cualquier influencia de los factores económicos y sociales en el desarrollo de la ciencia, pero esto no es totalmente correcto en tanto que en él se reconoce que esos factores pueden contribuir a promover o frenar ese desarrollo, aunque no inciden directamente sobre la estructura del conocimiento ni afectan la dirección en que se desarrolla la ciencia. Sus seguidores, que en sus primeros momentos buscaron oponer totalmente los aspectos intelectuales a los socio-históricos, planteaban que el desarrollo del conocimiento científico únicamente se puede analizar a partir de sí mismo y que no podría haber más historia de la ciencia que aquella que se situara dentro de ella, ya que, desde su óptica, esa historia es sólo un hecho de la ciencia misma.

¹⁵ MACLEOD, Roy, *Cambio de perspectiva en la historia social de las ciencias*, en Saldana, Juan J., op. cit. p. 261.

Para la corriente externalista, el principal exponente del enfoque internalista es el historiador de la ciencia Alexandre Koyré, que ejerce desde Francia una gran influencia sobre los investigadores anglo-sajones y los norteamericanos que será considerada decisiva para el fortalecimiento del enfoque, principalmente a partir de la traducción de su obra escrita en los años posteriores a la Segunda Guerra Mundial, entre la cual destaca sus "Estudios Galileanos" que aparece en 1940, para popularizar sus concepciones acerca del desarrollo de las ciencias, las cuales tienen amplio respaldo en sus numerosas investigaciones.

Es importante señalar, por fuera del debate que se estableció, que prácticamente al mismo tiempo que surgían las ideas de Koyré, en Francia aparecen también los trabajos epistemológicos y de historia de la ciencia de Gastón Bachelard, quien sustenta una visión de la historia del pensamiento científico que incluye como noción central el concepto de "obstáculo epistemológico", sosteniendo que en cuanto a los conocimientos científicos "... se conoce en contra de un conocimiento anterior, destruyendo conocimientos mal adquiridos..."¹⁶. Bachelard rechaza la idea de la continuidad histórica oponiendo a ella su concepto de ruptura y establece su proyecto de historia científica alrededor de la historia caduca que descansa "...sobre errores fundamentales y aún contradicciones... (y)... la historia sancionada (que) se refiere a nociones que cesaron de ser contingentes, ocasionales,

¹⁶ BACHELARD, Gastón, *La formación del espíritu científico*, 8a. edición., México, Siglo XXI editores S. A., 1979, p. 15.

convencionales..."¹⁷ para transformarse en conceptos científicos. Sus planteamientos, que en conjunto ejercieron gran influencia sobre los investigadores franceses, no lograron pese a ello, el mismo reconocimiento en otros países sino hasta épocas muy posteriores.

Para algunos autores Koyré es heredero de la tradición de P. Duhem, pues como éste, juzga que las matemáticas proporcionan las claves para la comprensión de la naturaleza; si bien sostiene que la ciencia es la búsqueda de la verdad, también señala que su obra es guiada por la convicción de la unidad del pensamiento humano. Koyré reconoce que la ciencia es un fenómeno social y que las condiciones sociales permiten o dificultan su desarrollo; pero, al parecer intentando contrarrestar los excesos de una línea externalista que trataba de explicar todo el trabajo de los científicos de la antigüedad con base en el desarrollo de la sociedad, argumenta que le "...parece vano querer deducir la ciencia griega de la estructura social de la ciudad... (y que) ... No es la estructura social de la Inglaterra del siglo XVII la que puede explicar a Newton, como tampoco la de la Rusia de Nicolás I puede aclarar la obra de Lovachetski..."¹⁸. Identifica a la ciencia, esencialmente como "theoria", una ciencia que progresa en la búsqueda de la verdad, que sólo puede ser comprendida en función de ella y de sus propios problemas.

¹⁷ SALDANA, Juan J. op. cit., p. 28.

¹⁸ KOYRE, Alexandre, Estudios de historia del pensamiento científico, 6a. edición, México, Siglo XXI editores, 1984, p. 185.

Su obra ejerció un impacto decisivo sobre los historiadores de la ciencia, pues además de hacer un aporte notable al estudio de la revolución científica del siglo XVII contribuyó en gran medida a que se superaran los enfoques biográficos y a que la atención de los historiadores se centrara en el proceso de desarrollo de la ciencia. Ante las diferencias señaladas, la división entre la comunidad histórico científica se hace más evidente. Mientras R. K. Merton propone una forma más útil de interpretación socioeconómica, las discrepancias se profundizan y los debates no siempre se mantienen dentro de los límites deseados. Durante los años cuarenta las posiciones parecen irreconciliables, con un internalismo que avanza defendiendo la superioridad cultural de la ciencia, que también muestra G. Bachelard, la cual, desde la óptica del externalismo, debe entenderse como "... el engrandecimiento típico del científico, que considera a la ciencia como el único saber verdadero..."¹⁹ mientras que el externalismo deriva hacia un sistema tosco, basado en la utilización de la sociología ordinaria y el determinismo económico, que parece facultar a la oposición para emitir juicios tan severos como el que ..." La historia externa puede incluir cambios en el sistema escolar, la llegada del Sputnik o el dadaísmo..."²⁰

Las preocupaciones sociales que los científicos de corte externalista, en especial los británicos, habían mostrado desde los

¹⁹ BERNAL J. D., y otros, op. cit. p. 322.

²⁰ HACKING, Ian, La filosofía de la ciencia según Lakatos, en Hacking, Ian, compilador de *Revoluciones Científicas*, México, F.C.E., 1985, p. 262, Breviarios No. 409.

años previos a la guerra se vieron incrementados por el lanzamiento de la bomba atómica de 1945 y del enfoque se desprende una línea que sirve de base para la aparición de la Ciencia de la Ciencia, que se construye con los aportes de numerosos científicos cuyos trabajos se vinculan estrechamente con la problemática social. Esta nueva orientación, pretende promover la aplicación de los métodos científicos a la comprensión de la ciencia misma y tiene entre sus objetivos la concientización acerca del papel que le corresponde a la ciencia en el desarrollo de la sociedad y el que debiera asignársele en el futuro; aunque su aparición parece coincidir con una cierta falta de interés por las explicaciones sociales de la ciencia, que se manifiesta por una reducción de las publicaciones de este tipo en la década de los cincuenta y principios de los sesenta.

La historia interna de la ciencia, que algunos catalogan como historia intelectual, evoluciona en esos tiempos bajo la pretensión de excluir de su campo de estudio los factores subjetivos o personales, postulando que los descubrimientos surgen como refutaciones a alguna teoría científica y que por lo tanto pertenecen a la ciencia misma; en esa etapa se señala el camino para el análisis de la historia de los problemas y las teorías científicas, se examinan las causas que determinan que éstas sean substituidas y se da pauta para el estudio de las estructuras del pensamiento. Entre los aportes notables de esa época puede señalarse el de C. C. Gillespie de 1959 o el de A. Rupert Hall de

1963, donde el autor critica los trabajos de R. K. Merton y califica como generalizaciones simplistas a las interpretaciones socioeconómicas de la revolución científica.

Sin embargo, con el paso de los años el panorama empieza a sufrir modificaciones sustanciales con los aportes de nuevos investigadores que provienen de otras disciplinas o que enfocan a la ciencia desde ópticas diferentes; hacia el final de la década de los sesenta la perspectiva se invierte cuando los estudios sobre historia social de la ciencia recuperan mucho del terreno perdido y cuando se ponen las bases para la reconceptualización de las viejas diferencias. Con este nuevo cambio de dirección, que no puede ubicarse con precisión en el tiempo, la controversia no quedará concluida del todo, pues aún subsistirán importantes cuestiones por resolver, pero los espacios de discusión comienzan a ampliarse con la emergencia de puntos de vista intermedios que señalan otros caminos donde no se niega la productividad de las tendencias en pugna, sino que se propone el análisis de sus virtudes y defectos, bajo la pretensión de desarrollar perspectivas históricas más integradas.

Dentro de esta nueva orientación quizá la mayor de las aportaciones le corresponda a T. S. Kuhn, quien es señalado por algunos como externalista restringido, él planteaba en 1968 que la unión de los dos enfoques en pugna era el reto más grande de la disciplina; a través de su obra magna, "La estructura de las

revoluciones científicas", Kuhn ejerce una influencia decisiva para el avance de la nueva dirección, pues sirve para dirigir la atención hacia el estudio de un conjunto más amplio de factores que pudieran afectar el desarrollo de la ciencia. A partir de entonces los historiadores van avanzando más hacia los terrenos entre el internalismo y el externalismo y las revistas científicas proporcionan, ya dentro de los setentas, mayores espacios para los estudios sociales, al tiempo que se critica abiertamente tanto la controversia como los argumentos que en ella se sostenían.

Al iniciar los ochentas se llega a aceptar ampliamente que el conocimiento científico tiene un papel social y el rechazo hacia la clasificación "interior" "exterior" se hace evidente con calificativos de simplismo o llegando a considerarla como un problema ficticio²¹, pero ninguno de los dos caminos ha sido abandonado y no puede asegurarse que la discusión se encuentre concluida, aún cuando se piense que uno y otro enfoque se relacionan no solamente cuando se estudia la interacción de la ciencia con otras esferas de la vida de la sociedad, sino también cuando la ciencia se reconoce como un establecimiento social. Gracias a ese y otros factores, el campo de estudio ha crecido considerablemente para englobar trabajos de diferente factura y durante los últimos años la historia de la ciencia ha evolucionado como campo científico, para pasar de los niveles descriptivos hasta las fases explicativas, alcanzando un grado de madurez que la

²¹ cfr. MIKULINSKI, S. R., La controversia internalismo-externalismo como falso problema, en Saldana, Juan F. op. cit., pp. 231-256.

convierte en una importante rama del saber científico, en donde se conjugan para formar un todo orgánico el análisis riguroso del material científico junto con el estudio de los diferentes fenómenos socio-históricos para tratar de desentrañar como evolucionan las ideas.

3.- EL ENFOQUE HISTORICO EVOLUTIVO.

No obstante que el análisis histórico de la ciencia ha sido reconocido ya como una disciplina independiente, aún sigue siendo objeto de crítica, la principal de las cuales se refiere a su supuesto idealismo; tanto porque se argumenta que separa a los hechos que estudia del contexto histórico y social del que forman parte, como porque al establecer estudios particulares de cada una de las ramas que la constituyen, fragmenta la actividad científica y la convierte en una yuxtaposición de historias parciales de ciencias distintas.

Desde un punto de vista ortodoxo las apreciaciones anteriores parecen irrefutables; sin embargo, resulta necesario reconocer, respecto a la primera, que la adopción de un enfoque internalista no conduce a la negación tajante de la visión externalista, pues en la actualidad se aplican criterios más científicos. En todo caso, al campo histórico que nos ocupa se accede desde diferentes caminos y su estudio admite la utilización de los distintos enfoques que se han desarrollado; no se piensa aquí que uno sea mejor que otro, pues cada uno entrega productos de valor considerable.

La segunda apreciación requiere una discusión más amplia; en primer lugar porque las investigaciones históricas particulares parecen un camino necesario, en vista de que la ciencia se ha convertido en un espacio de dimensiones muy amplias, gracias a la

abundancia de información acumulada y el avance acelerado de los conocimientos, por lo que la elaboración de un estudio sobre la historia global de la ciencia, que pudiera abarcar desde los orígenes de cada rama hasta la actualidad, que mostrara las relaciones entre ellas y analizara las influencias de los fenómenos socio-económicos, es una empresa que parece irrealizable.

Igualmente y sin dejar de reconocer el valor del enfoque relativo a la ciencia integrada, parece evidente que así como se fragmenta la realidad para estudiarla en sus diversos aspectos: físicos, químicos, biológicos, etc., así también habría que emprender el estudio de la historia con enfoques singulares que si bien resultan visiones parciales sobre el tema, pueden ofrecer un panorama completo de la estructura de cada rama particular de la ciencia, que no sólo es consistente con ella misma, sino que también tiene coherencia con la ciencia en su conjunto.

Un argumento más en el mismo sentido se obtiene al reconocer que dentro de los complejos procesos de conocimiento, el relativo a la ciencia constituye una forma especial e independiente y puesto que "... cada una de las divisiones de la ciencia posee sus características distintivas y éstas, conjuntamente con categorías generales especificadas peculiarmente dentro de su dominio, la definen por completo..."²², es evidente que cada una de ellas, la Física por ejemplo, posee una lógica interna propia y presenta

²² DE GORTARI, Ell, *Dialéctica de la Física*, cit. en *Filosofía de la Ciencia Antología*, México, Ediciones Quinto Sol S. A., 2a. edic. p. 48.

regularidades intrínsecas particulares que la convierten en un campo de estudio especial.

Antes de seguir adelante parece necesario hacer notar que con lo planteado hasta aquí no se pretende negar la importancia de las descripciones históricas globales, toda vez que se acepta que la suma de las historias parciales de las disciplinas particulares no puede considerarse como una historia de la ciencia en su conjunto. Es cierto que los tratados integrales requieren de complicados trabajos de investigación y largos períodos de análisis, pero a pesar de ello su utilidad es invaluable, pues constituyen la mejor manera de mostrar la complejidad real de las actividades científicas.

Es evidente que también hay razón en quien sostiene que el conocimiento del todo se fundamenta en la comprensión de las partes, pero la idea no es cerrar un círculo a través de argumentos que puedan contraponerse; habrá de señalarse nuevamente que los estudios histórico-científicos no son excluyentes, cada uno tiene su importancia especial y aunque sus niveles de cobertura y profundidad sean diferentes, sus resultados pueden complementarse pues contribuyen, desde ópticas diferentes, a la comprensión del campo de estudio científico.

Un estudio histórico de la Física, se entiende como un instrumento para profundizar en el campo particular de esa materia,

que permite reconocer las peculiaridades del pensamiento en las diferentes etapas de su proceso de evolución, así como los factores internos y externos que influyen en éste, que abre la posibilidad para una mejor comprensión de los conocimientos actuales, pues permite rastrear en el pasado los fundamentos de las teorías modernas.

A través de él es posible estudiar también el lugar que ha ocupado la Física en la historia de la humanidad, su interacción con la cultura y los fenómenos sociales, la gestación, el surgimiento y la sustitución de las diferentes leyes y teorías, la evolución de los métodos, las relaciones con la tecnología, los procesos de acumulación y desarrollo de los conocimientos, así como la aparición de las diferentes revoluciones en la ciencia.

La Física emerge como un espacio importante para los estudios históricos, los cuales pueden limitarse tan sólo a la biografía de los grandes personajes o a la descripción pura de los lazos de unión entre todos ellos, pero que también pueden abarcar terrenos tan amplios como los que se abren al examinar los trabajos de investigadores poco conocidos que, sin embargo, realizaron aportaciones notables para el desarrollo de la ciencia o lo que se refiere a la exploración de las líneas de estudio que no resultaron tan exitosas, la evaluación de los errores y las hipótesis equivocadas, el análisis de los obstáculos intelectuales y aun las indagaciones que sin entregar resultados aparentes también

influyeron en el avance de los conocimientos.

En los últimos años el campo relativo a la historia de la Física se ha ampliado considerablemente y no resulta fácil establecer en él criterios metodológicos absolutos o definiciones conceptuales definitivas, pues existe una pluralidad de enfoques y metodologías que convergen en la concepción de que los estudios de este tipo deben entenderse como procesos de complejidad apreciable.

En ellas se ha pretendido conceptualizar a la Física como el resultado de los esfuerzos de las generaciones subsecuentes que van adicionando a la memoria colectiva las verdades de las épocas en que viven, para establecer con ello el *continuum* histórico de la ciencia y evidenciar que la tesis evolutiva que se encuentra presente en muchos de los trabajos, es necesaria para entender la dinámica que conduce al desarrollo de las ideas y los conceptos.

Desde un punto de vista evolutivo, la historia de la Física no está hecha solamente para responder al qué, el cuándo, el dónde o el quién, pues se concibe como un campo de estudio más amplio que el solo registro cronológico de los resultados del saber; un estudio histórico de ese tipo se entiende como una empresa compleja, por medio de la cual se pretende realizar una explicación más completa acerca de las formas en que los conceptos y las teorías de la Física han aparecido o se han transformado, intentando reconstruir la manera en que se gestan y se desarrollan

esos procesos y poniendo en evidencia como se vincula la evolución de esa ciencia con las condiciones y necesidades sociales y económicas.

En el enfoque también se toma en cuenta que a pesar de que los trabajos específicos se asocian con la labor intelectual y creativa de los hombres de ciencia de cada época, el desarrollo alcanzado por la Física es claramente de naturaleza social y viene a ser el resultado de los esfuerzos de las generaciones que nos anteceden y las contribuciones mayores o menores de cada etapa de la humanidad. Así, el estudio de lo histórico se presenta como un esfuerzo por investigar y comprender en qué medida las nociones, las actitudes y los métodos que han sido superados ahora, han sido considerados igualmente en su momento como factores concretos de superación.

En los estudios de este tipo se reconoce que en cada periodo histórico se forma una imagen particular del mundo, donde se entrelazan las principales nociones científicas, filosóficas y sociales, para reflejar la existencia real de una época e incidir en todos los aspectos de la cultura; también se acepta en ellos que de una etapa de la historia a la otra, pueden variar tanto los contenidos que estudia la Física como los métodos con que se analizan los problemas de la naturaleza, las formas de pensamiento, las concepciones acerca de la ciencia y las relaciones que se establecen con los sistemas sociales.

Un elemento más que se agrega al terreno del análisis está conformado por los sistemas científicos de cada época, que se establecen alrededor de los aportes individuales, del trabajo de grupos aislados sin mayor estructuración o por la labor de instituciones sociales plenamente reconocidas, pues ellas constituyen, en conjunto, el ambiente concreto que determina, de manera implícita, el aparato conceptual y las teorías que conforman a la Física de las diferentes etapas históricas. Su estudio proporciona elementos para comprender mejor los procesos que subyacen en la gestación de las ideas y permite al mismo tiempo, analizar las situaciones que conducen a elegir una línea de investigación por sobre otras que también parecen fructíferas.

Se acepta igualmente en este enfoque que toda la ciencia avanza a través de la ejecución de proyectos que son regulados por la propia ciencia, pero que también se admiten aportes que tienen su origen en otras ramas de ella, que pueden provenir de hallazgos que son producto del azar o que son obtenidos como respuesta a la problemática que presenta el medio social, pues como se sabe, una buena parte del conocimiento científico y del de la Física en especial, se ha expandido a partir de los impulsos y requerimientos sociales.

Por medio de los estudios histórico evolutivos se muestra también que la Física no se desarrolla en forma unidireccional, ni sus contenidos se han ido acumulando con el paso de los años para

constituir una cadena perfecta que de manera lineal pudiera conducirnos del pasado hasta el presente, sino que ha experimentado una larga evolución donde se han tenido que superar experiencias negativas que condujeron a resultados erróneos o a aparentes callejones sin salida, que ha sufrido retrasos y desviaciones originados tanto por obstáculos internos como externos y que ha debido superar etapas de crisis en aquellas épocas donde ha sido necesario abandonar las ideas antiguas ante la evidencia de las explicaciones nuevas.

Pero una reconstrucción histórica de ese tipo, que se establece con la finalidad de realizar un análisis crítico de los procesos, en donde se estudian los contenidos, los métodos y los sistemas de pensamiento no sólo es necesaria porque sirve para comprender el desarrollo de la ciencia misma, sino que también es importante porque contribuye al avance de otros espacios de investigación. Uno de ellos es el que se relaciona con los estudios epistemológicos que se basan en la génesis de los conocimientos, que realizan F. Enriques o F. Gonseth²³, pero que tiene a Jean Piaget como su exponente más notable, el cual propone una teoría desde la que se realiza una lectura de la historia de la ciencia distinta a los acercamientos tradicionales y que proporciona información interesante.

En ella se interpreta que la ciencia nunca alcanza estados

²³ PIAGET, Jean, Volumen I, *Naturalista y métodos de la epistemología*, la. reimpresión, México, Edit. Paidós Mexicana S. A., 1985, p. 111, *Tratado de Lógica y conocimiento científico*.

definitivos y por lo tanto se investiga a través de qué procesos se logra pasar desde un conocimiento que generalmente se considera insuficiente, hasta otro que la comunidad científica acepta como superior. Así, el desarrollo de las nociones científicas o, de manera general, el incremento de los conocimientos alrededor de una ciencia como la Física, constituye para Piaget un hecho que puede estudiarse a través de dos caminos complementarios, uno que sirve para analizar lo personal o psicológico y otro que se ocupa de lo social a través de lo histórico.

En esta línea se sostiene que el conocimiento no es tanto un estado sino un proceso que sufre la influencia de las etapas precedentes de desarrollo y que todo aumento de conocimiento científico es un hecho colectivo caracterizado por una historia, cuya comprensión supone la reconstitución de ese desarrollo histórico, que se concibe no como una cronología anecdótica de los descubrimientos, sino como una historia del pensamiento científico.

De acuerdo con los planteamientos de Piaget, el conocimiento, tanto en el plano individual como en el social, pasa por un largo camino evolutivo y sostiene que de estudiarse éste, se podría esclarecer la naturaleza de ambos tipos de conocimiento; para ello, en la última etapa de su vida realiza estudios comparativos entre la historia de la física y las matemáticas y los mecanismos de conocimiento del niño, intentando encontrar paralelismos entre la adquisición individual de los conocimientos y el desarrollo del

saber colectivo, concluyendo que ha conseguido detectar un buen número de semejanzas entre esos mecanismos y presentando, además, un interesante estudio de la historia de la mecánica y un desarrollo detallado acerca de la psicogénesis de los conocimientos físicos²⁴.

Ahora bien, una discusión acerca de la importancia de los estudios histórico evolutivos no estaría completa si no se analizara la importancia que tienen desde el punto de vista educativo y el papel que pudieran desempeñar en el terreno de la enseñanza de las ciencias, donde más que una actividad complementaria de las diferentes metodologías que sólo puede usarse en temas específicos, debiera entenderse como un medio de aproximación diferente al proceso educativo y en especial, como un enfoque alternativo para el estudio de la Física.

Aceptemos como punto de partida que el tema de la enseñanza se ha enfocado comúnmente como un intento por aplicar la lógica al hecho vivo del contacto y la comunicación de profesores y alumnos para realizar ciertos trabajos seleccionados que pudiesen llevar a un aprendizaje de los últimos. Sin embargo ese modelo lineal con sus dos dimensiones básicas, enseñanza y aprendizaje, centradas cada una en un personaje con funciones y obligaciones particulares se ha ido reconociendo como insuficiente. Por ello con el paso de los años se ha llegado a admitir que el estudio del complejo

²⁴ Cfr. PIAGET, J. y García, R., *Psicogénesis e historia de la ciencia*, 2a. edic., México, Siglo XXI editores S. A., 1984.

andamiaje que representa el hecho didáctico en su conjunto es mucho más complicado y que si se intenta comprenderlo hay que examinarlo desde la óptica de diferentes campos de estudio.

Sin embargo y aun bajo la aceptación de la complejidad que se señala, es necesario reconocer que todo proceso educativo se justifica y tiene sentido en la medida que entrega resultados, es decir, cuando aquel a quien se enseña es capaz de apropiarse e individualizar la experiencia socio-histórica, cuando en él se produce el aprendizaje. Tenemos así un aprendizaje que puede asociarse con el modelo tradicional de educación, que pese a la influencia de las diferentes corrientes e intentos por dinamizar la enseñanza aún parece seguir vigente, donde los alumnos son receptores de información que conduce al memorismo y cuya pasividad se hace fluctuar ante distintas situaciones educativas donde sólo parece buscarse que se mantengan ocupados.

En extremos opuestos se ubican enfoques diferentes que pretenden propiciar aprendizajes más amplios y significativos, por medio de los cuales se intenta que los alumnos además de conocer los datos puedan usarlos, que dominen ciertas habilidades básicas y puedan aplicarlas en momentos oportunos, que logren interiorizar esquemas conceptuales particulares, que sean capaces de proyectar cosas novedosas y no sólo de repetir lo que ha sido realizado en otros tiempos. Se trata así de contribuir a formar individuos creadores que apliquen su inventiva a la búsqueda de explicaciones

originales, personas activas, capaces de aprender por sí mismas, con mentalidades críticas y que no estén dispuestas a aceptar gratuitamente lo que se les expone.

Dentro de éstos se ubica el enfoque histórico evolutivo que se utiliza en la enseñanza de la Física, en el que se reconoce el papel protagónico que le corresponde a la actividad intelectual del alumno y se piensa que la asimilación de lo que se estudia se logra en la medida en que ello puede ser reconstruido por quien aprende; a través de actividades que son adecuadas si en ellas se logra un redescubrimiento personal, donde es indispensable la reflexión del alumno que es guiado por medio del trabajo escolar y los cuestionamientos del profesor, a fin de que logre identificar los problemas y los convierta en dificultades propias para que procure hallarles solución.

El enfoque se asocia con la metodología heurística, que hace pensar inevitablemente en la historia de las ideas, la cual se rige por el principio de que la actitud general del estudiante no sea la de un receptor pasivo, sino más bien la de un redescubridor de los conocimientos, donde se apela a su juicio, a su iniciativa y a su imaginación para poner a prueba sus ideas en un proceso que se asemeja, en la medida de lo posible, al proceso mediante el cual se fue estableciendo verdaderamente el conocimiento humano en una ciencia, tratando de que se recorra el mismo camino que transitó la humanidad en la búsqueda del saber.

Los problemas centrales del enfoque histórico evolutivo consisten en tratar de encontrar y reproducir los pasos esenciales que permitieron alcanzar un objetivo científico para elaborar un desarrollo similar, equivalente al que se pudo haber seguido para llegar a ello; se emprende bajo el convencimiento de que todo proceso por el cual un estudiante llega realmente a conocer y comprender algo, se debe aproximar en alguna medida al proceso original; esto conduce al rastreo cuidadoso en la historia de las ideas científicas para tratar de descubrir el modo en que éstas se originaron, sin existir necesariamente el conocimiento exhaustivo de las etapas, pero sí una cautelosa hilación conceptual que muestre los nexos que permiten el tránsito entre ellas. En el enfoque, el par de adjetivos, histórico y evolutivo, hacen referencia a la conjugación que en él se hace de una investigación histórica cuidadosa y una reconstrucción conceptual semejante.

El enfoque exige de los profesores el compromiso de abandonar los prejuicios docentes y de tratar de situarse en la posición mental de los alumnos para elaborar los materiales de aprendizaje; así como el olvido, por lo menos parcial, de los enfoques tradicionales y las divisiones clásicas de la disciplina. No se espera del estudiante que redescubra la ciencia por sí mismo, aunque fuera deseable que lo hiciera en la mayor medida posible, ni tampoco se pretende concretamente que descubra las diferentes leyes o teorías; sólo se intenta favorecer por todos los medios la producción del redescubrimiento, buscando que pueda encontrar en

cada paso la respuesta a sus interrogantes, las pistas para resolver los problemas que estudia o el esquema histórico del aspecto que se interroga.

Es necesario señalar para concluir en este punto que una actitud histórica frente al problema de la enseñanza de una ciencia, la Física por ejemplo, permite ver con nuevos ojos su estructura global e identificar relaciones distintas con la sociedad posibilita igualmente la reconstrucción de las etapas que hacen comprensibles aspectos actuales de ella que de otro modo resultarían difícilmente abordables; la reconstrucción histórico evolutiva parece ser, en ciertos aspectos, uno de los pocos caminos para captar la verdadera naturaleza de una teoría, una ley o un hecho científico, dentro de un esquema donde caben tanto los hechos de la ciencia como los de la tecnología.

4.- LAS REVOLUCIONES CIENTIFICAS.

En las investigaciones acerca del desarrollo histórico de la Física se pone de manifiesto que con el incesante avance de la ciencia, se incrementa el poder del hombre sobre la naturaleza, al contar con formas cada vez mejores para explicar los fenómenos y métodos más efectivos para plantear y resolver los problemas. También se hace patente que los conocimientos se acumulan pasando de unas teorías y descubrimientos a otros, como evidencia de la continua sucesión entre lo viejo y lo nuevo, como muestra de la modificación constante de los esquemas conceptuales que acompañan y definen al desarrollo.

Actualmente se reconoce que la ciencia evoluciona basándose en los conocimientos precedentes y que, a lo largo de la historia, los adelantos toman la forma de modificaciones de lo conocido: refinamientos metodológicos, progresos en los instrumentos de observación y medición, reformulaciones de los problemas que se estudian, etc.; pero que, en ese camino hacia el progreso, sin poner en duda la importancia de aportaciones como las señaladas, no se puede soslayar la importancia de las ideas que son antecedente, ni despreciar los enlaces con las explicaciones científicas que van siendo superadas.

Pero el estudio del complicado proceso histórico que ha

conducido a la Física hasta su nivel actual, pone también al descubierto otros elementos que proporcionan una imagen diferente de lo que es esa ciencia y que sirven igualmente para abrir nuevos espacios de análisis que ayudan a comprender mejor las particularidades del desarrollo; uno de ellos se refiere al análisis de cómo se produce la transición entre las etapas sucesivas de los procesos, para identificar si los acoplamientos entre las representaciones que surgen consecutivamente siguen algún patrón específico y si se puede reconocer alguna correspondencia entre los distintos elementos que se incluyen en la sucesión.

En el proceso de desarrollo de la ciencia se pueden distinguir épocas de tranquilidad relativa, cuando las sucesiones no originan cambios radicales en la ciencia, etapas donde las ideas parecen irse acoplando sin dificultad, donde los enfoques sucesivos parecen fundirse con los ya establecidos y en los cuales la información nueva es integrada a los conceptos y teorías reconocidas sin afectar los principios que reconoce la Física. Períodos en los que, siguiendo la conceptualización elaborada por T. S. Kuhn²⁵, se aplica un paradigma que domina el panorama de la ciencia, el cual debe entenderse como un conjunto de valores, técnicas y creencias que comparte la comunidad científica en un momento histórico dado y que en la mayor parte de los casos permanece implícito; una concepción particular que establece cuál es el tipo de ideal

²⁵ cfr. KUHN T. S., *La estructura de las revoluciones científicas*, 6a. reimpresión, México, F.C.E. 1985, Breve: 200 en

científico que será el modelo a seguir en la investigación o en la solución de problemas.

De acuerdo con las ideas de Kuhn, existen etapas de calma relativa que identifica como períodos de ciencia normal que pueden explicarse reconociendo que "... si varias personas disponen de la misma teoría, se dirá que pertenecen a la misma tradición de ciencia normal. Esto significa que... usan la misma teoría para construir sus hipótesis, pero la unen a toda una variedad de... convicciones distintas..."¹⁶. Durante esos períodos, se plantea que la ciencia se conserva, pues en ellos los científicos no tienden a descubrir nuevas teorías, en tanto que su objetivo primero no es la búsqueda de novedades significativas y sus investigaciones producen principalmente resultados que contribuyen a incrementar los espacios que cubre el paradigma que se encuentra vigente.

También se dice de esas épocas que en ellas la ciencia se encuentra en fases netamente acumulativas, donde habrán de superarse las situaciones anómalas a través del ajuste de los alcances del paradigma reconocido. Sin embargo, no deben entenderse como períodos de retraso, pues en ellos el progreso es evidente, en parte por la ausencia de cuestionamientos a los principios establecidos que permite que los miembros de la comunidad científica concentren su atención en la investigación de los fenómenos, incrementando con ello su eficiencia para resolver los

¹⁶ ROLLERI, José L., compilador de *Estructura y desarrollo de las teorías científicas*, México, UNAM, 1980, p. 223.

problemas que se les presentan; así se van haciendo más precisos los conocimientos y la ciencia incrementa su trascendencia, mientras el terreno se va preparando para lo que comúnmente se acepta como los grandes avances de la Física.

Las discordancias y contradicciones continúan siendo asimiladas por la ciencia normal, en una etapa que conduce a la depuración y perfeccionamiento del paradigma y con ello a la ampliación del panorama de la Física, que ahora puede poner a discusión problemas nuevos y dar explicaciones más puntuales a fenómenos ya conocidos a través de investigaciones más minuciosas y precisas en un campo donde la información que se maneja es cada vez más detallada. Sin embargo, este proceso no puede transcurrir indefinidamente sin que el esquema de la ciencia normal comience a mostrar sus limitaciones, pues los paradigmas no están hechos para resolver completamente todos los problemas.

El desarrollo mismo de la Física hace emerger anomalías más amplias que, al presentar resistencias mayores, atraen la atención de la comunidad científica, pues el paradigma aceptado parece ser insuficiente para asimilarlas; como parte de los esfuerzos para resolver las dificultades dentro del paradigma, se ensayan diferentes soluciones que, al no tener el éxito deseado, conducen al surgimiento de proposiciones ajenas al paradigma y a la aparición de fracturas en la estructura. La ciencia entra así en una etapa de crisis que genera una gran inseguridad, puesto que las

reglas que aún están vigentes ya no resultan útiles para explicar las interrogantes nuevas, ocasionando también que incluso los resultados que previamente han sido aceptados se pongan ahora en tela de juicio.

Bajo la óptica de Kuhn, el proceso continúa en medio de enérgicos ataques a las viejas representaciones, de debates frecuentes acerca de los métodos y los problemas que sacan a la luz argumentos que contradicen lo establecido, para mostrar en conjunto y de forma inequívoca la aguda crisis en que se encuentra el paradigma que, como señal de su inconsistencia, resulta cada vez menos útil para la solución de los problemas urgentes. La crisis se agudiza con la impugnación abierta del orden instaurado que marca el inicio de la transformación del aparato conceptual con sus teorías, principios y leyes que ahora se consideran caducos.

Así queda instaurado un proceso revolucionario en cuya primera fase se ejercen acciones definitivas que conducen a la revisión, desde su propia base, de todo el sistema de pensamiento científico existente hasta entonces, acciones que si bien parecen negativas a simple vista, resultan imprescindibles para la eliminación de los obstáculos que pudieran oponerse a la emergencia de nuevas concepciones y todo ello se realiza en el entendido de que "... una nueva teoría, por revolucionaria que sea, siempre debe ser capaz de explicar plenamente el triunfo de su predecesora... (y ésta)...

debe parecer una buena aproximación a la nueva teoría..."²⁷.

La revolución que tiene como paso inicial el abandono del paradigma y la ruptura de la tradición científica se complementa con el surgimiento de un sistema nuevo y con la aparición de nuevas prácticas y reglas distintas; pero la teoría vieja no se descarta porque contenga numerosas anomalías, sino que se toma la decisión de desecharla solamente cuando se cuenta con otra teoría nueva que pueda ocupar su lugar, puesto que "...El rechazar un paradigma sin reemplazarlo con otro (sería) rechazar (a) la ciencia misma..."²⁸, ya que no resulta razonable abandonar los métodos y los instrumentos que han sido útiles, mientras no se cuente con sustitutos mejores.

Tales procesos revolucionarios pueden generar transformaciones menores que algunos llaman "pequeñas revoluciones"²⁹ las cuales se presentan cuando el núcleo del paradigma permanece inalterado mientras que uno de sus componentes, que ocupa un lugar importante, puede ser reemplazado por otro o cuando las modificaciones que se producen afectan solamente a los especialistas de una rama de la Física; pero también se presentan fenómenos mayores, a los cuales se presta mayor atención, que pueden ser tan amplios y profundos como para llegar a tener influencia en todo el ámbito de la

²⁷ HACKING, Ian, op. cit., p. 409.

²⁸ KUHN, T. S., op. cit. p. 131

²⁹ cfr. ROLLERI, J. L., op. cit. pp. 214-219.

ciencia, los que, por el impacto que producen, pueden ser considerados como auténticas revoluciones científicas ya que son capaces de transformar de manera radical todo el sistema de conceptos vigente, así como de generar cambios profundos en las representaciones que acepta la ciencia.

Pero el establecimiento de un nuevo paradigma no es inmediato y, en contraposición con la fase destructiva que puede decirse que se desarrolla con rapidez y brusquedad, la segunda etapa, que es eminentemente constructiva, debe recorrer un largo camino para lograr su aceptación. Para los innovadores esta fase se caracteriza por el intenso trabajo de búsqueda y creación, de selección y análisis de material, de continuas pruebas experimentales, de elaboración de nuevas explicaciones y de reinterpretación de lo acumulado, de integración de los conocimientos que conduzca a una síntesis teórica que condense los resultados y concentre las nuevas concepciones de la Física.

Esas condiciones generan también en esa parte de la comunidad científica un ambiente de apertura que favorece el análisis constructivo de las nuevas concepciones, la discusión y el debate, donde se estimulan las actividades productivas y se manifiestan las inquietudes creadoras; pero donde, posiblemente corroborando las apreciaciones de Pierre Duhem acerca de que no existen en la Física "...experiencias verdaderamente cruciales y (que) las razones de

abandonar una teoría no aparecen sino progresivamente..."³⁰, también se contará con espacio suficiente para la crítica, sobre todo mientras exista competencia entre los paradigmas.

No debe perderse de vista que la aceptación total del nuevo paradigma incluye un proceso de conversión del sector opositor que puede extenderse por mucho tiempo, ya que los seguidores del antiguo paradigma se encuentran comprometidos con una visión de la ciencia sobre la que descansa el periodo de Física normal de su época, la que, independientemente de los fuertes cuestionamientos que está recibiendo, para ellos continúa vigente pues la siguen tratando de aplicar en la resolución de los problemas, aun a riesgo de ser catalogados como retardatarios; así pueden transcurrir los años, entre acusaciones de terquedad o intransigencia, pues como plantea Max Planck "...una nueva verdad científica no triunfa por medio del convencimiento de sus oponentes, haciéndoles ver la luz, sino más bien porque dichos oponentes llegan a morir y crece una nueva generación que se familiariza con ella..."³¹.

La revolución culmina con el triunfo del nuevo paradigma que contribuye al progreso de la Física, entre las ganancias y pérdidas que con seguridad incluye, dejando el camino libre para un nuevo periodo de ciencia normal que habrá de cerrar temporalmente el ciclo: ciencia normal - crisis - revolución - nueva ciencia normal,

³⁰ BLANCHE, Robert, *El método experimental y la filosofía de la Física*, la. reimpresión, México, F. C. E. 1975, P. 148, Breviarios No. 223.

³¹ PLANCK, M., *Scientific Autobiography and Others Papers*, pp. 33-34 cit. por Kuhn, T. S., op. cit. pp. 234-235.

que conduce a la ciencia de niveles donde se opera con conocimientos fijos e invariables, hacia otros donde las categorías y los conceptos se vuelven flexibles, siguiendo procesos que, de acuerdo con la visión evolutiva que sostiene Kuhn, son característicos del proceso de desarrollo que, al menos en el Occidente, ha seguido la ciencia desde la antigüedad, en una evolución que se realiza a partir de lo que se conoce y bajo la pretensión de lograr una comprensión, cada vez mejor, de la naturaleza.

Las ideas de Kuhn han ejercido una influencia decisiva entre aquellos que estudian el desarrollo de la ciencia y, aunque él mismo las abandona posteriormente, han sido analizadas tanto con criterios positivos como con el afán de censura. Ciertos autores han ofrecido explicaciones en sentidos semejantes, presentando ideas que de cierta manera complementan lo que él ha propuesto, pero otros han llevado sus ideas a otros terrenos; algunos han concluido que el desarrollo del conocimiento científico es un proceso de constante reconstrucción que, como fuente de modificaciones primarias, cuenta con las innovaciones; éstas pueden generar pequeños cambios en los conceptos existentes o modificaciones sustanciales en ellos y ambos pueden ser identificados por medio de los diversos tipos de publicaciones científicas que se producen en cada época.

Dentro de esa línea se presta atención no sólo a las grandes

revoluciones de la ciencia, como se dice que hace Kuhn, sino también a la aparición reiterada de innovaciones, entendidas éstas como descubrimiento de fenómenos, como hipótesis o como leyes, que se piensa que se vinculen con la eliminación de las formas establecidas de conocimiento, que no aparecen en forma individual, sino a través de un proceso reiterado cuya frecuencia algunos investigadores pretenden establecer. Así, F. Dayson sostiene que los grandes descubrimientos de la Física ocurren cada 60 años, de los cuales los primeros treinta se dedican a la solución de problemas, mientras que en los treinta restantes se desarrollan las teorías y se asimilan los conceptos; de manera semejante, otros investigadores proponen periodos diferentes para la aparición de modificaciones y algunos llegan a plantear que los ciclos de formación de las ideas se pueden representar matemáticamente¹².

Una descripción de los planteamientos de Kuhn, así sea tan limitada como la que aquí se desarrolla, no puede dejar de señalar que alrededor de sus ideas se han suscitado fuertes debates y que si al nivel concreto de la historia de la ciencia ganaba terreno, en el nivel abstracto de las investigaciones epistemológicas, algunos pensadores trataban de demostrar que, aun sin proponérselo, sus concepciones conducían "...a una forma inevitable de subjetivismo, irracionalismo y relativismo y por ello, a posiciones que por razones filosóficas son insostenibles o incluso

¹² PEDOSEEV, P. N., rector general de Metodología del conocimiento científico, 2a. Edic., México, Presencia Latinoamericana S. A., 1985, pp. 342-343.

absurdas"¹³; planteamientos que, sin embargo, han sido rechazados por Kuhn bajo el argumento de que son producto de una mala comprensión de sus ideas.

Quizá uno de los críticos más fuertes ha sido Karl Popper, sus divergencias lo llevan al enfrentamiento directo cuando sostiene que "En ciencia (y sólo en la ciencia) podemos decir que hay genuino progreso: hoy sabemos más que antes"¹⁴, con lo que se opone a la concepción, de Kuhn, quien no acepta que haya continuidad en la evolución científica, ni que se cuente con mecanismos claros que permitan substituir un paradigma por otro. También rechaza con vehemencia ideas centrales de la teoría, como la de la ciencia normal, acerca de la cual plantea que "... el científico normal tal como lo describe Kuhn es una persona a quien se debe tener lástima... (pues) se le ha enseñado con espíritu dogmático... es una víctima de la adoctrinación..."¹⁵, aunque los seguidores de Kuhn han considerado que ésta es una interpretación inadecuada de la teoría, que puede ser corregida a través de una reconstrucción de las ideas.

El otro gran opositor es Imre Lakatos, discípulo y seguidor de la metodología de Popper que manifiesta su rechazo a los planteamientos kuhnianos señalando que "...la filosofía de la

¹³ ROLLERI, José L., op. cit. p. 216.

¹⁴ PIAUET, J. y García, R. op. cit. p. 238.

¹⁵ ROLLERI, José L., op. cit. p. 226.

ciencia, en manos de Kuhn, se convierte en psicología de turbas..."¹⁶ y que la idea de ciencia normal es dogmática y acrítica; para salvar a la ciencia de lo que llama las consecuencias irracionalistas que genera Kuhn, propone la metodología de los programas de investigación como un "...intento de reproducir teóricamente el conocimiento científico en su totalidad, en el contexto de la comprensión sistemática de su crecimiento y su proceso continuo de desarrollo..."¹⁷, aunque, al decir de sus oponentes, su propia metodología deje mucho que desear y sus programas de investigación sean sólo, en cierto sentido, sustitutos mejorados de los paradigmas de Kuhn.

Las discrepancias con Paul Feyerebend son de nivel distinto, quizá porque sus ideas guardan ciertas similitudes con las de Kuhn; sin embargo, sus diferencias no pueden ocultarse; Feyerebend también manifiesta un gran rechazo hacia los planteamientos relativos a la ciencia normal, así como a la influencia dominante que se les concede a los paradigmas, pues mantiene lo que él llama una posición pluralista planteando que en todas las etapas de la historia de la ciencia coexisten teorías diferentes, que aun cuando llegaran a estar en pugna, se conservarían al alcance de las comunidades científicas para ser usadas según su conveniencia.

Las diferencias entre los opositores y los defensores de la

¹⁶ ROLLERI, José L., *Ibid.* p. 339.

¹⁷ LAKATOS, I., *Criticism and the Methodology of Scientific Research Programmes* cit. por Rolleri, p. 429.

concepción Kuhniana se hacen más profundas, mientras que los hombres de ciencia parecen no prestar atención a la polémica que se ha desatado, entre señalamientos de que los juicios de irracionalidad que se le hacen a Kuhn ponen en evidencia que los filósofos defensores de la racionalidad tienen una visión estrecha de la actividad científica. El largo debate generado por las teorías de Kuhn llegó a alcanzar niveles considerables, pero más allá de los alegatos y las discrepancias, es necesario subrayar la gran contribución de los cuatro investigadores mencionados para el conocimiento del cómo se desarrolla la ciencia y la importancia que conceden al estudio de la historia; así, sin importar que sus lecturas del pasado los hallan conducido a conclusiones distintas: los paradigmas y las revoluciones, la coexistencia de teorías contrarias o los programas de investigación, es evidente que se encuentran unidos a través de la forma como se apoyan en la historia de la ciencia y por sus contribuciones al avance de ese campo de estudio.

Sin embargo, por sobre los trabajos y las aportaciones de los demás, las ideas de T. S. Kuhn merecen ocupar un lugar de privilegio, pues provocaron, en la década de los sesentas, una auténtica revolución en la filosofía de las ciencias que saca a la luz problemas distintos y ofrece un nuevo aunque impreciso vocabulario para discutirlos, estimulando el surgimiento de opiniones más amplias acerca de la ciencia, su evolución y su estructura. Por medio de sus planteamientos, conduce a la

reconsideración del papel de la historia de las ciencias y a cuestionar con sus críticas a estereotipos establecidos como el "...triunfo del método ortodoxo sobre el error y la superstición...", contribuye a borrar la imagen distorsionada de la ciencia y a la búsqueda de alternativas novedosas.

Sus contribuciones al desarrollo de la historia de las ciencias están fuera de discusión, pues son tan evidentes como su postura respecto a que en los estudios sobre la ciencia es necesario considerar los aspectos sociales de la actividad científica y su intervención en la controversia, internalismo-externalismo lo lleva a proponer la búsqueda de alternativas de unión, pues no considera satisfactoria la incompatibilidad; pero aparte de todo ello parece necesario subrayar la posición que mantiene a lo largo de su obra, donde parece guiarse por lo que manifiesta en las primeras líneas de su libro más popular, cuando señala un camino que, bajo la óptica de este trabajo, parece fundamental "...Si se considera a la historia como algo más que un depósito de anécdotas o cronología, puede producir una transformación decisiva en la imagen que tenemos actualmente de la ciencia..."¹⁹.

¹⁸ SALDARA, J. J. op. cit. p. 8.

¹⁹ KUHN, T. S. op. cit. p. 20.

5.- REVOLUCION INDUSTRIAL Y CIENTIFICA.

En la historia de la ciencia y de la Física es muy común utilizar la noción de revolución científica como referencia a una ruptura violenta con un pasado y a la instauración de un nuevo orden. Esta metáfora política, que es parte del vocabulario científico desde la época de la Revolución Francesa, se aplica no solamente al derrocamiento de una teoría científica establecida por otra nueva, que conduce a una forma diferente de estudiar la naturaleza, sino también para distinguir el trabajo de los personajes notables de la ciencia, que con sus ideas transforman de manera radical el sistema de conocimientos previamente aceptado. Así se hace referencia a las revoluciones astronómicas, químicas o biológicas del pasado, la de Galileo o la de Newton, la revolución relativista o la que produjo la mecánica cuántica.

Se ha mencionado ya que en este terreno se pueden incluir tanto revoluciones grandes como pequeñas, que algunas pueden afectar solamente a los miembros de una especialidad específica y que es posible que para esos grupos el descubrimiento de un fenómeno nuevo o inesperado pueda constituir una cuestión revolucionaria aunque para el resto de la comunidad los nuevos hallazgos no tengan el mismo significado.

Las revoluciones científicas pueden conducir a que el hombre modifique la visión que tiene de su lugar en el universo, generando

así lo que K. Popper llama una revolución ideológica, como las que se produjeron con los conceptos de Copérnico y Darwin. Pero también hay otras que, si bien desde el punto de vista científico, han sido tan grandes como las anteriores, pues sirvieron de guía a una generación de hombres de ciencia, no condujeron a revoluciones ideológicas. Tal es el caso de los trabajos de Faraday y Maxwell o el descubrimiento del electrón por J. J. Thomson ⁴⁰.

Dentro de ese contexto se ubica una revolución de dimensiones más amplias, que constituye el objeto de estudio de este trabajo y que bajo el nombre genérico de Revolución Industrial permite identificar un proceso donde se ponen en evidencia las complejas relaciones que se establecen entre la ciencia, la tecnología y la sociedad, el cual es considerado por muchos como la primera de las transformaciones trascendentales que han tenido lugar en la época moderna. Esta revolución, que si bien afecta con cronologías distintas a diferentes países y regiones de Europa y aun a naciones fuera de ese continente, tiene una fase crítica que puede ubicarse en la Gran Bretaña en un lapso para el cual no se cuenta con fechas definitivas de inicio y de terminación, pero que abarca aproximadamente de la segunda mitad del siglo XVIII a la primera del siglo XIX.

Durante esa época se experimentaron importantes cambios que habrán de tener profundas repercusiones hasta nuestros días, que

⁴⁰ *ofr.* POPPER, K., La racionalidad de las revoluciones científicas, en Hacking, I. *op. cit.* pp. 188-203

afectaron en su momento a la industria, la agricultura, los transportes y aun la visión intelectual del mundo, mientras que la ciencia se iba consolidando como un rasgo fundamental de las nuevas civilizaciones. Es cierto que el proceso que habrá de estudiarse no fue generado directamente por los avances científicos logrados hasta entonces y que tiene una relación más estrecha con el desarrollo y la transformación del sistema capitalista, pero no se puede negar que el camino hacia la era de las máquinas fue preparado por el gran nivel alcanzado por la Física, que fortalecida con el aporte de las diferentes culturas a lo largo de los años, había permitido arribar a una concepción mecanicista de la naturaleza que era fundamental para la comprensión de los artefactos de esas épocas.

5.1 ANTECEDENTES Y ORIGEN.

La organización capitalista del siglo XVIII emerge lentamente de la evolución de un sistema feudal que, principalmente en Europa, se fue construyendo alrededor de pequeñas aldeas. Estas en el mejor de los casos contaban con una industria artesanal incipiente, pero dependían en forma directa de una producción agrícola de subsistencia que, aunque no lograba producir excedentes notables, tenía capacidad para sostener al clero y a la nobleza que eran francamente parasitarios en las monarquías de los primeros siglos de nuestra era. Al iniciar la Edad Media, alrededor del siglo V, la ciencia seguía en plena decadencia cercada por la magia, la astrología y la religión; durante esos primeros años es importante señalar la labor de hombres como Boecio, Casiodoro, San Isidoro o Beda, quienes recogen los vestigios de una cultura en ruinas para retransmitirlos a los siglos venideros. Las sociedades feudales se fueron consolidando lentamente hasta generar estructuras políticas más equilibradas, como el Imperio Carolingio, donde la instrucción tuvo un gran impulso aunque la ciencia no se vio mayormente favorecida; mientras tanto España continuaba invadida por los árabes, que habrían de convertirse en mucho más que intermediarios entre el Mundo Asiático y la Europa Occidental⁴¹.

Antes del siglo X la labor de la Iglesia es fundamental para

⁴¹ cfr. KOVRE, Alexandre, op. cit. pp. 17-18.

la preservación del pensamiento griego y romano, gracias al trabajo que se realiza en los monasterios donde se estudian y se copian los manuscritos clásicos. Paralelamente, durante la dominación árabe fueron apareciendo en la península Ibérica centros culturales como los de Sevilla, Córdoba y Granada, que contaban con planteles de enseñanza donde podían encontrarse laboratorios, observatorios y bibliotecas, desde las cuales sería propagada tanto la ciencia de los griegos como el saber matemático de la India y la astronomía de los pueblos mesopotámicos y egipcios. En uno de esos centros estudia Gerbert de Aurillac, quien llegaría a ser el papa Silvestre II, el cual divulgó en Europa el uso del astrolabio⁴² y el ábaco, aunque al parecer los romanos usaban un aparato como este; de Aurillac, es considerado por algunos historiadores como el primer gran científico occidental de su tiempo, aunque otros más, aun siguen dudando de la autenticidad de su obra.

Alrededor del siglo XI, junto con el crecimiento de las poblaciones urbanas y la propagación de su sistema de vida, se fueron generando modificaciones progresivas en la técnica que trajeron consigo el florecimiento del comercio y el surgimiento de nuevos criterios económicos que pusieron al dinero en circulación; con el impulso de los nuevos enfoques para la manufactura y las actividades comerciales, se fue consolidando una profunda transformación económica, mientras los habitantes de los burgos se empezaron a fundir en una clase nueva que aspiraba a tener un lugar

⁴² Cfr. ARNALDEZ, R. y otros, *Historia general de la ciencia, la Edad Media, España*, Edit. Espasa Calpe, S. A., 1968, pp. 629-632.

dentro de la sociedad. El despertar de la vida comercial generó un vuelco definitivo en la economía y en las relaciones entre las clases sociales, que además de producir el crecimiento de la población mercantil y artesana y el desarrollo de los centros urbanos, tuvo tan amplias repercusiones generales que condujeron a la desintegración de la economía feudal en los países de Europa.

La burguesía emerge de las poblaciones reclamando una educación distinta. Así, de las escuelas de los monasterios se pasa a las de las catedrales, que si bien ya existían desde siglos atrás dedicadas principalmente a la enseñanza religiosa, bajo la influencia de la nueva clase social se convirtieron en el siglo XI en el germen de las universidades; la fundación de éstas, a finales del siguiente siglo, constituye la primera victoria intelectual burguesa que le abrió su participación en muchos de los beneficios de la nobleza y del clero que hasta entonces le habían sido negados. Con ello, los intereses intelectuales de la sociedad, que habían sido religiosos en los tiempos precedentes, gradualmente se fueron convirtiendo en lógicos y filosóficos. En medio de las nuevas condiciones materiales y culturales que estimulan la aparición de ideas diferentes, la creciente expansión del comercio abrió nuevos horizontes y las distintas corrientes intelectuales se filtraron en el ambiente.

El surgimiento de la nueva mentalidad también debe asociarse con el gran progreso técnico alcanzado en esas fechas, que descansa

tanto en las innovaciones traídas de Oriente, en la actualización de técnicas antiguas, así como en la invención de nuevos dispositivos, que sirvieron para resolver las dificultades del momento pero que también hicieron emerger problemas diferentes y pusieron al hombre de esa época ante situaciones nuevas. Para encarar la nueva problemática fue necesario utilizar perspectivas distintas que no sólo modificaron la vida material, sino que también ejercieron gran influencia sobre la evolución de las ideas, pues condujeron al enfrentamiento entre las tendencias que privilegiaban la búsqueda espiritual, característica de la cultura medieval, y las que pugnan por un estudio racional de la naturaleza.

Gracias al comercio, Europa recibe de Oriente inventos náuticos como la brújula y el timón de codaste, que permitieron la navegación a mar abierto con sus enormes consecuencias económicas; también se introduce la pólvora, que además de revolucionar el arte de la guerra planteó interrogantes físicas y químicas y contribuyó a la aparición de una nueva mecánica. Se generaliza el uso del estribo que junto con la collera y el pretal llegados de China, convirtieron al caballo en mejor animal de tiro, lo cual permitió mejorar los medios de transporte y en el campo, junto con el arado pesado, fueron factores importantes para mejorar los rendimientos e incrementar la existencia de reservas alimenticias que favorecerían la expansión demográfica. Por otra parte los molinos de agua, conocidos en Libia en el siglo II A. C., se extienden por

toda Europa y junto con los molinos de viento de origen Persa, abrieron el camino para una aplicación más amplia de la energía mecánica y dieron origen "... a los primeros mecánicos, en el moderno sentido de la palabra..."⁴¹.

Los nuevos procedimientos comerciales y la naciente industria de la guerra contribuyeron también a la aparición de los novedosos esquemas de pensamiento; con el ascenso de los banqueros y los empresarios y la aparición de los artilleros, el arte de calcular y el interés por medir adquieren una importancia creciente, que se manifiesta con claridad con la creación de las escuelas de ábaco que se popularizan en el siglo XIV y donde se prepara a los futuros comerciantes. La geometría se aplica con amplitud tanto a los cálculos relativos a ella, como a la demarcación de terrenos y fronteras territoriales, mientras la cartografía terrestre y marítima muestran al mundo dividido en longitudes y latitudes, producto del desarrollo de una concepción geométrica del espacio, nueva evidencia de la existencia de una filosofía pragmática que sería fundamental para el desarrollo de la ciencia.

Durante el siglo XII, la España reconquistada se convierte en un gran centro cultural al cual acuden clérigos de todas partes para estudiar las fuentes árabes y redescubrir así la ciencia helénica; es la época de las grandes traducciones, realizadas tanto en Toledo como en Salerno, que abarcan las obras de Euclides,

⁴¹ BERNAL, J. D., *La ciencia en la...* op. cit. p. 139.

Arquímedes, Tolomeo, Aristóteles, Apolonio, etc., al igual que las de los numerosos trabajos de los científicos árabes. La vida cultural se fue modificando y se desarrolla una considerable actividad intelectual que, si bien no fue suficiente para producir una ciencia revolucionaria, sí es muestra de una evolución de actitudes hacia la naturaleza y una clara transformación de las mentalidades. El movimiento " , que se conoce como "el Renacimiento del siglo XII", tuvo repercusiones limitadas, al parecer a causa de las cruzadas; liderado por la Escuela de Chartres que se inspira en las obras de Platón y se vincula con el pensamiento de San Agustín, tiene en Adelardo de Bath a uno de sus principales promotores. Este, aun cuando da muestras de pensamiento arcaico, es capaz de esbozar cierta metodología científica y de insistir en que "... el estudio de como ocurrían las cosas en la Naturaleza (natural causes) constituía un sujeto legítimo de investigación..."⁴⁵

En el siglo XIII, la ciencia y la cultura habrían de enriquecerse con la expansión de las universidades y la fundación de las primeras órdenes religiosas mendicantes, de las cuales provendrán nuevos maestros, filósofos y científicos, pero quizá en mayor grado por la gran difusión que alcanzan las traducciones de Oriente, lográndose en ese terreno que para el final del siglo la mayor parte de las obras griegas sobrevivientes fueran conocidas en

⁴⁴ cfr. THULLIER, Pierre, De Arquímedes a Einstein, Las caras ocultas de la invención científica, México, Alianza Editorial, S. A., 1991, pp. 79-121, Los Noventa #78.

⁴⁵ BECK, Robert, Historia social de la educación, México, UTEHA, 1965, p. 80.

latín, mientras que para el siglo XIV se comienzan a traducir a las lenguas populares. La doctrina de Aristóteles se divulga en las universidades y aunque es rechazada en un principio, el gran interés que despierta, quizá a causa de su gran coherencia lógica, logra producir su arraigo definitivo, para lograr a continuación un amplio dominio sobre el pensamiento medieval, que habría de extenderse hasta el siglo XVII, convertido en un gran aristotelismo que si en esencia se basa en las ideas de Aristóteles, está modificado por los ideales religiosos de la Iglesia cristiana.

En el plano religioso, se funda en Francia la orden de los frailes dominicos cuyos miembros se dedican a actividades religiosas y filosóficas así como a la enseñanza superior, aunque también se les habrá de conferir, a su tiempo, la persecución de las herejías a través del Tribunal de la Fe, la Santa Inquisición que ejercerá su poder durante varios siglos. Entre sus mayores exponentes se cuenta a Pedro Abelardo, Alberto Magno y en especial a Santo Tomás de Aquino quien logra culminar la aplicación de la filosofía antigua y medieval a la religión, fundiendo las ideas de Aristóteles con la teología cristiana en la Escolástica; movimiento intelectual que se caracteriza por una aplicación ..."más sistemática de la dialéctica a las cosas divinas y por un reconocimiento más general del interés que presenta en sí el estudio de las Ciencias Exactas..."⁴⁶. La escolástica avanza unida a las concepciones aristotélicas y pese a los intentos realizados

⁴⁶ ARHALDES, R. y otros op. cit. p. 543.

por desembarazarse de ellas, su hegemonía perdura desde finales de la edad media hasta el Renacimiento.

De la orden franciscana fundada en Italia proceden científicos que son seguidores de Platón y San Agustín, entre los que destacan los miembros de la Escuela de Oxford, como Robert Grosseteste, Roger Bacon y John Peckham, quienes estudian la Óptica, se inclinan hacia las matemáticas y son continuadores del movimiento de Chartres. Fuertemente influidos por los científicos griegos y árabes, logran consolidar una mejor concepción de la ciencia que ellos y guiados por las ideas de Grosseteste quien "...parece haber sido el primero en establecer una teoría sistemática y coherente de la investigación experimental..."⁴⁷, conciben una metodología que si bien no será aplicada con la amplitud ni la calidad de los siglos futuros, se distingue de la simple observación aristotélica y puede considerarse la base del método de la nueva ciencia. Su discípulo Roger Bacon, para algunos el franciscano más importante en ese terreno, señala que "...el conocimiento científico sólo podía adquirirse por experimentación..."⁴⁸ y como partidario ferviente del platonismo subraya que el conocimiento se debe fundar en las matemáticas.

La doctrina de Aristóteles, que no logrará ejercer un dominio completo sobre la Física medieval, tampoco tuvo éxito total en la

⁴⁷ CHOMBIE, A. C., Robert Grosseteste and the origins of experimental science 1100-1700, en *Forré, Alexandre*, op. cit. p. 55.

⁴⁸ JEANS, James, *Historia de la Física, hasta mediados del siglo XX*, 4a. reimpresión, México, FCE, 1966, *Bravilarios 84*, p. 141.

astronomía, donde comparte espacios de discusión con el sistema de Tolomeo, mientras en las ciudades progresan la industria y el comercio y se van desatando fuerzas que combaten lo establecido. En esos tiempos las enseñanzas de Juan Duns Escoto, que discute la teología y la existencia de Dios, y Guillermo de Occam, que es considerado un revolucionario en todos los sentidos, ejercen gran influencia y proporcionan elementos notables que habrán de utilizar los nuevos científicos franceses como Juan Buridan, cuya crítica a la explicación aristotélica del movimiento será fundamental para los trabajos de Galileo, y Nicolás Oresme quien realiza notables contribuciones en cinemática, además de combatir la doctrina acerca de la inmovilidad de la tierra y elaborar, junto con Buridan, una teoría acerca del *impetus*.

En ese tiempo, en mucho debido a la nueva producción de excedentes, la población se incrementa considerablemente mientras el comercio continúa dominando el panorama. También se logran avances significativos en los métodos de explotación de las minas y el trabajo de los metales. Bajo signos tan esperanzadores, el mundo parece caminar inevitablemente hacia el progreso generalizado. Sin embargo, a mediados del siglo XIV la Peste Negra se propaga en la Europa occidental diezmando a la población y causando estragos en la agricultura, de los cuales sólo podrá recuperarse aproximadamente un siglo después. Por esa época también tiene lugar la guerra de los Cien Años (1337-1453), a través de la cual Francia e Inglaterra consumieron buena parte de sus recursos,

que si bien trajo como consecuencia un declive en las nacientes industrias, contribuyó, por otro lado, al avance de las relativas al hierro y a los armamentos y constituye el primer impulso para el desarrollo de la marina inglesa.

Los numerosos cambios operados a lo largo de los años presagiaban modificaciones radicales que tienen su máxima expresión a partir del siglo XV, con el renacimiento de la cultura y la implantación de nuevos órdenes políticos y sociales que permitirán el surgimiento de la nueva ciencia. El saber que se conservó en los monasterios y se enriqueció con las traducciones de Oriente, encuentra nuevos patrocinios en las cortes de reyes y príncipes y sale a la luz para conquistar prosélitos entre los miembros de las clases sociales emergentes. De esta manera el movimiento intelectual que se venía preparando durante el medievo alcanza un vigor inusitado en los principios de la Era Moderna. Los grandes descubrimientos marítimos que dieron a conocer otras tierras y un Nuevo Mundo con civilizaciones distintas y floras y faunas desconocidas, contribuyeron en gran medida a despertar la curiosidad y el interés por el estudio de la naturaleza, al tiempo que se destruían prejuicios y leyendas, mientras que el uso de la imprenta se populariza poniendo al alcance del público común los nuevos libros impresos, que si en un principio son de tipo religioso rápidamente se extienden a la literatura, despertando un interés intelectual y educativo que resulta fundamental para el desarrollo acelerado de la cultura.

El Renacimiento que se origina en Italia y se difunde por toda Europa, señala un periodo donde se logran desde las aparentemente simples modificaciones de lo establecido, hasta los claros rompimientos con el pasado que dan origen a una nueva cultura, donde el saber y el hacer cuentan con aceptación social y se reconoce al arte y al oficio, al técnico y al artesano; donde se inaugura un modo de concebir a la naturaleza que puede considerarse como una etapa de transición donde se empieza a abandonar el discurso medieval que, si bien no ha conseguido liberarse completamente de la religión y la magia, contiene ya el germen del pensamiento científico futuro. Así se van debilitando las ideas que separan lo celeste de lo terrestre, se empieza a estudiar el cuerpo humano como un microcosmos particular y la alquimia cede terreno ante la química, mientras los criterios de la ciencia empírica continúan su avance definitivo.

Dos signos característicos de esta época están constituidos, uno por los libros sobre máquinas que con el nombre genérico de *Theatrum Maquinarum* tuvieron gran aceptación entre los siglos XV y XVI⁴⁹; el otro es el surgimiento de "ingenieros" que se dedicaban tanto a la mecánica, la hidráulica o la balística, pero que igualmente eran arquitectos, escultores y pintores, que a la distancia son considerados tan sólo como técnicos preocupados por la eficacia y el rendimiento, aunque de entre de ellos haya surgido Leonardo da Vinci a quien algunos llegan a considerar como "...el

⁴⁹ cfr. BABALLA, George, *La evolución de la tecnología*, México, Edit. Grigalvo S. A., (1991, Los noventa # 83, pp. 88-95.

primer científico que... intentara el estudio de la Naturaleza con espíritu verdaderamente moderno". Esta inclinación hacia la técnica para ciertos autores no es significativa, pero es vista por otros como una muestra inequívoca del acercamiento hacia una ciencia experimental y el abandono, que puede ser discutible, del saber que se basa en la especulación.

Lo que parece ser el primer rompimiento formal con el antiguo sistema de pensamiento, para algunos historiadores el más importante⁵⁰, es originado por los trabajos de Nicolás Copérnico quien al proponer una imagen del universo anticipada por Aristarco de Samos, en la que si bien utiliza una teoría imperfecta que no rompe con las ideas medievales, pone las bases para reformar los conceptos fundamentales de la astronomía y contribuye a la formación del nuevo espíritu crítico. Es cierto que su obra muestra un gran trabajo teórico más que un estudio experimental directo y que el éxito que tiene en las décadas siguientes es muy discutible, pero el cuidado que pone al analizar la teoría geocéntrica y al hacer su revisión matemática, permiten identificar los gérmenes de una nueva forma de pensar; quizá sus teorías no hayan sido del todo "...instrumentos que impulsaron la transición desde la sociedad medieval a la sociedad occidental moderna..."⁵¹, pero si parecen

⁵⁰ JEANS, James, op. cit. p. 145.

⁵¹ Cfr. BERNAL, J. D. op. cit. pp. 190-192.

⁵² KUHN, T. S., La revolución Copernicana, (Vol. I), España, Ediciones Orbis S. A., 1970, p. 24

ser amplios motivos de controversia que, junto con otros hechos notables, contribuyeron a generar el movimiento de renovación científica que a mediados del siglo XVI parecía inminente.

Si durante la primera mitad de ese siglo el movimiento de Reforma había roto la unidad cristiana que reinaba en la Europa Occidental y produjo la separación entre el papado y los pueblos del Norte, en la segunda mitad aparece la Contrarreforma donde se reorganiza el catolicismo y se implantan medidas drásticas en defensa de la fe, como la censura eclesiástica y la nueva Inquisición, que terminan por extinguir el Renacimiento. En medio de un ambiente de fanatismo se desatan las guerras de religión en Francia o en Alemania. En ellas España busca conservar su amplio imperio europeo y la unidad religiosa de sus dominios, fracasando en el intento y minando sus recursos. A partir de entonces se empieza a desarrollar el poderío de Francia e Inglaterra, mientras que con el establecimiento de la República de las Provincias Unidas habrá de surgir Holanda como rival del poderío naval británico; así, gradualmente esas tres regiones del Mar del Norte se irían consolidando como el nuevo centro económico de Europa.

El siglo no presenta cambios espectaculares en el terreno de la tecnología, aunque la industria naval es mejorada bajo el impulso a la navegación; la explotación de las minas evoluciona con el uso de los metales y la búsqueda de oro y plata en el nuevo continente. Gradualmente la industria del hierro se desarrolla

gracias a la demanda generada por las guerras y la elaboración de implementos usados en la agricultura y en las nacientes industrias. La productividad se incrementa con el uso de altos hornos que agregan el hierro colado al hierro forjado y al acero y los costos se abaten, mientras empiezan a aparecer problemas de combustible; la población, que se ha incrementado en forma considerable, utiliza grandes cantidades de madera y tiene que desmontar extensos terrenos boscosos para ampliar las áreas de cultivo y así poder alimentarse. Si a ello se agrega el gran consumo de madera que se utiliza en las construcciones navales y lo que se emplea en la industria del hierro, se obtiene como resultado la elevación de los precios de la madera y principalmente el agotamiento de los bosques.

La crisis de la madera que se presenta a finales del siglo XVI afecta seriamente a la metalurgia, en especial a la industria del hierro en gran escala que utilizaba al carbón vegetal como combustible. Entre las posibles soluciones que se ensayan se recurre al carbón mineral, que habiendo sido utilizado como combustible de uso doméstico desde la Edad Media, produce excelentes resultados y resulta ser el sustituto ideal, además de que puede ser encontrado a flor de tierra en los grandes yacimientos de Escocia y del norte de Inglaterra, como también en las extensiones mineras de Holanda; en Gran Bretaña su consumo se populariza rápidamente y su demanda es mucho mayor que la del hierro, de tal manera que "... antes de la Revolución Industrial,

su producción ya podía contabilizarse en millones de toneladas, primer artículo al que podrían aplicarse tales magnitudes astronómicas...⁵³". A corto plazo el carbón habrá de ocupar una posición de privilegio como materia prima y los centros industriales se desplazarán hacia los yacimientos de hulla, al tiempo que el Reino Unido, apoyada en su riqueza de mineral, iniciará el ascenso que la había de conducir al predominio.

En la astronomía, durante la segunda mitad del siglo XVI el copernicanismo va ganando terreno poco a poco, gracias a las enseñanzas de M. Maestlin y las aportaciones de T. Digges o a las de E. Reinhold; a finales de siglo, se descubren nuevas pruebas en su favor y la caída de la cosmología tradicional se acelera con la contribución de Tycho Brahe, quien realiza cambios importantes en las técnicas de observación astronómica y propone un sistema híbrido, en donde si bien rechaza la posibilidad de movimiento terrestre, mantiene las ventajas matemáticas del sistema de Copérnico. La revolución copernicana llega a su culminación con los trabajos de Johannes Kepler quien surge, "... como un producto de todo aquel movimiento de renovación que estaba teniendo lugar a fines del siglo XVI..."⁵⁴, para mejorar el sistema matemático elaborado por Copérnico y conseguir que las predicciones teóricas concordaran con las observaciones. Con su obra, sintetizada en sus tres leyes famosas, Kepler contribuye a convertir a los astrónomos

⁵³ ROSEBAWN, E. J., *Industria e imperio, una historia económica de Gran Bretaña desde 1750*, 14. edición, España, Edit. Ariel S. A., 1988, p. 44.

⁵⁴ BUTTERFIELD, Herbert, *The origins of Modern Science, 1300-1800*, U.S.A., Collier Books, 1962, p. 14

al copernicanismo y en ella algunos pueden ver el paso "... de una concepción aún animista del universo a una concepción mecanicista ... (donde) ... el mecanismo basta justamente porque los movimientos planetarios siguen leyes estrictamente matemáticas..."⁵⁵

Al iniciar el siglo XVII las antiguas concepciones acerca de la ciencia no podían sostenerse más, pues la nueva sociedad necesitaba otro tipo de explicaciones; los ideales de una burguesía que cambia y se extiende modificando los procesos de producción, son adoptados fácilmente y la riqueza material se vuelve la preocupación principal. Las condiciones para la substitución de los esquemas tradicionales son cada vez más propicias y el largo proceso revolucionario, que ha venido confrontando los supuestos intelectuales del pasado, culmina con el surgimiento de una ciencia diferente, que será responsable de responder a las exigencias de la cultura que emerge de la nueva sociedad. Durante la primera mitad de ese siglo, mientras las monarquías absolutas se van afianzando, la guerra de los treinta años envuelve a casi todas las naciones de Europa; de ella salen derrotadas Alemania y España que inicia su decadencia, siendo desplazada por Francia que surge como potencia victoriosa, ensanchando sus fronteras y afirmando su poderío creciente.

La ciencia moderna tiene en Galileo Galilei a uno de sus

⁵⁵ KOVRE, Alexandre, Estudios ... op. cit. p. 47.

exponentes más notables, a quien se le reconoce tanto por sus estudios y descubrimientos científicos, como por su abierta oposición al sistema escolástico, que habría de llevarle a la abjuración y la condena. Seguidor de las ideas de Copérnico, que en ocasiones limitan su producción, recibe influencias de Platón y Pitágoras, pero su adhesión a los planteamientos de Arquímedes le permite desarrollar una física cuantitativa que habrá de substituir a la ciencia aristotélica; sus trabajos más importantes se asocian con el análisis de los problemas del movimiento, que le ocuparon buena parte de su vida. El modo de proceder en las investigaciones y su forma de interpretar los datos de la experiencia proporcionan las primeras evidencias concretas de los procedimientos de una nueva física y, aunque algunos historiadores han dudado de su trabajo experimental, la gran mayoría lo considera "... el fundador de la metodología científica moderna ..."⁵⁶, donde se combinan los experimentos, reales y "del pensamiento", con el análisis matemático cuidadoso, características de una física distinta que servirá para ampliar los horizontes de estudio y permitirá descubrir nuevos espacios de investigación.

Sus aportaciones astronómicas fueron determinantes en la polémica acerca de los dos sistemas, pues fueron aceptadas como elementos contra la concepción tolemáica y las teorías acerca de la inmutabilidad y perfección de los cielos, mientras que la publicación de su obra popularizó el uso del telescopio y puso al

⁵⁶ FEEDOSSEV, P. N., op. cit. p. 73

alcance del hombre común la idea de un universo distinto del cosmos aristotélico. Contribuye ampliamente al desarrollo de la hidrostática, junto con Simón Stevin y, después de someter a crítica a la vieja teoría del movimiento, formula los principios de una nueva mecánica donde asocia al análisis matemático riguroso con los experimentos, la cual ocupa un lugar preponderante en el desarrollo de la ciencia, pues contribuye al enlace entre la física terrestre y la astronomía. Al ingenio y el estilo polémico de Galileo se unen la agudeza y las peculiaridades del pensamiento nuevo, que le permiten superar las concepciones escolásticas y descubrir, según sus contemporáneos, un nuevo cielo y una nueva tierra; pero su ciencia es tan amplia que hace "...surgir una nueva concepción del problema del conocimiento..."⁵⁷ que habría de ser afinado y perfeccionado con el paso del tiempo.

A medida que avanza el siglo, las investigaciones científicas de la época de Galileo, que bien pueden entenderse como actividades individualizadas, se van convirtiendo en parte de una empresa colectiva, donde el intercambio epistolar cumple una notable labor de comunicación; las ideas científicas se difunden por Italia y por Europa y personajes como Marin Mersenne se convierten en recolectores y transmisores de la correspondencia científica. Al iniciar la segunda mitad del siglo XVII se había hecho notable un movimiento generalizado de desarrollo de la ciencia, en el que los personajes pasan a segundo término. Mientras se sigue trabajando la

⁵⁷ CASSIRER, ERNST, *El problema del conocimiento, en la filosofía y las ciencias modernas*, I. ed. reimpresión, México, F.C.E., p. 185.

caída de los cuerpos y la hidrostática, se empieza a estudiar la atmósfera desde puntos de vista mecánicos y se retoma el problema del vacío; es el periodo de Pierre Gassendi a quien se le adjudica el resurgimiento del atomismo antiguo y de quien se piensa que da "...una base filosófica, una base ontológica, a la ciencia moderna..."⁵⁸ y también el de Rene Descartes quien "... encaminó a la física hacia el análisis del universo descomponiéndolo en la acción recíproca de objetos tomados por pares..."⁵⁹, además de crear una ciencia deductiva más que experimental.

Durante la segunda parte del siglo la economía europea atraviesa una crisis general, que señala la última fase de la transición de la economía feudal a la economía capitalista. En ella se detiene el crecimiento de las grandes ciudades y la población sufre los efectos de las pestes y la plagas, el comercio no experimenta incrementos notables y aun llega a disminuir en algunas regiones, de manera que "...el Mediterráneo cesó de ser el mas importante centro de influencia económica y política... (mientras)... las potencias ibéricas, Italia y Turquía acusaban un retroceso evidente..."⁶⁰. En Francia culmina el proceso que somete a la nobleza bajo el poder real y con el reinado de Luis XIV se instaura el absolutismo como una forma de gobierno, que será copiada por la mayor parte de los países de Europa, para contribuir

⁵⁸ KOYRE, Alexandre, Estudios... op. cit. p. 319.

⁵⁹ MARCH, Robert H., Física para poetas, México, Siglo XXI editores S. A., 1977, p. 45.

⁶⁰ HOBBSAWM, Eric, En torno a los orígenes de la revolución industrial, 23a. edición, México, Siglo XXI editores S. A., 1993, p. 8.

con su poder creciente a las concentraciones económicas. En un siglo que se caracteriza por la gran efervescencia social y numerosas insurrecciones, Inglaterra pasa de la revolución escocesa, a la guerra civil y al absolutismo de O. Cromwell durante el cual se establecerá el "acta de navegación" que prohibía la entrada en los puertos ingleses a los buques que no llevaran mercancías del país, esto junto con el triunfo en la guerra con Holanda, consolidan el fortalecimiento de su poderío naval; así arriban a la nueva revolución que conduce a la monarquía constitucional y a la adopción de una política marcadamente burguesa, que subordinará todos sus fines a un mercantilismo declarado que se orienta hacia la acumulación de capital.

Sin embargo, aun con los conflictos de esos tiempos, por extraño que pueda parecer, no hubo mayor interferencia con el trabajo de los científicos y aun puede considerarse como un período de prosperidad, donde se incrementa el interés por el estudio de los fenómenos de la naturaleza y aparece el apoyo de algunos patrocinadores. Mientras la ciencia y aun los experimentos se van filtrando en los círculos literarios, surge una nueva clase de hombres de ciencia de raíces burguesas, con recursos económicos que les dan mayor independencia para pensar y obrar, quienes buscan estrechar más sus relaciones y tienden a reunirse para discutir e intercambiar sus ideas; así, con el antecedente de la "Accademia dei Lincei" fundada en Roma en 1603, de manera natural se irán formando las sociedades científicas. En Italia surge en 1657 la

"... academia... del Cimento, que estableció el Cardenal Leopoldo de Medicis..."⁶¹ o su hermano Ferdinando II gran duque de Toscana según otros autores, en el cual se sigue una línea galileana, que se reconoce en su lema "provando e riprovando"; años más adelante, en 1660, se funda la "Royal Society of London for improving natural Knowledge" para continuar las actividades del grupo de científicos que ya se reunían en Oxford décadas atrás y su labor se oficializa al recibir la cédula real dos años después. Posteriormente aparece en París la "Academie Royale des Science" que se funda en 1666, como muestra del éxito social que lograron las ciencias durante el reinado de Luis XIV.

Las reuniones de las nacientes sociedades, donde el intercambio de información era el objetivo principal, fueron evolucionando gradualmente y pronto se busca en ellas concentrar los trabajos acerca de los problemas científicos y técnicos que planteaban la navegación, la industria militar y la minería. En la Real Sociedad se dirige la atención hacia la mejora de los oficios y de la industria existentes, logrando fundar en 1662 el Georgical Comitee que se encargará de estudiar las prácticas agrícolas. En ese mismo año, la Sociedad se hace cargo del examen de peticiones de patentes, claro ejemplo de la relación creciente entre lo teórico y lo práctico que caracteriza al nuevo orden. En 1665 se realiza la publicación de los "Philosophical Transactions of the Royal Society" en donde se concentra la información sobre el estado

⁶¹ VOLTAIRE, op. cit. p. 147.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

de las distintas ramas de la ciencia y la Tecnología. La atención de los científicos aún se concentra sobre la astronomía y el uso del telescopio, con lo que resurge el interés por la óptica y sobre la naturaleza de la luz; pero también se estudia la Neumática y los problemas relativos al vacío, donde destacan Robert Boyle, quizá la figura central en los inicios de la sociedad, y Robert Hooke, jefe de experimentación de ella, quien fue ..."el más grande científico experimental antes de Faraday..."⁶².

Si la Sociedad francesa contó desde su fundación con el sustento real, la de Inglaterra recibió el apoyo de miembros de la aristocracia y de la burguesía mercantil; ésta, aunque en un corto tiempo atravesaría momentos difíciles, en sus primeros años logró alcanzar el reconocimiento de los principales sabios del Reino y llegó a contar entre sus filas a Issac Newton, uno de los más grandes pensadores de la historia. Newton ingresa a la sociedad en 1672 siendo maestro de Cambridge, después de haber realizado calladamente importantes descubrimientos: el teorema del binomio y el cálculo diferencial, su teoría de los colores y el telescopio de reflexión, además de que "...había desarrollado una clara idea de las primeras leyes del movimiento y de la fórmula para la aceleración centrípeta..."⁶³. Después de la controversia que suscita su obra acerca de la teoría de la luz, reanuda sus estudios de los movimientos planetarios utilizando nuevas observaciones y

⁶² BERNAL, J. D., La ciencia en... op. cit. p. 444.

⁶³ ARONS, Arnold S., Evolución de los conceptos de la Física, México, Edit. Trillas S. A., 1970, p. 124

cálculos más precisos, para publicar sus resultados, en 1687, en su obra maestra "Philosophiae Naturalis Principia Mathematica", que es considerada como uno de los mejores productos del intelecto humano.

En los Principia, obra con la que se ha llegado a comparar a Los Elementos de Euclides o a El Origen de las Especies, se desarrolla "...una doctrina sobre la naturaleza, mediante el establecimiento de los fundamentos matemáticos de la física..."⁶⁴, donde fusiona los trabajos de sus antecesores con sus propios descubrimientos e ideas, para elaborar una síntesis que contiene las bases teóricas y metodológicas de la mecánica y sus tres famosas leyes del movimiento que serán fundamentales para el desarrollo posterior de la Física. El segundo libro se dedica a la discusión de los fundamentos de la hidrostática y la flotación de los cuerpos y a la solución de problemas de hidrodinámica como la caída de una columna de agua o la resistencia al deslizamiento en fluidos⁶⁵. En el tercer libro se analizan los movimientos de la Luna y los planetas, para desarrollar una crítica contundente en contra de la cosmología cartesiana de los vórtices y proponer su teoría de la gravitación, que aplica al estudio de los cometas y a la explicación de fenómenos asociados con la navegación como el origen de las mareas o el de las irregularidades en el movimiento de la luna; ese nuevo acercamiento matemático habría de revolucionar las concepciones acerca de la mecánica celeste y será

⁶⁴ SALDARRA, Juan, J., op. cit. p. 101.

⁶⁵ cfr. LEVI, Enzo, El agua según la ciencia, México, Ediciones Castell Mexicana S. A., 1989, pp. 68-69 y 226-227.

reconocido como "... la etapa final de la transformación de la concepción aristotélica del mundo, que iniciara Copérnico..."⁶⁶.

La importancia de la obra es indiscutible, tanto para la mecánica terrestre como para la celeste; sin embargo, la aceptación por la comunidad científica de su época no fue inmediata y debió de transcurrir un tiempo considerable para que su trabajo fuera asimilado por quienes rechazaban la idea de que se pudiera ejercer una influencia a través del espacio, entre cuerpos que no estaban en contacto, una oposición liderada por los numerosos seguidores de la física de Descartes, con la que Newton presenta claras discordancias; esto explica el rechazo de la teoría no solamente en los medios franceses, sino en muchas partes más, pues "... Al acabar el siglo XVII y hasta bien entrado el XVIII, la mayoría de los filósofos de la naturaleza eran cartesianos..."⁶⁷. Las críticas de Huygens y de Leibnitz contribuyeron a fortalecer la ciencia de Descartes, pero gracias a su solidez, la obra de Newton habría de imponerse poco a poco; así, en medio de la larga controversia que puso en pugna a los científicos ingleses y a los franceses, se fue desarrollando la transición de la física cartesiana a la newtoniana, y para finales del siglo XVIII una nueva época en la ciencia quedó establecida definitivamente con el triunfo de la física newtoniana sobre el complicado sistema deductivo de Descartes.

⁶⁶ BERNAL, John D., *La ciencia en...*, op. cit. p. 464.

⁶⁷ BARTON, George, op. cit. p. 149.

A través de sus "Regulae Philosophandi", Newton formula una guía para el trabajo científico, pero su mayor aportación en ese terreno es su forma de utilizar la metodología experimental, ya que proporciona "...el modelo de la manera en que el rigor y la precisión del cálculo deben asociarse con la sujeción escrupulosa a los datos de la experiencia..."⁶⁸; los efectos revolucionarios de sus trabajos también tienen que ver con el descubrimiento del lenguaje matemático de la nueva mecánica; el cálculo de "fluxiones" que abrirá el camino para un estudio más preciso de la naturaleza y contribuirá a la solución de numerosos problemas, así como al surgimiento de cuestiones nuevas. En manos de los brillantes matemáticos del siglo XVIII, la nueva herramienta produce grandes progresos en la mecánica, que se vuelve más matemática gracias a las aportaciones de L. Euler, J. D'alembert y L. Lagrange, quienes junto con D. Bernoulli contribuyeron a darle forma definitiva a la hidrodinámica y propusieron métodos generales para pasar del estudio del movimiento de las partículas al de los cuerpos rígidos y de ahí al de un sistema general de cuerpos. A medida que avanza el siglo, el éxito de la teoría newtoniana fue creciendo y su campo de acción se extendió cada vez más. La idea de causalidad a distancia aunque rechazada por Newton, logró una gran aceptación y se convirtió en un paradigma que sería aplicado tanto a las leyes de la electricidad como a las del magnetismo y conducirá posteriormente a la idea de campo.

⁶⁸ BLANCHÉ, Robert, op. cit. pp. 132-133.

El siglo XVIII fue un verdadero siglo newtoniano, cuyo ideal es el progreso del género humano a través del conocimiento y el dominio de la naturaleza. Pero en sus primeros años, mientras se realizaba la asimilación de la teoría, el impetu científico del siglo anterior se debilitó considerablemente, quizá a causa de un elemental sentido de respeto hacia las ideas del maestro. Al mismo tiempo, los grandes comerciantes enriquecidos al paso de los años, encuentran acomodo en la sociedad y adoptan actitudes conformistas; la producción artesanal a pequeña escala empieza a ser desplazada por una manufactura que ya puede considerarse masiva aunque se concentra mayormente en los mercados locales. De las filas de los manufactureros comienza a ascender una nueva clase burguesa que utiliza hábilmente los procedimientos técnicos para satisfacer las incipientes demandas de productos. Al avanzar el primer tercio del siglo, la actividad científica cobra nuevos impulsos con la difusión abierta de las ideas de Newton, que penetran igualmente en la cultura de la época; su influencia es definitiva para la aparición de la filosofía de las Luces, donde se manifiesta un espíritu de liberación intelectual basada en el uso de la ciencia y la razón, la cual se origina en Inglaterra y es llevada a Francia por Voltaire y Montesquieu, quienes "... oponen al cartesianismo la ciencia natural de Newton y la filosofía empírica de Locke, y a la vieja monarquía absoluta la libertad política de Inglaterra..."⁶⁹.

⁶⁹ DILTHEY, Wilhelm, *Historia de la filosofía*, 2a. Edición, México, FICSA, 1979, p. 134.

Para la segunda mitad del siglo XVIII, punto final de esta larga introducción, la ciencia ha recuperado su lugar y en casi todas las cortes de Europa se llega a contar con una Academia de Ciencias y Artes vinculada con el Estado; la época se caracteriza porque en ella se desarrollan dos grandes movimientos que serán decisivos para la ciencia y la política de los siglos venideros, frente a los cuales otros grandes hechos de ese tiempo parecen irrelevantes: La Revolución Francesa y la Revolución Industrial. La primera fue una revolución armada que se asocia con una etapa de crisis en la que se hundieron instituciones y valores sociales, donde la nobleza pierde definitivamente su papel rector de la sociedad y es substituida por la burguesía que formaliza así el poder que ya poseía, para conducir la vida socio-económica del mundo occidental; el movimiento marcará el inicio de una nueva era científica, donde se reconocerá que la participación del hombre de ciencia es cada vez más importante para el desarrollo de la sociedad, en la cual el trabajo científico puede ser utilizado para ganar poder y prestigio político; así, exceptuando los meses del período del Terror, los científicos empiezan a gozar de un respeto que se irá acrecentando en el tiempo de la República, que no decaerá en el régimen napoleónico, donde la ciencia acrecentará su valor.

Con el nombre genérico de Revolución Industrial se reconoce al gran proceso de transformación tecnológica, que incluye profundas implicaciones sociales, económicas y políticas, la cual surge en la

segunda mitad del Siglo de la Razón; es reconocida como la primera de las transformaciones trascendentales de la Epoca Moderna, donde diversos países experimentan un crecimiento económico que no tiene precedentes en la historia de la humanidad. A lo largo del proceso, que se inicia en Inglaterra habrá de lograrse el cambio de la producción de la fase manufacturera a la mecanizada, para dar paso a la industria que se caracteriza por el uso cada vez más difundido de la maquinaria movida por el vapor y por el desarrollo de las fábricas que darán origen a las ciudades de tipo industrial; su primera fase se realiza en la Gran Bretaña, la que gracias a ello se convierte en la "... monopolizadora virtual de la industria, de la exportación de productos manufacturados y de la explotación colonial..."⁷⁰. El caso británico, si bien desarrollado bajo condiciones específicas y en situaciones particulares, es aceptado generalmente como el modelo del proceso y es objeto del análisis que se realiza en las páginas siguientes; con él se pretende contribuir a un mejor conocimiento acerca de cómo evoluciona la Física, del surgimiento de algunas de sus líneas de estudio y de la forma en que se relaciona la ciencia con la industria, para construir una de las mayores transformaciones de la historia.

⁷⁰ НОББАУМ, Эрих, En torno a ..., op. cit. p. 93.

5.2 LA MAQUINA DE VAPOR Y LA ENERGIA CALORIFICA.

Generalmente se acepta que la Revolución Industrial Británica se inicia en 1780, aunque algunos autores asocian su origen con la llegada de Jorge III al trono en 1760. Se desarrolla en medio del avance que venía experimentando la economía europea en esos tiempos y fue precedida por las considerables décadas de desarrollo económico, que permiten al Imperio superar los obstáculos que fueron surgiendo a su paso. Se ha tratado de explicar el proceso a través de argumentos relacionados con factores climatológicos o geográficos, con la distribución de sus recursos naturales o con cuestiones históricas, religiosas o puramente políticas; pero la interpretación más aceptada asigna un valor fundamental a la aparición de la máquina de vapor y a la relación que se establece entre las innovaciones tecnológicas y la obtención de beneficios económicos. Dentro de esta línea las explicaciones se ubican entre las posiciones de quienes argumentan que la Revolución es el resultado directo de los importantes desarrollos tecnológicos como la máquina de hilar o la utilización del carbón y la que sostienen quienes piensan que la invención de la máquina de vapor no origina la Revolución, sino que dentro de ésta la máquina encuentra un campo fértil donde se utiliza ampliamente y se convierte en un elemento fundamental para el desarrollo del proceso.

Para algunos autores el surgimiento de la máquina de vapor está asociado con la popular leyenda que presenta a James Watt

inspirándose, para su construcción, en el vapor que sale de una tetera; sin embargo, para la época en que supuestamente se desarrollaría el relato, alrededor de 1745, la máquina ya tenía varias décadas de uso en la industria minera y su invención, que se realiza en el siglo XVII, es el resultado de un largo proceso de desarrollo que tiene sus raíces en épocas lejanas. El nacimiento de una máquina de este tipo, es parte del proceso de búsqueda de nuevas fuentes de energía que el hombre realiza desde tiempos remotos, para no depender en exclusiva de su fuerza muscular; por tal motivo, aprende a domesticar y aparejar animales de tiro que emplea con amplitud en el transporte, la guerra y la agricultura, utiliza la ayuda de otros hombres para multiplicar su fuerza mediante el empleo de cuadrillas de trabajadores y aun se vale del esclavismo para producir, en el pasado, grandes obras de ingeniería como las pirámides de Egipto o realizar la explotación minera de la antigüedad; pero también construye dispositivos mecánicos, como las máquinas simples, que le permiten aligerar el trabajo y multiplicar sus esfuerzos.

Los primeros antecedentes del uso del vapor con fines prácticos, de acuerdo con el padre jesuita Atanasio Kircher⁷¹, son de épocas anteriores a la Era cristiana, pues señala que un templo de Saís, capital del bajo Egipto, contaba con un aparato que escanciaba líquido cuando se prendían las llamas del altar, que debía funcionar por medio de la presión que ejercía el vapor y la

⁷¹ GARCÍA, Font, Juan, *Historia de la ciencia*, 7a. edición, Barcelona, Ediciones Danae S. A., p. 111.

dilatación del aire en un par de recipientes que contienen líquido. Dispositivos de ese estilo, parecen ser el fruto del trabajo de un conjunto de ingenieros ilustrados o científicos que combinan la ciencia con la ingeniería, que surgen en Alejandría en los últimos siglos anteriores a nuestra Era, bajo la influencia de la técnica que proviene de la cultura egipcia. Entre ellos destacan Ctesibio, Filón de Bizancio y Herón de Alejandría, pero el más famoso de todos es Arquímedes de Siracusa, mecánico habilidoso, matemático e inventor que es considerado por algunos historiadores como el primero que experimenta con artefactos de vapor, aunque de ello no existan mayores evidencias. La obra de Ctesibio es descrita por Filón y por él se sabe que inventó una clepsidra mecánica, un órgano de viento accionado por agua, así como "... una bomba hidráulica ... (y) ... una serie de ingenios bélicos a base de aire comprimido..."⁷², aunque algunos de éstos últimos resultaron impracticables.

Herón de Alejandría, quien es reconocido como un buen matemático autor de diferentes obras entre las que destacan la Mecánica, la Geometría o la que se refiere a Ingeniería Militar, realiza estudios de óptica, construye aparatos diversos, escribe acerca de las máquinas simples y dirige "... la escuela mecánica de Alejandría, ... [cuyos] primeros cursos se dedicaban a las ciencias teóricas (geometría, aritmética, ...)..."⁷³ para pasar después al

⁷² GARCÍA Font, Juan *Ibid.* p. 121.

⁷³ ENRIQUETI, F. y De Santillana, G., *Storia del pensiero scientifico*, cit. por Geymonat, *L'evoluzione del pensiero scientifico*, 5a. edición, Argentina, Eudeba, 1971, p. 26.

trabajo práctico. Su interés por la Mecánica de Fluidos se refleja en el tratado que se conoce como las *Pneumáticas*, en donde analiza el sifón y otros problemas hidrostáticos y proporciona las instrucciones para fabricar el conocido conjunto de ingenios o juguetes mecánicos que utilizan la compresión y expansión del aire; entre ellos se puede destacar a la eolípila, aparato de vapor de su invención, del cual se muestra un modelo en la *Figura 1*.



Fig. 1. Grabado que muestra a la eolípila de Heron tomado de un manuscrito del Renacimiento (Tomado de Garcia F., Juan, Historia de la ciencia, Ediciones Danae S. A., 1976)

Ahí puede verse un sistema de metal sellado, que consta de una esfera hueca que puede girar sostenida por dos tuberías conectadas a un recipiente que contiene agua; la esfera cuenta con dos pequeños tubos colocados en extremos opuestos de su superficie; el dispositivo funciona cuando, al prender fuego bajo el recipiente, el agua entra en ebullición y el vapor sube por los soportes para salir por los tubos pequeños en forma tangencial a la esfera, que empieza a girar como reacción al vapor que se escapa. Además de ella diseñó y construyó la fuente o surtidor de compresión, sus dispositivos que funcionan por medio de calor, como el que derrama aceite sobre un altar que es semejante al aparato que describe Kircher, así como los que son capaces de realizar trabajo mecánico, como el que abría las puertas de un templo cuando se produjera fuego en un altar.

El nivel de desarrollo que se alcanza en esos tiempos, coloca a la ciencia helenística en el umbral de una nueva época, en la que hubieran podido surgir diferentes inquietudes tanto en el plano teórico como el práctico; la unión que por entonces se logra entre la ciencia y la tecnología, representa el punto culminante de una cultura que por primera vez pretende el estudio de la naturaleza con fines netamente prácticos. Sin embargo, a pesar del gran avance logrado en el conocimiento de la maquinaria y aun cuando conocían "... la fuerza del agua que cae, la de la presión del aire y la del

vapor en expansión..."⁷⁴, no se tuvo el empuje suficiente para avanzar más en el control de la naturaleza. Se han ensayado diferentes justificaciones al respecto, algunas asignando culpas excesivas al papel de los individuos y otras que lo atribuyen a la falta de las materias primas necesarias, como la del hierro colado barato; pero una explicación más justa es la que toma en cuenta las condiciones económicas y sociales de la época. En el siglo I D.C., alrededor del cual se desarrollan los trabajos de Herón, el imperio romano dominaba los reinos helenísticos y las decadentes clases adineradas privilegiaban el juego y la diversión, despreciando abiertamente el trabajo manual; ellas mismas formaban el mercado potencial de la producción de artículos a gran escala, producción que a todas luces resultaba innecesaria; finalmente, la base de la economía era un esclavismo creciente que obviamente se contraponía con la posible utilización de maquinaria con fines industriales.

Bajo el dominio de Roma, la cultura helenística es absorbida por un pueblo de buenos ingenieros, quienes tuvieron gran habilidad práctica, pues construyeron puentes, edificios, calzadas o acueductos, pero que aplicaron la ciencia sin mayor estudio, pues no se interesaron por las especulaciones teóricas y solamente utilizaron ciertos inventos griegos; así, en el período que va del imperio a su decadencia no se reporta ningún informe acerca del uso del vapor. Tiempo después, en la época de Carlo Magno, se inicia la

⁷⁴ TURNER, Ralph, *Las grandes culturas de la humanidad, II, Los imperios clásicos*, 4a. edición, México, F. C. E., 1965, p. 609.

construcción de órganos para las iglesias donde volverá a aparecer el problema de proporcionar aire a presión uniforme por medios mecánicos, que habían estudiado Ctesibio y Herón.

Gracias a sus estudios de las obras griegas, el pueblo árabe logra desarrollar una mecánica experimental que en especial se refiere a la estática, la hidrostática y los principios de la dinámica, perfeccionan clepsidras y fuentes y basados en la Mecánica de Herón, analizan "... la construcción de aparatos dotados de movimientos automáticos ..."⁷⁵, según reportan los hermanos Musa. Igualmente en el siglo X, en los dominios de Bizancio, también se logran construir "...diversos aparatos hidráulicos y autómatas ..."⁷⁶ que están inspirados en los mecanismos de Herón; mientras que, en Occidente en ese siglo, solamente Gerbert de Aurillac habría desarrollado un órgano hidráulico semejante al de Ctesibio. En 1565 J. Turriano idea un aparato para abastecer de agua a Toledo que se conoce como el "artificio de Juanelo", pero a partir de entonces no se cuenta con información acerca del uso del vapor, hasta que en 1601 Giovanni della Porta, en su tratado de neumática, señala el poder que manifiesta cuando se encuentra confinado en una cámara cerrada.

La nueva ciencia le empieza a ganar terreno al aristotelismo con la apertura de diferentes espacios de discusión de las

⁷⁵ ARNALDEZ, R. y otros, op. cit. p. 516.

⁷⁶ ARNALDEZ, R., *ibid.* p. 588.

concepciones antiguas; uno de ellos se refiere al estudio del calor, que será fundamental para el desarrollo de la civilización industrial. Las primeras evidencias del uso del calor para beneficio del hombre, se asocian con el descubrimiento del fuego que le permitirá separarse de los animales, cocinar sus alimentos y superar las etapas primitivas; es elemento indispensable en las culturas de la antigüedad y componente sustancial tanto para la cosmología de la India como la de China. El fuego ocupa un lugar especial para la cultura griega; Pitágoras lo considera el centro del universo, para Platón es uno de los cuatro elementos del mundo y para Aristóteles, quien sostenía una visión semejante, el calor se asocia con el movimiento ascendente, pues según explica, cuando un cuerpo simple está fuera del lugar que le corresponde cuenta con un movimiento natural que lo llevará a ocuparlo "...hacia el centro (hacia abajo) como en el caso de la tierra y el agua, o bien hacia afuera (hacia arriba) como el aire y el fuego..."⁷⁷.

Alrededor del año 870 d. C., el filósofo árabe al-Kindi, estudioso de las obras de Aristóteles, discute la relatividad de los juicios que califican como cálidos o fríos a los objetos y reporta además, en su Tratado de Posología, uno de los primeros intentos teóricos para determinar la dosificación de los medicamentos. En él desarrolla una escala de "grados de calor". Templado, Primero, Segundo y Tercero, que es quizá la primera graduación termométrica de la historia, la cual hace corresponder

⁷⁷ PIAGET, J. y Garcia, R. op. cit. p. 42.

con los elementos de la proporción calor/frío: Igualdad, Doble, Cuádruple y Octuple⁷⁸, con ello se forma un sistema que será muy utilizado en la Edad Media, por los médicos seguidores de la escuela de elementos contrarios, para calentar los medicamentos de acuerdo con la escala y así poder moderar o atemperar a sus opuestos. Con antecedentes como esos, no resulta aventurado aceptar que "... las primeras ideas elementales acerca de la medición del calor provienen de la edad media..."⁷⁹; ello debe inscribirse dentro de una peculiar preocupación que se desarrolla en el siglo XIV, respecto a la manera en que las cualidades variaban su intensidad y la posibilidad de reducirlas a escalas de magnitudes medibles, que se conoce como "... la intensificación y disminución de formas y cualidades..."⁸⁰ por medio de la cual se estudiarían desde las variaciones de velocidad o la forma como se calentaba y enfriaba el agua, hasta preocupaciones de orden teológico.

Con el antecedente de Filón de Bizancio, quien alrededor del siglo II a.C. construyó un aparato para demostrar la expansión del aire por medio del calor, Galileo fabrica en 1592 el primer instrumento realmente científico para medir la temperatura; éste se compone de un bulbo de cristal de cuello estrecho y muy largo, que se llena de agua coloreada, el recipiente se invierte y su cuello se sumerge en un recipiente que contiene agua del mismo tipo. Al

⁷⁸ cfr. ARNALDEZ, R. y otros op. cit. pp. 489-491 y 661-664.

⁷⁹ BERNAL, J. D., La ciencia en ... op. cit. p. 555.

⁸⁰ GRANT, Edward, La ciencia física en la edad media, México, F.C.E., 1921, Breviarius 152, 1943, p. 111

equilibrarse el sistema, en el bulbo queda un cierto volumen de aire que, cuando se dilata o se contrae, obliga a bajar o a subir la columna de líquido, lo cual era aceptado como evidencia de un cambio de temperatura. El aparato llegó a utilizarse para comparar la temperatura de los diferentes objetos que se ponían en contacto con el bulbo y de esa manera procedían los médicos de la época, quienes verificaban la presencia de fiebre, colocando alternativamente el bulbo en la boca de una persona sana y de la enferma, para identificar temperaturas arriba de lo normal. En vista de que Galileo no propuso ninguna escala para medir las temperaturas, el instrumento es reconocido más bien como un termoscopio; sin embargo, llevando la rigurosidad al extremo, se puede notar que lo que en realidad se medía eran los efectos combinados de la presión atmosférica y la temperatura, para concordar con quienes plantean que el utensilio es un "barotermoscopio".

Con el tiempo se fueron acoplando tubos más delgados a los bulbos y eso hizo posible que se utilizaran líquidos como sustancias termométricas, se prescindiera del recipiente para inmersión y que los aparatos adoptaran una forma semejante a los actuales; el primer instrumento de ese tipo fue construido por Jean Rey en 1631, utilizando un tubo capilar abierto por un extremo y agua coloreada en su interior. Alrededor de una década más tarde, Ferdinando II de Medicis gran duque de Toscana, interesado en medir temperaturas por abajo del punto de solidificación del agua disena

un termómetro que utiliza alcohol en lugar de agua y tiene cerrado herméticamente el final del tubo para evitar la evaporación del líquido; además, se le asocia con la fundación, en Florencia, de una institución constructora de termómetros, en donde, al parecer, se utiliza mercurio como líquido termométrico por primera vez. Tales avances seguramente están asociados con la labor que realizan Vincenzo Viviani, G. A. Borelli o Francesco Redi en la Academia del Cimento, en donde se realizan estudios y experimentos sobre la propagación del sonido y de la luz, los fenómenos magnéticos, la presión del aire, el vacío y las propiedades del calor, además de construir diferentes tipos de termómetros con sofisticados sistemas de graduación como los que se muestran en la *Figura 2*.

Con el estudio de la Neumática y en especial el de la producción del vacío, que se desarrollaron también en el siglo XVII, las teorías científicas hacen sus primeras contribuciones al surgimiento de la máquina de vapor. En el primer tercio del siglo, el uso del sifón y de las bombas aspirantes habían mostrado la imposibilidad de elevar agua a alturas mayores que 10.33 mts. al nivel del mar, fenómeno al que el mismo Galileo no logró dar una explicación satisfactoria. La solución del problema es iniciada por Evangelista Torricelli, quien con la ayuda de V. Viviani realiza en 1644 su conocido experimento; en él, llena de mercurio un tubo de vidrio cerrado por un extremo y lo sumerge verticalmente en un cuba que también contiene mercurio; el líquido del tubo sale de él y se detiene cuando la columna tiene una altura aproximada de 76 cm. por

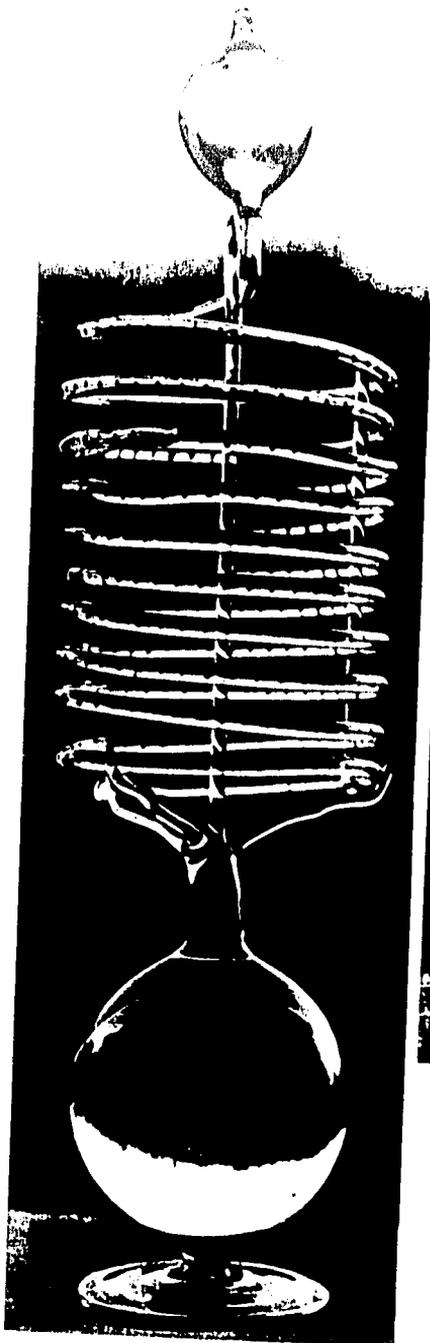


Fig. 2. Termometro en espiral y estuche con cuatro termómetros que contenían alcohol de vino y esferas de diferentes materiales (Tomado de MACORINI, E., *Monografia Strumenti Scientifici del Museo di Storia della Scienza di Firenze*, A. Mondadori Edit., 1968).

arriba del nivel de líquido del recipiente. El aparato empleado, el primer barómetro de mercurio, será estudiado ampliamente en la Academia del Cimento y más tarde se utilizará en los incipientes centros meteorológicos que ella controla. Pero la explicación que da Torricelli a su hallazgo, que la columna es sostenida por la presión de la atmósfera, y principalmente la producción de vacío en la parte superior del tubo, tuvieron efectos determinantes, pues sirvieron para cuestionar a la ciencia aristotélica respecto al vacío, a la cual se le da el golpe mortal con el reporte de B. Pascal de 1648 donde se demuestra cómo varía la presión atmosférica con la altura.

El siguiente paso lo realiza O. Von Guericke en 1654, quien diseña una bomba de aire capaz de producir el vacío en grandes toneles y que al aplicarla, en Magdeburgo, sobre dos hemisferios huecos que se unen herméticamente, logra demostrar que la presión del aire los mantiene tan fuertemente unidos, que no podrán ser separadas aunque en cada extremo se aplicara la fuerza de cuatro tiros de caballos. Pocos años después, Robert Boyle realiza sus experimentos acerca del "resorte del aire", en compañía de Robert Hooke, en donde utilizan las bombas neumáticas de Von Guericke, que ellos habían logrado perfeccionar; sus observaciones y medidas lo llevan a proponer, en 1661, la que se conoce como la ley de Boyle (aunque también se le atribuye a E. Mariotte) a través de la cual se establece que: Las presiones que soporta una cierta cantidad de gas son inversamente proporcionales a los volúmenes que ocupa si,

como plantea Mariotte, la temperatura no cambia; es decir:

$$P \propto V^{-1} \quad \text{ó} \quad P V = \text{Constante}$$

de donde se desprende que, si se cambia la presión de un gas del valor P_1 a un nuevo valor P_2 , el volumen debe de cambiar para que el producto permanezca constante:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

El trabajo de Boyle resulta fundamental para el desarrollo de la neumática, pero su importancia también reside en su forma de utilizar la nueva metodología experimental, en la obtención de la primera ley científica fuera del campo de la mecánica y en sus experimentos con la bomba de vacío, que le llevan a reconocer las influencias que éste ejerce sobre el magnetismo y la luz, la combustión, el sonido y la vida.

Paralelamente a los experimentos de Boyle, en otros lugares se buscaban ya las posibles aplicaciones prácticas del vacío. Con el avance de la minería en el siglo XVII, se había ido construyendo una gran variedad de bombas para diferentes usos que, como las utilizadas para la extinción de incendios o para la provision de agua, fueron de gran utilidad para la industria; pero el aporte revolucionario provino del campo relacionado con la solución de los problemas del drenaje de las minas, del cual habrían de surgir las

nuevas máquinas que conducirían a la humanidad a la era industrial. Desde tiempos remotos, el agua que se acumulaba en las excavaciones ocasionaba grandes dificultades y ya Aristóteles proponía, en su época, un aparato diseñado para extraerla con base en el principio del tornillo; Agrícola da cuenta que, alrededor del año 1550, en la región de Sajonia se había logrado gran desarrollo en la maquinaria construida para tal efecto. Así, en "De Re Metallica" menciona siete tipos de bombas, entre las que se cuentan: ruedas de arcaduces, bombas de bolas y cadenas movidas por molinos de rueda de andar o "...una serie de tres bombas aspirantes que elevan el agua sucesivamente..."⁴¹.

De la industria minera surgen las máquinas de vapor, que en un principio se conocen como máquinas atmosféricas, puesto que la presión de la atmósfera era lo que proporcionaba la fuerza motriz; la primera de ellas parece haber sido inventada en Inglaterra, pues aunque no se cuenta con datos claros acerca de su construcción, se sabe que en Worcester, Ramsey recibió en 1630 la patente por "... la elevación del agua con ayuda del fuego en trabajos de minería profunda..."⁴². En Francia, alrededor de 1674, C. Huygens y su ayudante Denis Papin realizan experimentos con un aparato que consta de un émbolo móvil en el interior de un cilindro provisto de válvulas; el aire contenido en el cilindro era expulsado gracias a la explosión de una pequeña carga de pólvora colocada dentro de él,

⁴¹ DERRY, T. y Williams, T., Historia de la tecnología, desde la antigüedad hasta 1750. Edición, México, Edit. Siglo XXI editores, 1986, p. 190.

⁴² SALDANA, I. J., op. cit. p. 110.

creando así un vacío parcial; posteriormente, al enfriarse el aparato, la presión atmosférica sobre la superficie del pistón lo haría descender hacia el fondo del cilindro. El proyecto, como es evidente, no tuvo un mayor avance, no solamente por la peligrosidad del uso de la pólvora, sino también porque no era posible contar con un vacío total, debido a la gran cantidad de residuos gaseosos. Algunos autores señalan también que en 1675 en Holanda, los hermanos S. y J. Musschenbroek habrían iniciado la producción de bombas neumáticas en serie, que resultaron poco manejables.

Denis Papin colabora con Boyle en Inglaterra y probablemente participa en el perfeccionamiento de la bomba de vacío. Ahí inventa en 1680 su conocida "marmita a presión" que es el antecedente de la moderna "olla express"; al regresar al Continente, modifica el aparato de Huygens en 1690 introduciendo el uso de vapor. El nuevo dispositivo, que se muestra en la *Figura 3*, está formado por un recipiente cilíndrico (A), un pistón (B) que puede desplazarse verticalmente y que cuenta con un vástago (D) que atraviesa la tapa del cilindro (C). El funcionamiento se inicia cuando se introduce un poco de agua en el cilindro y se hace descender manualmente el pistón hasta que toca la superficie del líquido; a continuación se hacía hervir el agua calentando la parte inferior del cilindro, para que el vapor generado en el proceso hiciera subir el pistón hasta una altura en que era inmovilizado por medio de una pequeña barra (E) que se introducía en un orificio del vástago. Al enfriarse el cilindro el vapor se condensaba formándose un vacío

parcial dentro del cilindro; entonces, al retirar la barra (E), se soltaba el pistón que era empujado hacia el fondo del cilindro por la presión atmosférica que ejercía una fuerza considerable.

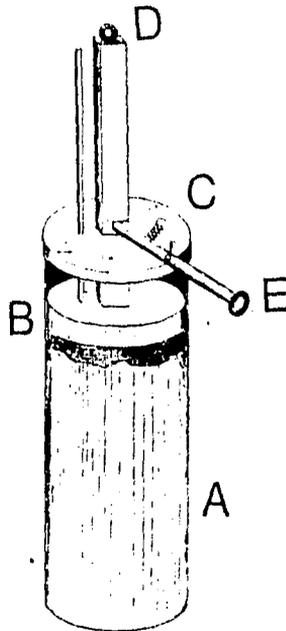


Fig. 3. Aparato de vapor de Denis Papin 1690. (Tomado de Basalla, G. La Evolución de la Tecnología, Edit. Grijalvo, 1991).

Con el aparato, Papin pone en evidencia el principio esencial de los motores atmosféricos y la posibilidad de que con cilindros y pistones adecuados se pudiera realizar trabajo útil, por lo cual sugiere algunas aplicaciones prácticas que él mismo parece ensayar en una lancha movida por vapor, que cuando se iba a demostrar como

funcionaba es destruida en un río de Alemania en 1695.

En 1698, Thomas Savery obtiene en Inglaterra una patente por la invención de una máquina aspirante para extraer agua de las minas, que tiene éxito comercial aun cuando fuera poco duradero; quizá su mayor virtud fue la demostración de que el desagüe de las minas podía resolverse, pues no producía potencia para propósitos generales, ya que no contaba con partes movibles. De acuerdo con el esquema de la *Figura 4*, la caldera P está conectada con un tubo horizontal que cuenta con una válvula A y se acopla con un recipiente cilíndrico Q que se conecta con una tubería vertical con dos válvulas más, la B en el tubo que va hacia la superficie y la C en el que baja al pozo de la mina.

Se llena de agua la caldera P y se enciende el fuego para hacerla hervir, abriendo las válvulas A y B y cerrando la C; el vapor que se produce circula por la tubería horizontal y llega al recipiente Q para expulsar el agua que contiene, ésta llega al tubo vertical, pasa por la válvula B y sube hacia la superficie para ser tirada en el exterior a través del tubo de desagüe. Cuando el cilindro se vacía totalmente se cierran las válvulas A y B, abriendo la C para permitir la conexión con el agua del pozo; a continuación se abre la llave de agua que está sobre el cilindro para bañarlo con agua fría y hacer que el vapor se condense, con ello se crea un vacío parcial en el interior, que hace posible que la presión atmosférica impulse el agua del pozo al cilindro. El

éxito del dispositivo no fue tan duradero pues consumía mucho combustible; además, el ciclo debía repetirse una y otra vez, a través de un proceso manual de alto riesgo, en el que la posibilidad de una explosión era considerable.

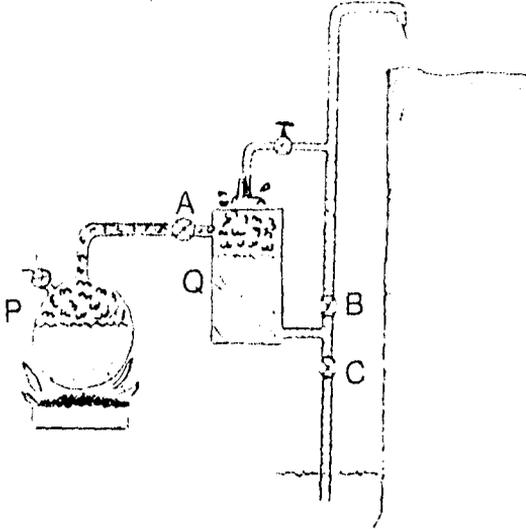


Fig. 4. Diagrama esquemático de la máquina de Savery (Tomada de Holton, G. Harvard Project Physics, Text, Holt R. and W. Inc. 1971).

En 1699, después de realizar numerosos experimentos, G. Amontons diseña una máquina que incorpora las ideas de Papin, mientras que el aparato de Savery es estudiado ampliamente y modificado con la adición de numerosas innovaciones, como las que Papin incluye en 1706, las cuales le permiten "... bombear agua mas allá de 100 pies en una bomba que tenía fugas..."⁴³; paralelamente

⁴³ FIRESTONE, Harvey S., Man on the move, the story of transportation, U. S. A., Bantam books, 1967 p. 11

Thomas Newcomen empezaba a realizar sus experimentos que le habrían de conducir a la invención de la primera máquina de vapor de importancia comercial, que sería utilizada ampliamente en el drenado de minas en Inglaterra, en Europa, así como en Norteamérica y llegaría a emplearse con ciertas modificaciones hasta principios del siglo XX. Al contrario de Papin, que tenía un doctorado en medicina y fuera profesor de matemáticas, Newcomen era un hombre de escasa instrucción formal, pero que contaba con experiencia directa con los problemas de las minas, con habilidad como constructor y que poseía conocimientos sobre mecanismos y materiales; su primer aparato, que tarda casi una década en perfeccionar, funcionaba en el Midland inglés en 1712. Este contaba con un motor atmosférico que utilizaba cilindros de mayor tamaño que los de Papin, mejoras hechas al aparato de Savery como la llave para inyección de agua al interior del cilindro, aporte de J. T. Dessaguliers, al igual que sus propias contribuciones como el control automático de apertura y cerrado de las válvulas.

Como muestra el esquema de la *Figura 5*, la máquina de Newcomen tenía un balancín como rasgo distintivo, formado por una viga que llevaba en uno de sus extremos un varilla suspendida verticalmente, para acoplarse con un pistón que va dentro de un cilindro; el otro extremo de la viga, tiene otra varilla que se une verticalmente con la bomba que aspiraría el agua de la mina y que cuenta además con un contrapeso. Al abrir la válvula A, mientras las otras dos están cerradas, del calentador sale vapor a presión atmosférica normal y

se dirige al cilindro, al tiempo que desciende el brazo del balancín que va hacia la bomba por efectos del contrapeso, y se eleva el otro extremo, haciendo subir al pistón.

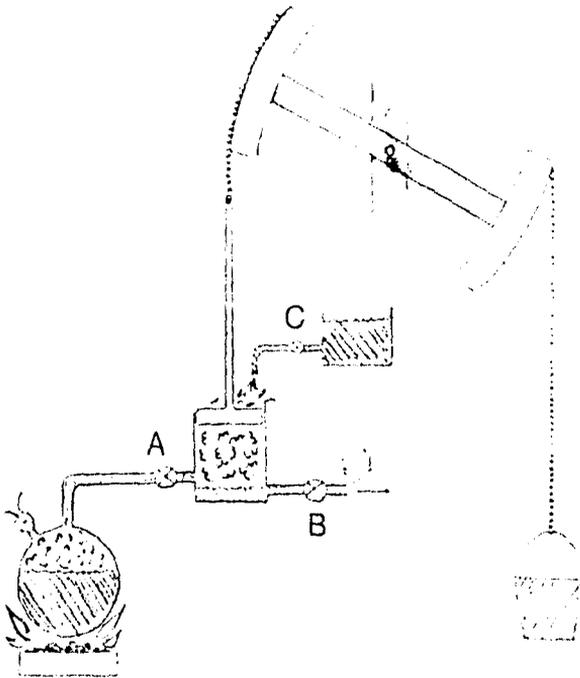


Fig. 5. Diagrama esquemático de la máquina de Newcomen (Tomada de Holton, G. Harvard Project Physics, Text, Holt R. and W. Inc. 1971.

Cuando el pistón llega a su posición más alta, se cierra la válvula A y se inyecta un chorro de agua fría en el exterior del

cilindro, para condensar el vapor y producir un vacío parcial dentro de él; esto permite que el pistón sea empujado de nuevo al fondo del cilindro, por medio de la presión atmosférica, al mismo tiempo que se elevaba el otro extremo del balancín, subiendo la varilla de la bomba que aspiraba así el agua de la mina. Mientras el pistón llegaba al fondo del cilindro, se cerraba la válvula C y se abría un poco la B para dejar escapar el vapor enfriado y condensado, finalmente, se cierra la válvula B y al abrir nuevamente la A el ciclo vuelve a empezar. Si bien, el manejo de la válvulas seguía siendo manual, la continuidad de los ciclos no causaba mayores problemas. Así, por sobre los defectos de manufactura, el balancín lograba realizar doce movimientos por minuto, con lo cual la extracción de agua en las minas dejó de ser un problema serio.

La máquina de Newcomen, más eficaz, segura y práctica que las demás, fue utilizada por años, después de que su inventor se asociara con Savery quien contaba con una patente; pero a pesar de que no tenía que colocarse en las galerías de las minas, ni requería de atención excesiva, era en realidad una máquina costosa. En cada uno de sus ciclos se debía de calentar el cilindro y el pistón, desde la temperatura del agua condensada hasta la del vapor, y si bien ello no resultaba problemático en las minas de carbón, donde se alimentaba a la máquina con combustible de baja calidad y poco valor en el mercado, en la industria minera restante, donde el carbón se transportaba desde lugares remotos,

los costos eran considerables. Debido a que generaba un movimiento alternante, sus usos era limitados y solamente podía ser utilizada como bomba o como fuelle. Sin embargo, ya que contaba con partes movibles que la hacían útil para otros propósitos, en ese siglo fue empleada para dar vueltas a una rueda, aunque su lento movimiento no fuera apropiado del todo para esos efectos. Su mercado se extendió a diferentes países del continente y un poco después llegó a las colonias de América, pero su impacto mejor lo logró en Inglaterra, donde se generalizó su uso. Ahí mismo, en 1713, la máquina fue perfeccionada por H. Potter, de quien se cuenta que logró, de manera rudimentaria, que las válvulas se abrieran y cerraran mecánicamente y su aportación dio origen a la introducción de válvulas automáticas que reducirían las dificultades de operación.

Por otra parte en el terreno teórico desde el siglo XVII surge la corriente que pretendía explicar al universo en términos mecánicos que se une con las ideas que había popularizado Gassendi para dar origen a una filosofía corpuscular con la que se trata de explicar la estructura de la materia y la naturaleza del calor. Muchos de sus seguidores llegaron a suponer una relación estrecha con alguna forma de movimiento en las partículas constituyentes y aún R. Descartes atribuye la sensación de calor a un movimiento que es comunicado a los nervios. R. Boyle, por su parte, al rechazar la teoría de los cuatro elementos que Aristóteles tomó de Empédocles, plantea que la materia está formada por partículas en movimiento y

discute el origen mecánico del calor al cual asocia con el movimiento de esas partículas; R. Hooke lo identifica como la agitación de las partes de un cuerpo, mientras que C. Huygens sostiene que el fuego debía contener partículas muy veloces para poder fundir y disolver las substancias. Con las aportaciones de los seguidores de esta escuela, el fenómeno del calor fue llevado al reino de la mecánica y puesto bajo la autoridad de sus leyes; sin embargo, aun cuando llegaron a establecer una asociación entre el calor y el movimiento de las partículas, ninguno de ellos fue capaz de convertir sus ideas en una teoría demostrable, y sus planteamientos, pese a ofrecer en conjunto una explicación completa que sonaba convincente, se quedaron en el terreno de la especulación, al no ofrecer evidencias cuantitativas concluyentes en el terreno experimental.

Con la llegada del nuevo siglo fueron apareciendo diversas teorías que se basaban en la existencia de fluidos imponderables y de efluvios, como el fluido eléctrico que será utilizado por décadas para explicar los fenómenos eléctricos; otro de esos fluidos era el flogisto, substancia a la que se hacía responsable de la combustión, descendiente del azufre de los árabes que podía aparecer en forma de llama o depositarse como hollín. De él surge la teoría, iniciada por G. E. Stahl en 1702, que alcanzara gran popularidad a la mitad del siglo, desplazando a las ideas corpusculares, pues permitió encontrar soluciones satisfactorias a los problemas relativos al calor, con explicaciones como las

siguientes: los cuerpos con mucho flogisto ardían bien, los que no se quemaban estaban desflogistizados, un cuerpo cambiaría sus propiedades al arder pues pierde flogisto y por esto mismo no puede ser quemado dos veces, etc. Así se fue construyendo una teoría que enfrentó críticas y objeciones, como el descubrimiento de que algunos materiales aumentaban de peso al perder flogisto, pero los argumentos usados en su defensa lograron compensar los juicios adversos; con ella se logra manejar los problemas de la época, de tal forma que, a medida que avanza el siglo se va consolidando hasta convertirse en el sistema intelectual en que se encuadran los científicos de la época, para pensar en forma coherente acerca de los problemas del calor y de la química.

Mientras adquiere importancia práctica el estudio de los efectos de la temperatura sobre las cadenas de agrimensura o la longitud de los péndulos y la rigidez de los resortes en los relojes, se inicia la transición de los termoscopios cualitativos a los termómetros cuantitativos con la introducción de puntos confiables y reproducibles para hacer posible la definición de escalas; así, se proponen los más variados y poco confiables puntos fijos que hacen surgir escalas por todas partes, hasta que, con la adopción de puntos como el de fusión de la mantequilla y de la congelación del aceite, se fue introduciendo el orden; el panorama se aclara con la adopción de los puntos de congelación y de ebullición del agua, pues los dos son claros y reproducibles a presiones particulares. Los problemas llegan a su fin cuando son

aceptados como puntos fijos en forma general, aunque todavía a principios del siglo XVIII existían más de 35 escalas en uso, entre las cuales destacan: la de D. Fahrenheit que desarrolla entre 1714 y 1717, con un termómetro de mercurio y una escala empírica de 180 partes iguales, la de R.A.F. Réamur propuesta en 1730 con un termómetro de alcohol que contenía 80 divisiones y la de A. Celsius construida entre 1710 y 1742 que se dividía en 100 partes iguales. El avance de la termometría continúa a lo largo del siglo con el estudio de diferentes sustancias termométricas para elegir la mejor, la cual resulta ser el "gas perfecto o ideal", que si bien no existe en la realidad es adoptado, a principios del siglo XIX, en los termómetros de precisión, ya que "...si la densidad es suficientemente baja, todos los gases reales tienen un comportamiento similar al de esta abstracción del gas ideal..."⁸⁴

Durante las primeras décadas del siglo XVIII, con el desarrollo de termómetros confiables, fue posible realizar experimentos cuantitativos más precisos y cuando se introduce en ellos el uso del calorímetro, se abren espacios más amplios para la investigación; entre los primeros experimentos, los más importantes se refieren a la obtención de la temperatura final de las mezclas de diferentes cantidades de agua que inicialmente se encontraban a temperaturas distintas. Según hace constar H. Boerhaave⁸⁵, Fahrenheit estudia mezclas calorimétricas de agua y mercurio,

⁸⁴ HALLIDAY, D. y Resnick, R., *Fundamentos de Física*, 5a. edición, México, C. E. C. S. A., 1964, p. 417

⁸⁵ cfr. BOERHAAVE, H., *Elementa Chemiae*, cit. Por Tissa, Lásio, *Generalised Thermodynamics*, U.S.A., MIT Press, 1996, pp. 9 y 10.

ajustando las cantidades que utiliza para lograr el mismo resultado que se obtenía para la mezcla de cantidades iguales de agua, es decir, que la temperatura final de la mezcla coincidiera con el promedio de las temperaturas iniciales de las sustancias. Los resultados que se obtienen no son totalmente precisos, pero son aceptados como la mejor explicación teórica para los hechos experimentales y serán utilizados como prueba de que la cantidad de calor que se intercambia y la temperatura final de una mezcla, dependen de los volúmenes de los cuerpos que intervienen en el proceso; es decir:

$$\Delta Q = v \Delta t \quad \text{y} \quad t = \frac{V_1 t_1 + V_2 t_2}{V_1 + V_2} \quad (1)$$

esa idea será aceptada en forma general durante las décadas siguientes y continuará vigente hasta la mitad del siglo.

En esa época parece haber claridad respecto a que, para una mezcla de cantidades iguales de agua fría y caliente, los cambios de temperatura entre una y otra debían ser iguales y opuestos en el equilibrio, es decir:

$$\Delta t_1 = -\Delta t_2$$

Al mezclar diferentes cantidades de agua, la menor de éstas sufre un cambio de temperatura proporcionalmente mayor, mientras que en la mayor de ellas el cambio sería menor, efecto que era

justificado por medio de la diferencia entre volúmenes de agua.

Alrededor de 1750 se desarrolla una orientación diferente, en donde se propone utilizar a la masa en lugar del volumen, planteando que los cambios de temperatura son inversamente proporcionales a las masas involucradas y tales que los productos $m \Delta t$ permanecen iguales en magnitud, de manera que:

$$m_1 \Delta t_1 = - m_2 \Delta t_2 \quad m_1 \neq m_2$$

Estos productos son fijos y reproducibles para cualquier situación y son interpretados como aquello que se intercambia entre las masas de agua, a saber una cantidad de calor ΔQ que adopta la forma:

$$\Delta Q = m \Delta t, \quad (2)$$

ésta, al ser utilizada para la mezcla, se convierte en:

$$\Delta Q_1 = - \Delta Q_2 \quad \text{ó} \quad \Delta Q_1 + \Delta Q_2 = 0 \quad (A)$$

para representar la conservación del calor o la relación entre calor ganado y calor perdido, en donde:

$$\begin{aligned} \Delta Q_1 &= m_1 \Delta t_1 = m_1 (t - t_1) \quad \text{y} \\ \Delta Q_2 &= m_2 \Delta t_2 = m_2 (t - t_2) \end{aligned}$$

que al ser usados en la ecuación (A), conducen a :

$$m_1 (t - t_1) = - m_2 (t - t_2)$$

de donde se obtiene que la temperatura final de la mezcla sería:

$$t = \frac{t_1 m_1 + t_2 m_2}{m_1 + m_2},$$

que para el caso particular en que $m_1 = m_2$, daría el valor:

$$t = \frac{t_1 + t_2}{2},$$

el cual concuerda con los resultados experimentales obtenidos.

En la práctica, se podía reconocer que las definiciones (1) y (2):

$$\Delta Q = v \Delta t \quad \text{y} \quad \Delta Q = m \Delta t \quad (3)$$

eran igualmente útiles para la mezcla de una sola sustancia, pero que ninguna proporcionaba resultados completamente satisfactorios cuando se combinaban sustancias distintas. Esas discrepancias habrían de subsistir hasta que Black un poco más tarde logrará introducir nuevos conceptos.

Entre 1759 y 1762, Joseph Black, considerado por algunos como el verdadero fundador de la termodinámica, analiza los trabajos de Fahrenheit y realiza nuevos experimentos utilizando el método de las mezclas para elaborar valiosas contribuciones, entre las cuales se cuenta su clara distinción entre la "intensidad de calor", es decir, la temperatura y la "cantidad de calor" o el calórico, la sustancia que fluye de los cuerpos de alta temperatura hacia los fríos y deja de fluir en el equilibrio. Fue el primero en plantear

ideas precisas acerca del equilibrio termico, del cual señala que "... todos los cuerpos que se comunican libremente entre sí y que no están expuestos a desigualdad alguna debida a acción externa, adquieren las mismas temperaturas..."⁸⁸, que parece ser una referencia a la ley cero de la termodinámica. Sus trabajos le permiten interpretar las diferencias entre la teoría y los resultados experimentales, como un signo de la influencia que ejercen las propiedades específicas de las substancias particulares sobre las relaciones mostradas en (3). Black construye una nueva hipótesis identificando que el calor que se absorbe o se desprende es proporcional al producto $m \Delta t$ e introducen una constante de proporcionalidad "c", con lo que la relación toma la forma:

$$\Delta Q = m c \Delta t$$

La constante c, que es característica de cada substancia, es conocida en un principio como la "facultad de recibir calor" y posteriormente será identificada como calor específico o capacidad calorífica específica.

Igualmente propone otra constante C, la capacidad calorífica, cuyo valor es:

$$C = m c$$

con la cual su relación puede adoptar la forma equivalente

$$\Delta Q = c \Delta t$$

y en ella, la constante C permite caracterizar el comportamiento

⁸⁸ ARONS, A. op. cit. p. 433.

de los cuerpos que reciben o pierden una cantidad de calor ΔQ y cuya temperatura varía en Δt .

También introduce el concepto de calor latente, al comprobar la existencia de fenómenos en los cuales el flujo de calor, positivo o negativo, no produce alteraciones en la temperatura, los cuales aparecen en la región del cambio de fase. Black estudia la fusión del hielo y la nieve, para concluir que cuando alguna de ellas se derrite absorbe gran cantidad de calor, que no produce incremento de temperatura en ellas, sino que es utilizada para la fusión del material. Al extender su análisis a la ebullición de los líquidos, encuentra igualmente que el calor es absorbido por el agua, para convertirse en vapor y que, mientras ello sucede, su temperatura no cambia; con ello demuestra que había descubierto una propiedad reproducible, cuyo efecto "... no consiste en calentar los cuerpos circundantes... (pues) ... En ninguno de los casos nos percatamos de la presencia del calor... el calor está oculto o latente..."⁸⁷, pero además proporciona una explicación convincente del porqué, el punto de fusión del hielo y el de evaporación del agua, son puntos correctos para la calibración de los termómetros, pues en ellos la temperatura se mantiene siempre constante. Las dimensiones del concepto se empezaron a vislumbrar con la medición de los calores latentes para diferentes sustancias, pero su verdadero valor iba a ser descubierto por James Watt en su máquina de vapor.

⁸⁷ BLACK, Joseph, El calor latente, clave de la máquina de vapor, cit. por Houlton, P. R. y Schiffer, J. Autobiografía de la ciencia, 2a. edición, México, FCE, 1968 p. 208.

5.3 EL CONCEPTO DE EFICIENCIA Y EL DESARROLLO DE LA TERMODINAMICA.

Durante la segunda mitad del siglo XVIII, el poderoso imperio inglés continúa su ascenso; fortalecido por la unión con Escocia, empieza a extender sus dominios con su ocupación gradual de la India en la guerra de los siete años. Al término de ésta, recibe casi todas las posesiones coloniales francesas: El Canadá, una región de la Luisiana, la mayor parte de las Antillas y el Senegal. Para ese entonces Londres, su capital, era ya la mayor ciudad de Occidente y sus puertos prosperaban cimentados en el tráfico de esclavos y en los productos de las colonias, mientras sus centros comerciales crecían con rapidez. El país contaba con una buena agricultura, aunque su campesinado no se arraigaba a la tierra, en parte porque era arrendada por los aparceros que daban trabajo a miles de jornaleros temporales, pero también porque la industria y la manufactura, mayoritariamente rurales, los iban convirtiendo de pequeños campesinos en obreros asalariados. La fortaleza del imperio se cimentaba en su flota, formada por la armada real que era su arma más poderosa y por su marina mercante, cuyo tamaño rebasaba ampliamente a la de Francia, su principal competidor; pero también se basaba en el comercio, tanto el interior con su enorme mercado capitalino alimentado por una nación de productores, como el floreciente comercio ultramarino, ligados ambos con un sistema político estable y el Parlamento controlado por la aristocracia

terrateniente, una clase postrevolucionaria de honda tradición puritana.

Debido a la creciente demanda de alimentos y combustibles y a los altos costos de transportación, se fueron mejorando las vías de comunicación y se abrieron nuevos canales para unir a las minas con las ciudades y, un poco después, a éstas con las regiones textiles; la red de caminos también fue transformada, ocasionando la evolución del transporte, permitiendo un tráfico más variado y la proliferación de caminos de paga. Durante esa época se incrementó considerablemente la cantidad de patentes otorgadas y surgieron numerosas innovaciones. Ellas son de gran utilidad para la industria textil que se transforma rápidamente mediante el uso de inventos esenciales para la producción, como la lanzadera volante y en especial las máquinas de hilar: la "Jenny" de J. Hargreaves, la "Water-frame", máquina que utiliza la fuerza motriz del agua y es patentada por R. Arkwright en 1768, y la "mule", híbrido de las dos anteriores, inventada por Crompton en 1780. Gracias a ellas se desarrolló la industria del algodón, que sería fundamental para la notable expansión de las exportaciones inglesas; además, ya que las máquinas requerían de grandes cantidades de energía, con ellas se inicia la producción fabril y el cambio industrial empieza a tomar forma con la gran fábrica establecida por Arkwright en Cromford en 1771, y se consolida con la primera de las fábricas movida totalmente por energía hidráulica que se edifica en Lancashire en 1777.

La primera etapa de la Revolución Industrial puede considerarse un tanto primitiva en cuestiones técnicas y científicas; en ella la rueda hidráulica conserva su gran importancia y con la introducción del hierro se transforma en una fuente energética más eficiente, que daría paso a una tecnología hidráulica más avanzada. La máquina de vapor, con su movimiento alternante, no podía competir con el suave y constante que realiza la rueda. Por ello sus aplicaciones industriales, alrededor de 1750, eran muy limitadas y uno de sus usos más comunes era el de bombear agua para proporcionar un caudal constante a una rueda hidráulica, aunque el procedimiento desperdiciaba una gran cantidad de energía. A pesar de ello, la máquina de Newcomen había extendido su uso y era empleada como material de estudio en las universidades; en la de Glasgow, donde Black enseñaba acerca del calor latente y la teoría de la ebullición, J. Anderson utilizaba, en su clase de filosofía de la naturaleza, un modelo de la máquina que es puesta en manos de James Watt para su reparación en 1764. Watt, quien construía y reparaba instrumentos científicos para la Universidad, se dedica al estudio de la máquina y realiza un conjunto de experimentos acerca del comportamiento del vapor que discute con Black, con quien a partir de entonces establece una relación estrecha.

Un problema de eficiencia, el bajo rendimiento del modelo, le proporciona el punto de partida para sus investigaciones y el contacto intelectual con Black, por otra parte, le permite abordar

el problema desde una perspectiva más racional y científica. Deduce que el movimiento de la máquina depende de que el vapor se condense de la forma más rápida y completa posible; además, supone que como el cilindro requiere ser enfriado continuamente, cada vez que entra vapor dentro de él la mayor parte se condensa al entrar en contacto con sus paredes, con lo que se impide el desarrollo completo de la potencialidad del vapor. De los experimentos que realiza concluye que, a la presión de una atmósfera, un volumen de agua produciría 1800 volúmenes de vapor; aunque posteriormente se demostraría que no era totalmente exacta, la proporción es aceptada rápidamente y se generaliza en la regla, usada comúnmente en la ingeniería, de que una pulgada cúbica de agua se convierte en un pie cúbico de vapor. De las medidas que realiza concluye que el modelo de Newcomen consumía no menos de ocho cilindros de vapor en cada revolución, y que su poca eficiencia se debía a que siete octavos del vapor entrante eran empleados exclusivamente para calentar las paredes del cilindro, mientras que sólo el octavo restante servía para hacer funcionar a la máquina.

Para corregir los defectos del aparato de Newcomen, Watt propone conservar el cilindro a la misma temperatura que el vapor entrante y experimenta con diferentes dispositivos y materiales, hasta que formula la idea de aislar el cilindro para condensar el vapor en una cámara independiente. Mientras tanto J. Smeaton efectuaba, en 1767, una investigación acerca del rendimiento de las máquinas de vapor, semejante a la que había realizado anteriormente

para las ruedas hidráulicas con la que había conseguido la medalla Copley, el más alto galardón de la Royal Society. Un año después Watt termina el primer modelo de prueba de la máquina modificada y en 1769 registra la patente del "... nuevo método para reducir el consumo del vapor y combustible en las máquinas de fuego..."¹⁴.

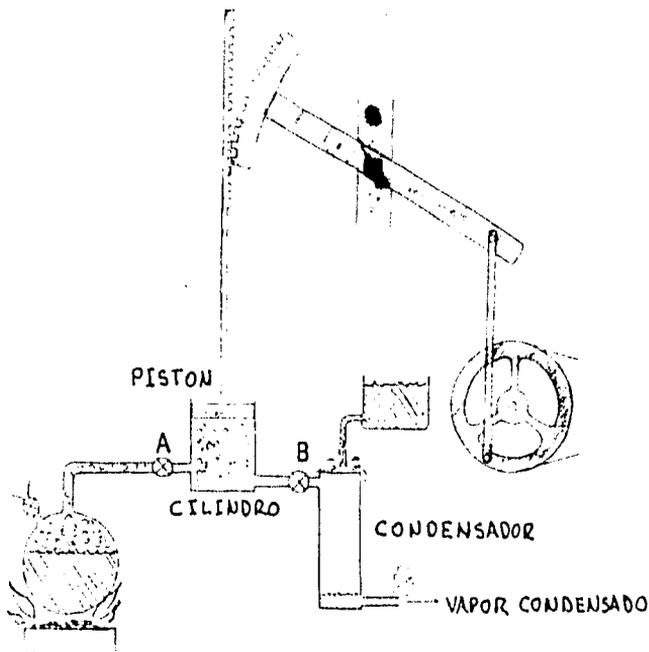


Fig. 6. Diagrama esquemático de la máquina de Watt (Tomada de Holton, G. Harvard Project Physics, Text, Holton R. and W. Inc 1971.

¹⁴ DERRY, T. K. y Williams, T. I., op. cit. Volumen 2, p. 404.

La *Figura 6* presenta un diagrama esquemático de su forma más simple, en la que se muestra que al abrir la válvula A cuando la B está cerrada, el vapor entra al cilindro y empuja hacia arriba al pistón, haciendo descender el extremo útil de la viga; casi al llegar el pistón a la parte superior del cilindro, se cierra la válvula A y se abre la B, permitiendo que el vapor circule hacia el condensador que se mantiene frío gracias al agua que cae sobre él. Al mismo tiempo, en el cilindro se produce un vacío parcial para que el pistón descienda y el otro extremo de la viga desarrolle algún trabajo, mientras escapa el vapor condensado; finalmente, cuando el pistón llega al fondo del cilindro, se cierra la válvula B y se abre la A para que el ciclo vuelva a empezar.

Además del condensador independiente, que es considerado la mayor novedad de la máquina, también se incluyen en ella otras mejoras importantes como el incremento de la presión del vapor arriba de la atmosférica, con lo que cada golpe de émbolo se vuelve más poderoso; además, el cilindro era mantenido a temperatura elevada gracias a un baño de vapor y estaba dotada de una válvula de equilibrio que servía para igualar la presión en ambos lados del pistón, pero morfológicamente la máquina seguía necesitando elementos como el enorme balancín o las cadenas que caracterizaban al invento de Newcomen. La producción del aparato fue difícil en los principios, pues no existían herramientas ni mano de obra especializada para ejecutar los diseños con precisión, como el barrenado de los cilindros por ejemplo, además de no contar con

amplio soporte financiero. Sin embargo, al asociarse con el gran industrial M. Boulton, Watt tiene acceso a las fábricas de Soho y construye dos máquinas que se instalan en 1776, una para bombear agua en una mina de carbón y la otra para inyectar aire en uno de los altos hornos de J. Wilkinson, quien fabricará a partir de entonces los cilindros necesarios. La patente de Watt se amplía hasta finales de siglo y la sociedad reemplaza las antiguas máquinas de la región minera de Cornwall entre 1776 y 1781, recibiendo como pago la tercera parte de la cantidad ahorrada en combustible, negocio altamente productivo, pues la máquina tenía una gran eficiencia y ahorraba alrededor del 75 por ciento de él.

Los nuevos inventos de Watt afinan el funcionamiento de la máquina y en 1781 patenta uno de los principales, el "paralelogramo articulado, especie de palanca que cuenta con un codo movable en uno de sus extremos, el cual se acopla a la parte inferior de la barra que baja del balancín, mientras su otro extremo se ajusta para servir de manivela a una rueda que es obligada a girar por la acción de la barra que sube y baja; con ello logra transformar el movimiento lineal de los pistones en movimiento rotatorio y gracias a esto, la máquina de vapor puede ser llevado al campo de la industria en general. Poco después introduce el "engranaje planetario", sistema formado por dos ruedas dentadas que se acoplan para substituir al "paralelogramo" con el cual se consigue un movimiento continuo y uniforme que podría ser aplicado a casi todas las necesidades industriales. La fabricación de cilindros más

largos y precisos le permite construir y patentar, un año después, el motor de doble acción, máquina donde el vapor se inyecta alternativamente en un lado del pistón, mientras se descargaba por el otro y con ello se consigue duplicar la capacidad de la máquina.

En ese mismo año introduce el uso de la fuerza expansiva del vapor, sus estudios acerca de la eficiencia le hacen reconocer que, el hecho de que siempre que se abría la válvula de descarga el vapor escapaba del cilindro con gran fuerza y violencia, era muestra de que el vapor aún tenía potencia que podría ser utilizada para mover el pistón. Watt modifica su máquina para que únicamente admitiera vapor durante una parte de la carrera del émbolo, después, con las válvulas cerradas el vapor habría de expandirse gradualmente, disminuyendo su presión por el resto de la carrera; cuando la válvula de descarga se abría, la presión del vapor era muy cercana a la del condensador. De esa manera, logró utilizar prácticamente toda la potencia del vapor, disminuyendo la cantidad utilizada e incrementando la economía de la máquina. En 1788 agrega un regulador que controla automáticamente la entrada del vapor y mantiene constante el funcionamiento del aparato. Seis años después inventa el "indicador", medidor de vapor en miniatura, aplicable a cualquier máquina de cilindro y pistón, que proporciona una gráfica de las variaciones de presión en el cilindro, el cual habrá de contribuir poderosamente a la investigación científica en torno a la máquina de vapor, como antecedente de los diagramas de ciclos.

Con las modificaciones que introduce Watt, su máquina es aproximadamente ocho veces más económica que la de Newcomen, tenía además mayor capacidad y se podía utilizar casi para todos los propósitos. Al igual que Smeaton, utiliza el peso por la altura como una medida básica del rendimiento mecánico y lo expresa en diferentes unidades como el pie-libra e introduce una unidad nueva, el horse power o caballo de vapor. Su trabajo no fue solamente el de un mecánico, pues aunque tenía habilidades excepcionales para ello, él era más bien un ingeniero especialista en el estudio del vapor que analiza minuciosamente sus propiedades termodinámicas y que, es uno de los primeros en aplicar la ciencia a la industria, pues hace uso de la experimentación sistemática para estudiar los procesos físicos que se desarrollan en el interior de la maquinaria. Si bien sus máquinas no tuvieron un éxito inmediato, ellas "...fueron realmente las fundadoras de la tecnología industrial..."⁸¹ y hacia finales del siglo XVIII había construido e instalado, en sociedad con Boulton, cerca de 500 máquinas, ejerciendo un completo monopolio sobre ese mercado industrial; la firma se volvió conservadora y se opuso a las mejoras que no fueran producidas por ellos, tratando inclusive de conseguir una ley para prohibir el uso de presiones altas, puesto que ellos no las utilizaban.

Los inventos de Watt contribuyeron poderosamente al desarrollo

⁸¹ HOBBSBAWM, Eric J., *Industria e Imperio*, 1a. edición, España, Editorial Ariel S. A., 1988, p. 16

de la industria, ya que abrieron las puertas para una energía barata, potente, regular e independiente de la fuerza del viento o del agua, que habría de permitir la instalación de fábricas en las ciudades. Una nueva revolución se introduce en la industria textil con la instalación, en 1785, de una máquina de vapor en una fábrica de hilados y para la última década del siglo el vapor es usado para mover las hiladoras intermitentes, aunque las máquinas hidráulicas seguirían produciendo los hilados finos. La Revolución Industrial creó mayores excedentes para la venta y se hizo necesaria la renovación de los medios de transporte; el desplazamiento por tierra no se resolvió de inmediato, pues apenas N. J. Cugnot experimentaba con cierto éxito con una carreta de tres ruedas impulsada por un motor a vapor en 1770, mientras que el surgimiento de la locomoción enfrentaba problemas, como el que tuvieron W. Simington y W. Murdoch, que fueron bloqueados por las patentes de Watt en 1784, en sus trabajos con locomotoras modelo. Las embarcaciones movidas a vapor empiezan a aparecer en los ríos, como la francesa de 1775 impulsada por una máquina de baja potencia y el "Pyroscophe" del Marqués d'Abbans que navega el río Saona en 1783; cuatro años después en Estados Unidos J. Fitch utilizaba un bote de vapor para transportar carga y pasajeros sin mucho éxito y J. Ramsey experimentaba con el impulso de una bomba de vapor, en tanto que en Inglaterra el Ministerio de Guerra se interesaba por los trabajos de W. Symington.

El desarrollo de la máquina de vapor, que ha extendido su

influencia al Continente, encuentra un terreno fértil en Francia, donde la ciencia, que en los inicios de la Revolución había sido cuestionada duramente, lograba la aceptación total de la sociedad gracias a su clara vinculación con el espíritu escéptico, práctico y científico de la burguesía post-revolucionaria. La República incorpora a sus planes el trabajo científico y la investigación, y la ciencia se va haciendo indispensable para la industria y para la guerra; en 1793 se dan muestras claras de las nuevas relaciones cuando el Comité de Salud Pública reúne a científicos de la talla de Laplace, Coulomb y Lagrange en la "Comisión de Pesas y Medidas" que se encargará de la normalización de las unidades. Las viejas instituciones monárquicas son desplazadas y la Convención decreta la desaparición de la Real Academia de Ciencias y en su lugar se crea el Instituto Nacional de Francia que cuenta con tres áreas: Ciencias Físicas y Matemáticas, Ciencias Morales y Políticas, así como Literatura y Bellas Artes. La participación de los científicos se considera indispensable para la vida de la comunidad y para el avance social; varios de los hombres de ciencia franceses que provienen de la Ilustración y son también revolucionarios, llegarán a convertirse en hombres de poder y habrán de ocupar cargos de gran importancia en la política.

Un personaje de este tipo es Lazare Carnot, el "arquitecto de la victoria", quien fue miembro del Comité de Salud Pública junto con Robespierre, formó parte del Directorio, fue Ministro de Guerra en el Consulado y del Interior durante los Cien Días. Egresado de la

Escuela Real de Ingenieros y es reconocido por sus escritos sobre estrategia militar, geometría proyectiva y sobre los fundamentos del Cálculo; fue miembro del Instituto Nacional y comisionado, en la primera década del siglo XIX, para examinar los méritos de los inventos mecánicos y los escritos matemáticos que llegaban al Instituto. Su contribución más importante la realiza en el terreno de la física del trabajo y la energía, que estudia en el "Ensayo sobre las máquinas en general" y es publicado en 1782; ahí propone condiciones para obtener el rendimiento máximo en una rueda hidráulica, según las cuales el agente motor debía entrar en el aparato sin choques ni golpeteos y salir de él con velocidad nula; de esa manera una máquina que tuviera rendimiento perfecto, proporcionaría la fuerza necesaria para bombear agua en sentido inverso a la caída y podría llevarla hasta su fuente de origen. El documento contenía una de las primeras referencias a lo que después sería la concepción dinámica del trabajo, que él llama momento de actividad, la cual parece provenir de la tradición ingenieril y cuya adopción formal es atribuida tanto a Coriolis como a Poncelet, de él plantea Carnot que "es la cantidad que debe uno de economizar... para extraer de un agente dado todo el efecto que este puede ejercer."⁹⁰ En 1803 publica los "Principios fundamentales del equilibrio y del movimiento", revisión ampliada de su trabajo, que será utilizado en los estudios que años más tarde realizarán su hijo Sadi y sus compañeros de la Escuela Politécnica.

⁹⁰ KUHLM, T. B., *La tensión esencial. Estudios Selectos sobre la tradición y el cambio en el ámbito de la ciencia.* México, F. C. E., 1962, p. 111.

De Francia, donde el nacimiento de la República coincidirá con el despertar de la Revolución Industrial, surgen también las ideas de Lavoisier que tendrán gran aceptación durante las siguientes décadas. Antoine L. Lavoisier, la figura más grande de la química en el siglo XVIII, contribuye a liberarla de los restos de aristotelismo y alquimia que aún quedaban en ella y es el fundador de la química moderna; se opone abiertamente a la teoría del flogisto y demuestra que los planteamientos de Macquer, quien en 1778 sostiene que el flogisto es la materia real del calor y de la luz, conducen a contradicciones. Su ataque definitivo lo inicia en 1783 y da origen a la nueva controversia que habría de enfrentar a los científicos franceses con los ingleses. Lavoisier concibe al calor como un fluido elástico e imponderable al que denomina calórico, una sustancia material que no podía ser creada ni destruida y que tenía la facultad de ser "sensible" al difundirse y rodear a las partículas formando una "atmósfera" a su alrededor o ser "latente" para combinarse por atracción con las partículas de otras sustancias.

El modelo, además de dar origen a interesantes relaciones cuantitativas, proporcionó explicaciones satisfactorias para los fenómenos relativos al calor estudiados en ese tiempo, como las variaciones de la temperatura, la dilatación, los incrementos de presión en los gases, la fricción, la elevación de temperatura al comprimir rápidamente un gas, etc. La teoría del calórico se impone en Francia, después de vencer la oposición de los químicos

tradicionalistas; pero en Inglaterra, donde Lavoisier era conocido por haber rivalizado con los estudios de Priestley sobre la química de los gases, habría de enfrentar una fuerte resistencia encabezada por éste último, quien todavía en 1800 sigue manifestando su oposición a Lavoisier en su "...Doctrina del Flogiston Establecida y la Refutación de la Composición del Agua..."⁹¹. Fortalecida en la controversia y apoyada por científicos como Black, quien reconoce en ella la esencia del calor que utilizaba en sus trabajos, la teoría del calórico logrará destruir finalmente a la del flogisto y será aceptada ampliamente para perdurar hasta bien entrado el siglo XIX; sin embargo, su explicación acerca de la gran cantidad de calor liberado en la combustión, la discusión acerca del peso del calórico como sustancia material y en especial el origen del calor generado por la fricción, eran puntos débiles que habría de atacar el pequeño grupo de investigadores que se oponían a la teoría.

Uno de ellos fue Benjamín Thompson Conde de Rumford, quien inventó, entre otras cosas, el sistema de calefacción a vapor, la chimenea moderna o el anafre; también realiza experimentos alrededor del calórico, como los que le permiten concluir que ni el calentamiento ni el enfriamiento de las sustancias tenían efecto sobre el peso de ellas, además de ser reconocido como el primero que se interesa por la convección como forma de transmisión del calor. En 1798 reporta a la Royal Society que mientras supervisaba

⁹¹ BUTTERFIELD, H., op. cit. p. 219.

la perforación de cañones en Munich, sorprendido por las altas temperaturas que alcanzaba la pieza de metal y más que ella, las virutas del taladrado, realiza diferentes estudios para tratar de explicar lo observado. El fenómeno no era desconocido entre los seguidores del calórico, quienes planteaban que la pieza de metal tenía mayor calor específico que la pedacería desechada y que el sobrante se liberaba como el calórico que calentaba al cilindro; pero el argumento es refutado por Rumford al demostrar que, tanto el metal como los residuos, tienen el mismo calor específico. A continuación realiza sus conocidos experimentos para identificar cuanto calor se podía generar en las operaciones; en ellos utiliza un taladro como para producir calor por rozamiento, midiendo los incrementos de temperatura, tanto directamente sobre el metal como posteriormente en el agua que recubre al dispositivo, la cual llega hasta la ebullición.

De los resultados obtenidos, Rumford concluye que el movimiento es la causa del calor que detecta en sus experimentos y, en franca oposición a la teoría del calórico, sostiene que la fuente del calor generado por la fricción es inagotable, por lo que el calórico no se conserva ni puede tener una naturaleza material. Aunque parecía estar convencido de la relación que se establece entre el calor generado y el trabajo que realizan los animales que movían el torno, no hay ninguna evidencia de que hubiera realizado medidas cuantitativas en ese sentido. Sus planteamientos no fueron concluyentes y quizá su rechazo al principio de conservación del

calórico, sin ofrecer una alternativa a cambio, o su carencia de una teoría coherente que respaldara sus argumentos pudieran explicar la escasa influencia que logró ejercer sobre sus contemporáneos. Por otro lado, a Rumford se le reconoce por haber fundado en 1799 la Royal Institution, donde se pretendía estudiar la ciencia y la tecnología, a semejanza de lo que se hacía en el Conservatorio de Artes y Oficios francés, fundado en 1794, instituto de mecánica que tenía la reputación de ser la "Sorbona industrial". Un menor impacto tuvo H. Davy, quien realiza nuevas experiencias en apoyo a las ideas de Rumford, las cuales no lograron mayor aceptación. Así, apuntalada por sus seguidores la teoría del calórico consiguió superar la crítica para seguirse usando un tiempo considerable.

Al iniciar el siglo XIX, Watt se retira de la industria y al concluir los derechos que le otorgaba la patente sobre su condensador termina el monopolio ejercido por él y por Boulton. Esto deja el campo abierto para la investigación, que ya no necesitará encubrirse, especialmente en el terreno del uso del vapor a alta presión y la expansión compuesta. La evolución de la máquina de vapor se vuelve posible gracias al avance logrado en la manufactura de sus partes, a su mejor acabado y al cuidadoso ajuste entre los componentes, con lo cual se hace posible responder mejor a las especificaciones de los inventores. Los primeros modelos de máquinas de alta presión que funcionaron con éxito fueron desarrollados por R. Trevithick en 1797, quien aunque entró en

conflictos con Watt a causa de las patentes, continuó con sus investigaciones y logró perfeccionar sus inventos. Alrededor de 1800 había construido una máquina de alta presión para extraer minerales en Cornualles. Un año después, en colaboración con A. Vivian, construye y pone en práctica su primer carruaje movido a vapor que transportaba pasajeros y podía alcanzar una velocidad cercana a los 15 km/hora. En 1802 construye una máquina de bombeo que pese a su pequeño tamaño (su cilindro tenía alrededor de 90 cms. de altura) tenía una gran potencia, pues lograba una presión diez veces mayor que la atmosférica; sus máquinas, que se seguirían usando en el bombeo hasta finales de siglo, pronto extendieron su campo de acción a casi todas las ramas de la industria.

La misma línea que sigue Trevithick es desarrollada en forma independiente en los Estados Unidos, como parte del movimiento que los lleva a "... producir máquinas ahorradoras de trabajo (humano) para la agricultura, así como para la industria..."²² durante la primera mitad del siglo XIX; en ese terreno se incluyen los dispositivos mecánicos movidos por agua de O. Evans, su draga de vapor y en especial la pequeña máquina de alta presión con la que, en 1804, cortaba mármol y pulverizaba yeso. La evolución de la máquina de vapor también tiene que ver con el uso de la máquina de expansión múltiple o compuesta inventada en 1781 por J. C. Hornblower, cuya denominación alude al hecho de que a la máquina de Watt se le agrega un cilindro de alta presión, la cual, no pudo

²² BASALIA, G., op. cit. p. 143.

desarrollarse en su primer momento a causa de las restricciones impuestas por las patentes de Watt. En ellas el vapor se dilata parcialmente en un cilindro de alta presión y pasa a otro que tiene una capacidad cuatro veces mayor que el primero donde se expande completamente; ella renace en 1804, cuando se podía usar esa presión sin problemas, y las patentes de Watt habían expirado, gracias al trabajo de A. Wolf; su gran ahorro de combustible, que era del orden del 50%, alienta su uso en el continente. Durante el primer tercio del siglo la máquina de Trevithick se empleaba ampliamente en las minas y en el bombeo de agua en general; además se usaban las de mesa inventadas por Maudslay en 1807 y las de balancín libre en los pequeños establecimientos, pero la máquina de Watt seguía siendo la más utilizada en las grandes fábricas y molinos, hasta que es transformada por Mc Naught en 1845 en una máquina de expansión múltiple que habrá de adueñarse del mercado.

En las primeras décadas del siglo se incrementa el uso de la máquina de vapor y se aplica con amplitud al transporte; Trevithick construye la primera locomotora de vapor que se desplaza sobre rieles y muestra su eficacia como transporte de pasajeros y carga pesada en 1804. Posteriormente diseña otra locomotora que es usada como diversión y por 1811 fabrica una más la "Cornish", también se interesa en otros campos de la tecnología y adapta su motor de alta presión a un molino y a una barca que utilizaba una rueda con remos. Las máquinas se empiezan a utilizar en las minas para acarrear el mineral y G. Stephenson se dedica a perfeccionarlas; en

1814 construye la "Blutcher", su primera locomotora y posteriormente diseña otras en las que incorpora la chimenea inventada por Trevithick, que había probado con éxito en su primer carruaje movido a vapor, esto permitía el escape de cierta cantidad de vapor, reforzaba considerablemente el tiro de la caldera y al incrementar la corriente de aire sobre la caja de fuego, conseguía aumentar la eficacia de las locomotoras que serían ahora capaces de desarrollar velocidades más altas. En 1825 su "Locomotion No. 1" inaugura el transporte formal de pasajeros y cuatro años después presenta la "Rocket", en cuyo éxito se cimienta la apertura de una nueva era en los transportes. La navegación a vapor empieza a tomar forma cuando R. Fulton prueba su barco a paletas movido por una máquina Boulton-Watt en 1807, realizando en tiempo récord un viaje por el río Hudson; en 1811 inaugura el servicio comercial que pronto extiende hacia el sur, logrando producir para 1815 más de veinte barcos entre los cuales se cuenta el "Demólogos" de uso militar. En Europa, el primer vapor con éxito comercial navega el río Clyde en 1812 y diez años más tarde lo hace el primer barco de hierro movido a vapor construido en Inglaterra; en la década de los treinta se introducen máquinas verticales y al substituir las ruedas de paletas por hélices se abre el paso, en 1832, para las embarcaciones de gran tonelaje y se consolida el camino de los viajes transoceánicos.

El siglo XIX es un período de expansión en Inglaterra donde el comercio, la población y la industria alcanzan un gran desarrollo.

El formidable incremento en la producción de tejidos de algodón plantea nuevas necesidades de maquinaria, materias primas y procesos auxiliares. La industria presenta exigencias mecánicas que no son necesariamente resueltas por la ciencia, pero en el terreno de las máquinas de vapor la situación es distinta. Los constructores tradicionales, que no parecían requerir de conocimientos científicos y que, en concordancia con la filosofía de la época industrial, habían centrado su labor en la solución de los problemas prácticos asociados a la reducción de costos de operación, empezarán a recibir la importante contribución de la ciencia. Sin embargo, el estudio científico de las máquinas de vapor no se emprende en Inglaterra como era de esperarse sino que se desarrolla en Francia, donde el Estado había empezado a asumir el control de la enseñanza por medio del plan de Condorcet: donde se pretendía la instrucción del pueblo y la difusión de las "luces", se proponía la enseñanza única, neutra y gratuita, y se reconocía al Estado la obligación de instruir; a través de ese plan se coloca a la ciencia en lugar preponderante y se favorece el trabajo científico. Uno de los hechos más notables de la Revolución Francesa, que es fundamental para la investigación acerca de las máquinas, fue la transformación de la Escuela de Obras Públicas en la Escuela Politécnica, que se realiza en 1794 bajo el impulso de Lamblardie, G. Monge y L. Carnot entre otros; con ella, que habrá de sobrevivir a diferentes cambios políticos creciendo cada vez más, se demuestra que más allá de las diferencias de cada régimen, el poder político asumió su responsabilidad en la protección de la

ciencia.

Aunque la Escuela desempeñaba funciones de instituto de tecnología, en ella se realizaba la formación preparatoria para lograr la admisión a las escuelas superiores. Su estructura tenía carácter paramilitar y para ingresar había que aprobar un concurso riguroso. Su orientación era nueva y revolucionaria, pues si bien se buscaba formar mentalidades prácticas, se proporcionaban sólidas bases teóricas en mecánica, geometría descriptiva y química, además de estudiar una ciencia útil que tenía ingerencia directa en el desarrollo de la tecnología. La cuidadosa selección de sus maestros lleva a los científicos más eminentes a las cátedras; entre ellos se cuenta a G. Monge, P. S. Laplace, J. L. Lagrange, G. Bertholet y J. B. J. Fourier. La actividad científica se concentra en las escuelas de París y los científicos divulgan sus ideas en los cursos y a través de publicaciones académicas, así, Monge publica su geometría descriptiva, Laplace el ensayo de probabilidad o Lamarck su teoría evolucionista; con ello la ciencia de cierta manera se populariza, pues los trabajos y las investigaciones se pusieron al alcance del público ilustrado, más allá del círculo inmediato de sabios y académicos. Entre los alumnos destacados de la Escuela se encuentra a D. F. J. Arago, J. B. Biot, S. D. Poisson, J. L. Gay-Lussac y P. R. Dulong, algunos de los cuales se integrarán en su momento a la planta docente de ella, y en generaciones posteriores a A. L. Cauchy, J. V. Poncelet, A. T. Petit, G. Coriolis y Sadi Carnot, entre otros.

Durante el régimen napoleónico se incrementaron los apoyos para la enseñanza científico-técnica, mientras la ciencia francesa, apoyada en la organización de la Escuela Politécnica, se hacía más práctica y experimental y lograba mantener, durante la primera mitad del siglo XIX, una clara superioridad en toda Europa. El interés por el estudio de las máquinas que se manifiesta en el siglo XIX parece ser impulsado por el Estado francés, quien en 1793 ofrece premios por el perfeccionamiento de las máquinas de vapor, además de contar con una estructura política en la que la Comisión Central de Máquinas de Vapor³³ a través del Ministro de Trabajos Públicos podía solicitar la realización de experimentos en ese terreno. Tal vez gracias a ello, en el primer tercio del siglo aparece un conjunto de obras acerca de la teoría de las máquinas y la mecánica industrial, entre las que se puede señalar la de C. L. M. H. Navier de 1818 sobre las máquinas hidráulicas y en el mismo año por Petit, quien en el periodo de colaboración con Dulong, publica un artículo sobre el cálculo del efecto de las máquinas, la de Poisson de 1823 que aplica su teoría sobre la compresión adiabática a las máquinas del vapor, las publicadas en 1829 una de ellas por Coriolis quien estudia a las máquinas como fuentes de trabajo y la otra por Poncelet que incluye cálculos sobre máquinas de vapor y en especial la importante contribución de Sadi Carnot que es publicada en 1824.

Nicolás Leonard Sadi Carnot, hijo del célebre general L.

³³ KUILEN, T. S., *La Tensión Esencial...* op. cit. pp. 117-118.

Carnot, fue un notable estudiante de la Escuela Politecnica que egresa de ella en 1814 para continuar sus estudios en la Escuela de Ingeniería Militar de Metz como segundo teniente, interviene en algunas acciones militares y termina su carrera dos años después. La reputación de su padre se convierte en un obstáculo para su superación en los primeros años de la Restauración y recibe licencia del ejército en 1820 para dedicarse al estudio y la investigación; asiste a cursos en el Colegio de Francia, en la Sorbona, en la escuela de Minas y otras instituciones más donde estudia física, economía y desarrollo industrial principalmente, también realiza visitas frecuentes a fábricas e industrias donde se familiariza con la máquina de vapor. En esa época establece amistad con N. Clément quien impartía en el Conservatorio un curso de especialización, fundamentalmente de química aplicada y realizaba investigaciones sobre la teoría de los gases así como sobre la teoría y operación de las máquinas térmicas. Junto con Désormes, Clément realiza cálculos sobre la potencia motriz de diferentes máquinas de vapor que serían utilizadas por Poncelet y por Carnot; además realizan también uno de los primeros trabajos importantes sobre la expansión adiabática, que según R. Fox, solamente es comprendido por ellos mismos y por Carnot.

Alrededor de 1821, después de una breve interrupción de sus estudios, Carnot se concentra en la investigación de los problemas de la máquina de vapor, que analiza en su trabajo "Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas que pueden

desarrollar esa potencia", que es publicado por el principal editor científico de Francia en 1824. El trabajo es presentado en la Academia de Ciencias por P. S. Girard, a través de una amplia y favorable reseña que se imprime en la "Revista Enciclopédica" y fue mencionado también en el "Boletín de Ciencias Tecnológicas" ese mismo año, pero sus ideas parecen haber sido ignoradas por completo. Las investigaciones de Carnot siguen adelante extendiendo sus trabajos al diseño de las máquinas y la teoría del calor, siendo mencionado como "constructor de máquinas de vapor" por A. Fourcy alrededor de 1828, aunque no hay evidencias concretas de que se haya dedicado a esas labores. Después de la Revolución de Julio, que dio origen a la Segunda República, Carnot es mencionado como candidato a la Cámara de los Pares, pero rechaza su nominación; sus últimas investigaciones las inicia por 1831 y se refieren a las propiedades físicas de los gases y el vapor, especialmente a la relación entre presión y temperatura, pero son interrumpidas por su enfermedad y muere, en una epidemia de cólera, en 1832.

Al morir Carnot, la mayoría de su trabajo escrito fue quemado junto con sus pertenencias, quedando para la posteridad solamente unos cuantos manuscritos, notas de algunos de sus cursos, un par de traducciones de artículos de Watt y su único trabajo publicado, las Reflexiones, que habrá de servir de base para el desarrollo de la termodinámica, que anteriormente se construía sobre bases químicas. El libro que Carnot escribe ante la inexistencia de una teoría completa acerca de las máquinas de fuego, incluye en su primera

parte una exposición sobre el calor que, según plantea, puede ser la causa del movimiento, pues a él se le debe atribuir los grandes movimientos naturales como el sistema de vientos o las corrientes de agua; ahí señala también la importancia adquirida por las máquinas de fuego y la necesidad de ahondar en su estudio. Carnot busca establecer razonamientos generales que pudieran aplicarse a todas las máquinas de fuego y se propone examinar si su potencia motriz y los posibles perfeccionamientos en ellas pudieran tener límites y si es que, existen otros agentes, aparte del vapor de agua, capaces de desarrollar una mejor potencia motriz, potencia que reconoce como el efecto útil que puede producir un motor, el cual puede "...compararse a la elevación de un peso a una cierta altura; que como se sabe, tiene por medida el producto del peso por la altura a que se ha elevado."⁴

En la primera parte del libro introduce el principio que considera aplicable a todas las máquinas que se mueven a través del uso del calórico, según el cual la producción de movimiento no se debe al consumo de él, sino al restablecimiento de su equilibrio; es decir, a que el calórico es transportado de un cuerpo cuya temperatura es alta a otro en que ésta es más baja. En una máquina de vapor, razona Carnot, el calórico atraviesa las paredes de la caldera y se incorpora "en cierto modo" al vapor que se produce en ella, el cual lo arrastra hacia el cilindro y de ahí al condensador donde se pone en contacto con el agua fría para licuarse; el vapor

⁴ CARNOT, Sadi. Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas aptas para desarrollar esa potencia, México, Consejo Editorial del I. P. N., 1976, p. 18.

es entonces el vehículo para transportar al calórico, que ahora pasa al agua fría del condensador para calentarla, así se consigue restablecer el equilibrio en el calórico con su paso del cuerpo caliente al agua fría. Carnot concluye que para que se produzca una potencia motriz no es suficiente con obtener calórico, sino que es necesario contar con un objeto o lugar frío hacia el cual éste pudiera fluir; la atmósfera sería entonces como un gran condensador al cual se podría enviar el calórico pero, quizá anticipando la idea del incremento de la entropía, hace notar que si la temperatura del medio ambiente aumentara considerablemente, llegaría a un nivel en que el flujo de calórico no pudiera realizarse más.

Carnot realiza un par de explicaciones de diferente nivel, acerca de las máquinas de vapor y obtiene en cada caso elementos con los que elabora conclusiones y construye su teoría. En la primera de ellas, que él considera un examen superficial, describe la forma de proceder para producir potencia motriz y para ello imagina dos cuerpos A y B que serían recipientes (reservoirs) de calórico tales, que se les podría extraer o agregar cualquier cantidad de él sin que sus temperaturas se alterasen, siendo la de A mayor que la de B. El primer caso tendría que ver con el transporte de calórico del cuerpo A al cuerpo B y se iniciaría cuando se tomara calórico de A para formar vapor que, se supone, habría de estar a la misma temperatura que el cuerpo A; el vapor se introduciría en un cilindro que contendría un pistón y que sería

desplazado para que aumentara el volumen original del recipiente y con el del vapor, con ello, la temperatura del vapor descendería y se continuaría el proceso hasta que llegara a alcanzar la temperatura de B. A continuación se pondría el vapor en contacto con el cuerpo para que se condensara, empujando el émbolo para que ejerciera una presión constante sobre el vapor y lo convirtiera en líquido totalmente. El resultado del proceso sería la transferencia de calórico del cuerpo caliente al frío y la producción de un trabajo externo; la substancia activa volvería a su estado inicial y no habría ningún desperdicio de calórico.

Desde el punto de vista de Carnot, un ciclo como el anterior era reversible y en el proceso inverso, partiendo del cuerpo B, también se podría formar vapor a la temperatura de él, después se le comprimiría hasta que lograra alcanzar la temperatura del cuerpo A, para condensarlo al ponerlo en contacto con este y continuar la compresión hasta licuarlo por completo; con el resultado de que se consume potencia motriz y se transfiere calórico del cuerpo frío al caliente. La comparación entre los procesos inversos permite ver que en el primer caso se produciría potencia motriz y se llevaría calórico del cuerpo A al B, mientras que en el segundo se consumiría potencia motriz y se transportaría calórico del cuerpo B al A; pero además, si en los dos casos se ha utilizado la misma cantidad de vapor, si no se ha perdido potencia motriz ni se ha desperdiciado calórico en los procesos, entonces la potencia motriz producida en un caso sería igual a la consumida en el inverso y la

cantidad de calórico que se llevara del cuerpo A al B, sería igual a la que pasara del cuerpo B al A. El resultado neto de una máquina que realizara un conjunto de operaciones alternativas de este tipo sería que el trabajo producido en un sentido se consumiría en el inverso y que se llevaría la misma cantidad de calórico del cuerpo frío al caliente y viceversa; la reversibilidad del ciclo se hace posible a condición de no contar con ningún flujo inútil de calórico a lo largo de él, pues si algo se perdiera el motor no sería reversible.

Ahora bien, si existiera una forma más ventajosa de usar el calórico que la descrita anteriormente, si se contara con un metodo por el cual se pudiera obtener mayor potencia motriz de la misma cantidad de calórico y las mismas temperaturas, se podría tomar, a juicio de Carnot, una parte de esa potencia máxima para usarla en la operación inversa, llevar calórico del cuerpo B al A y regresar así al punto de partida. Si se repitieran sucesivamente las operaciones, la parte restante de esa potencia podría quedar disponible para realizar trabajo externo y la combinación serviría entonces para usar el mismo calor una y otra vez, liberando una cantidad de potencia que se multiplicaría sin límite y sin ninguna transferencia de calórico a una temperatura menor. Esta posibilidad es rechazada por Carnot, por un lado porque a la creación indefinida de fuerza motriz sin necesidad de consumir combustible la consideraba contraria a las leyes de la mecánica y de la física, pero también porque se daba origen a un movimiento perpetuo que

juzgaba imposible en los terrenos nuevos del calor y la electricidad; por ello concluye que "... el máximo de potencia motriz que se obtiene empleando el vapor es también el máximo de potencia motriz realizable por cualquier medio..."⁵⁵

Para complementar la proposición plantea que, cualquier flujo de calórico que no produzca potencia motriz debe interpretarse como una pérdida y establece como condición necesaria para alcanzar la potencia máxima "...que no se haga en los cuerpos, empleados para realizar la potencia motriz del calor, ningún cambio de temperatura que no sea debido a un cambio de volumen..."⁵⁶. De la discusión que hace Carnot acerca de esos procesos ideales, surgen diferentes objeciones que nos permiten suponer que aún en ellos el máximo de eficiencia posible es siempre menor al 100%, esto quiere decir que la energía útil que se obtiene en una máquina nunca puede ser tanta como la energía que entra; en las máquinas reales los problemas se agudizan, pues en ellas siempre aparecen pérdidas de potencia motriz por el contacto de cuerpos a temperaturas diferentes, de manera que su eficiencia de operación siempre será mucho menor. Estas conclusiones quedan englobadas en uno de los principios fundamentales de las máquinas caloríficas, el que ninguna de ellas puede operar con eficiencia perfecta y ello constituye una de las diferentes formas de expresar la segunda ley de la termodinámica, que en la versión de Carnot, se resume en que "... el calor no

⁵⁵ CARNOT... *ibid* p. 50.

⁵⁶ CARNOT... *ibid* p. 52

puede ser transformado totalmente en trabajo..."

Para explicar como una substancia como el calorico puede convertirse en una fuente de potencia, Carnot utiliza analogias hidraulicas que por un lado parecen provenir de la influencia directa de los estudios de su padre, para quien una máquina venia a ser un cuerpo intermediario, que sirve para transmitir movimiento entre dos o más cuerpos primarios que no actúan directamente unos sobre otros; pero que también pueden ser un reflejo de sus conocimientos acerca de los avances logrados en la utilizacion de las ruedas hidraulicas, a finales del siglo XVIII y principios del XIX, en especial de los trabajos de J. Smeaton quien habia demostrado que la eficiencia de las ruedas que recibian su impulso por la parte superior era mejor que aquella de los que lo recibian por la inferior. Para Carnot, la potencia motriz del calor se podia comparar, con gran aproximación con la que produce una caida de agua, pues sin importar cual fuera la substancia utilizada para recibir la acción del calor o la máquina usada para recibir el efecto del agua, las dos tenian un máximo de potencia que no podia ser rebasado. Igualmente plantea que, la potencia que genera una caida de agua depende de la altura y la cantidad de líquido que cayera, la del calor dependería de la cantidad de calorico empleado y lo que llama una "expresión inusitada": la altura de la caida, es decir, la diferencia de temperaturas entre los cuerpos que

²⁷ HOLTOM, Gerard y otros, directores del Harvard Project Physics, Reader, Unit 3. The Triangle of mechanics, U. S. A., Holt Rinehart and Winston Inc, 1971, p. 70.

intercambian calórico; finalmente, señala una discrepancia, si la potencia en la caída de agua es proporcional a la diferencia entre los niveles, "...la caída de calórico produce más potencia motriz en las temperaturas inferiores que en las superiores..."⁹⁸.

Su explicación mas general acerca de la máquina ideal y el ciclo con el que trabaja, incluye un fluido elástico, aire atmosférico para él, encerrado en el recipiente a,b,l,m que, se supone, cuenta con paredes que conducen el calórico perfectamente y el cual se muestra en la figura 7; cuenta con un pistón cuya base es cd , además de dos cuerpos A y B que mantendrán su temperatura constante a lo largo del proceso, siendo la del cuerpo A mayor que la del B.

1er. paso) Se pone en contacto el cuerpo A con el recipiente, para que el aire contenido en él alcance la misma temperatura que el cuerpo A, mientras el pistón se encuentra en la posición cd .

2o. paso) Se mantiene el cuerpo A en contacto con el recipiente, para que proporcione el calórico necesario para mantener constante la temperatura, mientras el pistón se eleva gradualmente y llega a la posición ef .

3er. paso) Se retira el cuerpo A para que el aire no reciba más calórico; sin embargo, el pistón se continúa moviendo y se aleja de la posición ef , el aire se enrarece y su temperatura desciende pues ya no recibe calórico, el proceso continúa hasta que el fluido

⁹⁸ CARNOT, op. cit. p. 94.

llega a la temperatura del cuerpo B, entonces se detiene el pistón que, se supone, habrá llegado a la posición *gh*.

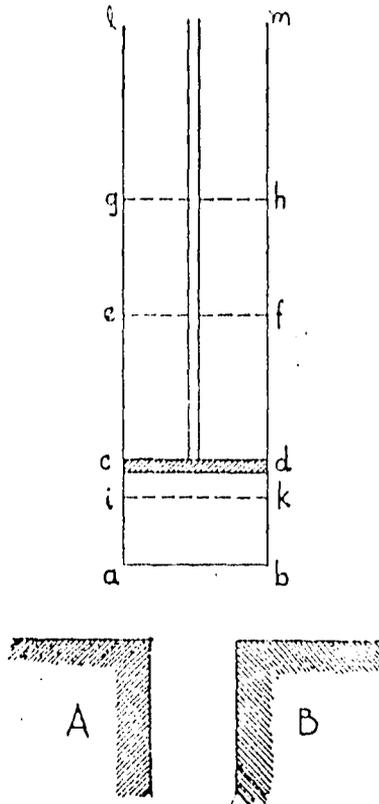


Fig. 7. Dispositivo de Carnot para explicar el ciclo que propone. (Tomado de Carnot, S. Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego..., Consejo editorial del I.P.N., 1976).

40. paso) Se pone el recipiente en contacto con el cuerpo B y se

comprime el aire que contiene, retrocediendo el pistón que pasa de la posición gh a la cd , mientras tanto, el aire permanece a temperatura constante, pues durante el contacto cede calorífico al cuerpo B.

5o. paso) Se separa el cuerpo B y se continúa comprimiendo el aire, el cual, puesto que se encuentra aislado, incrementa su temperatura; se sigue ejerciendo compresión, hasta que el aire llegue a la temperatura del cuerpo A y durante ese tiempo el pistón pasa de la posición cd a la ik .

6o. paso) Se vuelve a poner en contacto el recipiente con el cuerpo A y el pistón retrocede de la posición ik a la ef ; mientras la temperatura permanece constante.

7o. paso) Se repite el paso número tres y a continuación se realizan los pasos 4, 5, 6, después 3, 4, 5, 6, 3, 4, 5, 6, ... y así sucesivamente.

Carnot explica a continuación que todas las operaciones descritas en esos pasos, pueden realizarse en el sentido inverso y describe como se procedería en el caso de dos de ellos. Imagina que después del sexto paso, cuando el pistón llega a la posición ik mientras se mantiene el contacto con el cuerpo A; entonces, como la temperatura permanece constante, el calorífico que había entregado el cuerpo A durante el sexto paso, vuelve a él mismo en el paso inverso y al final de ese proceso, todo se encontrará como estaba al final del quinto paso. Si en esas condiciones se separa el cuerpo A del recipiente y se lleva el pistón de ik a cd , la

temperatura del aire tendrá que descender tanto como había aumentado durante el quinto paso y llega a un punto en el que será la misma que tiene el cuerpo B, con lo cual se llega a las condiciones del final del cuarto paso. De manera semejante se podría seguir procediendo a través de operaciones inversas en los cuatro primeros pasos y se podría regresar al punto de partida. Así, resulta evidente que si la operación directa tuvo como consecuencia la producción de cierta cantidad de potencia motriz y el paso de calórico del cuerpo A al B, en la operación inversa, el resultado es el consumo de esa misma potencia y el regreso de calórico del cuerpo B al A, de manera que bien pudiera concluirse, como dice Carnot, que las operaciones en ambos sentidos se neutralizan.

En sus explicaciones Carnot introduce dos puntos de gran importancia. El primero de ellos es que las operaciones de cualquier máquina calorífica son cíclicas y que la substancia de trabajo siempre se lleva de regreso a las condiciones originales y por lo tanto, no sufre cambios permanentes; el segundo punto es que las operaciones perfectas son reversibles. El ciclo completo de una máquina calorífica perfecta consiste entonces de cuatro operaciones básicas: durante la primera y la tercera se hace entrar y se transfiere calor respectivamente conservando la temperatura constante, durante la segunda y la cuarta la temperatura de la substancia de trabajo cambia por expansión y compresión respectivamente, sin ningún flujo de calor.

Utilizando razonamientos analógicos a los que expone en el capítulo III sobre la excreta superficial de los procesos, prueba que es imposible que se produzca una potencia motriz superior a la que se obtiene con su máquina y concluye con una proposición general "...La potencia motriz del calor es independiente de los aparatos que intervienen para realizarla; su cantidad solo está fijada por las temperaturas de los cuerpos entre los cuales se hace, ..., el transporte del calorico...". En la última parte de sus "Reflexiones", Carnot hace un estudio de las máquinas de vapor de alta presión, sosteniendo que son superiores, puesto que vuelven útil una mayor caída de calorico que los motores de bajo presión; también reflexiona acerca del empleo, de los gases y otros vapores diferentes al del agua, en especial, sobre el "aire atmosférico", del cual señala ventajas e inconvenientes. También concluye que el aire parece más apropiado que el vapor, si se desea obtener potencia motriz en las caídas de calorico en las temperaturas elevadas, aunque quizá en las inferiores, dice Carnot, el vapor de agua sea más conveniente; sin embargo, finalmente plantea que, aun cuando el empleo del aire pudiera presentar en la práctica diferentes problemas técnicos, como los relativos a la lubricación o a la combustión, cuando éstos fueran resueltos, el aire "...ofrecería sin duda una notable superioridad sobre el vapor de agua..."¹⁰⁰.

¹⁰⁰ CARNOT... 1843, p. 65

¹⁰¹ CARNOT... 1843, p. 128

Se ha especulado mucho acerca de cual hubiera sido el curso de los acontecimientos, si Carnot hubiera vivido algunos años más, de hecho se sabe por alguno de sus manuscritos que estaba muy cerca del gran descubrimiento del siglo XIX, la conservación de la energía; pero no hay duda de que de haber tenido más tiempo para completar sus estudios, el progreso de la termodinámica y en especial el de la ingeniería, hubieran logrado un gran avance. Sin embargo, pese a la innegable calidad de su obra, su libro fue prácticamente ignorado desde su aparición y a lo largo de casi toda la década siguiente su obra pasó desapercibida y solamente fue citada en un par de documentos de esa época. Aunque es difícil determinar las razones concretas para la escasa influencia de los trabajos de Carnot, se puede reconocer que algunos de sus hallazgos, no hicieron sino confirmar lo que en la práctica eran ya hechos aceptados; sus explicaciones sobre el mejor rendimiento de los motores de alta presión se basaban tanto en datos que había publicado el "Monthly Engine Reporter" y que eran suficientemente conocidos en el medio técnico, como en el comportamiento de las máquinas del tipo diseñado por A. Woolf que habían sido desarrolladas en el Continente por H. Edwards, antiguo socio de Woolf.

Los mayores rendimientos de tales máquinas, se debían a las rigurosas normas de fabricación establecidas por Woolf y a la introducción de ciertas mejoras, como los nuevos mecanismos en las válvulas, el perfeccionamiento de calderas y fogones y los mejores

aislamientos térmicos, entre otros; de manera que comparada con todo ello, la ventaja termodinámica del funcionamiento a temperaturas un poco mayores, no resultaba propiamente una proposición revolucionaria. Se ha planteado, por otro lado, que Carnot no reacciona de forma notable, ni realiza ninguna acción ante el poco éxito de su trabajo, lo cual se ha tratado de explicar señalando su desconfianza acerca de la teoría del calórico que parece mostrar cuando establece que "... los principales fundamentos sobre los cuales reposa la teoría del calor necesitarían un examen cuidadoso. Muchos hechos experimentales aparecen casi inexplicables en el estado actual de esa teoría."¹⁰¹. En el mismo sentido, se dice que entre sus manuscritos llegó a plantear dudas acerca de esa teoría y del axioma de la conservación del calor, las cuales parecen haberse vuelto convicciones en la última etapa de su vida; algunos argumentan también que llegó a reconocer que su comparación entre la máquina de vapor y la rueda hidráulica no era correcta, por lo cual habría abandonado la teoría del calórico, adoptando una concepción corpuscular¹⁰².

A lo largo del tiempo se ha intentado descalificar su trabajo por el uso que hace de la teoría del calórico, quizá desconociendo los datos aportados anteriormente; también se ha criticado que Carnot daba el mismo significado a los términos del calor y el

¹⁰¹ CARNOT... *Ibid.* p. 63.

¹⁰² *Cfr.* MASON, S. P., ... *op. cit.* p. 131.

calórico, al menos así lo deja ver cuando plantea que utiliza indistintamente esas expresiones. Diferentes autores han rebatido estos puntos, sosteniendo que el uso de una teoría en una época en que todavía se encuentra vigente no es causa de descrédito, además de que los dos términos mencionados se aplican, cada uno, en situaciones diferentes, por lo que se afirma que las posibilidades de confusión son muy remotas. También se plantea que Carnot utilizaba la palabra "chaleur" para referirse al calor en general y la expresión "chute de calorique" para la potencia motriz en las máquinas de vapor, pero que nunca utilizó "chute de chaleur"; según la opinión de algunos autores tenía cierta idea acerca del concepto de entropía, para el cual utilizaba el término "calorique". Esto parece conducir a lo que pudiera parecer el argumento de mayor contundencia a su favor "... si la expresión "chute de calorique" se traduce por "caída de entropía" muchas de las objeciones a los trabajos de Carnot hechas por Kelvin, Clapeyron, Clausius y otros pierden su validez..."¹⁰¹

El trabajo de Carnot se empieza a conocer hasta 1834, cuando E. Clapeyron publica una reformulación analítica de él en el "Journal d'Ecole Polytechnique (XIV)". Ahí presenta las premisas, los teoremas y algunos de los argumentos específicos de Carnot, pero altera considerablemente el sentido original, también introduce el diagrama indicador en la termodinámica, gráfica presión-volumen, donde el ciclo de Carnot aparece formado por los

¹⁰¹ SEMANSKY, M. W., Calor y Termodinámica, España, Aguilar S. A. de Ediciones, 1961, p. 167

procesos isotérmicos y dos procesos adiabáticos, en donde hace uso por primera vez de esta palabra; sin embargo, la importancia del trabajo no fue apreciada totalmente, en mucho debido a la rigidez del juicio de Clapeyron sobre el calórico, que sirvió de freno a su aceptación generalizada. El trabajo de Carnot no llamó mayormente la atención hasta que C. H. A. Holtzman en 1845 y en especial Thomson en 1848 empezaron a trabajar algunos aspectos del documento de Clapeyron. Sir William Thomson, Baron Kelvin of Largs, estudia en Glasgow donde había gran interés por la ciencia francesa del primer tercio del siglo XIX, ahí se familiariza con las teorías de los grandes matemáticos de esa época y en especial analiza los tratados de Fourier y Laplace.

En 1845 se traslada a Francia para trabajar en el laboratorio de Regnault y estudiar en París, ahí se relaciona con Cauchy, Sturm, Biot y Liouville entre otros, y sus estudios lo conducen a una nueva aproximación a la teoría eléctrica y se desarrolla su interés por el trabajo experimental y la instrumentación, pero además se introduce en la teoría de Sadi Carnot a través del trabajo desarrollado por Clapeyron. En un documento de 1848 Thomson emplea la teoría de Carnot por primera vez en un intento por establecer una escala termométrica "absoluta", sugiriendo que los incrementos iguales de temperatura podrían definirse como , los rangos de temperatura en los que una máquina de calor perfecta operaría con eficiencias iguales. Un poco después presenta en Edimburgo una relación general de los hallazgos de Carnot y el

trabajo es publicado en las "Transactions of the Royal Society of Edinburg". Entre 1848 y 1850, trabaja directamente sobre las "Reflexiones" y publica un conjunto de documentos donde extiende y confirma los resultados de Carnot, lo cual viene a ser un gran apoyo para las ideas de este, aunque no llega a aceptar del todo la teoría calórica pues mostraba escepticismo al empleo de las entidades imponderables.

A partir de la tercera década del siglo, la atención se empieza a concentrar en la producción de calor a partir de diferentes fuentes de energía y las relaciones entre el calor y el trabajo se fueron haciendo más claras, mientras la teoría del calórico perdía terreno. Los progresos logrados por la ciencia abarcan campos muy amplios y si bien la biología no logra consolidarse, la química que había encontrado su camino con Lavoisier se moderniza y se vuelve racional y cuantitativa, la física extiende sus dominios y en especial, los avances que se logran en el campo de la electricidad y el magnetismo, generan una corriente de descubrimientos que surge a raíz de la invención de la pila eléctrica, que realiza Volta en 1800, ello conduce a la física hacia los procesos de conversión. El primero de estos procesos se pone en evidencia con la invención misma de la batería eléctrica, que muestra que las reacciones químicas producen corriente eléctrica; un poco después se encuentra que la corriente eléctrica puede producir calor y también luz, mientras que, por medio de la electrólisis, se demuestra que una corriente eléctrica puede

originar reacciones químicas.

En 1820, Oersted demuestra que la corriente eléctrica puede generar efectos magnéticos y dos años después, T. Seebeck encuentra que el calor aplicado a una pareja de metales, producía una corriente eléctrica si la soldadura de sus extremos estaba a diferentes temperaturas; el descubrimiento de la inducción electromagnética realizado por Faraday en 1831, es también parte del conjunto de procesos de conversión que durante esa época ocupaba la atención de los científicos. Paralelamente se fue reconociendo que otros procesos conocidos como la producción de calor por percusión o por fricción, así como la obtención de potencia motriz a partir del calor en las máquinas de vapor también eran procesos de conversión. Así se fue delineando un campo de estudio diferente, que se construye sobre la red de conexiones entre partes de la física que anteriormente se imaginaban separadas; en el pensamiento científico surgen elementos que habrán de servir de guía para la aparición de un punto de vista nuevo sobre la naturaleza, una visión especial que algunos científicos, quizá más receptivos, desarrollan en la primera mitad del siglo XIX, acerca de que todos los fenómenos de la naturaleza pudieran estar unidos y ser el resultado de una fuerza básica que imaginan indestructible. Esa visión y los descubrimientos que produce, habrían de conducir al surgimiento del principio de la conservación de la energía.

Sin duda uno de los precursores de ese nuevo enfoque fue S. Carnot; de sus manuscritos y la segunda edición de las "Reflexiones", publicado en 1872 por su hermano, se desprende que repitió los experimentos de Rumford y realizó experiencias propias sobre percusión y fricción, para tratar de medir la fuerza motriz consumida y el calor producido en ellos, llegando a convencerse, de esa manera, de que el calor se transforma en movimiento. También llegó a plantear que el calor no es otra cosa que potencia motriz o movimiento que cambia de forma y que "... la potencia motriz... se encuentra en cantidades invariables y... nunca... se crea ni se destruye..."¹⁰⁴, lo cual parece ser suficiente evidencia de que no desconocía la conservación de la energía; además aunque no especifica como lo obtiene, señala que para producir una unidad de potencia motriz se necesita destruir 2.70 unidades de calor, lo cual constituye una medida del equivalente mecánico del calor. En Alemania, alrededor de 1830, surgen enfoques como el de J. Von Liebig, quien suponía que la energía mecánica de los animales, así como el calor de sus cuerpos, podrían provenir de la energía química de los alimentos, por medio de ellos, se trata de explicar las transformaciones desde puntos de vista químicos y biológicos, que son resultado directo de las concepciones que dominaban a ese país.

Con base en la teoría de la ciencia de J. G. Fichte, el filósofo alemán F. Schelling propone una nueva manera de realizar

¹⁰⁴ CARNOT, S., *Biographie et manuscrit*, cit. por Bernal, J. D. en *Ciencia e Industria en el siglo XIX*, Barcelona, Edic. Martínez Roca S. A., 1973, p. 51.

investigación científica, asociada con una teoría filosófica que se conoce como "Naturphilosophie" o Filosofía de la Naturaleza, que no debe confundirse con la filosofía natural (Natural philosophy), que es la física para los ingleses. El propósito principal de la corriente, liderada también por J. W. von Goethe, es el comprender cada fenómeno como un todo y el buscar los principios básicos, no matemáticos, que se supone que los gobiernan; sus seguidores se relacionan con el movimiento Romántico, que despreciaba la visión matemática de la naturaleza y se oponía a la cosmología desarrollada a partir de Newton pero no por él, pues rechazaba la idea de un mundo mecánico y la de un universo concebido como una gran maquinaria. La escuela ejerció una gran influencia sobre la generación de científicos alemanes educados a principios del siglo XIX, sus seguidores no creían en el análisis separado de las partes de los fenómenos, ni en la medición cualitativa en los laboratorios, pues se pensaba que la naturaleza se entendía por la observación directa, más que a través de aparatos "artificiales"; así, se estimula la especulación acerca de las ideas que no podían ser demostradas por la experimentación, contribuyendo en gran medida al surgimiento de actitudes como el de la búsqueda de la realidad subyacente en la naturaleza.

Dentro de esa filosofía se creía que el magnetismo, la electricidad, la gravedad, etc., no eran más que distintas fases bajo las que se manifestaba la unidad de la naturaleza; de manera que los fenómenos de ese tipo no estaban separados realmente uno

del otro, sino que más bien eran formas diferentes de una "fuerza" básica, fuerza que de acuerdo al uso que le daban vendría a ser lo que modernamente se conoce como energía. Así pues, desde ese punto de vista, "... había solamente un tipo de fuerza tras el desarrollo de la naturaleza... (y)... sostenían que la luz, la electricidad, el magnetismo y las fuerzas químicas se hallaban todas interconectadas..."¹⁰⁵, pues todas ellas eran aspectos de una misma cosa. Para el enfoque, la búsqueda de las conexiones entre los fenómenos, era una de sus preocupaciones principales, de manera que aún cuando la ley de la conservación de la energía era de índole práctica y cuantitativa, la Filosofía de la Naturaleza jugó un papel fundamental en su descubrimiento y en este punto los experimentos y las teorías matemáticas se complementaron con las especulaciones filosóficas, lo cual parece ser una condición para un cambio de paradigma.

M. Faraday intenta por su parte descubrir las relaciones entre todas las "fuerzas" físicas conocidas en su tiempo y llega a una idea cercana a la de la conservación de la energía, estudiando en conjunto varios procesos de conversión. En 1834 ofrece una serie de conferencias sobre los últimos descubrimientos realizados en química y galvanismo, una de las cuales lleva el significativo título de "Las relaciones de la afinidad química, la electricidad, el calor, el magnetismo y otras fuerzas de la materia"; además complementa sus exposiciones con demostraciones experimentales

¹⁰⁵ HADJIM, Stephan S., *Historia de las ciencias. 4. La ciencia del siglo XIX*, México, Alianza, 1977, p. 115.

sobre "la producción de una (fuerza) partiendo de otra y viceversa". En 1839 C. F. Mohr, quien fuera discípulo de Liebig, también manifiesta la idea de la conservación y la defiende en términos de los procesos de conversión, según su opinión hay sólo dos clases de cosas en la naturaleza, materia y fuerza, por lo que además de los 54 elementos químicos conocidos, se cuenta con un agente más, la fuerza que bajo condiciones adecuadas puede aparecer como movimiento, electricidad, luz, calor y magnetismo. Ese mismo año expresa M. Seguin, que el calor se puede transformar en movimiento pues ambos son manifestaciones de una misma cosa, además de plantear que en una máquina, el vapor, después de hacer su trabajo libera menos calor hacia el condensador que el que le proporcionó la caldera, pero su obra pasa inadvertida quizá por ser parte de un trabajo de tecnología ferroviaria. Por su parte, W. R. Grove se aproxima a la idea de la conservación en 1842, pero no llega a la conversión del calor en trabajo que es el aspecto principal. Finalmente, L. A. Colding en 1843 experimenta con el frotamiento y calcula un valor aproximado del equivalente mecánico, concluyendo que el trabajo se puede convertir en calor y que la fuerza no podía ser destruida.

El cuadro anterior se completa con la primera formulación trascendente, que es fruto del trabajo de J. R. Mayer, quien recibe gran influencia de la Filosofía de la Naturaleza, y propone una ley de conservación de la energía que se origina en la observación de

¹⁰⁴ KUHN, T., *La tensión esencial...*, op. cit. pp. 100-104.

los procesos fisiológicos relacionados con la respiración y el calor; Mayer plantea que el calor y el trabajo deben ser equivalentes y que podían transformarse mutuamente a través de una relación cuantitativa fija. Su escaso conocimiento de las teorías calóricas todavía vigentes, le permite oponerse a ellas y hacer proposiciones que, a pesar de su carácter especulativo, son muestra de la nueva mentalidad de la época; ellas aparecen por primera vez en el trabajo que envía a la revista "Annalen der Physik" en 1841, donde aparece la esencia del principio de conservación, pero con errores notables. Su nuevo artículo "Comentarios sobre los cuerpos de naturaleza inorgánica" es publicado en 1842, mostrando la prioridad de sus proposiciones, y aunque en él había corregido sus errores más visibles, la equivalencia entre calor y trabajo no se sustenta sobre argumentos definitivos, ni indica con claridad como obtiene el valor de 365 kilogramos-metro por cada caloría. En sus publicaciones posteriores, 1845 y 1848, busca establecer relaciones entre el calor y el mundo orgánico, así como explicar el origen del calor del sol, pero su trabajo no recibió ningún reconocimiento y sus planteamientos acerca de la conservación no fueron apreciadas por una comunidad científica que reclamaba la paternidad de la teoría para Inglaterra.

Para el desarrollo de la termodinámica es más importante la contribución de James P. Joule, quien establece la equivalencia entre el trabajo mecánico y el calor y realiza la más completa investigación experimental sobre esa materia. Es un genuino

representante de la nueva clase social que se preocupa más por la fabricación que por el comercio, que centra su interés en el estudio de las posibilidades de transformación entre los diferentes agentes naturales y de su conversión en potencia mecánica. Aunque algunos autores ven en sus trabajos una continuación directa de los experimentos de Rumford, sus inicios apuntan en otro sentido, pues comparte la idea generalizada de que la electricidad podría reemplazar a la fuerza del vapor. En 1837 construye una máquina electromagnética operada por una batería y en el transcurso de su investigación descubre que el paso de una corriente i por una resistencia R libera una cantidad de calor que es proporcional a Ri^2 , relación conocida como el efecto Joule, que es incluida en el texto "Sobre la producción de calor por electricidad voltáica" enviado en 1840 a la Royal Society. En una línea semejante a la estudiada por M. Faraday y P. M. Roget, supone que la oxidación del zinc en la batería es la fuente de la fuerza motriz de su máquina y al comparar el material consumido con el trabajo que se obtiene en ella, concluye que la máquina de vapor es más rentable debido al alto costo del zinc comparado con el del carbón.

A continuación experimenta con la corriente producida por una máquina magneto-eléctrica o generador, que gira impulsada por una pesa que desciende y mide el calor liberado para compararlo con el trabajo que hace funcionar al generador; el valor promedio de sus medidas es de 838 pie x libra para cada BTU, cantidad de calor que eleva la temperatura de una libra de agua en un grado Fahrenheit,

ese valor es mayor al que se acepta en la actualidad (778.26 lb. x pie) en un 7.7% y se reconoce generalmente como la primera medición directa de la relación entre el calor y el trabajo. En su siguiente experimento mide el calor producido por la fricción del agua, que sale por los pequeños orificios de un cilindro impulsada por un pistón movable; así obtiene 770 pie X libra para una BTU, valor que es menor en un 1% al valor aceptado. Esos experimentos son reportados en el escrito "Sobre los efectos caloríficos de la magneto-electricidad y sobre el valor mecánico del calor", que publica sin mayor éxito en 1843; ahí también plantea que siempre que una cantidad de "fuerza" parece desaparecer aparece una cantidad definida de calor, que para él significa una regla de conservación. Posteriormente trabaja con gases, midiendo el calor liberado al comprimirlos y el trabajo realizado en ello. También realiza experimentos de expansión libre y todo sale publicado en el "Philosophical Magazine" en 1845, pero tampoco recibe mayor atención.

Sus publicaciones no llamaron la atención, lo cual puede interpretarse como muestra de las diferencias de valores e intereses entre los caballeros científicos de la Royal Society y los "científicos industriales", quienes fieles a sus orígenes, mostraban inclinaciones hacia la solución de problemas más prácticos, esto contribuyó a que a partir de entonces sus experimentos fueran cada vez mejores. Entre estos destaca el que utiliza su conocido aparato de paletas giratorias, en el que el

lento descenso de unas pesas hacía girar una rueda de paletas colocada dentro de un calorímetro, produciendo así la agitación del agua colocada dentro de él. En el experimento se ejercieron controles rigurosos sobre las posibles fuentes de error y el proceso se repitió varias veces, para lograr un aumento de temperatura suficiente para ser registrada, pues los incrementos era de pequeñas fracciones de grado. En 1847 trata de presentarse ante la Asociación Británica para el Progreso de la Ciencia, sociedad fundada por Ch. Babbage en 1831, para substituir a la Royal Society que, se decía, se había convertido en una corporación cerrada; debido al gran número de documentos a analizar, Joule no logra hacer más que un recuento verbal de su trabajo "Sobre el equivalente mecánico del calor, determinado por el calor producido por la fricción de fluidos", en él incluía un valor promedio de 772 pie X libra para el equivalente mecánico del calor que es menor en .8% al valor aceptado. El trabajo pudo haber pasado inadvertido, a no ser por la intervención de W. Thomson quien entabla una animada discusión con Joule.

En ese mismo año, durante una conferencia en Manchester, Joule lanza un ataque definitivo contra la teoría del calorico, planteando que "...Nosotros hemos demostrado... que el calor puede ser convertido en fuerza viva y en atracción a través del espacio... salvo que la materia pueda ser convertida en atracción a través del espacio... la hipótesis de que el calor debe ser una

substancia debe caer por el suelo...". A continuación realiza más de cien experimentos con sólidos y líquidos, obteniendo sus resultados más precisos que publica en 1849. Ahí establece su relación final, que habría de perdurar por cerca de treinta años, planteando que si al nivel del mar 772 libras descendieran un pie, se incrementaría la temperatura de una libra de agua en un grado Fahrenheit.

La desconfianza de los científicos fue patente ante la pequeñez de los efectos en los que basaba tan importantes conclusiones y el mismo Thomson solicita mayores evidencias. Aunque se había impresionado gratamente con el trabajo y las ideas de Joule, no había llegado a estar totalmente de acuerdo con él porque le ponía en conflicto con la teoría de Carnot, por quien tenía gran admiración. Concretamente, de acuerdo con Joule el calor se transforma en trabajo y entonces deja de existir como calor, por otro lado, de acuerdo con Carnot el trabajo se produce solamente por la caída del calórico, sin que la cantidad utilizada sufriera ninguna alteración; todavía en ese año Thomson había escrito un recuento de la teoría de Carnot en la que aún manifestaba su adhesión a ese punto de vista. El año siguiente R. Clausius muestra que los dos principios pueden conciliarse por medio de una pequeña modificación en la teoría de Carnot, que al parecer ya había sido visualizada años antes por Joule; el calor que entrega una fuente, según Clausius, puede considerarse que consta de dos partes, una

¹⁰⁷ ARONS, Arnold B., op. cit. p. 158.

que es transferida al condensador y la otra que es convertida en trabajo y es destruida. Una vez vencida esa dificultad, Thomson se vuelve uno de los líderes en el desarrollo de los nuevos puntos de vista y en 1851 publica un artículo, donde combina las ideas de Carnot sobre los ciclos reversibles con las de Joule, utilizando el término energía como un equivalente del calor y el trabajo mecánico.

Como ya se ha planteado, Mayer y Joule son sólo una parte del grupo de hombres de ciencia que propusieron, de alguna manera, la idea de que la energía se conserva, pero los resultados obtenidos por Joule son fundamentales y de hecho constituyen la base de lo que se conoce como la primera ley de la termodinámica; sin embargo, no hay duda de que en el segundo cuarto del siglo, existía un clima generalizado que presagiaba el surgimiento de la ley de conservación. Junto con la aceptación creciente de los trabajos, resalta también la aportación de H. von Helmholtz quien en 1847, mientras Joule perfecciona sus experimentos, había publicado su famoso ensayo "Sobre la conservación de la fuerza"; en él combina la teoría mecánica del calor con el principio de conservación y realiza una síntesis global de gran importancia.

Aun cuando la aparición del libro de Helmholtz suscitara una nueva controversia en cuanto a la paternidad del descubrimiento, no cabe duda que la amplia aceptación de la ley de conservación en mucho se debe al escrito. En él utiliza una perspectiva biológica

semejante a la desarrollada por Mayer, mostrando la insuficiencia de la teoría del calorico para estimar cuantitativamente al calor producido por fricción y percusión, así como para explicar el enorme calor de combustión; plantea también que el calor puede ser producido por electricidad y por medios mecánicos, ofreciendo como prueba los experimentos de Joule, a quien también cita por el equivalente mecánico del calor. Su trabajo lo concluye argumentando que ningún hecho conocido contradice la ley de conservación y que es confirmada por muchos de ellos. Quizá su mayor cualidad reside en que expresa ideas seguras donde otros plantearon expresiones vagas y su planteamiento fundamental queda registrado en el siguiente párrafo: "... Hemos arribado a la conclusión de que la Naturaleza como un todo posee una abundancia de fuerza que de ninguna manera puede ser incrementada o disminuida, y que por lo tanto, la cantidad de fuerza en la Naturaleza es tan eterna e inalterable como la cantidad de materia. Expresada en esta forma, he llamado a la ley general El principio de la Conservación de la Fuerza..."¹⁰⁸.

El principio de la conservación de la energía o de la fuerza tiene un desarrollo histórico que se realiza también a través de la destrucción de un paradigma, pues solamente "...después del rechazo de la teoría calórica podía la conservación de la energía llegar a ser parte de la ciencia..."¹⁰⁹. El principio ha sido considerado

¹⁰⁸ HOLTON, G. y otros, *Directores del Harvard Project Physics, Text, USA, Holt Rinehart and Winston* 1971. Unidad 3 p. 58.

¹⁰⁹ Kuhn, T. S., *La estructura...* op. cit. p. 157.

como el mayor descubrimiento de la mitad del siglo XIX, así como una de las leyes fundamentales de la ciencia. A través de él, la mecánica dejará de regir todos los dominios de la física, para ser reconocida como uno de sus elementos y no como el elemento básico; la noción general de la energía se convirtió entonces en el concepto universal de la física y la energía mecánica quedó solamente como un caso particular, que está al mismo nivel que la energía térmica, la eléctrica o la química. Ninguna otra ley habría de servir para unir tan claramente los diferentes campos científicos, pues de la química a la biología y aún en los estudios de ingeniería siempre se aplica la misma ley; su éxito ha sido tan completo que pareciera imposible que algún nuevo experimento pueda refutarlo. De él resulta evidente que cualquier máquina que realiza un trabajo puede hacerlo porque obtiene energía de alguna fuente, pero esa máquina no puede proporcionar más energía que la que le da la fuente y cuando ésta se agota la máquina deja de trabajar; pues las máquinas sólo pueden transformar la energía, ésta no puede ser creada ni destruida.

A partir de 1850 W. Thomson en Escocia y R. Clausius en Alemania trabajan sobre los detalles matemáticos de la termodinámica y combinan la teoría de Carnot con la conservación de la energía. Para Clausius, quien establece los fundamentos de la termodinámica moderna, el descubrimiento de Joule acerca de la conversión del calor en trabajo viene a ser la primera ley de la termodinámica, mientras que a la proposición que hace Carnot de que

el calor no puede pasar, en forma natural, de un cuerpo frío a uno caliente lo reconoce como la segunda ley. Por medio de esas dos leyes logra probar que el trabajo que se obtiene en un ciclo perfecto, para una cantidad dada de calor que entrega una fuente, depende solamente de la temperatura y proporciona una fórmula que permite calcular el valor máximo de calor que es aprovechado como trabajo mecánico. Así, demuestra que la eficiencia η de un ciclo es:

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

donde Q_1 es el calor que entrega la fuente y Q_2 es el calor que no se aprovecha y T_1 es la temperatura absoluta de la fuente, mientras que T_2 es la del condensador. Lógicamente la última fracción siempre será menor que 1, es decir, la eficiencia es siempre menor al 100% a menos que $T_2 = 0$, pues no se puede convertir en trabajo todo el calor que entrega la fuente, a menos que el condensador estuviera en el cero absoluto y como esto es imposible, aún en una máquina perfecta siempre se tendrá una eficiencia menor que el 100%.

En 1854 Clausius da su interpretación de la segunda ley de la termodinámica e introduce un nuevo concepto que jugará un papel importante a partir de entonces; para la teoría de Carnot el calor

pasa de la fuente al condensador sin alterar su cantidad, en la teoría de Clausius, una parte de ese calor se pierde pues se transforma en trabajo y una cantidad menor es liberada hacia el condensador; es decir:

$$Q_1 = W + Q_2$$

donde Q_1 y Q_2 son, respectivamente, el calor que entrega la fuente y el que no se aprovecha y W es el trabajo que se realiza en la máquina.

Clausius piensa que algo debe permanecer sin cambio en el ciclo perfecto, que lo pueda distinguir de los demás y ello es una de las ecuaciones fundamentales del ciclo:

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

donde T_1 y T_2 son temperaturas absolutas, siendo T_1 la de la fuente y T_2 la del condensador. Si se transponen los términos, se puede obtener:

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

y esta razón del calor que se transfiere a la temperatura que es transferido, es la que Clausius piensa que permanece sin cambio al

final de un ciclo perfecto.

La razón del calor que fluye a la temperatura Clausius la juzga como una cantidad térmica distinta, tan significativa como el calor o la temperatura y le asigna en principio el nombre de transformación-contenido, ya que medirá la capacidad de transformación del calor. Tiempo después utilizó la palabra "entropía" formada por dos palabras griegas que van a significar "cambio o transformación hacia". Esta cantidad se incrementa cuando fluye calor hacia un cuerpo, disminuye cuando el calor sale de el y permanece constante durante los procesos reversibles en los que no hay flujo de calor; así el signo de un ciclo perfecto es que no haya cambios en la entropía total del sistema.

La entropía de un sistema se incrementa siempre que fluye calor de una temperatura alta a una baja y no sufrirá cambio, solamente, cuando el calor fluye entre cuerpos que están a la misma temperatura, que es la condición de Carnot para un ciclo perfecto. Pero como el calor nunca fluye sin que existan diferencias de temperatura, es evidente que todos los procesos naturales, todos los ciclos conocidos, están acompañados por un incremento en la entropía. En cualquier lugar la entropía aumenta y la energía pierde su capacidad de transformarse, de manera que Clausius resume el significado de las dos leyes de la termodinámica, estableciendo que:

- 1) La energía del universo es constante.

- 2) La entropía del universo tiende hacia un máximo.

Esas son la primera y segunda leyes de la termodinámica a ampliadas para que pudieran englobar a toda la naturaleza.

La termodinámica continuará su desarrollo en una Europa que en el terreno político pasa de la guerra de Crimea a la austro-prusiana y después a la franco-prusiana. Mientras tanto, Inglaterra se aferraba al modelo industrial original y surgían nuevas economías industriales, que habrían de originar cambios notables; uno de éstos se refiere al papel que juega la ciencia en la tecnología, que si en la primera parte del siglo XIX puede considerarse secundario, en las últimas décadas vendría a ser fundamental. La revolución del transporte ocasionada por un ferrocarril que evoluciona, impulsa el desarrollo de la tecnología científica y la expansión de la economía. Esta revolución puso al alcance de la industria nuevas materias primas como el caucho y el petróleo, cuyo uso eficaz requiere de procesos técnicos que cuentan con bases científicas. Las nuevas herramientas de la tecnología industrial serán la mecánica y la termodinámica, la acústica y el electromagnetismo, la química orgánica y la inorgánica, mientras dos nuevas industrias, la eléctrica y la química, empiezan a surgir. Los principales adelantos técnicos de la segunda mitad del siglo tienen relaciones estrechas con la ciencia; la

experimentación se vuelve más consistente y se establecen vínculos más estrechos entre las instituciones científicas, la tecnología y la industria.

Algunos historiadores sostienen que aunque las leyes de la Termodinámica hubieran quedado establecidas, no se puede asegurar que su formulación generara cambios mayores en los métodos de producción energética, pues las máquinas de vapor, a su juicio, se continuaron perfeccionando en sus detalles técnicos, con aplicaciones menores de los principios que se habían establecido. Para otros autores que parecen presentar visiones más justas, la contribución de la Termodinámica se continúa a través de la investigación de nuevos procedimientos para incrementar tanto la presión como la expansión en las máquinas de vapor, en la búsqueda de nuevas formas para acoplarlas y en el estudio de las turbinas de vapor; pero también en el desarrollo de las máquinas de combustión interna y en el de las máquinas de refrigeración.

Pero aun si las aportaciones concretas de la termodinámica a la tecnología pudieran minimizarse, los efectos de la introducción del concepto de energía así como el de su conservación y la 2a. Ley de la Termodinámica, ejercieron gran influencia en el desarrollo del pensamiento humano. En el caso de la energía, quizá el puente más sólido entre las teorías abstractas de la ciencia y las necesidades prácticas, porque habría de generar una tendencia que enfrentaría, a finales de siglo, a los seguidores de la mecánica y

los de la energética para tratar de "...determinar el concepto y la misión de la ciencia natural..."¹¹⁰; mientras que la segunda ley, la disipación del calor y la degradación de la energía, en especial las predicciones de Lord Kelvin acerca de la muerte térmica del universo, además de despertar el interés popular, abrieron caminos para la búsqueda de nuevas formas de energía. Mientras que se iban estableciendo nuevos espacios de discusión como la cuestión del origen de la energía del sol, la edad del universo y la posible inconsistencia entre ésta y la teoría de la evolución de Darwin, que fueron planteadas en particular por el mismo Lord Kelvin.

De la larga y complicada historia de los inicios de la termodinámica que aquí se ha tratado de abordar, es posible destacar que quizá ninguna otra disciplina de la física siguiera por un camino tan complicado para alcanzar el éxito; con tantas décadas de descubrimientos, argumentaciones, falsos retornos y reinventiones, con líneas que parecían ser divergentes y que finalmente se reunirán en la gran síntesis de la mecánica estadística, que enlazará a los dominios microscópicos y macroscópicos en la última parte del siglo XIX. Pero de esa historia y de lo que faltó por describir, uno puede darse cuenta que lo único que se puede hacer con el pasado, es estudiarlo.

¹¹⁰ CASSIRER, E. El problema del conocimiento ... IV. 1986, 2a. reimpresión, p. 121.

6.- CONCLUSIONES

Por medio de este trabajo se ha tratado de poner en evidencia ciertas cuestiones relativas a las interacciones entre la Física y la Tecnología, así como su dependencia de los factores económicos y sociales, que se manifiestan a lo largo del periodo en que se gestan los estudios termodinámicos. Algunas de las aportaciones que pueden desprenderse de él ya han sido señaladas en el cuerpo del escrito, pues el valor principal de los argumentos surge en el contexto en el cual se desarrolla la discusión y aunque reflejan las circunstancias del momento y la idiosincrasia de una persona, se basan en el supuesto de que no es posible concluir, en términos precisos, qué fue lo que condujo el progreso de la ciencia en el pasado, ni se puede decir qué intentos tendrán éxito en el futuro. En la investigación se ha intentado mostrar que los periodos de creación de la Física forman parte integrante de los grandes movimientos sociales, económicos, filosóficos y políticos de la historia; así, se señala cómo en el Renacimiento, unido a la substitución de la economía feudal por una nueva economía, se logran avances singulares en la cultura, se reconocen valores prácticos inmediatos a las ciencias exactas y la nueva astronomía recibe un gran impulso, pues se utiliza en la navegación que otorga a la sociedad burguesa el apoyo principal para la conquista del mundo.

A través del análisis crítico de diferentes textos y autores,

se realizó un estudio retrospectivo acerca del surgimiento de la Termodinámica y en la búsqueda de elementos para el trabajo, se fue construyendo un análisis sobre la evolución de la historia de la ciencia que permitió identificar como se fueron gestando algunas de las teorías científicas y como lograron ser introducidas en los diferentes contextos históricos. Así se llegó a reconocer que de una época histórica a otra no cambian solamente los contenidos de la ciencia, sino también las maneras de estudiar a la naturaleza, las formas particulares de pensamiento, así como las concepciones mismas acerca de la ciencia; por lo que se puede concluir que el estudio exclusivo de los grandes genios o el de las epopeyas científicas de la historia, son sólo visiones parciales de una realidad compleja. Del contenido del trabajo también se puede desprender que al hacer referencia a las relaciones entre la ciencia y la sociedad, no se alude a una correspondencia unilateral ni rígida y así como se reconoce que la ciencia tiene sus mecanismos propios de desarrollo y que su investigación siempre parte de antecedentes científicos, también se piensa que esto no excluye que se puedan internalizar en ella las diferentes demandas y concepciones sociales.

Se ha intentado ofrecer un panorama de la Física diferente al que se encuentra en los libros de texto, donde generalmente se le presenta como un conjunto compacto de conocimientos que definen verdades ciertas e inalterables; en ellas se registran los logros de la ciencia, pero los fracasos, en general, pasan completamente

inadvertidos. Los estudios históricos tienen espacios para los fracasos y los errores, pues dependen de las circunstancias del momento y son por lo tanto fenómenos históricos, que pueden quedar al descubierto a través de estos enfoques que son por lo regular de un carácter más crítico. También se ha pretendido presentar a la Física como una actividad humana, en continua interacción con todas las demás actividades del hombre, la cual cambia al desarrollarse y extenderse a regiones nuevas e inexploradas y al reelaborar continuamente sus resultados previos, con el uso constante de una conciencia crítica creciente. Se ofrecieron evidencias de que la Física ha sido un agente de cambios sociales que, como parte del mismo proceso, ha sufrido transformaciones ella misma; se señalaron también épocas y lugares en donde las condiciones políticas y económicas fueron especialmente favorables para el desarrollo de la investigación, en los cuales se rompieron las distinciones de clase, se permitió el estímulo recíproco entre el científico y el hombre práctico y se fue difundiendo la ciencia hasta tomar la forma de un saber práctico tradicional.

Se ha intentado realizar la investigación bajo la guía de las teorías de T. S. Kuhn, para tratar de identificar en la historia los períodos que en ella se determinan y contrastar los hechos históricos con la teoría, logrando reconocer la concordancia que se esperaba. Al analizar el surgimiento y la evolución de la organización capitalista, se han localizado los vínculos que ella establece con el desarrollo de los sistemas de pensamiento y con el

avance de la ciencia, logrando poner en evidencia que el surgimiento de la ciencia moderna coincide con el triunfo de la burguesía. Utilizando como línea conductora el estudio de las máquinas se ha tratado de mostrar las intermitencias producidas a lo largo del tiempo en el estudio de la Termodinámica, ensayando explicaciones para el abandono en que parecieran quedarse las líneas de trabajo que podían contribuir a acelerar su desarrollo y se han rastreado las causas que podían influir en la aparición de esos obstáculos. Del proceso histórico estudiado surge un esquema de relaciones complejas y no necesariamente jerárquicas con respecto a los vínculos entre la ciencia y la tecnología, que se opone a las concepciones tradicionales relativas a la subordinación de la segunda. Así se llega a concluir que las grandes transformaciones que caracterizan a la Revolución Industrial: combustibles, materiales, fuerza motriz o mecanismos, son más bien productos del ingenio de los obreros y los técnicos, a través del impulso de los factores económicos.

El estudio de la evolución de la máquina de vapor y su incorporación a la Revolución Industrial permitió el uso de nuevas formas de energía que sirvieron para acelerar el proceso revolucionario y para reconocer que el triunfo económico de los inventos y la creciente apreciación social de los inventores, promovió la investigación en campos diferentes para afrontar nuevos retos y necesidades. La progresiva complejidad de los conocimientos, que ineludiblemente habían de ser comprendidos por

quienes deseaban triunfar en el proceso, promovió una simbiosis entre ciencia y técnica que paulatinamente hizo crecer el papel determinante de la primera. Con la intervención de la generación de ingenieros franceses se establecieron nuevos retos y nuevas investigaciones; el triunfo del vapor en el transporte y la navegación se extendió por todo el mundo y la industrialización se instauró en distintos países, mientras el desarrollo en la ciencia, la ingeniería y la filosofía sugerían las nuevas ideas acerca de la energía que habían de consolidar a la Termodinámica.

En el terreno educativo quizá este trabajo no cumpla las expectativas esbozadas al diseñar la investigación, pero ante el objetivo inicial de concluir con el programa de un curso, se ha planteado ahora un producto quizá más modesto pero que cuadra mejor con quien se dedica al estudio de la historia, que es la de entregar una visión particular del surgimiento de la Termodinámica que pudiera servir de motivación para un estudio más amplio y mejor. El producto puede considerarse un material de apoyo para quien estudia la Termodinámica, disciplina que contiene muchos aspectos que no son intuitivos y son problemáticos para los alumnos, especialmente en los niveles introductorios. Gracias a que el enfoque permite establecer relaciones específicas con situaciones conocidas por los alumnos, podría ser usado como una metodología que los condujera a un aprendizaje significativo y no la simple memorización de nombres, fechas y paradigmas, ya que al despertar en ellos el espíritu de búsqueda los conocimientos no

sólo se consigue desarrollar su pensamiento lógico, sino que contribuye a la asimilación profunda de los elementos de la ciencia. Finalmente, la adopción de un enfoque de este tipo podría ser un valioso apoyo para desarrollar el espíritu crítico de los alumnos y para promover en ellos las actitudes del investigador, pues todo tema o asunto se convierte en un problema a resolver si se apela a los diferentes recursos que proporciona el proceso histórico evolutivo.

BIBLIOGRAFIA.

- 1.- ALBA Andrade, Fernando, El desarrollo de la tecnología. La aportación de la Física, México, F.C.E., 1987, La ciencia desde México # 23.
- 2.- ARNALDEZ, R., y otros, Historia general de la ciencia, La Edad Media, España, Editorial Orbis S. A., 1988.
- 3.- ARONS, Arnold B., Evolución de los conceptos de la Física, México, Edit. F. Trillas S. A., 1970.
- 4.- ASHTON, T. S., La revolución industrial, 11a. reimpresión, México, F.C.E., 1974, Breviarios 25.
- 5.- BABINI, José, El siglo de las luces: ciencia y técnica, Buenos Aires, Centro Editor de América Latina S. A., 1971, Biblioteca fundamental del hombre moderno # 10.
- 6.- BACHELARD, Gaston, La formación del espíritu científico, contribución a un psicoanálisis del conocimiento objetivo, 8a. edic., México, Siglo XXI editores S. A., 1979.
- 7.- BASALLA, George, La evolución de la tecnología, México, Edit. Grijalbo S. A., 1991, Los noventa 83.
- 8.- BECK, Robert, Historia social de la educación, México, UTEHA, 1965.
- 9.- BERNAL, J. D., Ciencia e industria en el siglo XIX, Barcelona, Edic. Martinez Roca S. A., 1973.
- 10.- BERNAL, J. D. y otros, La ciencia de la ciencia, México, Edit. Grijalbo S. A., 1968, Colección Dina.
- 11.- BERNAL, J. D., La ciencia en la historia, 3a. edic., México, Edit. Nueva Imagen S. A., 1979.
- 12.- BERNAL, J. D., La ciencia en nuestro tiempo, 2a. edic., México, Editorial Nueva Imagen S. A., 1979.
- 13.- BLACKWOOD, O. H., Kelly, W. C. y Bell, R. M., General Physics, 3a. edic., John Wiley & Sons. Inc., 1955.
- 14.- BLANCHE, Robert, El método experimental y la filosofía de la Física, 1a. reimpresión, México, F.C.E., 1975, Breviarios 223.
- 15.- BRUUN, Geoffrey, La Europa del siglo XIX (1815-1914), 9a. reimpresión, México, F.C.E., 1993, Breviarios 172.

- 16.- BUTTERFIELD, Herbert, *The origins of modern science 1300-1800*, U.S.A., Collier Books, 1962.
- 17.- CARNOT, Sadi, *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas aptas para desarrollar esa potencia*, México, Consejo Editorial del I. P. N., 1976.
- 18.- CASSIRER, Ernst, *El problema del conocimiento, en la filosofía y en la ciencia modernas I*, 4a. reimpresión, México, F.C.E., 1986.
- 19.- CASSIRER, Ernst, *El problema del conocimiento, en la filosofía y en la ciencia modernas II*, 3a. reimpresión, México, F. C. E., 1986.
- 20.- CASSIRER, Ernst, *El problema del conocimiento, en la filosofía y en la ciencia modernas IV*, 4a. reimpresión, México, F.C.E., 1986.
- 21.- DE GORTARI, Eli, *El método dialéctico*, México, Edit. Grijalbo S. A., 1970, Colección 70.
- 22.- DERRY, T.K. y Williams, T. I., *Historia de la tecnología, desde la antigüedad hasta 1750*, 8a. edic., México Siglo XXI editores S. A., 1986.
- 23.- DERRY, T. K. y Williams, T. I., *Historia de la tecnología, desde 1750 hasta 1900 (1)*, 8a. Edic., México, Siglo XXI editores S. A., 1986.
- 24.- DILTHEY, Wilhelm, *Historia de la filosofía*, 2a. edición, México, F.C.E., 1979.
- 25.- ESCUDERO, Antonio, *La revolución industrial*, México, Red Editorial Iberoamericana, 1990, Biblioteca básica de Historia.
- 26.- FEDOSEEV, P. N., redactor general de *Metodología del conocimiento científico*, 2a. Edic., México, Presencia latinoamericana S. A., 1985.
- 27.- FEYNMAN, Richard P. y otros, *Física, Volumen I: Mecánica, radiación y calor*, México, SITESA, 1987.
- 28.- FIRESTONE Jr., Harvey S. *Man on the move, the story of transportation*, U.S.A. Pennant student edition, 1967.
- 29.- GAMOW, George, *Biografía de la Física*, España, Salvat Editores S. A., 1971.
- 30.- GARCIA-COLIN S., Leopoldo, *De la máquina de vapor al cero absoluto (Calor y Entropía)*, México, F.C.E., 1986, La ciencia desde México 5.

- 31.- GINSBURG, H. y Oppen, S. Piaget y la teoría del desarrollo intelectual, México, Prentice-Hall Hispanoamericana S. A., 1986.
- 32.- GOODLAD, J. I., La ciencia integrada, la formación docente y el mejoramiento de la enseñanza, en: Nuevas Tendencias en la Enseñanza Integrada de las Ciencias, Montevideo, UNESCO, 1977.
- 33.- GOMEZ, Germán R., La enseñanza de las ciencias, su enfoque histórico evolutivo, Argentina, Angel Estrada y Cia. 1969.
- 34.- HACKING, Ian, Revoluciones Científicas, México, F.C.E., 1985, Breviarios 409.
- 35.- HALLIDAY, D. y Resnick, R., Fundamentos de Física, 5a. impresión, México, C. E. C. S. A., 1984.
- 36.- HEISENBERG, Werner, La imagen de la naturaleza en la Física actual, España, Edic., Orbis S. A., 1985, Biblioteca de divulgación científica.
- 37.- HOBBSBAMM, Eric J., En torno a los orígenes de la Revolución Industrial, 23a. edic., México, Siglo XXI editores S. A., 1993.
- 38.- HOBBSBAMM, Eric J., Industria e imperio, una historia económica de Gran Bretaña desde 1750, 3a. Edic., España, Edit. Ariel S. A., 1988.
- 39.- HOLTON, Gerald, La imaginación científica, 2a. reimpresión, México, F.C.E., 1989.
- 40.- HOLTON Gerard y otros, directores del Harvard Project Physics, Reader, Unit 3 The triumph of Mechanics, U.S.A., Holt Rinehart and Winston Inc., 1971.
- 41.- HOLTON, Gerard y otros, directores del Harvard Project Physics, Text, U.S.A., Holt Rinehart and Winston Inc., 1971.
- 42.- JEANS, James, Historia de la Física, hasta mediados del siglo XX, 4a. reimpresión, México, F.C.E., 1986, Breviarios 84.
- 43.- JONES, Graham, Ciencia y Tecnología en los países en desarrollo, México, F.C.E., 1982, 1a. reimpresión.
- 44.- KOYRE, Alexandre, Estudios de historia del pensamiento científico, 6a. edic., México, Siglo XXI editores S. A., 1984.
- 45.- KUHN, T. S., La estructura de las revoluciones científicas, 6a. reimpresión, México, F.C.E., 1985, Breviarios 213.
- 46.- KUHN, Thomas S., La revolución copernicana Volúmenes I y II, Ediciones Orbis S. A., 1978.

- 47.- KUHN, Thomas S., *La Tensión Esencial, Estudios selectos sobre la tradición y el cambio en el ámbito de la ciencia*, México, F.C.E., 1982.
- 48.- LEVI, Enzo, *El agua según la ciencia*, Mexico Ediciones Castell Mexicana S. A., 1989.
- 49.- MACORINI, Edgardo, Director de la Enciclopedia Mondadori delle Scienze, *Monografía Strumenti Scientifici del Museo di Storia della Scienza di Firenze, Italia*, Arnoldo Mondadori Edit., 1968.
- 50.- MARCH, Robert H., *Física para poetas*, México, Siglo XXI Editores S. A., 1977.
- 51.- MASON, Stephen F., *Historia de las ciencias. 4. La ciencia del siglo XIX*, México, Alianza Editorial Mexicana, 1988.
- 52.- MIKULINSKI, S., redactor general de Investigaciones soviéticas sobre historia de la ciencia, Moscú, "Ciencias sociales contemporáneas" Academia de Ciencias de la URSS, 1979.
- 53.- MOULTON, F. R. y Schiffers, J. J., *Autobiografía de la ciencia*, 2a. edic. México, F.C.E., 1986.
- 54.- MOYER, Wayne A., *Biophysical science activities for the high school*, U.S.A., Parker Publishing Co. Inc., 1972.
- 55.- NIDDITCH, P. H., compilador de *Filosofía de la ciencia*, México, F.C.E., 1975, Breviarios 254.
- 56.- PEREZ Rojas, R. Antonio, compilador de *Filosofía de la ciencia (Antología)*, 2a. edic., México, Edic. Quinto Sol S. A., 1984.
- 57.- PEREZ P., Rafael, *La Enseñanza de las Ciencias, en Universidad de México*, Revista de la UNAM, Las Ciencias en la UNAM, México, UNAM, Enero-Febrero 1991.
- 58.- PIAGET, Jean, *Volumen 1. Naturaleza y métodos de la epistemología*, México, Editorial Paidós Mexicana S. A., 1985, 1a. reimpresión, *Tratado de lógica y conocimiento científico*.
- 59.- PIAGET, Jean y García, R., *Psicogénesis e historia de la ciencia*, 2a. Edic., México, Siglo XXI Editores S. A., 1984.
- 60.- PIAGET, Jean, *Psicología y epistemología*, México, Edit. Artemisa S. A., 1986, *Obras maestras del pensamiento contemporáneo # 50*.
- 61.- PIAGET, Jean, *La explicación en las ciencias*, España, Edic. Martínez Roca S. A., 1977.

- 62.- PLUM, Werner, *Revolución Industrial*, Colombia, Ediciones Internacionales S. A., 1978.
- 63.- REICHENBACH, Hans, *Objetivos y métodos del conocimiento físico*, 1a. reimpression, México, F.C.E., 1983, Colección popular 244.
- 64.- ROJAS G., Manuel, *Introducción a la historia de la ciencia*, México, A. G. T. editor S. A., 1944.
- 65.- ROLLERI, José L., compilador de *Estructura y desarrollo de las teorías científicas*, México, U.N.A.M., 1986.
- 66.- SALDAÑA, Juan J., *Introducción a la teoría de la historia de las ciencias*, 2a. edic., México, U.N.A.M., 1989.
- 67.- SARTON, George, *Ensayos de historia de las ciencias*, México, UTEHA, 1962.
- 68.- SNOW, C. P., cit. por French, A. P., *Fifty years of physics education*, en: *Physics Today*, November 1981.
- 69.- SONNATI, Stefano, *Ciencia y Científicos en la sociedad burguesa*, 2a. edic., España, Icaria edit. S. A., 1984.
- 70.- STROTHER, G. K., *Physics, with applications in life sciences*, U.S.A., Houghton Mifflin Co., 1977.
- 71.- THUILLIER, Pierre, *De Arquímedes a Einstein, Las caras ocultas de la invención científica*, México, Alianza Editorial S. A., 1991, Los noventa # 78.
- 72.- TREBESCHI, Alberto, *Manual de historia del pensamiento científico*, España, Editorial Avance S. A., 1977.
- 73.- UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO, *Universidad de México, Revista de la Universidad Nacional Autónoma de México, Las ciencias en la UNAM*, México, UNAM, Enero-Febrero, 1991.
- 74.- VILLAS T., Siro, *Las claves de la Revolución Industrial 1733-1914*. España, Editorial Planeta S. A., 1990.
- 75.- VOLTAIRE, *El siglo de Luis XIV, II*, España, Ediciones Orbis S. A., 1986.
- 76.- ZEMANSKY, M. W., *Calor y termodinámica*, España, Aguilar S. A., Ediciones, 1961.