

K
IM0235

13

CUADERNOS DE

FORMACIÓN AVANZADA

MAESTRÍA EN GESTIÓN TECNOLÓGICA
GRUPO DE POLÍTICA Y GESTIÓN TECNOLÓGICA

GABRIEL POVEDA RAMOS

**EL CALOR: CIENCIA,
TECNOLOGÍA E HISTORIA**



**Universidad
Pontificia
Bolivariana**

**ESCUELA DE
FORMACIÓN AVANZADA**

9 010308022

Cursos de Formación Avanzada
Maestría en Gestión Tecnológica
Centro de Práctica y Gestión Tecnológica

Gabriel Poveda Ramos

EL CALOR: CIENCIA,
TECNOLOGÍA E HISTORIA



BIBLIOTECA

Universidad
Pontificia
Bolivariana

K
IM0235

ARTICULISTA

Cuadernos de Formación Avanzada
Maestría en Gestión Tecnológica
Grupo de Política y Gestión Tecnológica

- Ingeniero Químico, UPB Medellín
- Ingeniero Electrónico, UPB Medellín
- Electrocerca National Schools, California
- Tecnología Textil, Instituto Textil de Lodz, Polonia
- Magister en Matemáticas Aplicadas, Universidad Nacional, Medellín
- Ingeniero Militar, Escuela Militar de Colombia, Bogotá
- Especialista en Economía e Integración en América Latina, Universidad
- Doctor Honoris Causa en Ingeniería, UPB

Gabriel Poveda Ramos

EL CALOR: CIENCIA,
TECNOLOGÍA E HISTORIA



BIBLIOTECA

Cuaderno No. 13



K
IM0235

ARTICULISTA

Cuadernos de Formación Avanzada
Maestría en Gestión Tecnológica
Grupo de Política y Gestión Tecnológica

- Ingeniería Química, UPB Medellín
- Ingeniería Eléctrica, UPB Medellín
- Electrónica Industrial, Universidad de Caldas
- Tecnología Textil, Instituto Tecnológico de Loda, Polonia
- Magister en Mecanismos Aplicados, Universidad Nacional, Medellín
- Ingeniería Metalúrgica, Escuela Técnica de Colombia, Bogotá
- Especialización en Mecánica e Ingeniería en América Latina, Buenos Aires
- Doctorado en Ingeniería, Universidad de Chile

Gabriel Poveda Ramos

EL CALOR: CIENCIA,
TECNOLOGÍA E HISTORIA



BIBLIOTECA

Cuaderno No. 13



ARTICULISTA

Gabriel Poveda Ramos

- Ingeniero Químico. UPB Medellín
- Ingeniero Electricista. UPB Medellín
- Electrotécnica National Schools. California
- Tecnología Textil. Instituto Textil de Lodz. Polonia
- Magíster en Matemáticas Aplicadas. Universidad Nacional. Medellín
- Ingeniero Militar. Escuela Militar de Colombia. Bogotá
- Especialista en Economía e Integración en América Latina. Buenos Aires
- Doctor Honoris Causa en Ingeniería. UPB.

© Editorial Universidad Pontificia Bolivariana, 2002

Colección de Avanzada
Escuela de Formación Avanzada

El calor: Ciencia, Tecnología e Historia
Primera edición, 2002

Edición:
Escuela de Formación Avanzada
Grupo de Política y Gestión Tecnológica

Rector:
Mons. Gonzalo Restrepo Restrepo

ISSN: 0124-7557

Impresión:
Editorial Universidad Pontificia Bolivariana
E-mail: editupb@logos.upb.edu.co
Telefax: 415 9141 - A.A.: 56006
Medellín, Colombia - 2001



BIBLIOTECA

Gabriel Poveda Ramos

- Ingeniero Químico UPB Medellín
- Ingeniero Electricista UPB Medellín
- Electrónica National School, California
- Tecnología Textil, Instituto Textil de Łódź, Polonia
- Master en Matemáticas Aplicadas, Universidad Nacional, Medellín
- Ingeniero Militar, Escuela Militar de Colombia, Bogotá
- Especialista en Economía e Ingeniería en América Latina, Buenos Aires
- Doctor Honoris Causa en Ingeniería, UPB

Introducción 7

Antes de nuestra Era 9

Del año 1 d.C. al 1600 22

La revolución científica y técnica del siglo XVII 30

El siglo de la ilustración 38

La revolución termomecánica de Watt 49

El vertiginoso siglo XIX antes de Joule 61

La segunda mitad del siglo XIX 76

Ferrocarriles y fundiciones en Colombia siglo XIX 100

Los motores de explosión y su ingreso a Colombia 102

El siglo XX antes de la II guerra mundial 110

Comportamiento de los consumos de fuentes primarias de energía en Estados Unidos (1776 - 1976) 118

Unidades de energía 124

Termociencias y termotecnologías en Colombia s.XX 135

Bibliografía 143

Índice onomástico 146

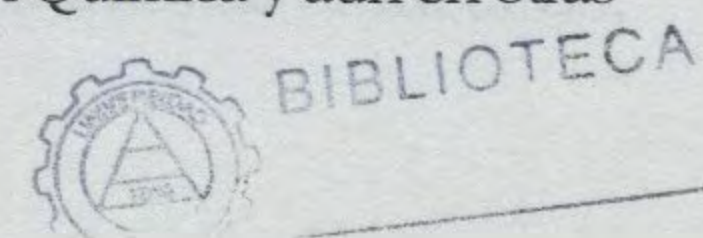


BIBLIOTECA

INTRODUCCIÓN

Hace varios años que este autor ha venido estudiando la historia de la ciencia en el mundo para entender la historia de la tecnología; y estudiando la historia de la tecnología en el mundo, para entender por qué y cómo vinieron ésta y aquélla a nuestro país, Colombia. Este trabajo ha sido muy dispendioso pero se ha cumplido sin tropezar con grandes vacíos de información, excepto en el caso del más antiguo de los saberes tecnológicos del hombre, que es el saber (empírico y científico) acerca del calor y de las muchas técnicas que nuestros congéneres pusieron por obra para utilizar la energía térmica en multitud de usos y aplicaciones. En este campo, el autor no ha podido encontrar ninguna exposición, unificada y completa, sobre la historia del desarrollo del conocimiento del calor (que debería llamarse la Termognosia), y -menos aún- sobre la historia de la tecnología del calor (que debería llamarse la Termotecnología). Dicha exposición (si la hubiera) sería el primer paso obligado para hacer una metaciencia del calor y una metatecnología de la energía térmica. Y en el caso de Colombia, cuya evolución histórica en materia de Ciencia y Tecnología está aún muy poco estudiada, lo que menos se conoce en esta materia es el proceso pentacentenario de cómo hemos ido conociendo e incorporando ese saber y esas técnicas. Por ejemplo, lo único que conocemos de los indígenas precolombinos en esta materia es que sabían prender fuego frotando trozos de madera, y que lo usaban solamente para iluminarse en las noches y para cocinar alimentos, tal como lo hacían los Australopitecos, hace 2 y medio millones de años o quizás mucho más.

Este documento se propone, pues, exponer en un solo texto, y de manera muy resumida, esta historia tan vieja como lo es la del Homo habilis en el Viejo Mundo y como lo es la de los primeros Homos sapiens que vivieron en el Nuevo Mundo. Está proyectado para cumplir una labor fundamentalmente didáctica, para alumnos universitarios que estudien en su currículo algunas de las asignaturas de Física del Calor, Fisicoquímica, Termodinámica, Termoquímica, Máquinas Térmicas, Materia y Calor u otras disciplinas análogas. También puede servir como guía de un seminario sobre Historia de la Ciencia y la Tecnología, o sobre Desarrollo Tecnológico en Colombia (Si algún día nuestras universidades se interesan en esto último). Pero deseamos que este trabajo sea útil también para profesionales y técnicos curiosos o cultos, ya graduados en alguna carrera de Ingeniería, en Física, en Química y aún en otras



INDICE

Introducción 7

Antes de nuestra Era 9

Del año 1 d.C. al 1600 23

La revolución científica y técnica del siglo XVII 30

El siglo de la iluminación 38

La revolución termodinámica de Watt 49

El siglo XIX antes de Joule 63

La segunda mitad del siglo XIX 76

Revoluciones y fundiciones en Colombia siglo XIX 100

Los motores de explosión y su ingreso a Colombia 102

El siglo XX antes de la II guerra mundial 110

Comportamiento de los combustibles de líneas primarias 118

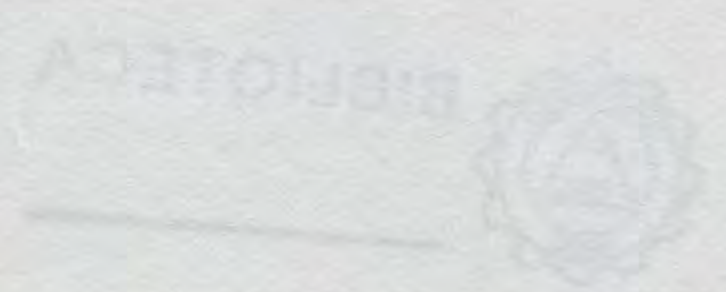
de energía en Estados Unidos (1776 - 1976) 124

Unidades de energía 134

Termodinámica y termotecnología en Colombia siglo XX 135

Referencias 143

Índice cronológico 146



profesiones. De todas maneras, para leer este trabajo, es necesario poseer los conocimientos elementales de Física y de Química del bachillerato, y de los primeros semestres de una Ingeniería, Medicina, Agronomía, u otra carrera universitaria semejante, que sea usual en Colombia o en Hispanoamérica.

Nuestro libro no tiene la pretensión de ser un libro erudito ni "culto". Por eso las referencias dentro del texto o la bibliografía son pocas y parcas. Por eso, también, hemos omitido citas y referencias de pie de página. De otra manera, la lectura hubiera resultado muy pesada y muy pedante. Porque la redacción de este documento ha requerido al autor el trabajo de leer íntegros, y consultar o estudiar en detalle muchos libros y artículos de revistas. Las más útiles de estas fuentes están reseñadas, al final, en la bibliografía.

ANTES DE NUESTRA ERA

Desde que los seres humanos existen en la tierra, ellos han percibido en su piel las sensaciones de calor y frío. El calor tórrido de mediodía en un desierto; el frío gélido de una noche estrellada a la madrugada; la brisa cálida de una tarde de verano; la nieve congelada en un piso invernal; el agua refrescante de un riachuelo en la selva cálida. Estas y muchas otras sensaciones naturales o creadas por el mismo hombre pusieron en todos los idiomas del mundo desde siempre las palabras "calor", "caliente", "tibio", "fresco" y otras que indican que su sentido del tacto le dio al hombre muy tempranamente la noción de lo que hoy llamamos "temperatura". Parece ser que todos los animales superiores también perciben las experiencias de "lo frío" y "lo cálido". A veces les ocurren como experiencia grata; y a veces como experiencia que puede llegar a ser, inclusive, muy ingrata, como es una quemadura.

Hoy sabemos que hace unos 750.000 años no existía aún nuestra especie, la del *Homo sapiens sapiens*. Existía el *Homo erectus*, otro homínido anterior, que, a juzgar por los hallazgos de sus cuevas en varias partes del mundo, (como la cueva de L'Escafe, cerca a Marsella, Francia) ya usaba el fuego. Sabía cómo recogerlo en incendios ocasionales de vegetación causados accidentalmente por rayos; cómo transportarlo a distancia (seguramente como leños ardiendo); cómo propagarlo; cómo usarlo para iluminar sus noches y combatir el frío; cómo lanzarlo a las fieras que lo perseguían; cómo mantener un vivac; cómo apagarlo, y cómo avivarlo. El *Homo sapiens neanderthalensis*, ya usaba, hacia los 79.000 años antes de Cristo, algunas formas sencillas de lámparas contenidas en cuencos de piedra, quizá alimentadas con grasa animal, y empleando hierba o musgo secos como mecha para sostener la pequeña llama que iluminaba precariamente sus cavernas (Según Hellemans y Brunch en su obra reseñada en la bibliografía).

El *Homo sapiens sapiens* (nuestra especie) existe quizás desde hace más de 90.000 años, por lo que hoy se sabe. Conoció siempre el fuego y es indudable que lo usó para lo que ya hacían con él sus ancestros; y que le dió pronto nuevos empleos: para cocinar sus alimentos; derretir grasa de animales; endurecer trozos de madera; ahuecar troncos de árboles y hacer así canoas para navegar en ríos y lagos; y también (lamentablemente) para atacar a otras tribus paleolíticas. Entre las fechas de 30.000 a 25.000 años antes de Cristo (a.C.),

en territorio de la actual República Checa, aparecen piezas rudimentarias de cerámica quemadas, si bien las vasijas de arcilla cocida sólo las conocemos desde 7.000 u 8.000 años a.C. Y también, ya hace 20.000 años, el hombre fabricaba habitualmente uno de sus primeros implementos domésticos: las lámparas en cuencos de piedra que acabamos de describir. Era su primera actividad industrial basada en el fuego o dedicada a usarlo.

Los primeros animales fueron domesticados por el hombre cerca de unos 12.000 años a.C. El primero fue el perro. Después lo fueron las cabras. Hacia el 8.000 a.C. los hombres hicieron los primeros cultivos agrícolas en la fértil tierra de Mesopotamia y en las de algunos otros valles aluviales del Cercano Oriente o del Medio Oriente. Entonces la expansión de la agricultura dió lugar a nuevos usos del fuego, como el de quemar la vegetación natural de vastos espacios naturales para usar la tierra en nuevas siembras; y el de aguzar puntas de bastones que eran luego usados para roturar el suelo y para sembrar semillas. Poco después, cuando la humanidad comenzó a construir casas permanentes, el hombre se dió cuenta de que el calor del sol secaba y endurecía el barro de las arcillas húmedas hasta darles la consistencia de una piedra; y con ladrillos de esta arcilla secada al sol empezó a hacer sus pequeñas viviendas. Después secó esos ladrillos en hornos o fogones muy rudimentarios. Fue en esta forma como los seres humanos crearon la alfarería, que fue su primera industria manufacturera y para la cual necesitaron usar grandes cantidades de calor y de combustible. Aquellos hornos rudimentarios fueron los primeros equipos industriales fabricados por el hombre; y con el tiempo fueron creciendo, mejorando y aumentando en su tamaño y en número, para producir más y mejores artículos de cerámica, de manera permanente, y como parte integrante e importante de su cultura y de su economía.

Alrededor del año 7.000 a.C. nuestros antepasados empezaron a producir vasijas cerámicas en España, Mesopotamia, Asia Menor y otros sitios. Las hacían con arcillas, formándolas a mano o en pequeños tornos; luego las apilaban en el suelo y las rodeaban de leña seca que encerraban con piedras. Después la hacían arder durante uno a dos días, según la cantidad de piezas para producir. De la misma manera hacían ladrillos quemados, los cuales eran mucho más duros que los que solamente eran secados al sol. La cerámica requería grandes cantidades de calor, que sus fabricantes suministraban quemando madera natural. La ciudad de Jericó, en Palestina, una de las más antiguas que aún subsisten en el planeta, era en ese momento una aldea neolítica donde vivían unas 2.500

personas; y sus casas eran construídas con ladrillos endurecidos al fuego. Fueron quizás esas sociedades neolíticas las que inventaron y usaron activamente los primeros dispositivos rudimentarios de madera para producir fuego por fricción de una pieza contra otra.

Hacia el año 6.000 a.C. los hombres empezaron a domesticar vacas y toros en Egipto, Mesopotamia y Asia Menor. Además de la leche y la carne, el ganado vacuno proporcionaba a esas sociedades la energía necesaria para arrastrar arados y para cargar fardos. Esa fue la primera fuente de energía que el hombre usó para atender sus necesidades sociales, diferente a la de su propio cuerpo. Siglo más o siglo menos, algún pueblo del Asia Central domesticó el onagro y su pariente cercano, el asno, para usarlos como fuente de trabajo mecánico.

El hombre descubrió el cobre en el Cercano Oriente hacia el año 4.500 a.C., primero como trozos de metal en estado nativo, como todavía se encuentran en algunos sitios. Luego, muy probablemente, algunos pastores o viajeros descubrieron que al apagar una hoguera que había estado encendida con leña encima de ciertos minerales naturales, quedaban trozos del mismo metal. Hacia el año 4.000 en Egipto ya se extraían regularmente los minerales de cobre. Así mismo identificaron esos minerales (malaquita, calcopirita y cuprita, los llamamos hoy); construyeron hornos más grandes (primero en el suelo, después elevados); los encendieron con leña o con carbón de leña; y cargándolos con esos minerales, produjeron cobre metálico en escala industrial. Esos hornos eran de arcilla y piedra, medían de uno a tres metros de largo; más o menos 1.50 metros de ancho, y 1.0 a 1.2 metros de alto. Era la segunda industria fabril de los hombres y, como la cerámica, también requería grandes cantidades de carbón y de combustible. Nació así la tecnología de la metalurgia y con ella nació la Edad del Cobre, primera entre las edades que hoy llamamos Edad de los metales.

A mediados del cuarto milenio a.C. (Hacia el 3.600 a.C.), en Egipto, en Mesopotamia y quizá también en otras áreas de Asia, se comenzó a producir bronce, a partir de minerales de cobre mezclados con casiterita (óxido de estaño). Muy pronto el nuevo metal se propagó a otras culturas y a otras regiones. Se producía en vasijas y en moldes cerámicos colocados al fuego vivo de carbón vegetal, dentro de hornos que eran abiertos al principio, y cerrados después, y que eran esencialmente iguales a los hornos para obtener el cobre. Avanzaba así la industria metalúrgica, que ha sido y sigue siendo otra gran consumidora

de calor y de combustibles. El bronce sería el metal más usado hasta las épocas del 1.400 a.C., cuando los hititas iban a encontrar el hierro y el modo de producirlo. No sobra recordar que desde el 3.500 ó el 3.001 los egipcios producían hierro pero en muy pequeñas cantidades, en pequeños hornos enterrados, con mucha dificultad y solo para elaborar objetos ornamentales “muy lujosos”.

El uso del fuego para iluminar espacios y viviendas logró un nuevo avance cuando dentro del período del 3.500 al 3.000 a.C. los egipcios inventaron las bujías o velas, hechas con un cuerpo combustible de grasa animal y con una mecha de fibra de lino o de papiro seca. Pronto ese invento tan útil se extendió a los otros pueblos de la Cuna de la Civilización.

Cuando los mismos egipcios construyeron sus primeras pirámides, en el tercer milenio antes de Cristo, ya sabían que el calor dilata los sólidos y los resquebraja. Para separar grandes bloques de caliza de la roca madre en las canteras, procedían así: encendían una fogata encima de la piedra con el fin de calentarla y una vez caliente le rociaban agua fría, lo que la agrietaba. En las grietas por donde querían cortar, insertaban cuñas de madera seca que humedecían para que se hincharan y en esta forma reventaban la roca por las líneas deseadas. De esta manera los picapedreros egipcios separaban bloques de varias toneladas de peso, que luego llevaban por el río Nilo al sitio de la pirámide que construían.

Poco tiempo después, alrededor del 2.500 a.C. los mismos egipcios habían inventado el vidrio, lo estaban usando y lo estaban fabricando, aunque fuera en pequeñas cantidades. Lo hacían a partir de cuarzo, de carbonato de sodio nativo (o “natrón”, como lo llamaban y que encontraban en los bordes del desierto), y de roca caliza. Lo hacían fundiendo los ingredientes en crisoles cerámicos encerrados en hornos análogos a los de los alfareros, pero a mayor temperatura. Luego, hacia el año de 1.560 a.C. los egipcios mejoraron la operación de sus hornos de vidrio dotándolos de fuelles, lo cual muestra que ya entendían, en forma intuitiva y empírica pero efectiva, la importancia primordial de la ventilación abundante para avivar el fuego. Lo mismo estaban haciendo ya en sus hornos metalúrgicos.

En la misma época (entre el 2.500 y el 2.400 a.C.) los caldeos, en la ciudad de Ur (Mesopotamia), ya sabían soldar láminas de oro martillándolas en caliente, una contra otra. Y muy lejos, en América Central, algunas culturas muy

primitivas ya hacían vasijas de arcilla quemada en hornos a unos 900°C de temperatura.

Fue en la meseta iraníana, unos 2.000 años a.C. donde sus habitantes domesticaron y aprendieron a montar el caballo. Desde allí y desde entonces este animal ha sido una gran fuente de energía, una máquina de guerra y un vehículo versátil y ubicuo de la humanidad.

En el norte de Asia Menor (hoy Turquía) fue donde la tribu llamada de los Chalibdes, en el imperio de los hititas, a mediados del segundo milenio anterior a Cristo, descubrió la manera de producir hierro metálico primario a partir de sus minerales (los óxidos llamados hoy hematita y limonita), agregándoles caliza como fundente y encendiendo la masa con carbón de leña el cual actúa como combustible calefactor y como reductor químico de los óxidos. Lo hacían en pequeños huecos excavados en el suelo. Los Chalibdes lo encontraron seguramente de manera fortuita. Jamás hubieran podido explicar su procedimiento de modo científico. Pero a ellos se les debe el nacimiento de una de las más grandes e importantes industrias que ha tenido la humanidad. Fue también, siempre, una de las que ha consumido más energía térmica a lo largo de la historia tecnológica y cultural de la humanidad. En una hornada de varias horas, quemando carbón de madera, y a temperatura superior a la fusión del hierro (1275°C), se obtenía un bloque o lupa de algunos kilos de arrabio (hierro muy impuro) que después, martillando y recalentando repetidamente, los herreros convertían en armas, herramientas y vasijas. Los Hititas guardaron celosamente el secreto del hierro, pero hacia el siglo X a.C. los asirios y otros pueblos vecinos comenzaron a usarlo para su armamento, por la inmensa superioridad en resistencia y dureza de este metal sobre el bronce y sobre el cobre. Nació así y creció con fuerza la Edad del Hierro de la historia. Y con el paso de los siglos aumentó el consumo de hierro entre los pueblos, creció su producción, y los hornos para fabricarlo mejoraron, así como creció el consumo de las materias primas y del carbón vegetal que se requerían para fabricarlo y para forjarlo.

Se ha encontrado recientemente que en algunas partes de Asia ya se destilaba alcohol para preparar bebidas en los años del 1.500 al 1.450 a.C. Eso significa que esos pueblos ya entendían, en la práctica, qué era la evaporación de líquidos con calor, y la condensación de vapores por enfriamiento; y que entendían, en conjunto, la destilación como un proceso térmico potencialmente muy útil. En realidad, ésta es una de las operaciones físico-químicas más útiles y más

viejas que conocemos, y que el hombre emplea en todo el mundo y empleará siempre para separar y refinar productos líquidos.

A propósito de combustibles hay que notar que la leña y el carbón vegetal eran los únicos que entonces usaban los hombres. Sin embargo, desde tiempos muy remotos algunos pueblos en Mesopotamia, el Cáucaso, Persia y China conocieron el petróleo crudo, el asfalto natural y el gas natural que en muchos sitios de esas regiones brotaban (y brotan aún) espontáneamente. Sabemos hoy que entre el año 900 y el año 850 a.C. los chinos ya extraían gas natural de pozos profundos y lo usaban para quemarlo en sus cocinas y en sus hornos metalúrgicos, donde hacían cobre, bronce y hierro, tal como los producían también los babilonios, los egipcios y los hindúes. Muchos geólogos e ingenieros de petróleos de hoy opinan que el episodio de Moisés y la zarza ardiendo que narra la Biblia, sugiere que las fuentes de gas natural espontáneo e incendiado eran ya comunes en Egipto y en el Sinaí, como también en otras regiones. Pero a esos hidrocarburos combustibles no se les daba importancia económica ni social, salvo tal vez como unguento medicinal y como material para calafatear embarcaciones, en el caso del petróleo crudo.

En las civilizaciones del segundo milenio a.C. el fuego ya era parte muy importante de la economía y de la cultura de las sociedades urbanas que existían en Egipto, Asia Menor, Creta, Cercano Oriente, India y China. Ellas lo usaban para desbrozar tierras cultivables; para proporcionarse luz y calor domésticos; para ahuecar troncos de árboles y así hacer embarcaciones; para fundir metales; y para producir cerámicas, vidrio, cobre, bronce, hierro y ladrillos. Por esa época, además, esos mismos pueblos aprendían a producir nuevos metales como el estaño y el plomo, en hornos metalúrgicos cada vez más diversificados, cada vez más grandes y cada vez más numerosos. Como se dijo arriba, sus combustibles eran la vegetación seca, la leña, el carbón vegetal y la grasa animal. Quizá en uno que otro sitio de Mesopotamia, del mar Caspio o de Persia se usaba el petróleo crudo de un rezumadero natural cercano, para iluminación doméstica. De todas maneras sus pocos combustibles los obtenían con poco esfuerzo: eran "muy baratos" como diríamos hoy. El fuego y el calor no eran para esos pueblos ningún "fenómeno" como hoy los entendemos: eran realidades naturales de percepción inmediata, cuyos efectos se hacían ver de inmediato, de manera intuitiva y directa, de la misma manera que el viento, el curso del agua, o los cuerpos que caen. Ellos no veían allí nada para averiguar ni para explicar. Se trataba solamente de utilizarlo.

Parece -hasta hoy- que fueron los chinos, hacia el 1.200 a.C. los que primero inventaron la técnica de fundir metales (concretamente el bronce) en crisol, para derretirlo al calor y vaciarlo luego en moldes de arena o de arcilla, para elaborar así piezas de forma más compleja, como eran sus campanas, sus herramientas o sus adornos.

Con el lenguaje de hoy podemos decir que desde épocas remotas los hombres conocían y se aprovechaban de numerosos fenómenos térmicos: la combustión, el calentamiento de sólidos y de líquidos, su dilatación térmica, su enfriamiento, la ebullición y la evaporación de líquidos, la fusión de metales y minerales, la aleación de metales, la congelación del agua (que conocían solamente en las altas montañas, en inviernos muy fríos, cuando y donde nevaba, como en el Cáucaso; pero nunca en el Nilo). Conocían también y empleaban la conducción en metales, la convección de líquidos calientes, la irradiación de calor desde cuerpos calientes y de llamas. Ellos no sabían cuál era la naturaleza íntima, física, del calor, ni se lo preguntaban. Los sacerdotes formaban la clase más culta y menos ocupada de las culturas más avanzadas, y mantenían muchos fuegos encendidos en sus altares, porque le atribuían significados mágicos y místicos muy diversos. Pero ni siquiera ellos llegaron a crear ningún cuerpo sistemático de conocimiento sobre la fenomenología del calor, lo cual sí hicieron con la agricultura, la geometría, la aritmética, la astronomía y la medicina. En cambio, entre esos pueblos si surgieron muchos cuerpos de artesanos que eran usuarios activos del fuego y del calor. Esos artesanos eran los ceramistas, los vidrieros, los alfareros, los curtidores de cueros, los productores de cobre y de hierro, los forjadores, los fundidores, los cocineros, los cerveceros, los panaderos, los orfebres, los armeros, los picapedreros y los mineros. Esta situación habría de perdurar sin cambios significativos hasta la época del imperio romano. El frío no era usado habitualmente para nada en las culturas anteriores a nuestra era cristiana, hasta cuando los primeros emperadores romanos utilizaron el hielo para enfriar el vino en sus banquetes, en los primeros decenios después de Cristo.

La Grecia clásica hizo muy pocos aportes a la tecnología de su tiempo, a pesar de sus grandes progresos en otras áreas de la cultura humana. El fuego lo usaron para lo mismo que ya hacían con él las civilizaciones más antiguas. En el siglo VI antes de nuestra era, el filósofo Heráclito (537-470 a.C.) aseguró que el fuego es el material del cual se constituye todo el Universo, en el sentido en que Thales de Mileto (640-546 a.C.) lo había afirmado respecto al agua. Es

indudable que el “fuego” de que hablaba Heráclito no era el que desprende un leño encendido sino más bien algo así como una representación intelectual de la fuerza metafísica de un principio creador que los filósofos griegos buscaron intensamente. Más útil y duradero fue el aporte de un cierto Glauco de Chíos (oriundo de la isla de ese nombre en el mar Egeo) quien vivió entre el año 700 y el año 600 a.C., e inventó el procedimiento para soldar cobre, bronce y hierro con una aleación de plomo y estaño, que derrite fácilmente, y que aún hoy usan nuestros artesanos para ese mismo efecto.

USOS DEL CALOR PARA EL HOMBRE

(Antiguos, recientes y contemporáneos)

- Cocinar y asar alimentos
- Hervir líquidos
- Generar vapor
- Evaporar líquidos
- Hidrolizar sustancias orgánicas sólidas
- Fundir minerales y rocas
- Producir y fundir metales
- Tostar minerales y granos
- Pirolizar materiales carbonáceos
- Desecar sólidos molidos y granos
- Iniciar la ignición de combustibles
- Incinerar desechos sólidos combustibles
- Caldear ambientes
- Fragar materiales cerámicos
- Calcinar minerales
- Endurecer metales
- Maleabilizar metales
- Fragar plásticos termofraguables
- Derretir plásticos termoplásticos
- Ablandar y derretir ceras, grasas y otros pseudo-sólidos orgánicos
- Templar y revenir metales, vidrio, etc.
- Oxidar metales
- Fluidificar líquidos
- Cuartear minerales

- Expandir gases
- Generar corrientes termoeléctricas (débiles)
- Incendiar bosques y cubierta vegetal
- Refrigerar (por absorción)
- Refrigerar (por expansión)
- Iluminar espacios
- Irradiar calor y luz
- Estallar explosivos químicos
- Estallar explosivos termonucleares
- Dilatar sólidos cristalinos
- Activar y acelerar reacciones químicas endotérmicas
- Disparar proyectiles
- Esterilizar materiales biológicos sólidos
- Pasteurizar líquidos
- Cauterizar cuerpos y materiales vivos
- Grabar en madera
- Destruir y demoler edificaciones y ciudades

Entre los años 530 y 520 a.C. figuró el griego Theodoro de Samos (en esa isla), a quien en siglos posteriores sus connacionales atribuyeron varios inventos mecánicos y el invento de un horno para producir hierro primario (arrabio), así como le atribuyeron el procedimiento de vaciar objetos en hierro derretido en moldes de arcilla. Quizá esto último fuera verdad, pero sólo en el marco geográfico y cultural de la Grecia antigua, y para el hierro. Porque en otras partes del mundo (como la China) ya se sabía hacerlo con el bronce, tal como lo indicamos más arriba.

El carbón mineral fue desconocido para los pueblos de Egipto, de Mesopotamia y de la India antes de Cristo. Pero los chinos lo extraían desde el año 1.000 a.C. y lo usaban en sus hornos para producir vidrio, cerámicas y metales. En Occidente fueron los griegos clásicos quienes lo descubrieron, le dieron el nombre de anthrax y lo usaron como combustible para forjar y para fundir metales. Theofrasto (371-300 a.C.), el gran naturalista que fue discípulo de Aristóteles, incluye una descripción sobre el carbón mineral en su libro sobre las piedras y las rocas.

El dominio de las culturas antiguas sobre la tecnología metalúrgica en caliente, queda demostrado por el hecho de que en la India, entre los años 500 y 490 a.C., los armeros fabricaban espadas y cuchillos de acero, superponiendo tiras

alternadas de hierro maleable y hierro de fundición, calentádaslas a mil grados en forjas con carbón vegetal, y maleándolas a mano en el yunque. A ese material lo llamaban wootz y por siglos y siglos así lo hicieron. Esa técnica de fabricar espadas de acero se extendió luego hacia China (ca.400 a.C.) y hacia Siria. Todavía en el siglo XIX, antes de Bessemer, en Europa Occidental y en Asia se hacían así esas armas que hicieron famosas a las armerías de Damasco, Toledo, Solingen y otras ciudades del mundo.

Entre los años 450 y 440 a.C., en Sicilia, en la ciudad de Akragas (o Agrigento según los romanos) el filósofo Empédocles formuló la idea (que todos sus seguidores repitieron por siglos) de que el mundo físico está formado por cuatro "elementos" que son: el agua, el aire, el fuego y la tierra (la que forma los suelos, nó el planeta que llamamos así). Posteriormente Aristóteles (384-322 a.C.) estableció que las "propiedades fundamentales" de la materia son "lo caliente", "lo seco", "lo frío" y "lo húmedo". Así, por ejemplo, el agua sería algo "que es húmedo y frío" (sic), el fuego sería "caliente y seco", y así, todo lo demás. Todo el Mundo Occidental, sus filósofos y sus eruditos, pensaron así hasta que llegó el Renacimiento a Italia en el siglo XV. También en la Italia griega, en la ciudad de Tarento, el filósofo y científico Arquitas, en los años del 420 al 411 a.C. construyó varios juguetes mecánicos, y experimentó con ellos, incluyendo una paloma mecánica hecha en metal, y movida por un chorro de vapor de agua caliente.

La cultura helenística en Alejandría, que realizó tantos adelantos técnicos y científicos, casi nada nuevo avanzó en el conocimiento y en la técnica del calor para usos sociales. La única gran innovación que aún usamos y que sus técnicos realizaron fue el invento del faro (primero en la historia humana), como el que construyeron en la isla de Pharos, junto a la ciudad, y en cuya cima ardió siempre un gran fuego. Fue la primera vez que se usó éste para enviar señales a larga distancia: su luz alcanzaba hasta 40 kilómetros mar adentro, en noches muy oscuras y sin bruma. El faro de Alejandría duró varios siglos en pie y fue para los griegos y romanos una de las siete "grandes maravillas" del mundo antiguo. Dice Donald Hill (Ver bibliografía) que al comenzar la era cristiana ya existían unos treinta faros en el Mediterráneo y otros mares aledaños al mundo civilizado de entonces.

Hay también dos hechos casi anecdóticos en la historia de la ciencia alejandrina que es preciso recordar. Uno de ellos es que entre el año 260 y el año 240 antes

de Cristo el ingeniero Filón de Bizancio (nacido ca. 300 a.C.) diseñó muchos dispositivos mecánicos, los construyó y los ensayó. Con esos mecanismos Filón experimentó con la expansión de aire caliente como fuerza motriz para darles movimiento. Pero esta idea precursora fue luego echada al olvido por el mundo clásico.

En el año 50 de nuestra era, el físico e ingeniero Herón (ca.20 d.C.-ca.105 d.C.) en la propia Alejandría, inventó (entre otras curiosidades mecánicas) un pequeño "juguete" de laboratorio que él llamó "aeolipilo". Consistía en una pequeña esfera de cobre, apoyada en dos puntos, horizontal y diametralmente opuestos, y alimentada por el vapor de agua que se producía en una calderita que estaba parcialmente llena de agua hirviendo, calentada por un fuego debajo de la misma. En otros dos puntos diametralmente opuestos, en un plano vertical, y colocados sobre la "línea ecuatorial" de la esfera, había dos escapes acodados, girando en dicho plano vertical, por los cuales salía el vapor al exterior en dos chorros, en direcciones opuestas, y cuya reacción mecánica impartía a la esfera un movimiento de rotación muy rápido, apoyado horizontalmente en los "polos" horizontales ya mencionados. Hoy diríamos que era una pequeña turbina de vapor a reacción, con rotor esférico, con eje horizontal y con dos escapes ecuatoriales simétricos. La idea no pasó del gabinete del laboratorio de Herón, pero su sola presencia demuestra que su inventor ya era consciente de la posibilidad de obtener movimiento y trabajo mecánico a partir del vapor de agua caliente y en expansión.

En los laboratorios de los primeros alquimistas de Occidente, quienes vivieron en Alejandría en los dos primeros siglos de nuestra era, fue donde el calor y el fuego comenzaron a ser usados como agente para lograr cambios químicos y físicos no solamente en metales, sino en minerales, en líquidos y en sustancias de muchas clases que aquellos ensayaban sistemáticamente en la búsqueda ilusoria de la "piedra filosofal" que les sirviera para transmutar los pocos metales que se conocían entonces en el codiciado oro. Esos alquimistas inventaron operaciones que hoy son de enorme utilidad científica e industrial y que requieren grandes consumos de energía térmica: fundir sales y minerales, destilar líquidos, evaporarlos, sublimar sólidos, cristalizar soluciones, disolver sólidos y líquidos en caliente, oxidar metales y sales, calcinar rocas y minerales, descomponer sustancias, hidrolizar materiales con agua hirviendo y otras. No es exagerado decir que ellos inventaron en pequeña escala los usos del calor que hoy son básicos en las modernas industrias químicas y de procesos térmicos, en gran escala.

También en Alejandría, entre el año 170 y el año 160 a.C., el mecánico griego Ctesibius construye y ensaya un “cañón de viento”, análogo a un cañón de aire comprimido y calentado, a alta presión. Es el primer intento que conocemos para usar la fuerza expansiva de los gases calientes, la misma que hoy usamos a todas horas y en todo el mundo, en millones de máquinas y motores.

Cabe señalar aquí que la lejana China seguía avanzando en el desarrollo y en la aplicación de técnicas metalúrgicas con empleo de calor. Entre el año 310 y el año 300 a.C. sus pobladores inventaron los fuelles a pistón, de doble acción, que producen una corriente continuada y abundante de aire para avivar el fuego en sus hornos, y que en Occidente serían reinventados tan solo en el siglo XVI. Y entre el 300 y el 290 a.C. inventaron, al nivel de su imperio y su cultura, el proceso de derretir el hierro y vaciarlo en moldes para hacer objetos de forma especial, como ya hemos visto que lo hacían otras civilizaciones con el cobre y con el bronce. Desde un poco antes del año 302 a.C. los chinos usaban corrientemente el carbón mineral en vez de carbón de madera como combustible para alimentar sus hornos productores de metales.

Es posible conjeturar que en el siglo II o en el I antes de Cristo los romanos le aprendieron a algún pueblo del Asia Menor a construir y a aprovechar las ruedas hidráulicas de paletas y de canjilones, horizontales en unos casos y verticales en otros casos, de golpe del agua superior o de golpe inferior, para aprovechar la energía de las corrientes naturales de agua. El hecho es que el ingeniero romano Marco Pollio Vitruvio (ca. 70 a.C.-ca. 25 a.C.) las describe, en el siglo I a.C. en su enciclopédico libro “De Architectura”. Ellas serían las primeras máquinas motrices mecánicas que se usaron industrialmente en Occidente, y quizás en todo el mundo; y serían por varios siglos los únicos motores primarios hasta que de Afganistán y Persia vino a Europa el molino de viento, en el siglo VII d.C., traído por los árabes en su fenomenal expansión de entonces. Después de las ruedas hidráulicas y de los molinos de viento sólo vendrían, mucho después, en el siglo XVIII, las primeras máquinas de vapor en Inglaterra, como fuentes de fuerza motriz para servir a los usos de los hombres. Hablaremos de ellas más abajo.

Hay que registrar que, tal como ya lo señalamos, desde mucho tiempo atrás se había reconocido el papel esencial que tiene el aire en la combustión, así como la gran utilidad de ventilar bien un fuego o una brasa para encenderlos más. Vimos arriba que Hellemans y Brunch informan que los egipcios y los

mesopotámicos ya usaban fuelles para ventilar el fuego en los hornos de hacer vidrio y en los hornos metalúrgicos, en la época de 1600 a 1551 a.C.; y vimos que esos mismos autores agregan que en el último decenio del siglo IV a.C. (310 a 301 a.C.) los chinos inventaron los fuelles de pistón de doble acción, que producen un chorro continuo de aire, y los cuales sólo llegaron a ser conocidos en Europa en el siglo XVI d.C. Y en el primer siglo de nuestra era, también en China, un artesano llamado Tu Shih, inventó los fuelles movidos por agua para soplar hornos donde se trabajaba el arrabio de hierro, y para elevar así sus temperaturas con el propósito de abreviar la fundición y de trabajar con coladas más fluidas.

DEL AÑO 1 d.C. AL 1600

Los romanos se dieron cuenta desde el comienzo de su historia de la gran importancia política y militar de producir hierro abundante, de buena calidad y barato, para lograr el éxito en sus vastos y numerosos planes de expansión militar. Su avidez por el metal fue una de las causas para apoderarse de regiones que eran ricas en buen mineral de hierro (como lo era y es España y como lo era y es la actual Austria), y cuyos habitantes sabían muy bien cómo obtener un buen metal y cómo trabajarlo. Por eso la siderurgia, con sus hornos, sus grandes consumos de carbón vegetal, sus forjas y sus herreros, se extendieron por todo el mundo que fue siendo dominado por los romanos, en Europa, en Asia y en África. Y ya en los primeros siglos de la era cristiana, los hindúes, los germanos y los celtas desarrollaron en forma autóctona una avanzada tecnología siderúrgica. Los tres pueblos aprendieron a hacer armas de acero, forjándolas adecuadamente. En la India a este material lo llamaban "wootz" (como ya dijimos) y lo exportaban hasta las ciudades romanas, donde era muy apreciado por su alta resistencia y su especial valor militar.

En los diez siglos de historia que dominaron los romanos, desde el siglo V a.C. hasta el siglo V d.C., la tecnología del calor cambió muy poco, a no ser por lo que tocó a la siderurgia. Esta industria en expansión exigió construir hornos más grandes y más numerosos por toda la Europa romana y por las tierras de sus vecinos pueblos "bárbaros". Pero en lo tocante al calor, a su tecnología, a los combustibles y a sus aplicaciones, casi nada nuevo ocurrió.

Desde que Constantino fundó a Constantinopla, llamada después Bizancio en el siglo IV de nuestra era, comenzaron a recogerse en sus bibliotecas todos los documentos escritos por griegos, romanos, alejandrinos, sirios, babilonios y persas, sobre todos los saberes humanos que esos pueblos cultivaron. Los que no procedían de originales en griego, fueron traducidos a esta lengua, que era la del pueblo constantinopolitano. En cambio en el imperio romano de Occidente, en esa época, las invasiones bárbaras y el caos que éstas provocaron destruyeron las bibliotecas y las escuelas de enseñanza. Allí desaparecieron la literatura clásica y la ciencia, y sobre Europa cayó la noche de la Alta Edad Media. Del siglo V al siglo X casi nada nuevo ocurrió en Europa Occidental en materia de ciencia y de tecnología del calor. Solamente los artesanos y los

obreros populares seguían ejerciendo sus oficios con un aceptable nivel técnico, que transmitían de padres a hijos. Entre ellos seguían estando los oficios basados en el fuego: obtener hierro y otros metales; formarlos y elaborarlos; curtir cueros; producir objetos de cerámica y de vidrio; fundir y trabajar el oro y la plata; producir cerveza, y otros menores. Todo esto en escala pequeña, en los pequeños burgos alrededor de los castillos feudales, porque la clientela de estos oficios era la nobleza, que era muy rica pero muy escasa en número. Aún así, hay evidencia de que desde la caída de Roma hasta los siglos X y XI los obreros y los artesanos europeos hicieron notables mejoras en la calidad de sus productos de cerámica, de vidrio, de oro, de hierro y de cobre, lo cual significa que también hicieron mejoras en sus hornos, en sus forjas, en sus hornillas, en sus herramientas, en sus quemadores, en sus procedimientos y en sus materias primas.

Hay que registrar un hecho que por varios siglos fue ignorado en China y en Occidente, y que Hellemans y Brunch informan. Se trata de que en el año 577 d.C., en aquel remoto país, en su ciudad norteña de Ch'i, que estaba siendo sitiada por ejércitos hunos y tártaros, unas mujeres inventaron los primeros fósforos de cerilla para encender fuego en sus cocinas y en sus hogares de calefacción. Al parecer, ese invento maravilloso no se propagó ni en la misma China. Trece siglos después, un europeo, en Suecia, volvería a hacer este mismo invento, como veremos más adelante.

Cuando los árabes comenzaron en el siglo VII su sorprendente y veloz expansión por Asia, África y Europa, comenzaron también a encontrar en Siria, en Alejandría, en el Asia Menor, en Mesopotamia y en Persia los textos antiguos de esas viejas culturas, ya traducirlos al árabe. En su expansión al Occidente los guerreros musulmanes transportaron esos libros a España, la que invadieron en el año 711, y donde fundaron el brillante califato de Córdoba y su gran universidad. Allí, lentamente, aquellos textos empezaron a ser traducidos del árabe a los idiomas europeos: al romance, al latín y a otras lenguas de entonces. Fue pues así como Europa Occidental comenzó a redescubrir desde el siglo X a las grandes civilizaciones antiguas. Lo poco que escribieron los alejandrinos, los egipcios y los babilonios sobre las técnicas del fuego y del calor fue llegando así a las nacientes escuelas elementales de las iglesias y de los conventos medioevales. Fueron también los árabes quienes trajeron a Europa algunos aparatos que pasaron a ser recursos técnicos importantes en las industrias, como lo fue el alambique. Se sabe, por ejemplo, que hacia el 1005 los italianos

aprendieron a destilar vino para hacer brandy. Es evidente que ya dominaban y entendían bien el uso de la destilación como operación industrial.

Del mismo siglo VII (entre el año 650 y el 659) fue la invención en Bizancio de un violento combustible para la guerra, creado allí por un ingeniero militar egipcio, llamado Callinico (Callinicus, en latín), quien había nacido en Heliópolis (Egipto) en el año 622 d.C., y luego había pasado a Siria y a Bizancio. Dicho combustible era una mezcla líquida de azufre, nitro (nitrato de amonio) y petróleo liviano natural; que ardía con furor y sobrenadaba en el agua; que no se podía apagar sin consumirse; que se esparcía rápidamente, y que podía lanzarse con bombas lanzallamas que eran sencillas de hacer y de operar. El “fuego griego” -como se le llamaba- era un arma temible, especialmente apto para atacar los barcos de madera de los enemigos árabes de Bizancio, quienes fueron siempre derrotados en combate contra los barcos bizantinos, porque éstos estaban todos dotados de esa terrible arma. Los bizantinos lo usaron con éxito casi hasta el final de su existencia como poder militar, en el siglo XV. No es exagerado pensar que el fuego griego prolongó por varios siglos la vida del gran imperio griego. Por eso su composición química fue un secreto militar que era guardado muy celosamente por Bizancio. Solamente en nuestro siglo XX se ha llegado a descifrar su composición química y a reconstruir su formidable poder militar.

Es digno de notar que, según Hellemans y Brunch (Ver bibliografía), en Escandinavia, al norte de Europa, alrededor del año 800 d.C. se estaban ya construyendo altos hornos de tres, cuatro y cinco metros de altura para producir arrabio (hierro crudo) a partir de los buenos minerales de este tipo que Suecia ha tenido siempre. Era un gran paso adelante en la tecnología siderúrgica y en el manejo de cantidades mucho más grandes de carbón de madera y de calor. Puesto que el siglo IX fue el comienzo de las grandes expediciones militares de los escandinavos (o normandos, o vikingos) contra toda Europa, es posible que sus avances en la siderurgia, en esos decenios, hubieran contribuido a acrecentar el poder militar de esos pueblos que dispusieron de excelente armamento de hierro y de acero.

En la remota China, alrededor del año 1005, ya se estaba usando corrientemente el carbón mineral como combustible industrial y como combustible doméstico. Y hacia el año 1045, en ese inmenso país, un alquimista llamado Tsen Kung-Liang publicaba las primeras formulaciones conocidas hoy, para preparar tres variedades de pólvora.

Pasaron luego dos siglos sin que apareciera casi nada nuevo en el mundo en nuestro tema, hasta cuando, en el año de 1241, los mongoles del inmenso imperio fundado por Gengis Khan invadieron a Rusia y a Europa Central. Llegaron hasta Silesia, Polonia y Hungría, y ya se acercaban a Viena cuando les llegó la noticia de la muerte de su gran emperador Ogdai Khan, en el Extremo Oriente, y se retiraron velozmente de Europa. Sin embargo, uno de sus jefes, Batu Khan se construyó su dominio personal en el sur de Rusia, dominio que se conoció con el nombre de La Horda de Oro. Mientras duró el poder uniforme de los mongoles desde el mar de la China hasta el mar Negro, y mientras floreció ese enorme imperio, las comunicaciones entre Europa y China fueron bastante activas a lo largo de esos dos o tres siglos. En esos siglos, del XII al XV, China tuvo un comercio relativamente activo con el imperio bizantino, a través de la llamada “ruta de la seda”, por la cual venían porcelanas, papel, sedas y ornamentos. Por este camino pudieron venir también varias innovaciones técnicas que después vemos aparecer en Europa.

No se sabe con seguridad si fueron los mongoles los que trajeron a Europa la pólvora, el cañón y los cohetes, además de otros inventos chinos ya antiguos. Hay razones para pensar que así fue: coincidencias de fechas y lugares y otros indicios parecen confirmarlo. Lo que sí se sabe es que hay libros chinos del año 1004 d.C. que hablan de la pólvora y que dan fórmulas para prepararla y para usarla en juegos pirotécnicos y en cohetes manuales. Se sabe que en el año 1249 (ocho después de la invasión mongola a Europa), Roger Bacon (1214-1294) en Inglaterra describía, por primera vez en este continente, el sorprendente y utilísimo explosivo; y explicaba la manera de elaborarlo, mezclando partes iguales y pulverizadas de carbón vegetal, nitro y azufre. Se sabe también que en el sitio a la ciudad de Metz, en Francia, en el año de 1324, durante la guerra de los Cien Años, fue cuando los franceses usaron la pólvora y los cañones como medios de combate, en su lucha contra los invasores ingleses, y por primera vez en Europa. Apareció así en Occidente una nueva forma de usar el fuego en la vida social de los humanos, esta vez de tipo destructivo. Además, la industria metalúrgica de la fundición ganó un nuevo y grande mercado en expansión acelerada, que fue el de fundir y maquinar cañones (de bronce, al principio, y de hierro posteriormente) para las mil guerras de la Edad Media, las mismas que mediante estas nuevas armas terminaron con el poder militar y político de los castillos feudales y, en consecuencia, ayudaron a acabar con el mismo sistema feudal.

Fué a comienzos del siglo XIII cuando Europa comenzó a conocer el uso generalizado del carbón mineral. Más concretamente: en Inglaterra comenzó a surgir y a crecer una minería de carbón, cuyo producto se dedicaba en su mayoría a las casas de habitación de la ciudad de Londres, en cuyas chimeneas ardía y proporcionaba calor a sus habitantes, en una época cuando la población de la ciudad crecía aceleradamente, y en un clima que exigía calefacción durante casi todo el año.

La única gran novedad importante en la tecnología del calor que se registró en Occidente durante el siglo XIV, fue la aparición y la difusión en Europa Occidental, del alto horno, que quizás fue inventado por los escandinavos, para producir hierro crudo (arrabio). La proliferación del alto horno comenzó en Lieja (hoy Bélgica, entonces Flandes) a mediados del decenio de 1340 a 1349. Ya entonces esos hornos alcanzaban hasta seis y ocho metros de altura. Antes de entonces, hoy solo sabemos que en el siglo IX, como lo anotamos arriba, hacia el año 805 en Escandinavia ya se construían altos hornos de unos dos metros de altura solamente. El combustible generador de calor y reductor químico de los óxidos de hierro era, como siempre lo había sido, el carbón de madera. La siderurgia se iba convirtiendo en una industria deforestadora. Rápidamente se expandieron el alto horno y la actividad de la siderurgia a Francia, Renania, Inglaterra, Polonia y Silesia. Dicen Hellemans y Brunch que en 1389 el hierro crudo (arrabio) producido en altos hornos, con carbón de madera, ya era un material popular y común en Europa.

Durante los diez siglos que duró la Edad Media (especialmente a partir del siglo X) y durante la primera Edad Moderna hubo pues pocos avances, y pocos cambios cualitativos que fueran importantes, en la tecnología y en el conocimiento del calor y del fuego. Pero los usos sociales del calor que ya eran habituales se intensificaron y se expandieron dentro de cada país, y se extendieron a otros nuevos países, en la medida en que crecía la población del mundo civilizado, y en que los hombres consumían más y más alimentos, bebían más alcohol y cerveza, producían y fundían más metales, fabricaban más cerámicas y vidrio, y hacían más y más guerras.

Si bien los alquimistas en Alejandría, en Grecia, en Bizancio, en el imperio árabe y en la Europa de la Baja Edad Media habían sin duda meditado mucho sobre el fuego, no se conocen aún documentos escritos por ellos que sean de importancia sobre la naturaleza o las propiedades de este fenómeno, talvez

porque ellos creían que -como había dicho Aristóteles- se trataba de un elemento fundamental del Universo y, por lo tanto, no susceptible de desagregación material ni de explicación como fenómeno complejo. Dice Partington que -como caso aislado- en los siglos XIII y XIV un alquimista que se firmó como Marco el Griego (Marcus Graecus) escribió los manuscritos que luego reunió en su "Libro de los Fuegos" (Liber Ignium), en los cuales él describe varias mezclas incendiarias y describe la pólvora, y cuyas informaciones parecen estar basadas en fuentes árabes y nó griegas (aun cuando el ya mencionado "fuego griego" incendiario fué inventado en la griega Bizancio para usarlo contra los árabes).

En las casas y salones medioevales, hasta los siglos XII ó XIII (según el libro de Burke, en la bibliografía), no había un sitio adecuado para quemar leña en una hoguera que calorease las frías noches de los gélidos inviernos en la Europa de occidente y del norte. Como experiencia única y solitaria, el monasterio de Saint Gall en Suiza en el siglo IX, había instalado un sistema de calefacción central que consistía en un fuego en los subterráneos, cuyos gases calientes subían por conductos cerrados que caldeaban las habitaciones, y luego salían por un tubo a la atmósfera. El sistema indicaba ya una familiaridad con fenómenos y conceptos como la buena ventilación que necesita una hoguera, el tiro hacia arriba de los gases calientes y el descenso de las masas frías de gas. Agrega Burke que los únicos hornos que eran usados comunmente por ese tiempo, eran los que usaban carbón vegetal para hacer hierro, vidrio y cerámicas, y que la pericia de quienes hicieron la instalación de Saint Gall vino probablemente de operarios que usaban estos últimos equipos. El sistema seguramente evolucionó y se simplificó hasta que en el siglo XII apareció la chimenea u hogar (palabra proveniente de "fogar", de "fuego") dentro de la misma habitación en donde el campesino también cocinaba su sopa y donde el aristócrata calentaba agua para bañarse. El nombre de chimenea se dio primero al tubo vertical de escape de gases a la atmósfera; y luego se le dio a la cavidad dentro del muro donde arde la leña. A lo largo de los años y en distintas regiones, las chimeneas interiores domésticas tomaron más y más formas, así como dimensiones y ornamentaciones variadas. En el siglo XV, hacia 1480, Leonardo da Vinci concibió y dibujó un aparato incorporado al escape vertical de una chimenea, que sería movido por el "tiro" ascendente de los gases calientes, donde una pequeña turbina de hélice tomaría algo de esa energía y la transmitiría al exterior para ser aprovechada en otro uso mecánico en la vivienda. Según Burke, en el siglo XV llegaron a Italia desde la ciudad de Bizancio, recién invadida por los turcos, muchos esclavos tártaros que llevaban consigo sus herramientas

tradicionales y, entre ellas, sus rudimentarios ventiladores axiales operados a mano para soplar aire a hornillas y fogones domésticos y de artesanos.

Davies (Ver bibliografía) presenta la fotografía de un prototipo en un museo, de una chimenea para calefacción doméstica, que inventó Benjamín Franklin en 1740, construida como cámara cilíndrica de hierro fundido, ligeramente levantada del piso para absorber el aire, con su caja de fuego cerrada para evitar el humo y las chispas en el ambiente. Y muestra un esquema del sistema de calentamiento para un invernadero de plantas que inventó y construyó en 1716, en Suecia, el botánico Marten Triewald y que, iguales en lo esencial, siguen operando en millones de invernaderos del mundo.

Fue a comienzos del siglo XVI cuando España comenzó a conquistar y a colonizar a América, desde La Florida al norte, hasta el río de La Plata al sur. Sin embargo ese vasto proceso militar y político tuvo una escasísima importancia en la ciencia y en la tecnología, excepto en la actividad naviera. Los españoles eran reacios al aprendizaje de estas últimas disciplinas, las mismas que sí proliferaban en ese momento en Italia, Francia, Inglaterra, Alemania y Holanda. Los españoles de entonces carecían de industrias desarrolladas en su península. Usaban el fuego y el calor solamente para hacer sus comidas, caldear sus viviendas, fundir armas y poco más. Su mentalidad fanática contrarreformista veía en la ciencia y en la técnica a nuevos y peligrosos enemigos del dogma religioso. Por lo tanto la América hispana nada recibió en estas materias. Del calor y del fuego nuestro continente casi nada aprendió, que no supieran ya los pueblos precolombinos, a no ser el uso de las armas de fuego. Además la política colonial cerradamente mercantilista de España prohibió que en sus colonias se estableciera alguna industria. Por lo tanto, en la América española nada se supo de la ciencia o de la tecnología del calor mientras dominó España. Además, en la propia península se ignoraba profundamente el tema.

Ya en pleno Renacimiento, en Italia, un superintendente de minas (según lo identifican Hellemans y Bunch en su libro), llamado Vanochio Biringuccio (1480-1539), publicó un libro sobre su oficio, con el nombre en latín "De la Pirotechnica" (1549) donde su autor da informaciones prácticas sobre el tratamiento químico, mecánico y térmico de minerales, sobre producción de metales a partir de sus minerales, y sobre la destilación y la sublimación. El libro revela que ya existía entre los mineros de Europa un vasto conocimiento sobre la tecnología del calor aplicada a la minería y a la metalurgia.

Por esos mismos años medianeros del siglo XVI, en Alemania, el médico y químico Georg Bauer (Agrícola, como se firmaba en latín) (1494-1555) hizo un gran aporte didáctico e investigativo en muchos temas específicos, a la tecnología y a la ciencia europeas, las que en ese momento comenzaban a reanimarse vivamente. En 1556, un año después de su muerte, en forma póstuma aparece su gran obra clásica, "De re metallica" (De las cosas de los metales), la cual presenta una descripción enciclopédica de los yacimientos de minerales en Europa, de sus características mineralógicas, de los métodos para encontrarlos, de la construcción de las minas, de los procedimientos para explotarlas, de las propiedades de los metales que entonces se conocían, y de los usos que se les daban a éstos. Allí se describen también los usos del fuego, del calor y de los combustibles en las minas de entonces: la tostación de minerales; la reducción de óxidos con carbón; diversos tipos de hornos; las maderas combustibles; el carbón mineral; la evaporación de aguas salinas; la producción de cobre primario; el alto horno con carbón vegetal y caliza, y el hierro que producía; el recalentamiento de metales para forjarlos; los procesos térmicos y metalúrgicos para obtener el plomo, el estaño y el zinc; la fundición en crisol del oro, la plata, el bismuto, el zinc, el cobre, el bronce y el hierro; su colada líquida en moldes; la fundición y el acabado de cañones y campanas; el revenido y el temple del hierro; y otras numerosas operaciones metalúrgicas y mineras en caliente.

En su rivalidad con España (que surgió en ese mismo siglo), Inglaterra decidió convertirse en la mayor potencia naval de Europa y del mundo, y comenzó un proceso muy intenso (que duraría siglos) de construir barcos. En ese tiempo esto significó un vertiginoso proceso de deforestación de la isla, para obtener madera para los barcos. Esto repercutió perjudicialmente sobre la industria fabricante de hierro, la cual alimentaba sus altos hornos con carbón de madera. Ante la escasez de madera para hacer ese carbón, un industrial siderúrgico, Abraham Darby, en el poblado de Coalbrookdale, pensó en el carbón mineral y encontró que éste era muy inadecuado, en su forma natural, como tal, para producir hierro. Pero, después de muchos ensayos, en 1709, Darby aprendió a coquizar la hulla y a usar el coque que obtenía así, para hacer un excelente hierro. Apareció así en el mundo un nuevo combustible artificial, el coque, útil para varios fines. Cabe recordar que un siglo antes, en 1619, en la localidad de Dudley, en la misma Inglaterra, algún industrial siderúrgico ya había preparado coque y lo había usado para el mismo fin. Pero probablemente su método tenía deficiencias técnicas o era muy costoso, por lo cual en su tiempo se le echó al olvido.

LA REVOLUCIÓN CIENTÍFICA Y TÉCNICA DEL SIGLO XVII

El siglo XVI llegaba a su fin, en 1592, cuando Galileo Galilei (1564-1642), en la Universidad de Pisa inventó el primer instrumento de la historia, que se hiciera para medir la temperatura de los cuerpos. Él lo llamó "termoscopio" y era una forma rudimentaria de termómetro, consistente en un bulbo de vidrio lleno de aire que, al ponerse en contacto con un cuerpo caliente expandía el gas y señalaba cualitativamente el cambio de temperatura. No tenía graduaciones numéricas y por eso no permitía hacer mediciones. Señalan Hellemans y Bunch que era un instrumento muy burdo, pero que constituyó la base para comparar temperaturas por lo menos durante los diez años siguientes. Un año después de morir Galileo, en circunstancias bien conocidas, su discípulo Evangelista Torricelli (1608-1647) descubrió la presión atmosférica y la midió con el barómetro de mercurio que él mismo inventó al efecto. Hoy sabemos cuánto tienen que ver la presión barométrica con los fenómenos térmicos de gases y líquidos, incluyendo el fenómeno de la combustión.

En un famoso libro suyo, en 1748, escribió el abate y científico francés Jean-Antoine Nollet que el primer termómetro en la historia del mundo, salió por primera vez de las manos de un campesino holandés, cuando comenzaba el siglo XVII. Y agrega Locqueneux (ver bibliografía) que ese campesino debía tener no pocos conocimientos de física. Este último autor agrega que la palabra "termómetro" fue usada por vez primera por el autor francés P. Leurichon en 1624, cuando aún vivía Galileo.

Fue en la misma Italia de Galileo y en la misma época donde el médico y físico Giambattista Della Porta, (1535-1615) en 1601 en la Universidad de Nápoles, realizó una importante serie de experiencias ya propiamente científicas, sobre el vapor y sobre la presión del vapor caliente. Tales experimentos fueron las manifestaciones precursoras del interés científico y técnico que estos temas comenzaron a despertar en Europa, dentro del mismo siglo. Es verosímil pensar que Della Porta ya había sabido del aeolipilo que Herón construyó y ensayó en Alejandría 1550 años antes, porque ya en esta época Europa conocía la literatura de la antigüedad clásica, venida a través de los árabes y de los bizantinos.

Pero a quien la historia reconoce como inventor del primer termómetro y quien le dio ese nombre, fue un noble italiano, desocupado pero aficionado a la "filosofía natural": el gran duque de Toscana Ferdinando II (1610-1670), en el año de 1641. Era simplemente un tubo de vidrio, recto, con un extremo sellado y otro abierto, parcialmente lleno de líquido de tal manera que, al ponerlo en contacto con un cuerpo caliente se dilataba el líquido, alargando su columna en una cantidad que se podía medir a lo largo del tubo. Aún era muy elemental, pero era mucho mejor que el termoscopio de Galileo. Trece años después, en 1654, el mismo gobernante florentino mejoró su termómetro, cerrándolo en ambos extremos y usando también un líquido (como agua, alcohol o aceite de oliva) como indicador de la medida.

Quince años después, en 1669, independientemente, el físico francés Guillaume Amontons (1663-1705) ideó un termómetro de aire, distinto y mejor que el de Galileo, pues medía las temperaturas por cambios de presión y no por cambios de volumen. Así descubrió que el agua hierve siempre a la misma temperatura, y pudo usar la ebullición del agua como temperatura de referencia para las demás mediciones. Con su termómetro encontró que una misma cantidad de aire aumenta en volumen, cuando aumenta la temperatura, en una cantidad constante, y que esa misma cantidad de aire merma su volumen al enfriarse (Esto ocurría 118 años antes de que lo redescubriera Charles). Luego Amontons encontró que esa cantidad era la misma para todos los gases. Pero sus descubrimientos pasaron desapercibidos y solamente fueron re-encontrados más de un siglo después.

El Renacimiento en Europa trajo consigo el redescubrimiento de la cultura y de la ciencia de la antigüedad clásica. Comenzó en el siglo XV en Italia. En esa atmósfera de innovación y de avance, un estudioso francés de nombre Salomon de Caus (1567-1630) publicó en 1615, en Frankfurt, su libro "Les raisons des forces mouvantes avec diverses machines" en el que describe numerosos dispositivos mecánicos y aparatos térmicos que los arquitectos, los artesanos y los mineros europeos habían estado inventando desde la Edad Media. En ese libro su autor propone un aparato para calentar el agua que consistía en un recipiente cerrado hasta cuyo fondo llega un tubo, por el cual saldría al ambiente exterior un chorro de agua caliente impulsada por la presión del vapor en el recipiente. Dice Rey Pastor (Ver bibliografía) que el ya mencionado Della Porta (1535-1615) había construido unos años antes, en Nápoles, un aparato muy similar al de Caus y que la concepción de esos dispositivos implica que

Della Porta y Caus ya entendían claramente que el vapor de agua no es aire caliente sino un cuerpo distinto con una gran posibilidad de expandirse.

Unos años después, en 1629, el ingeniero italiano Giovanni Branca publicó en su país el libro "Le artificiose machine" donde describe numerosas máquinas realmente usadas en su tiempo, y otras que el autor imaginó como proyectos para el futuro. Allí describe y dibuja una máquina hipotética que consistiría en una rueda horizontal, dotada de paletas en su periferia, paletas sobre las cuales incide a alta velocidad un chorro de vapor de agua, caliente, que hace girar así la rueda con alta velocidad de rotación. En el mismo libro Branca propuso una "rueda del fuego", movida por gases calientes ascendentes que se originan en un hogar de combustión. Ninguna de las dos máquinas existía realmente en su tiempo y no parece que hubieran sido construidas por Branca o por nadie en esa época. Pero hay que reconocer que una y otra contenían claramente la idea de producir trabajo mecánico mediante máquinas rotatorias que, andando los siglos, darían lugar a la turbina de vapor y a la turbina de gases que hoy usamos para mover generadores eléctricos, barcos y otras máquinas.

El siglo XVII muestra un vivo interés por la ciencia y por el avance de la técnica en Inglaterra. En 1655, el Marqués de Worcester, Edward Somerset, encarcelado en la Torre de Londres después de ser sitiado y rendido su castillo por las fuerzas del Parlamento (1646) durante la revolución de Cromwell contra Carlos I, escribe su libro "La Centuria". Allí, en forma no muy clara, para no perder la prioridad de sus muchas invenciones, describe, entre otras cosas, una máquina para elevar agua que él había construido en 1630 en su castillo. Excarcelado en 1660, el personaje mencionado construyó otra máquina análoga cuyo dibujo han reconstruido algunos historiadores de la tecnología. Allí la presión del vapor impele hacia arriba el agua de un depósito inferior, produciéndose un vacío, que absorbe el agua inferior para llenar otro depósito superior. En esencia, este era el principio esencial que sería usado después en las máquinas de Savery y Newcomen. La máquina de Somerset significaba un gran avance y fue puesta en uso práctico hasta 1670, mientras estuvo muy en boga, según informan Rey Pastor y Drewer (Ver bibliografía). Por eso en 1663 el Marqués de Worcester declaraba satisfecho que había descubierto el poder del vapor para elevar el agua y "para reventar cañones".

Johann Baptiste van Helmont (1579-1644) fue un gran científico experimentador y teórico holandés que mucho estudió el fuego y el calor, y quien inventó la

palabra "gas" para referirse a los cuerpos que se encuentran en ese estado. En 1630 aseveró con clarividencia que la llama es humo en ignición y que el humo es gas. Fue él, además, quien primero expresó claramente la ley de la indestructibilidad de la materia, aunque esta trascendental revelación pasó desapercibida para los científicos de su tiempo.

Quizás no es aventurado pensar que en la mente de algunos alquimistas europeos del siglo XVII o de algún experimentador imaginativo, comenzó a aparecer la noción de que el calor sería una "sustancia" que los cuerpos ganarían al calentarse y que perderían al enfriarse. El hecho es que a mediados del siglo siguiente, los "filósofos naturales" ya hablaban de "la materia del calor" y de "el calórico" como "nombre científico" para referirse a aquella, e incluían ese "calórico" como participante en las reacciones químicas donde aparecía, en pie de igualdad con los reactivos y con los productos de las mismas. Así lo hicieron los primeros químicos que, como Boyle, fueron los padres de esta ciencia, hija culta de la semi-bárbara pero útil alquimia que los árabes habían llevado a Europa.

Es claro que el siglo XVII, a partir de Galileo, vio nacer como ciencia (en el sentido moderno) la teoría del calor. Los grandes pensadores de la época le dedicaron extensas reflexiones teóricas y mucha experimentación. Dice Partington que algunos de los sabios ingleses más profundos de la época, tales como Francis Bacon, Robert Boyle, Robert Hooke e Isaac Newton entrevieron que el calor era el movimiento mecánico de las partículas diminutas de los cuerpos, movimiento que aumentaba en intensidad con la temperatura. Es lamentable, sin embargo que esa idea visionaria no se hubiera extendido entre los científicos hasta fines del siglo siguiente con los trabajos de Rumford, como veremos más adelante.

Pero en el mismo siglo XVII nació, dice el mismo Partington, uno de los errores más grandes y perdurables que hayan ocurrido en la historia de la ciencia, y que se refería a la combustión y a los combustibles. Varios químicos y médicos acuñaron la palabra "flogisto" para designar la presunta materia intangible e invisible y principio que daba lugar al fuego cuando un cuerpo se quema (aunque no designaba al mismo fuego). Así lo hicieron Raphael Eglin (Hapelius, dicho en latín) en 1606, Daniel Sennert (1572-1637) en 1619, y el mismo van Helmont por esos mismos años. Luego, en 1669, el químico alemán Johann Joachim Becher (1635-1682) afirmó que los constituyentes de los cuerpos son el aire, el agua y tres "tierras", una de las cuales era la "tierra inflamable". Y en 1703 el

médico alemán Georg Ernest Stahl rebautizó esa tierra inflamable como “flogisto” y le enseñó a Europa esta palabra y esta idea que sólo serían desterradas de la ciencia por Lavoisier, casi un siglo después. La teoría era que toda materia combustible u oxidable poseía una sustancia especial llamada “flogisto”, intangible e invisible, algo así como un “espíritu”, con peso negativo (!), que al quemarse u oxidarse esa materia, era desprendida a la atmósfera. Pese a todo, esta teoría absurda de la combustión y de los combustibles prevaleció casi durante un siglo entre los químicos y los físicos de toda Europa.

Robert Boyle (1627-1691) fue el gran experimentador que convirtió la vieja alquimia en la química científica como hoy la entendemos. Nació en Irlanda pero se formó y trabajó en Inglaterra. Su gran obra “The sceptical chymist” es -puede decirse- la primera gran obra de investigación en la historia de la química. Inicialmente su asistente de laboratorio fue Robert Hooke, con quien hizo mucha investigación sobre la combustión y sobre los materiales combustibles como el hidrógeno, el carbón vegetal, el azufre y la pólvora. Boyle sospechó que no podía existir combustión en ausencia de aire. Luego trabajó él solo extensamente sobre el efecto del calor en las reacciones químicas, sobre la calcinación de sólidos, sobre la destilación de líquidos, sobre los gases calientes y fríos, y sobre muchos otros fenómenos térmicos de tipo físico-químico. Midió la gravedad específica cuyo concepto se conocía desde los tiempos de Arquímedes, para numerosos sólidos y líquidos, y se sirvió ampliamente para sus experimentos de mezclas refrigerantes como la de ácido nítrico con nieve. Fue quien primero usó en el laboratorio el termómetro de vidrio con columna de mercurio y cerrado en ambos extremos, que aún se emplea extensamente en nuestras fábricas y en nuestros laboratorios. Con su termómetro y con la bomba de vacío que él le rediseñó a Hooke para que éste la construyera, Boyle descubrió que la temperatura de ebullición de los líquidos aumenta si se sube la presión ambiente.

En 1673 publicó sus “New experiments touching the relation betwixt flame and air”, y también sus “New experiments to make fire and flame stable and ponderable”. Varios años antes, en 1662 había encontrado su ley de relación inversa entre las presiones y los volúmenes de los gases, la misma que hoy los científicos angloparlantes llaman Ley de Boyle. Esta relación sería redescubierta independientemente en Francia, en 1679 por el físico Edme Mariotte, por lo cual debemos llamarla Ley de Boyle y Mariotte. Es importante recordar que Boyle descubrió experimentalmente el fenómeno termodinámico de que el agua hierve a menor temperatura cuando lo hace a presión menor que la del ambiente

atmosférico, fenómeno lleno de aplicaciones hoy en la tecnología aplicada del calor. En su libro “Micrographia” (1667) Boyle publicó la primera teoría explícita y admisible sobre la combustión, y describió correctamente la estructura de la llama de una vela, o de cualquier llama.

El químico inglés John Mayow (1641-1679) descubrió luego que la combustión y la respiración son procesos de una misma naturaleza y que el aire es indispensable para ambos; pero que sólo una cierta parte de este gas que nos rodea interviene en ellos (Hoy sabemos que esa parte es el oxígeno contenido en el aire).

También la tecnología daba pasos importantes. Entre los años de 1650 y 1654, en la ciudad alemana de Magdeburgo, su alcalde Otto von Guericke, desarrolló la primera bomba neumática de vacío y realizó el famoso experimento de acoplar dos hemisferios de bronce, evacuados de aire, y tirar de ambos con dos troncos de caballos avanzando en direcciones opuestas, sin lograr desprenderlos. Fue un experimento crucial para el desarrollo posterior de la teoría y de la construcción de las máquinas de Newcomen y de Watt. Luego, en 1655 Robert Hooke (1635-1703) en Oxford, y a solicitud de Boyle, mejoró la técnica de construir y reconstruir barómetros. Después, en 1659 el propio Boyle mejoró el diseño de la bomba de vacío que construyera Hooke. Y usando la técnica de construir cilindros herméticos con émbolo móvil, en 1674, en París, el físico holandés Jan Christian Huyghens (1629-1695) intentó hacer funcionar un rudimentario motor de combustión interna impulsado por explosiones de pólvora dentro del pistón. Era la idea que con el tiempo se convertiría en el motor de automóvil que hoy mueve al mundo.

Las luchas religiosas en Francia en ese siglo XVII expulsaron de ese país a los protestantes, quienes allí eran llamados hugonotes. Uno de ellos, un joven estudioso y brillante llamado Denis Papin (1647-1712) emigró a Holanda y se ocupó como asistente de Huyghens en su laboratorio de la Universidad de Leyden. Poco antes, todavía en París, en 1675, Papin había construido una bomba neumática perfeccionada, superior a la de Guericke. Y en 1680, acompañando a Huyghens en Inglaterra, presentó en ese país su invento de la olla a presión con válvula de seguridad, con la cual demostró la posibilidad de alcanzar con relativa sencillez altas presiones y altas temperaturas, usando vapor de agua. Diez años después, ya exilado en Alemania, Papin diseñó y construyó en la misma Magdeburgo de Guericke una máquina de vapor atmosférica

experimental (un simple pistón de vapor) a la que proyectaba dar aplicación industrial. Este mecanismo sería luego el corazón de la máquina de Newcomen, no sabemos si a sabiendas de éste o no. Y en 1695, en Kassel, Papín estuvo trabajando en el proyecto de una transmisión de energía neumática y de una lancha a vapor. No pudo llevar a la práctica el proyecto, según se afirma, porque su lancha a vapor fue destruida por barqueros del río Fulda, temerosos de que el vapor les quitara su trabajo.

Thomas Savery (1650-1715) era un técnico de minas inglés que tenía que luchar diariamente con el problema del agua freática que mana en los socavones, los inunda e impide el trabajo. Por eso se dedicó largo tiempo a idear un dispositivo mecánico para extraer el agua del fondo de las galerías de las minas a la superficie. En 1693 lo patentó como “una máquina de aspiración”. Consistía esencialmente en una caldera cerrada para generar vapor a presión muy poco superior a la presión atmosférica; y de un recipiente ovoidal, cerrado. El vapor entraba al recipiente ovoidal y enseguida éste era enfriado externamente con agua fresca. Se creaba así un vacío en el recipiente y éste succionaba el agua del fondo de la mina, mediante un tubo vertical descendente y largo. A renglón seguido se le inyectaba más vapor al recipiente y se expulsaba el agua por otro tubo vertical ascendente hasta la superficie exterior. El poder elevador de la máquina era de 27 metros de columna de agua; y para minas más profundas se instalaban dos o más unidades en tandem, verticalmente. Savery bautizó su máquina como “el amigo del minero” y escribió un folleto con el mismo nombre para divulgar su uso. Inicialmente la caldera presentaba el riesgo de estallar, hasta que el mecánico John Theophile Desaguliers (1683-1744), en 1715 le adaptó la válvula de seguridad que había sido inventada por Papin (1679) y le hizo otras mejoras. La máquina sólo podía aspirar el agua desde el nivel de cinco metros por debajo del recipiente ovoidal. Adolecía de muchos riesgos mecánicos, hidráulicos y térmicos. Tenía muy baja eficiencia termomecánica, no superior a dos o tres por ciento y por eso requería grandes cantidades de carbón o leña para extraer poca agua, y aún eso, haciéndolo muy despacio. Pero muchas máquinas de Savery funcionaron en las minas inglesas. Y en Francia, en 1707 Papin le hizo varios perfeccionamientos, y entre ellos reemplazó el recipiente ovoidal por un cilindro con pistón accionado por el vapor.

Al otro lado del canal, en 1699, el físico francés Guillaume Amontons (1663-1705), ya mencionado, al cabo de numerosos experimentos trazó en París el diseño de una “machine a feu”, basada en las ideas de Papín, e incluyendo una

marmita a presión como la inventada por éste y que, al menos en teoría, podría mover un vehículo. Sin embargo, esa máquina nunca se usó comercialmente en Francia ni en ningún otro país. De todos modos, la Revolución Industrial ya estaba en plena marcha en Gran Bretaña.

EL SIGLO DE LA ILUSTRACIÓN

Al comenzar el siglo XVIII vivía en Europa una pléyade de sabios: Isaac Newton, Robert Hooke, Amadeo Avogadro, Denis Papin, Thomas Savery, Thomas Newcomen, Guillaume Amontons, Abraham Darby, Antoine Réaumur, Gabriel Fahrenheit, Jakob Leupold, Hermann Boerhave y muchos otros grandes científicos e ingenieros que generaban torrentes de conocimientos teóricos y de nuevas aplicaciones técnicas acerca del calor y de varios otros campos de la Ciencia.

Uno de los primeros grandes pasos en la tecnología y la ciencia del calor de este nuevo siglo lo dio el constructor de instrumentos alemán Gabriel Daniel Fahrenheit (1687-1736), nacido en Dantzig y quien trabajaba en la ciudad de Amsterdam, en 1717. El ensayó con numerosos termómetros de alcohol marcados con graduaciones numeradas de longitud, hasta que dio con el termómetro de mercurio que sin saberlo Fahrenheit, ya había usado Boyle. Preparó una mezcla de hielo, agua y cloruro de amonio, que entonces era la más fría que se conocía en condiciones ambientales, y marcó allí los cero grados de temperatura de su escala (0°F, según escribimos hoy). Para la mezcla de agua y hielo en equilibrio (que es un poco menos fría) marcó 32°F (0°C, para nosotros), y consecuentemente le resultó para el agua hirviendo al nivel del mar (Amsterdam es puerto en la orilla del mar del Norte) la temperatura de 212°F. Fue la primera escala de temperatura que se inventó en el mundo y rápidamente se expandió por Alemania, Holanda e Inglaterra. Aún hoy seguimos usándola. Luego, en 1730, en París, el ingeniero René Antoine Ferchault de Réaumur (1683-1757) construyó un termómetro de alcohol y le graduó su escala desde los cero grados (0°Re, se escribía) en la temperatura de congelación del agua, hasta los 80°Re a la temperatura de ebullición a nivel del mar. Esta escala de Réaumur se usó en Francia y en Italia hasta principios de nuestro siglo XX. Y en 1742 el astrónomo y físico sueco Anders Celsius (1701-1744) en la Universidad de Upsala inventó el termómetro centígrado pero al revés: 100°C para la congelación del agua y 0°C para la ebullición a una atmósfera de presión (nivel del mar). Afortunadamente al año siguiente el físico francés Jean Pierre Christin invirtió la escala para dejarla como la usamos hoy en todo el mundo. De esta manera, las equivalencias entre las tres escalas se expresan mediante las relaciones numéricas:

$$C = (F - 32) \times 5/9 \qquad C = 10 R/8$$

$$R = (F - 32) \times 50/72$$

donde C es la temperatura centígrada (o Celsius), R es la temperatura Réaumur y F es la temperatura Fahrenheit. La introducción de las escalas termométricas fue -y sigue siendo- un hecho de importancia trascendental en la evolución de la ciencia y de la tecnología del calor.

A propósito de Réaumur hay que señalar que fue él quien inventó y construyó en 1720 el primer horno de cúpula o "cubilote" (como aún se le dice), para fundir hierro gris. Durante dos siglos y medio el cubilote fue el equipo y el método más usado para fabricar las piezas de hierro gris derretido que después se vierte en moldes de arena para darle forma (o "hierro colado"). El cubilote permitió popularizar en casi todo el mundo -inclusive en muchos países muy pobres y en Colombia- la industria de la fundición de metales. Inicialmente el horno de cúpula era calentado con carbón de madera, pero desde que Darby inventó el coque, se siguió caldeando con este otro tipo de carbón. A pesar de que hacia 1960 el cubilote comenzó a ser desplazado rápidamente por el horno de inducción en todo el mundo, aún operan muchos cubilotes en este fin de siglo XX, especialmente en países pobres incluyendo el nuestro, donde su bajo costo de construcción y la sencillez de su operación lo hacen accesible a empresas y a naciones de escasos recursos financieros y técnicos.

Thomas Newcomen (1663-1729) era -como Savery- ingeniero en las minas de carbón de su patria inglesa y vivía también preocupado por la evacuación de las aguas subterráneas del fondo de los socavones. Por eso se dedicó desde 1705 hasta 1712, a diseñar y a construir prototipos para una máquina aspirante, a vapor, más potente que la de Savery, para poder extraer volúmenes más grandes de agua. Fue así como desarrolló la máquina que llamamos con su nombre aunque hoy sólo existe como curiosidad de museo, a la que denominó "máquina de presión atmosférica" y en la que utilizó ideas de Papin, de von Guericke y de Savery. Era un gran balancín horizontal, elevado, que en un lado era subido y bajado por un cilindro de vapor con su pistón, cilindro donde entraba vapor caliente para elevar el brazo del balancín; y luego era enfriado inyectándole agua fría al interior del cilindro, con lo cual el vapor se condensaba y creaba vacío, y el pistón quedaba así sometido a la fuerza descendente de la presión atmosférica que lo hacía bajar. La oscilación del balancín era transmitida por el otro brazo a una viga vertical que en su ascenso y descenso operaba una o

varias bombas aspirantes e impelentes que extraían el agua del pozo de la mina. Para fabricar y vender su máquina se asoció con el mismo Savery y otro inversionista. En 1712 Newcomen patentó su invento, y construyó en una mina de carbón la primera máquina de vapor en la historia que usara un cilindro de vapor con pistón como elemento motor. Al año siguiente, un joven ayudante de Newcomen llamado Humphrey Potter, mejoró en varios aspectos el funcionamiento de la máquina, aunque la eficiencia termomecánica de ésta seguía siendo de sólo dos o tres por ciento y por lo mismo consumía mucho carbón. Desperdiciaba gran cantidad de energía; consumía 25 kilos de carbón por caballo-hora de trabajo y, en consecuencia, su operación era muy costosa. Aún así se dice que Newcomen tuvo éxito desde el principio, y construyó y vendió unas 500 máquinas antes de ser desplazado del mercado por la competencia que vendría luego de parte de la máquina de Watt, a comienzos del siglo siguiente. En 1830 se construyó (siempre en Inglaterra) la última máquina de Newcomen.

El ejemplo y los escritos de Papin, de Somerset, de Savery y de Newcomen estimularon e inspiraron a otros estudiosos. Así, en el año de 1723 se presenció en Alemania una novedad tecnológica verdaderamente portentosa para su tiempo, cuando Jakob Leupold (1624-1727) publicó su libro "Theatrum machinarum generale", en nueve tomos. Era una gran enciclopedia sobre las máquinas de su tiempo. Allí el autor describe el diseño de una máquina de vapor a alta presión, sin condensador, comparable a las que aparecerían poco después en Europa Occidental. Estaba claramente inspirada en la de Newcomen, pero a diferencia de ésta nunca se convirtió en una máquina útil en la vida práctica.

Fue también a comienzos del siglo, en 1724, cuando el médico y químico holandés Hermann Boerhave (1668-1738) afirmó en su libro "Elementae chemiae" que el calor es un fluido, al que llamó "el calórico", que no tenía peso, que podía ser absorbido o expulsado de los cuerpos, y podía ser transpasado de uno a otro cuerpo. Esta idea venía de tiempo atrás, y perduró en el mundo científico europeo hasta fines de ese mismo siglo, cuando los trabajos de Rumford desterraron del todo la idea del "calórico" para reemplazarlo por el concepto mecánico de movimiento de partículas. Cabe anotar aquí que en el mismo año de 1724 Gabriel Fahrenheit (de quien ya hablamos) descubrió y describió el fenómeno del sobre-enfriamiento del agua, cuando ésta se refrigera cuidadosa y lentamente por debajo de 32°F (o sea de 0°C) sin congelarse, hasta que lo hace repentinamente al caerle alguna partícula sólida, o al acelerar el enfriamiento.

Un gran avance en la teoría de los gases y del calor se registró en 1738 cuando Daniel Bernouilli (1700-1782), en Basilea, Suiza, elaboró y formuló la primera teoría cinético-molecular de los gases. La teoría describe un gas como un cuerpo formado por partículas pequeñísimas separadas por "grandes" distancias, y que se mueven erráticamente, al azar, chocando elásticamente entre ellas y contra las paredes del recipiente. Esto le permite a Bernouilli deducir que, a una misma temperatura, el producto de la presión por el volumen permanece constante en el tiempo (como lo prevé la ley de Boyle-Marriotte); y que si la temperatura del gas aumenta o disminuye, en la misma proporción lo hará la energía cinética total (entonces llamada vis-viva) de las partículas, como también aumentaba el producto aritmético de la presión por el volumen.

En otras palabras, que

Presión x volumen = constante x (temperatura centígrada + constante)

Esto último sería redescubierto (o corroborado) en forma definitiva y de manera experimental, en el siglo siguiente, por los físicos franceses Charles y Gay-Lussac, independientemente el uno del otro, como veremos más abajo.

En años recientes de esta misma época, Rusia, tan remota y tan atrasada respecto del Continente, estaba siendo sacudida por el zar Pedro I el Grande, para incorporarla a la vigorosa corriente de progreso científico y tecnológico que recorría a Europa Occidental. Nunca hasta entonces Rusia había hecho ningún aporte original a la ciencia o a la tecnología de la física o de la química. Pero en la nueva atmósfera estimulada por el zar, se destacó el gran químico Mikhail Ivanovich Lomonosov (1711-1765) quien en 1744 publicó en San Petersburgo un artículo sobre las causas del calor y del frío. Allí afirma que según sus estudios, el calor es una forma de movimiento de las partículas de los cuerpos. Aunque esto ya lo habían conjeturado otros científicos de ese siglo, ellos habían sido desatendidos, como lo fue también Lomonosov. Hay que notar que si bien esa idea había sido mencionada por varios científicos, no había llegado a abrirse paso en la ciencia porque no se había sometido a la prueba de experimentos y mediciones cuantitativas, como lo requería la ya avanzada mentalidad científica de la época. Sería Rumford quien lo lograría, como lo veremos más abajo.

Entre tantos investigadores brillantes en Europa, el gran científico del calor en el siglo XVIII fue el médico, químico y físico escocés Joseph Black (1728-1799)

nacido en Burdeos (Francia). Sus extensas investigaciones y conferencias aparecieron compiladas y publicadas en 1803 (post-mortem) con el título de "Lectures on the elements of chemistry". En sus numerosísimos experimentos con calor y frío, con agua y otros líquidos, Black concibió y definió los conceptos importantísimos de calor específico y de capacidad calorífica de los cuerpos (1754). Luego identificó el fenómeno de calor latente de evaporación y el de calor latente de fusión de las sustancias, cuando éstas sufren estos cambios de estado absorbiendo (o devolviendo) mucho calor sin cambiar de temperatura (1761). Black midió por vez primera el calor específico del agua en términos de onzas de carbón necesaria para calentarla, lo tomó como referencia de los calores específicos de otras sustancias y midió también el de muchas de éstas (1760-1765). Además, con esta unidad midió los calores latentes de evaporación de numerosos líquidos. Fue Black quien así introdujo en la Física la importantísima idea de los calores específicos de las sustancias, y de los calores latentes necesarios para que éstas cambien de estado sin cambiar de temperatura, o, como decimos hoy, de manera reversible. Pero hay que mencionar que algunos de los trabajos de Black, fueron erróneamente interpretados por algunos de sus contemporáneos como un apoyo a la idea equivocada del "calórico" que era muy común en su tiempo. Resulta claro que si Joseph Black no tuvo que inventar los primeros tipos rudimentarios de calorímetros, alguien un poco anterior a él debió ser quien lo hizo, para poder medir cantidades de calor con la precisión con la que lo hizo Black. Sus trabajos clarificaron definitivamente la gran diferencia entre los dos conceptos de temperatura por una parte, y cantidad de calor por la otra. Así mismo las extensas investigaciones de Black constituyeron después una firme base teórica para el trabajo de Watt en el diseño de su máquina. Así lo reconocería después el mismo Watt. Black fue, entre otras cosas, el creador indiscutible de la calorimetría como ciencia experimental rigurosa.

De esos años es del caso recordar que en el ámbito de la tecnología del calor en la siderurgia, se registró una innovación muy importante: El empresario e ingeniero metalúrgico John Wilkinson, en Inglaterra, en 1757 patentó una máquina sopladora hidráulica accionada por agua, para impulsar los fuelles que eran necesarios para avivar la combustión en los altos hornos y en los hornos de recalentamiento del hierro. Esto suponía ya una clara comprensión del papel vital de la ventilación en la velocidad de una combustión; y en la vida industrial significó un notable aumento en la velocidad de producción de hierro, una mayor producción diaria y una rebaja en el costo de producción por tonelada de metal.

Es también importante registrar que hacia 1770, el técnico ceramista e industrial de la locería de nombre Josiah Wedgewood (1730-1795), en Inglaterra, experimentando en la quema de arcillas inventó lo que hoy llamamos "conos pirométricos", que son las pequeñas pirámides de unos 10 ó 15 centímetros de altura y base cuadrada, hechas de mezclas de arcillas y arenas que funden, cada una, a una temperatura distinta y bien conocida, y que sirven por eso para determinar la temperatura de un horno en donde se las coloca: el último de ellos que se funde al calentar el horno indica la temperatura del recinto. Fue el primer sistema usado industrialmente para medir altas temperaturas.

Ya en el último tercio del siglo XVIII, y aún antes de los trabajos de Watt, las ideas sobre máquinas de vapor habían prendido en algunos medios académicos e industriales de países de Europa Occidental. Es así como en 1767 un ingeniero militar francés, Joseph Nicolas Cugnot (1725-1804), pensando en mecanizar la marcha de los cañones de artillería, diseñó y construyó un carro triciclo de madera, dotado de una marmita calentada por leña y de un cilindro de vapor, que podía moverse por su propia energía térmica. Este es el primer vehículo autopropulsado que se recuerda en la historia de la tecnología. Podía transportar cuatro personas a la velocidad de 3.6 kilómetros por hora. Pero era demasiado pesado; peligroso para los pasajeros por el fuego de la caldera; y costoso de construir. Por eso no prosperó. Pero es bueno recordarlo porque el carro de Cugnot fue el antecesor de las locomotoras de vapor que vendrían poco después, y también el antecesor más remoto de los vehículos que luego, en el siglo XIX, comenzaron a moverse mediante sus propios motores de combustión interna.

Un paso más en la clarificación científica del concepto de calor lo dio en 1772 en Suecia el físico Johan Carl Wilcke (1732-1769) al medir por vez primera el calor latente para la fusión del hielo. Años después, en 1781, él mismo redescubrió (independientemente de Black) el concepto de calor específico de las sustancias, midiendo las cantidades de calor como cantidades equivalentes de carbón al quemarse. Debió ser él quien primero dibujó la curva de calentamiento del agua, desde hielo hasta vapor, en grados de temperatura, en función del tiempo de calentamiento. Estos trabajos abrieron también la posibilidad de definir y medir los calores de combustión de los diversos combustibles que ya se usaban en ese tiempo (leña, carbón vegetal, turba, lignito, antracita, aceite de ballena, sebo animal) comparándolo con la hulla, lo que significó un gran avance conceptual y experimental puesto que se trataba

de un tema de enorme importancia práctica en el mundo de la industria, la que crecía vertiginosamente en esos años en Europa.

Fue durante los años del decenio 1770-1780 cuando, en París, el químico Antoine Laurent Lavoisier (1743-1794) realizó sus trabajos famosos que le llevaron a descubrir la naturaleza de la combustión como un proceso de combinación del combustible con el oxígeno del aire (gas este al cual le dio su nombre), lo mismo que la naturaleza de la respiración. Lo llevaron también a demostrar experimentalmente el principio de conservación de la masa; a definir el calor de combustión; a determinar la composición química del agua (tan conocida hoy y que escribimos como H_2O); y a establecer que la combustión al aire de materiales carbonáceos es una oxidación que produce gas carbónico. Trabajando en estrecha colaboración con Laplace (Pierre Simon, marqués de, 1749-1827), construyó los primeros calorímetros de precisión en su laboratorio. Por esto, por su novedoso uso de los métodos químicos cuantitativos y por sus muchos aportes a esta ciencia, Lavoisier es llamado “el Padre de la Química Moderna”. El desterró del todo la idea falsa del “flogisto”, que había imperado para “explicar” la combustión, desde cuando la impuso Stahl, medio siglo antes, y que el mismo Lavoisier había aceptado en sus primeros años. El flogisto salió definitivamente de la Ciencia y entró a la Historia de la Ciencia. Es así como aún lo recordamos hoy.

Casi simultáneamente entró en el conocimiento de los químicos del mundo el gas oxígeno, que fue aislado e identificado independientemente por Joseph Priestley (1733-1804) en Leeds, Inglaterra, en 1774, y por Karl Wilhelm Scheele (1742-1786) en Upsala, Suecia, en el mismo año. Ambos aclararon ya del todo su función indispensable en una llama. Así terminó la leyenda del flogisto y quedó claramente comprendida la combustión de la llama y sus otras dos variantes, la oxidación lenta en la atmósfera y la respiración de los seres vivos.

En 1779 un ingeniero inglés, Adair Crawford, escribió y publicó el libro con el largo título de “Experimentos y observaciones sobre el calor animal y la inflamación de cuerpos combustibles”. Allí presentó nuevos métodos calorimétricos para medir el calor específico de las sustancias y trató sobre la generación de calor en el cuerpo de los animales. Fue precisamente en ese mismo año cuando Lavoisier dio el nombre de “oxígeno” a la parte del aire que es respirable y comburente.

Aún en este momento los químicos y los físicos seguían pensando que el calor era una sustancia continua, fluida e imponderable a la que llamaban “calórico”. En los años 1780-1788 varios químicos como K. Lubbok, J. Gadolin y J.B. Richter afirmaban todavía que un combustible contenía gas oxígeno y “calórico”. Así lo informa Partington en su libro ya referido (Ver bibliografía).

El gran “breakthrough” en el progreso de la ciencia del calor en el siglo XVIII lo hizo el militar e ingeniero norteamericano Benjamín Thompson (1753-1814), más conocido como Barón de Rumford, y quien vivía en Inglaterra en 1798 cuando publicó su libro “Enquiry concerning the source of heat which is excited by friction”, en el cual describe sus experiencias cruciales como director de las fábricas de cañones del reino alemán de Baviera, cargo que acababa de desempeñar. Perforando las ánimas de los cañones Rumford observó que éstos se calentaban con la fricción del barreno, tanto más rápidamente cuanto más rápido se les taladraba; que la cantidad de agua de enfriamiento requerida en esa operación era directa y rigurosamente proporcional a la cantidad de metal arrancado; y lo más importante, descubrió que era posible producir calor en el metal en cantidades indefinidamente grandes simplemente taladrando el cañón durante un lapso suficientemente largo. Ningún fluido (como supuestamente era el “calórico”) podía ni puede producirse en cantidad indefinida por el mero procedimiento de hacer trabajo mecánico indefinidamente. Esto demostraba sin lugar a dudas que el calor es una forma de energía mecánica de vibración de las partículas de los cuerpos. Partington señala que Black ya lo había afirmado. Y como vimos arriba, lo había anunciado también Lomonosov. Pero faltaba la prueba experimental irrecusable que dio Rumford. El trabajo del militar norteamericano desterró para siempre la noción errónea del “calórico” que había sido imaginada por Boerhave. Al año siguiente (1799) el físico y químico (hoy muy famoso) sir Humphry Davy (1778-1829), buscando nuevas comprobaciones de la teoría de Rumford, estuvo experimentando y encontró que frotando en el vacío dos trozos de hielo y manteniendo todo el experimento a $0^{\circ}C$ ($32^{\circ}F$), se podía derretir todo el hielo. En experimentos anteriores, entre 1787 y 1799, Rumford había comprobado con gran exactitud y rigor, que el peso de una cierta cantidad de agua no cambia al congelarse ni al derretirse, aunque lo primero requiere retirarle una gran cantidad de calor y lo segundo requiere devolvérsela. De aquí al experimento crucial de Joule, en 1843, quedaba sólo un paso que dar. Es extraño que hubiera que esperar para ello más de 40 años, aunque tanto Rumford, como Davy y como Joule vivieron en la misma Inglaterra y en

la misma atmósfera de progreso científico y técnico. Rumford terminó su vida en París, después de haberse casado en 1805, con la viuda de Lavoisier, quien en sus primeros años había sido defensor muy resuelto de la teoría del calórico.

Ya dijimos que en 1783, en Francia, Lavoisier y Laplace (Pierre Simon, 1749-1827) construyeron los primeros calorímetros de hielo de precisión y los usaron para medir calores específicos y para medir cantidad de calores desprendidos en la combustión de materiales y en la respiración humana. Dice Partington que este trabajo echó las bases de la ciencia que hoy llamamos la Termoquímica, tanto en su modalidad experimental como en la de teoría científica. Estos trabajos serían después perfeccionados y ampliados por Joseph-Louis Gay-Lussac (1778-1850) en la misma Francia. En 1787, también en París, el químico Jacques Alexandre-César Charles (1746-1823) redescubrió, sin saberlo, las relaciones de Amontons, según las cuales cuando una masa de gas se calienta, ella expande su volumen, y el aumento del volumen es aritméticamente proporcional al aumento de temperatura. Cinco años después (1792) Gay-Lussac corroboró este resultado y midió el coeficiente de expansión volumétrica por cada grado de aumento de temperatura para el aire y para el gas carbónico (que era llamado entonces "gas silvestre"). Por eso hoy llamamos esta ley cuantitativa con el nombre de Charles-Gay Lussac.

Por aquellos mismos años, en 1792, el ingeniero inglés William Murdock (1754-1839), ayudante de Watt, inventó la destilación seca del carbón, produjo gas combustible de retorta, y desde 1803 lo usó para calentar su propia casa y su taller en días de invierno. En 1804 el ingeniero inglés Frederick Winsor (1763-1830) patentó en Londres un horno para producir este gas a escala industrial y montó una planta para fabricarlo y venderlo. Desde ese momento el gas de carbón se comenzó a usar como combustible para iluminar casas y calles, y así comenzó a generalizarse en Inglaterra. El sistema público de alumbrado con este gas en Londres se inauguró en 1807. Philippe Lebon (1767-1804) reinventó o reprodujo el gas de carbón en Francia, en 1795; y en 1818 se inauguró el alumbrado público de París, después de sobrepasados los trastornos de las guerras napoleónicas. Así Murdock y Lebon le dieron al mundo un nuevo combustible (el gas de retorta o "gas de alumbrado") que fue importantísimo durante más de un siglo para iluminar casas y ciudades y como combustible para hornos. Este gas tiene un calor de combustión de alrededor de 600 a 800 Btu/pie cúbico normal.

Ya finalizando el siglo XVIII en 1793, y en plena Revolución Francesa la Asamblea Nacional de ese país adoptó el sistema métrico decimal de unidades de peso (hoy decimos "masa") y de medida, que se basa en el metro, el kilogramo y el segundo. Es uno de los pasos más trascendentales registrados en toda la historia de la ciencia y la tecnología. Rápidamente en Francia fueron definidas y adoptadas la "caloría" como unidad de cantidad de calor, el kilográmetro como unidad de trabajo mecánico, y el "chével de vapeur" (75 kilográmetros por segundo) como unidad de potencia. Este "chével de vapeur" es ligeramente distinto del "horse power" inglés. Por entonces en Inglaterra todos los científicos y los ingenieros medían los fenómenos térmicos en grados Fahrenheit y en "british thermal units". Pero en toda Europa continental los ejércitos napoleónicos y sus científicos acompañantes impusieron el "grado centígrado" (que hoy llamamos "de Celsius") y la caloría.

Hasta fines de este siglo XVIII que suele llamarse "de las luces", era aún muy poco lo que se sabía científicamente sobre la radiación del calor. Pero en 1791, un físico suizo hoy casi olvidado, Pierre Prévost (1751-1839), desarrolló la primera teoría correcta sobre los intercambios de radiación de calor. Además demostró que el frío es solamente la ausencia de calor; que todos los cuerpos, a cualquier temperatura irradian calor continuamente; y que cuando no parecen irradiarlo ello significa que lo están intercambiando en equilibrio térmico con su ambiente. Quizá su trabajo fue conocido en Inglaterra por el grande astrónomo y físico sir William Herschel (1738-1822) quien se dedicó en esos años a estudiar con el termómetro el espectro de la radiación solar, y en 1800 descubrió los rayos infrarrojos en dicho espectro. Estos rayos son los que, como hoy sabemos, producen efectos puramente térmicos y tienen longitudes de onda mayores que el color rojo de la luz visible.

Cuando termina el siglo XVIII, la Revolución Industrial ya ha emprendido su carrera vertiginosa en Inglaterra y está dando firmemente sus primeros pasos en Francia, en Alemania y en los pequeños Estados Unidos de entonces. Ya se estaban aplicando las grandes innovaciones mecánicas y termotécnicas que se habían realizado recientemente en las industrias textiles, en la siderurgia, en las fabricaciones metal-mecánicas, en las industrias químicas de entonces; en la producción de papel, en las fábricas de vidrio, en las cerámicas, en la minería y en otros sectores industriales. En aquellos países el consumo de combustibles había crecido espectacularmente, constituyéndose así en el indicador más elocuente del progreso técnico. El mundo no conocía aún la electricidad

industrial, ni el petróleo y sus derivados, ni la energía atómica. Por eso la leña, la hulla y el gas de carbón eran los materiales energéticos casi únicos (salvo una parte mucho menor de energía hidráulica) que movían al mundo industrial que surgía trepidante.

LA REVOLUCIÓN TERMOMECÁNICA DE WATT

James Watt (1736-1819) era un experto metalista y fabricante de instrumentos que ejercía este oficio en el taller de la Universidad de Glasgow. Un día del año de 1765 un profesor le pidió que reparara un prototipo de una máquina de Newcomen que era usado para fines didácticos y de estudio en esa institución. Además de reparar la máquina, Watt la estudió detenidamente pensando en cómo construir una que fuera más eficiente y más potente. Se dio así cuenta de que la mayor causa de ineficiencia de la de Newcomen estaba en que el vapor se inyectaba caliente a la cámara de expansión y era luego rociado con agua fría dentro de la misma, en una secuencia de calentamiento-enfriamiento que desperdiciaba una gran parte del calor aportado por el vapor. Desde ese momento hasta 1769 Watt trabajó en diseñar y construir un nuevo tipo de máquina de vapor; después siguió mejorándola y ensayándola, y en 1775 obtuvo la patente de invención. La innovación crucial es que en la máquina de Watt, la cámara de expansión y la de condensación están separadas, de modo que la primera se mantiene caliente y la segunda permanece fría.

La máquina de Watt poseía una caldera separada, calentada en hoguera de carbón, para generar vapor; y un dispositivo accionado por un cilindro que recibe el vapor y dotado de un pistón que es desplazado hacia afuera por el vapor. Al terminar la carrera del pistón se cierra la admisión de vapor y se abre una válvula de escape. El pistón regresa y expulsa el vapor que se había admitido, y éste va al condensador donde se enfría, se licúa y vuelve a la caldera. El pistón hace así un movimiento de vaivén que es transmitido por la biela correspondiente a los mecanismos que se trata de impulsar, bien sea con movimiento recíprocativo, o bien sea con movimiento rotatorio. En la primera máquina que construyó Watt el vapor actuaba a una presión baja, apenas superior a una atmósfera (14.7 libras por pulgada cuadrada o sea 1.05 kilogramos por centímetro cuadrado). Además, actuaba sobre una sola cara del cilindro, en una sola dirección (lo que se llama acción simple). Pronto el inventor modificó el diseño para que el vapor actúe a presión sobre una cara, en el camino de ida del pistón, y luego sobre la otra en el camino de regreso, lo que se llama doble acción, y duplica así, fácilmente, la potencia mecánica que produce.

En esos primeros años de su trabajo Watt hizo otros inventos para su máquina, como lo fue el movimiento planetario de la biela motriz para cambiar su movimiento de vaivén en movimiento rotatorio. Inventó también el regulador centrífugo, destinado a mantener constante la admisión de vapor y, por ende, la velocidad de la máquina. Diseñó además el mecanismo de palancas que se llamó "inversor de Watt" con el fin de convertir movimientos rotatorios en movimiento rectilíneo de vaivén. Inventó la idea y la unidad de medida del "horse-power" con el fin de promover la venta de sus máquinas llamando la atención al número de caballos (equinos) que se usaban entonces para oficios mecánicos y que la nueva máquina permitía reemplazar. También introdujo el concepto de eficiencia para su invento, definido como "el número de libras de peso que se elevan un pie en altura por cada fanega de carbón empleada". En 1790 concibió y le construyó a sus máquinas el indicador gráfico de presión y volumen, como varían dentro del cilindro de vapor, y que llamamos diagrama indicador de Watt.

La nueva máquina mostró de inmediato sus muchas ventajas. Era más potente que la de Newcomen y más económica en carbón. Marchaba de manera más regular. Podía accionar muchos tipos de máquinas mecánicas, además de las bombas de agua de las minas.

Watt buscó un socio capitalista para formar una compañía fabricante de su invento. Después de un intento fallido, en 1781 constituyó la empresa con el industrial Mathew Boulton (1728-1809); montaron la fábrica en un suburbio de Birmingham y se dedicaron a construir y vender la máquina, exportándola también a varios países del mundo y perfeccionándola cada vez más. Ella fue adoptada de inmediato en las muchas nuevas fábricas que estaban surgiendo en Gran Bretaña con motivo de la torrentosa revolución industrial que comenzaba en esos años en esa nación. Por eso mismo pronto recibieron solicitudes de Estados Unidos y de otros países europeos, para otorgar las licencias y los planos necesarios para fabricar la nueva máquina de vapor en sus respectivos mercados.

La idea de mover un vehículo mediante un motor de vapor (que Cugnot había intentado en Francia años atrás) se había conservado en Inglaterra, y el éxito del motor de Watt la reactivó. Por eso en 1785 el mecánico William Symington (1763-1831) construyó una pequeña lancha movida por reacción de vapor

caliente en el agua, de un H.P. de potencia. Construyó también un carruaje experimental, de madera, dotado de una pequeña marmita y un cilindro de vapor. Al año siguiente otro ingeniero mecánico, que trabajaba para Watt y Boulton, llamado William Murdock (1754-1839), construyó otro prototipo de carro de vapor. Pero ni Symington ni Murdock tuvieron éxito técnico ni comercial. Sus vehículos eran muy débiles y consumían demasiado carbón. Tampoco tuvo éxito un motor similar al de Watt (aunque más rudimentario), que un constructor de máquinas, James Pickard, patentó en la misma Inglaterra en 1780.

En esos momentos las mayores limitaciones técnicas del motor de vapor de Watt eran su escasa potencia (por la baja presión del vapor) y su tamaño grande. En Inglaterra, fue el ingeniero Richard Trevithick (1771-1833) quien se dedicó a desarrollar una máquina de vapor que trabajara con presiones más altas que las primeras de Watt. En Estados Unidos fue Oliver Evans (1755-1819) quien asumió la misma tarea.

Trevithick logró construir, en 1800, su máquina de vapor a más alta presión, con potencias muy superiores y tamaños más reducidos que los primeros motores de Watt. Enseguida se dedicó a diseñar y a construir una locomotora para arrastrar vagones cargados de carbón, y que fuera movida por su nueva máquina térmica; y en 1804 hizo la demostración pública de lo que ya podía llamarse el primer ferrocarril a vapor en la historia del mundo. Consistía en una carrilera de rieles de hierro, en circuito cerrado, donde rodaba la locomotora y algunos vagones que cargaban 16 toneladas inglesas de carbón. El tren recorrió diez millas, pero los rieles de hierro fundido no soportaban el peso. Además, consumía demasiado carbón porque esa locomotora alcanzaba una eficiencia termomecánica no superior al siete u ocho por ciento. Fue el comienzo de la era ferroviaria que partiendo de Inglaterra se extendería luego, muy rápidamente, al mundo entero.

En cuanto a Evans, construyó en 1789 su propia máquina a alta presión y la acopló a una carreta, como lo habían hecho varios antecesores, pero su carruaje no prosperó. Sin embargo, su motor de vapor tuvo mejores resultados porque en Estados Unidos se extendía rápidamente la demanda por máquinas de vapor más potentes.

El Ferrocarril

Es en esta época cuando se unen la historia de la máquina de vapor y el nacimiento del ferrocarril. El germen de este último hay que buscarlo en las minas de carbón inglesas que despachaban el mineral a los centros de consumo en carretas tiradas por caballos por los pésimos caminos del siglo XVII. A comienzos del siglo siguiente se tienden los primeros rieles de madera en esos caminos. Eran varas de seis pies de longitud y de cinco pulgadas de ancho, sostenidas por durmientes atravesados y colocados cada dos pies. Así mismo se le puso pestaña a las ruedas de los vagones para que no descarrilaran. Poco después, en 1716 se pasa a los primeros rieles de madera cubiertos con tiras de hierro. Luego vino el riel de hierro maleable, producido por primera vez por Abraham Darby III (1735-1791) en su taller siderúrgico de Coalbrookdale, en 1767. En realidad, desde 1738 había noticias del funcionamiento de un tranvía de mulas que rodaba sobre rieles de hierro fundido en Whitehaven; y desde 1755 comenzaron a operar en Inglaterra algunos trenes de carros con ruedas de hierro, cargados de carbón y tirados por caballos, como los que se construyen en 1797 en Shropshire y como el ferrocarril público para transportar pasajeros y tirado por caballos que se tendió en 1801 entre Wandsworth y Croydon. No sabemos los nombres de quienes introdujeron estas importantes innovaciones tecnológicas, pero sí sabemos que ellas hicieron posible la idea del ferrocarril que vendría después.

Dos años después de que Trevithick expusiera públicamente los principios de su teoría del ferrocarril, independientemente de él, y sin conocerse mutuamente, un ingeniero francés, Jacques Vivien hizo lo mismo en su país. Pero Vivien no procedió a construir su ferrocarril. En cambio Trevithick sí lo hizo, como lo vimos más arriba.

Dados estos pasos vendrían otros aceleradamente. Pronto el mecánico John Blacket halló el medio de evitar el patinaje de las locomotoras, aumentando su peso. Además William Hadley produjo un tren a vapor para transportar carbón, que fue jocosamente denominado el "Puffing Bill" y montó una línea de fabricación industrial de locomotoras para minas. Para 1814 había en la parte sur de Gales (South Wales), más de 400 millas de ferrocarriles dentro de las minas y alrededor de ellas.

Precisamente en 1814 fue cuando George Stephenson (1781-1848) construyó y demostró públicamente, con gran éxito, la famosa locomotora "Rocket", dotada

de una caldera con 25 tubos, que marchaba sobre carriles de hierro a velocidades hasta 14 kilómetros por hora, formalizando así a nivel comercial e industrial el invento de la locomotora de vapor. En los años siguientes Stephenson estuvo dedicado a mejorar el diseño y la construcción de calderas, motores, locomotoras, trenes y carrileras. A esto último ayudó el hecho de que en 1820 fue inventado por el industrial John Birkinshaw, en su propia fábrica siderúrgica, un proceso y un equipo para laminar rieles de hierro.

El año de 1825 es el de inauguración del ferrocarril como un nuevo medio de transporte al servicio de la humanidad. Fue en esa fecha cuando George Stephenson construyó el primer ferrocarril público que funcionó en todo el mundo: la línea Stockton-Darlington, que comenzó a operar desde ese momento. Stephenson la dotó de locomotoras muy mejoradas, incluyendo los últimos perfeccionamientos de las calderas y de los motores de vapor. En 1827 se registró un nuevo avance técnico cuando Jacob Perkins inventó y patentó - también en Inglaterra - la caldera de vapor a muy alta presión (hasta 1400 libras por pulgada cuadrada) con la cual se podían hacer operar máquinas y locomotoras mucho más potentes. El mismo Perkins, que era un buen ingeniero, inventó el diagrama de presión-temperatura-volumen del vapor que hoy llamamos la carta psicrométrica y que es indispensable para el diseño de calderas. En 1828, al otro lado del Canal de la Mancha, el ingeniero francés Marc Seguin (1786-1875) diseñó y patentó la primera caldera múltiple tubular, cuya modalidad comenzó de inmediato a desplazar las anticuadas calderas de marmita.

Estos perfeccionamientos le permitían a Stephenson construir ferrocarriles más largos, locomotoras más potentes y trenes más largos. Por eso en 1829 construyó la línea Liverpool-Manchester con locomotoras perfeccionadas para el uso público, y por esa línea comenzaron a circular los trenes regulares con itinerarios periódicos desde el año siguiente. Aunque en 1829 el ingeniero John Ericsson proyectó una locomotora que competía bien con las de Stephenson, éste y su hijo Robert (1803-1859) respondieron al reto diseñando y construyendo en 1830 nuevas locomotoras de mayor tamaño y de mayor potencia, como la "Northumbrian" y la "Planet" que habrían de seguir en uso público durante muchos años después.

Desde este momento y en adelante comienzan a aparecer en Europa y en Estados Unidos muchas líneas férreas aceleradamente. En 1832 se construye la primera de ellas en Francia. En 1833 el ingeniero inglés Isambart K. Brunel (1806-

1859) construye el ferrocarril de Londres a Bristol. Dos años después el propio George Stephenson traza y construye la primera ferrovía en Bélgica, la de Bruselas a Malinas, y en 1838 se construye y se da al servicio una línea de mucho tráfico: la de Londres a Birmingham. En Francia, Alemania, Italia y Holanda comenzaron a tenderse las ferrovías febrilmente. España, siempre rezagada en la aplicación de innovaciones tecnológicas, sólo comenzó a construir su primer ferrocarril en 1843, entre Madrid y Aranjuez. Cinco años después fue terminada la línea Barcelona-Mataró.

En esos primeros años posteriores al invento de Stephenson, la técnica de las máquinas de vapor progresó rápidamente tanto en el diseño como en la construcción. Uno de los avances descollantes en ese camino fue el desarrollo del motor compuesto, con varios cilindros de vapor en serie, a alta presión, en Estados Unidos, que fue realizado y patentado en aquel país por William Mc Naugh (1813-1881). Y tres años después, en Inglaterra, Lord Dundonald inventa la caldera de tubos de humo, o caldera pirotubular, que producía una más alta presión y que por eso hizo posible que se generalizara el uso de la máquina compuesta tanto en locomotoras como en barcos y en motores industriales.

El estudio teórico del motor de vapor hubo de esperar la maduración del genio técnico de William John Macquorn Rankine (1820-1872) quien utilizando la teoría termodinámica que ya estaba bastante desarrollada en su tiempo, estudió el ciclo de la máquina de vapor, ciclo que hoy lleva su nombre, y cuyo análisis apareció en su libro clásico "Handbook of the steam engine", publicado en Londres en 1859. En esa obra Rankine introduce la termodinámica como herramienta básica de la ingeniería y acuña la mayoría de los términos que actualmente son usados en ese campo. Es muy de notar a este respecto que desde 1834 el físico francés Benoit-Pierre-Emil Clapeyron (1799-1864) había desarrollado la primera versión de la segunda ley de la termodinámica basándose en sus estudios sobre la teoría de la máquina de vapor.

Además, la máquina de vapor encontraba nuevos usos y se expandía por todas partes. A mediados del siglo todas las fábricas de Inglaterra, Francia, Alemania y Estados Unidos habían abandonado otros métodos de obtener la energía y habían instalado las nuevas máquinas de vapor para mover sus equipos. Boulton y Watt habían construido y vendido centenares de máquinas de vapor fabricadas en los talleres que ellos habían instalado años atrás. Y cuando la patente de

Watt se venció, en toda Europa y en Estados Unidos aparecieron talleres fabricantes de máquinas de vapor.

Una nueva aplicación para el motor de Watt de alta presión y de doble efecto fue hallada por Elisha Graves Otis (1811-1861) en Estados Unidos al inventar y patentar el ascensor de personas y de carga movido a vapor, en 1860. Y unos años después, en 1881 fue instalado el primer motor de expansión de triple efecto, para uso marino, en el buque inglés Aberdeen. Poco tiempo después el ingeniero sueco Karl Gustav de Laval (1845-1913) patentó en Inglaterra en 1887 la primera turbina de vapor de álabes, de una etapa, como alternativa al motor reciprocativo original de Watt. Su diseño recuerda mucho el que Giovanni Branca había propuesto en el siglo XVII y del cual ya hablamos. Y en 1884, sir Charles Algernon Parsons, (1854-1931), también en Inglaterra, inventa la turbina de vapor de múltiples etapas, con circulación axial del vapor, que tenía un superior rendimiento termodinámico y que alcanzaba hasta el 30% del calor del combustible convertido en trabajo mecánico, lo que la hacía particularmente útil en barcos.

Pero en los ferrocarriles seguía usándose exclusivamente el motor reciprocativo de émbolo de Watt. No obstante, en 1847 en Estados Unidos el ingeniero Moses G. Farmer (1820-1893) diseñó y obtuvo la primera patente para una locomotora eléctrica, apoyándose en los progresos que recientemente se habían alcanzado en Europa en el diseño y en la construcción de motores eléctricos de corriente directa. Dos años después, en 1849, otro inventor, R. Page, en ese mismo país logró un diseño mejor y obtuvo otra patente para otra locomotora eléctrica perfeccionada.

El primer gran túnel ferroviario en Europa fue construido en 1853, el de San Gotardo, para dar paso a la línea Viena-Trieste, a través de los Alpes. Ya había en Europa y en América, en total, casi cien mil kilómetros de ferrocarriles. En 1862 se terminó la larga ferrovía de Varsovia a San Petersburgo, así como la de Roma-Nápoles y la de Argel-Blida, que fue una de las primeras que se tendieron en África. En 1869 se concluyó en Estados Unidos la primera línea que unió las costas oriental y occidental de ese país: el ferrocarril Unión Pacífico.

Ya los ferrocarriles del mundo se construían con rieles de acero y no de hierro forjado, desde que en 1862 en Inglaterra se produjeron los primeros rieles en

aquel metal y se montaron las instalaciones para producirlos industrialmente. Con rieles de acero ingleses y con equipos ingleses se construyó en 1872 el primer ferrocarril del Japón. Y con rieles de hierro y equipo norteamericano se inició en 1869 la construcción del Ferrocarril de Barranquilla-Sabanilla, el primero que funcionó en nuestro país. Posteriormente, en 1875 se emprendió la del Ferrocarril de Antioquia.

En esos años hubo otras innovaciones importantes en materia de ferrocarriles. Por ejemplo, en 1872 George Westinghouse (1846-1914) en Estados Unidos patenta el freno de aire automático para trenes. Dos años después, en 1874 es patentada en ese mismo país la primera locomotora a vapor de diseño aerodinámico. Y en 1875 el ingeniero alemán Werner Siemens, radicado en Inglaterra, diseña y pone en prueba experimental el primer tranvía eléctrico, con aspiraciones de llegar algún día a convertirlo en una verdadera locomotora eléctrica.

Hasta 1885 ya se habían tendido en todo el mundo unos 500 mil kilómetros de carrileras. Pero se usaban distintas anchuras entre rieles. Entre las varias amplitudes de "trocha", las que prevalecían eran las de Stephenson de 4 pies y 8 y ½ pulgadas, y la americana de una yarda (3 pies). En el año mencionado se estandarizó en Europa y en Estados Unidos el uso de la trocha de Stephenson, que desde entonces se llamó "trocha Standard". Cabe recordar que este punto ocasionó en Colombia, en 1881 una aguda polémica entre el ingeniero Francisco Javier Cisneros que propugnaba por la vía de una yarda para este país, y los ingenieros Manuel Ponce de León y Abelardo Ramos, quienes abogaban por la trocha de cuatro pies y 8 y ½ pulgadas. En los países de extensos territorios planos era desde luego más recomendable la trocha ancha. Este era el ancho de vía del ferrocarril Canadian Pacific que en 1886 llegó hasta la ciudad de Vancouver en el Océano Pacífico habiendo partido desde la costa oriental de ese país. Y de cuatro y medio pies de ancho se construyó así mismo, entre 1891 y 1901, el Ferrocarril Transiberiano, de Moscú a Vladivostock.

Desde el comienzo de su existencia entre Stockton y Darlington, el ferrocarril se había extendido aceleradamente por todo el planeta. En efecto, la longitud de las líneas férreas en todo el mundo había crecido como lo muestran las cifras siguientes:

1830	332	kilómetros
1840	8.641	"
1850	38.443	"
1860	107.935	"
1870	207.923	"
1880	367.020	"
1890	615.927	"
1900	740.478	"
1927	900.000	"

Cuando se formó en 1890 la Oficina Internacional de Transportes Ferroviarios ya había ferrovías tendidas y trabajando prácticamente por todo el mundo.

La navegación a vapor

En 1781, el año cuando Watt y Boulton se asociaron para comenzar a construir industrialmente las máquinas de vapor diseñadas por el primero de ellos, un inventor francés tuvo la idea de aplicar el vapor a la navegación, por primera vez. Así entre 1781 y 1783 el barón francés Jouffroy d'Abbans trabajó en diseñar y construir un pequeño barco de madera, a vapor, accionado por paletas laterales rotatorias, el cual puso a prueba en el río Saone, cerca de Lyon, con el nombre de Pyroscaphe y con resultado favorable. Pero este resultado no pasó a otros mayores.

Un hecho importante (aunque no tuvo que ver con el vapor) fue la construcción en 1787 del primer bote dotado de casco hecho de lámina de hierro, realizado por John Wilkinson, (1728-1808), en Midlans, Inglaterra. Fue una enorme sorpresa para sus conciudadanos que pensaban que el barco metálico no podría flotar. Y abrió la puerta para los grandes barcos de vapor que vendrían después. En el mismo año de 1787, al otro lado del Atlántico, en Estados Unidos, el inventor John Fitch (1743-1798) puso a flote en el río Delaware el primer barco de vapor que funcionara en el Nuevo Mundo, y que usaba hélices como propulsoras. Fitch llegó a tener varios barcos de vapor con lo que el camino de la navegación a vapor quedaba abierto. Pero aún así, es digno de notar el éxito de William Symington (1763-1831) en Inglaterra cuando en 1801 construyó el primer barco de vapor inglés, un remolcador que era accionado por ruedas de

paletas movidas por una máquina de vapor de doble efecto y que navegó con éxito en el río Támesis. Y dentro de la emulación entre norteamericanos y británicos, en esta carrera hacia el progreso técnico, al año siguiente, en Estados Unidos, el ingeniero John Cox Stevens (1749-1838) botó al agua un barco de vapor operado con hélices, que era de mayor tamaño que el barco de Fitch. En todos estos casos fue el desarrollo de la caldera de vapor de alta presión lo que permitió aplicar el motor de vapor a los barcos con eficacia técnica.

La historia cita como fecha memorable la de 1803, cuando el ingeniero norteamericano Robert Fulton (1765-1815) ensayó con éxito una nave de vapor, movida por ruedas de paletas en el río Sena. Pero Napoleón, que gobernaba a Francia, y cuyo interés Fulton buscaba, se mostró indiferente a esta novedad y el inventor, decepcionado, regresó a su patria. Sin embargo continuó con su empeño, y en 1807, después de mucho estudio y mucho trabajo, este inventor logró establecer la navegación regular en barcos de vapor por el río Hudson, entre las ciudades de Nueva York y Albany, con el barco "Clermont" movido por ruedas laterales de paletas, que fue el primer buque que operó en forma práctica y comercial en el ámbito de todo el mundo. En gran parte su éxito se debió al motor de vapor a alta presión y de doble efecto, que Richard Trevithick había perfeccionado en 1800, tal como ya se dijo.

En 1803 el constructor de barcos Adam Dallery en Inglaterra expuso la idea, nueva en ese país, de usar hélices en lugar de ruedas de paletas como mecanismo hidromecánico de propulsión para los barcos. Siguiendo esta idea, dos años después su compatriota Stevens (ya aludido) construyó un pequeño barco a vapor con hélices gemelas, que navegó con éxito. Casi simultáneamente, en 1804, el inventor norteamericano Oliver Evans (1755-1819), en su país, construyó un original vehículo anfibio movido a vapor. Y siete años después (1811) el primer barco de vapor de gran tamaño, el "Orleans" surcaba las aguas del río Ohio, dotado de una gran máquina de alta presión, de doble acción y que movía sendas ruedas de paletas, a uno y otro costado del casco.

Ya era claro para armadores y oficiales navales que el barco marítimo de vapor no era sólo una posibilidad sino un avance técnico necesario. En 1816 un buque comercial inglés, el "Elisha" fue el primer barco de vapor que cruzó el Canal de la Mancha, aun cuando también usó las velas para la travesía. Y de este momento en adelante, la navegación a vapor avanza aceleradamente. En

1817 es botado en los astilleros de Sevilla el primer barco de vapor que se construyera en España. Y en 1819 el "Savannah" de bandera norteamericana, barco de vela pero también dotado de paletas laterales de madera, movidas a vapor, fue el primero en atravesar el Atlántico con la fuerza del vapor, que le permitió hacerlo a la velocidad promedio de seis nudos, en 27 días, siendo este un verdadero record histórico de su tiempo.

Una nueva innovación la logró Aarón Mamby, al construir en 1822 un barco de vapor con paletas laterales de hierro, que hizo navegar exitosamente en el río Támesis. Tres años después, en 1825, un buque de vapor a paletas hizo el recorrido desde Inglaterra a la India en el tiempo asombrosamente corto de 113 días de travesía.

Fue por aquellos años, en 1823, cuando el empresario alemán Juan Bernardo Elbers (1776-1853) trajo a Colombia, por primera vez, los barcos de vapor que primero navegaron el Magdalena. Eran accionados por calderas de vapor y motores de Watt de alta presión y doble acción, e impulsados por dos ruedas giratorias con paletas de madera, una a cada costado. Los barcos del río Magdalena fueron la primera expresión tangible del desarrollo tecnológico de la Revolución Industrial que tuvimos en la historia de Colombia.

Desde entonces la navegación a vapor comenzó a penetrar en todos los grandes ríos del mundo y a reemplazar la navegación a vela en todos los mares.

Conclusión

No puede decirse que la máquina motriz de vapor fue un invento exclusivo de Watt. Pero fue éste el que la convirtió, de un dispositivo rudimentario e ineficiente que era, de usos muy limitados, en la gran fuente de potencia mecánica que impulsaría la prodigiosa transformación industrial y tecnológica del siglo XIX en Europa y los Estados Unidos. Desde los últimos años del siglo XVIII el carbón, la caldera y el motor de vapor comenzaron a mover coches, ferrocarriles, barcos, telares, bombas de agua, máquinas herramientas y aparatos de toda clase. La máquina de vapor se convirtió en el paradigma del mundo industrializado. Y no solamente fue la gran herramienta práctica que transformó el mundo y multiplicó por miles las limitadas capacidades mecánicas del hombre y de sus animales, sino que produjo también una verdadera revolución en la

visión del mundo. Una ciencia íntegra como la Termodinámica fue construida sobre los pensamientos de Carnot, Clapeyron, Clausius y Rankine referentes a la máquina de vapor. Si fuera necesario mencionar media docena de las creaciones físicas del hombre que más han transformado su mundo para ventaja suya, una de ellas tendría que ser el motor de vapor que Watt convirtió en uno de los instrumentos más útiles que ha tenido la humanidad.

EL VERTIGINOSO SIGLO XIX ANTES DE JOULE

El año de 1804 registró varios hechos muy importantes en nuestra historia. En Inglaterra apareció publicado el libro "An experimental inquiry on the nature and propagation of heat" donde su autor sir John Leslie (1766-1832), establece que la transmisión del calor por radiación tiene las mismas propiedades que la propagación de la luz: se refleja con la misma ley de reflexión, viaja en línea recta, se refracta al pasar del aire a otro medio, etc.

También en 1804 apareció un gran aporte teórico, en Francia, donde el físico Jean Baptiste Biot (1774-1862) enunció por primera vez las leyes correctas sobre la conducción del calor en los sólidos (que a veces se llaman "de Fourier"). Siete años después, en 1811, el físico y matemático Simeon Denis Poisson (1781-1840) desarrolló la teoría matemática de las distribuciones de temperatura y la conducción de calor basándose en la teoría de las series de Fourier que este matemático (Jean Baptiste Fourier, barón 1768-1830) había creado en 1810. Posteriormente el mismo Fourier reunió y amplió todo este trabajo en su libro "Théorie analytique de la chaleur" donde también consagró la noción de conductividad térmica específica. Allí también fundó lo que hoy llamamos el Análisis Dimensional, aunque todavía considerando sólo tres magnitudes físicas fundamentales: la longitud, la masa y el tiempo.

En esos primeros años del siglo fue cuando Laplace y Poisson dedujeron la expresión correcta de la velocidad del sonido en el aire ambiente, considerando para ello que el proceso de compresión y expansión de cada volumen elemental de aire, es de tipo adiabático y no isotérmico como se creía antes.

Estaba apenas comenzando el siglo cuando en 1807, en Inglaterra, el físico Thomas Young (1773-1829) acuñó en su inglés nativo la palabra "energy" (en castellano "energía"); definió con claridad su concepto como capacidad para realizar trabajo (fuerza multiplicada por espacio que ésta recorre); y fue el primero en introducir esa palabra en el lenguaje de la mecánica. (Aún el calor no era visto como una forma de energía, tal como hoy sí lo hacemos). Desde entonces esa palabra fundamental entró al lenguaje de todos los ingenieros y todos los científicos del mundo con el mismo significado que le dio Young, y casi con la

misma fonética en todos los idiomas. El concepto y el vocablo de “energía” se ha extendido hoy a todas las ciencias de la Naturaleza y ha sido uno de los más fructíferos en la historia de las ciencias y de la tecnología.

Ya dijimos que durante ese mismo año de 1807, al otro lado del Atlántico, en New York, el inventor y empresario estadounidense, Robert Fulton (1765-1815), después de muchas tentativas infructuosas de él mismo y de otros inventores, hechas en Europa y en Estados Unidos, construyó el que desde entonces fue el primer barco fluvial de vapor comercialmente exitoso de la historia. Se llamó el Clermont, desarrollaba 20 H.P. de potencia, navegó varios años en el río Hudson, e inauguró la navegación a vapor que luego se extendería a todos los grandes ríos y a los mares del mundo. Simultáneamente, en ese mismo año, en España (tan ausente de la historia de la ciencia y de la tecnología) y por excepción, el mecánico Isaac de Rivaz obtuvo la primera patente que se conozca hoy para un carro autopropulsado, el cual era movido por un cilindro de vapor con su caldera, y quemaba gas de retorta de carbón. Pero era muy pesado, costoso y difícil de construir en un país que en materia de ciencia y tecnología estaba todavía como en la Edad Media, y en consecuencia el carro no prosperó.

En cambio, en esos mismos años Richard Trevithick en Inglaterra y Oliver Evans (1755-1819) en Estados Unidos estaban teniendo pleno éxito tecnológico e industrial, fabricando máquinas de vapor de agua que ya trabajaban con una presión bastante superior a la atmosférica en la caldera, aumentando considerablemente la eficiencia del ciclo. Trevithick empleó presiones de unas 15 libras por pulgada cuadrada por encima de la atmosférica, o, como escribimos hoy, de 15 psig, que corresponden casi exactamente a dos atmósferas de presión absoluta, puesto que una atmósfera es 14.7 psia.

Después de los avances espectaculares de la Química al final del siglo XVIII, sus ya numerosos cultivadores se dedicaron con ahínco a estudiar las propiedades de los gases. Uno de los más brillantes entre ellos, a comienzos del siglo XIX fue el francés Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850) a quien ya mencionamos y quien en 1807 publicó sus estudios sobre la dilatación de los gases con la temperatura, y formuló la ley que su coterráneo Charles ya había encontrado en 1787, como ya dijimos. Según esta ley, cuando un gas se calienta mientras mantiene una misma presión, el volumen aumenta linealmente con la temperatura; en tanto que si el calentamiento es a volumen constante, es la presión la que aumenta linealmente con la temperatura. Mediciones posteriores

mostraron que a presión constante, el volumen del gas aumenta en $1/273$ del volumen que tenga a 0°C , por cada grado centígrado que se le caliente. Gay-Lussac fue por muchos años profesor en la Ecole Polytechnique y seguramente fue alguno de sus alumnos quien combinó este descubrimiento con la ley de Boyle y Mariotte para escribir que, dada una masa W de gas, con volumen V , a una presión p y a una temperatura t (en grados celsius), se podía escribir, para un mismo gas

$$p V \propto W (273 + t) (^{\circ}\text{C})$$

Luego de esto, otro de los alumnos de Gay-Lussac encontró que, para muchos gases químicamente puros, el volumen de una mole-gramo era de 22.4 litros, para todos, a 0°C de temperatura y a una atmósfera de presión (760 mm de columna de mercurio, como se registra al nivel del mar). En esa situación ya fue posible escribir que, para todos los gases, se tendría

$$p V = (W/M) R (273 + t) (^{\circ}\text{C})$$

en donde M es el peso molecular en gramos; y donde $R = 0.0820$ litro x atmósfera/ $^{\circ}\text{K}$ x mole, es la que desde entonces se llama “la constante de los gases perfectos”.

Un invento y descubrimiento técnico y científico muy importante fue el que realizó el químico francés Nicolás Appert (1750-1841) sobre la esterilización por calentamiento de los alimentos animales y vegetales, mucho antes de Pasteur. Appert publicó su invento en 1810 en su libro “Le livre de tous les ménages ou l’art de conserver pendant plusieurs années toutes les substances animales et végétales”. Estimulado por la oferta que Napoleón había hecho de dar un premio a quien inventase un método práctico de conservar grandes cantidades de alimentos (como las que requerían los ejércitos del Emperador), Appert descubrió que calentando a 100°C y luego envasándolos al vacío se lograba ese propósito. Este invento ha tenido hasta el día de hoy, una utilización mundial y una inmensa importancia para el desarrollo de la producción industrial de alimentos en todas partes del mundo.

En el año de 1815 se dio un paso teórico muy importante. El químico inglés William Prout (1785-1850) midió los calores específicos de varios elementos químicos sólidos y observó que ellos son múltiplos enteros del valor para el

hidrógeno, lo que, según él, sugería que los elementos químicos están formados todos a partir del hidrógeno. También notó que los pesos atómicos suelen ser múltiplos de los del hidrógeno. Por mucho tiempo se llamó "hipótesis de Prout" a esta observación, la que en su tiempo fue desatendida, y permaneció olvidada hasta cuando vino a cobrar sentido en nuestro tiempo al descubrirse el protón y al entender la estructura de los átomos.

En el año de 1820 se fueron los españoles de lo que es hoy Colombia. Ellos nunca nos trajeron ni el estudio ni las aplicaciones de la teoría del calor; ni la técnica para producir hierro; ni la de producir cobre a partir de sus minerales. No nos dejaron el conocimiento de la hulla ni de su empleo. Ni asomo de máquinas de vapor; ni la soldadura de metales; ni el conocimiento del sistema métrico decimal, ni del termómetro, ni del trabajo del hierro forjado en caliente, ni nada sobre la electricidad, ni, en general, nada de lo mucho que ya conocía y usaba la Europa avanzada en materia de ciencia y de tecnología. Del hecho, España siempre prohibió en sus colonias americanas el establecimiento de todo tipo de industrias de fabricación, a no ser las sencillas manufacturas rudimentarias de textiles y cerámicas que nuestros indígenas conocían desde siglos antes, y aparte de las pocas y pequeñas artesanías que vinieron con inmigrantes y soldados peninsulares: herrerías, carpinterías, talabarterías y poco más.

La Expedición Botánica de Mutis fue la única ceja de luz científica que hubo en el oscurantismo de nuestra época colonial. Como una curiosidad sin repercusiones importantes en la Ciencia, cabe recordar el invento del hipsómetro por nuestro científico Francisco José de Caldas (1768-1816), invento que ya se conocía en Europa. Por eso cuando se fueron los españoles, los hispanoamericanos sólo usábamos el fuego para hacer los alimentos y algunas piezas de alfarería y ladrillo cocido; y para forjar a mano algunas piezas de hierro: herraduras, barrotos para ventana y poco más. Las raíces de nuestro subdesarrollo quedaban así sólidamente afianzadas en nuestro suelo.

En cambio en Europa (fuera de España) seguían apareciendo nuevos conocimientos y nuevos inventos en materia de ciencia y tecnología del calor, y nuevas aplicaciones para unos y otros. Por ejemplo: en la lejana Escocia, en 1816, (según dice don Julio Rey Pastor en su libro que reseñamos en la bibliografía), un oscuro clérigo, el Reverendo Robert Stirling (1790-1878) concibió y patentó un motor de aire caliente, de combustión externa, que operaba en un ciclo termodinámico reversible y regenerativo compuesto por dos tiempos

isotérmicos y dos tiempos isométricos (a volumen constante). Skrotzky (ver bibliografía) asevera que Stirling construyó y patentó su motor en 1827, y no en 1816 como dice Rey Pastor.

Stirling nunca construyó su motor en la vida real, y su idea cayó pronto en un olvido injustificado, pese a la alta eficiencia termodinámica que su motor ha demostrado después. Solamente se le redescubrió en nuestro siglo, hacia la segunda guerra mundial, para usarlo en su forma reversa como ciclo de refrigeración; y luego, en los años novecientos setentas se le estudió como posible ciclo y motor de combustión externa para automotores. En los últimos años ha vuelto a los archivos "muertos" de la tecnología y sólo se estudia en los textos didácticos de termodinámica. Stirling murió olvidado.

Fue en 1818, en Francia, cuando los químicos Pierre-Louis Dulong (1785-1838) y Alexis-Therèse Petit (1791-1819) enunciaron la ley empírica que lleva el nombre de ambos, y según la cual los calores específicos de los elementos químicos sólidos son inversamente proporcionales a sus pesos atómicos. Hoy la escribimos poniendo que el calor específico por gramo es, según Dulong y Petit:

$$C = 6 R / (2 A)$$

donde R es la constante universal de los gases y A es el peso atómico del elemento. La ley vale a temperaturas no muy extremas y ha servido para estimar los pesos atómicos de numerosos metales que han sido descubiertos posteriormente. Ya en el siglo XX sería revisada como ya veremos, porque a temperaturas muy bajas deja de cumplirse.

Poco después, en 1821 el físico alemán Thomas Johann Seebeck (nacido en Rusia, 1770-1831) descubre el efecto termo-eléctrico que lleva su nombre, y que consiste en que si dos alambres de metales distintos se unen en uno de sus extremos y también en el otro, y una de las uniones se calienta mientras la otra se deja fría, se produce una corriente eléctrica continua y permanente en el circuito así formado. Este es el fenómeno que hoy usamos para medir altas temperaturas en hornos y calderas con pirómetros y termocuplas.

John Ericsson (1803-1889) fue un brillante, terco y temperamental ingeniero civil y mecánico y un fecundísimo inventor que nació en Suecia, luego vivió en Inglaterra y después se trasladó por el resto de su vida a Estados Unidos. En

este último país inventó y patentó un motor que llamó "motor a fuego de vapor", que comenzó a fabricar y a vender en 1833. Trabaja en ciclos de cuatro tiempos: expansión isobárica, expansión isotérmica, compresión isobárica y compresión isotérmica. Hoy es llamado con justicia el ciclo Ericsson. Su máxima eficiencia termodinámica es tan alta como la del motor ideal de Carnot trabajando a las mismas temperaturas extremas.

Y en 1837 el químico alemán Friedrich Mohr (1806-1879), discípulo del gran Justus von Liebig, barón (1803-1873) asevera que el calor es el movimiento vibratorio de las partículas de los cuerpos, energía almacenada en ellos y que, por lo tanto, debe tener una medida como la tiene la energía mecánica. Esto fue cinco años antes de que Robert Mayer publicara esta tesis en su libro famoso (que mencionaremos más abajo); pero Mohr no fue oído por el mundo científico.

Pero el avance talvez más importante en toda la historia de la ciencia y de la tecnología del calor ocurrió en 1824, cuando un joven oficial del ejército francés, Nicolás Léonard Sadi Carnot (1796-1832) se dedicó a estudiar las máquinas de vapor que se construían en su patria y a indagar por qué eran menos eficientes que las que se construían en Inglaterra.

Carnot, como la mayoría de los científicos de su momento, aún creía en "el calórico", pero sus muchos experimentos y sus profundas reflexiones lo llevaron a los descubrimientos fundamentales que constituyeron núcleo y raíz de la nueva ciencia que él creó así: la termodinámica. Él ideó la máquina ideal cíclica de cuatro tiempos (compresión adiabática, compresión isotérmica, expansión adiabática, expansión isotérmica) a la que hoy llamamos justamente con su nombre. En ese camino introdujo el concepto de reversibilidad termodinámica, que es desde entonces uno de los más importantes en esta ciencia; y mostró que las irreversibilidades implican siempre una pérdida de energía aprovechable. Mostró que el calor que se aplica a una máquina térmica contiene una parte aprovechable como trabajo (o calor útil) y otra no aprovechable que se disipa al ambiente. Mostró que se realiza trabajo cuando el calor pasa de una alta temperatura (T_1) a una baja temperatura (T_0), y que el calor aprovechado como trabajo mecánico (W) es a lo sumo una proporción determinada del calor aplicado a temperatura alta (Q_1) proporción que él llamó eficiencia termodinámica y que vale

$$W/Q_1 = (T_1 - T_0)/T_1 = (Q_1 - Q_0)/Q_1$$

siendo $0 < T_0 < T_1$ y donde las temperaturas se miden poniendo

$$T = t + 273^\circ\text{C}$$

donde t son las temperaturas en grados centígrados o Celsius. Él definió explícitamente el trabajo mecánico como una fuerza multiplicada por una distancia recorrida, independientemente de Young, quien ya lo había hecho así; y sugirió la idea que luego se convertiría en la Segunda Ley de la Termodinámica, según la cual el calor sólo se transfiere espontáneamente de un cuerpo a mayor temperatura a otro de menor temperatura. Así mismo sugirió la posibilidad de construir y operar motores de combustión interna, que serían más eficientes que las máquinas de vapor, las cuales son motores de combustión externa. Todo esto lo consignó en un pequeño libro que tituló "Reflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines pouvant développer cette puissance", el cual pasó desapercibido para sus contemporáneos hasta que Lord Kelvin lo redescubrió en 1849 y mostró a Europa el inmenso valor científico del trabajo seminal de este joven genio. El nombre de Carnot será siempre el paradigma de los grandes creadores de la ciencia mundial.

En 1830 Carnot se dio cuenta de que la analogía que había usado en su libro mencionado, asimilando la rueda hidráulica a la máquina de vapor en 1824, no era apropiada y que sólo una parte del calor era aprovechado al pasar de una temperatura alta a una baja. De aquí salió la fórmula que ya mostramos para la eficiencia máxima de su motor ideal, expresada en función de las temperaturas de la fuente caliente de calor y del receptor frío del calor no aprovechado.

Fue Kelvin también quien acuñó con la ocasión mencionada, la palabra "termodinámica" y quien introdujo en 1851 el concepto de temperatura absoluta y de "cero absoluto de temperatura", como la temperatura a la cual se anula la energía vibratoria de las moléculas, y que sería de -273°C .

Y después de que el físico alemán Georg Simon Ohm (1787-1854) introdujera en 1827 la noción de resistencia eléctrica, varios físicos descubrieron que el valor de esa resistencia, en los metales, aumentaba linealmente con la temperatura. Además, unos pocos años después, en 1840, en Inglaterra, sir James Prescott Joule (1818-1889) agregó el descubrimiento de que cuando una corriente de intensidad I atraviesa una resistencia R durante un lapso de tiempo t , se desprende una cantidad de calor $Q = I^2 R t$. Esta fue la base para

que luego en el mundo de la técnica se pudieran construir hornos de resistencia eléctrica, parrillas calefactoras, radiadores eléctricos de calor y otros aparatos calefactores eléctricos. Y no se tardó mucho tiempo para que otros investigadores llegaran a descubrir que la conductividad térmica de los metales es proporcional a su conductividad eléctrica y recíprocamente, fenómeno al cual hoy llamamos ley de Wiedemann-Franz, con el nombre de sus descubridores. En este mismo terreno de la termoelectricidad, ya en 1834 el físico francés Jean-Charles-Athanase Peltier (ca.1795-1845) había descubierto otro fenómeno termoeléctrico, que hoy lleva su nombre: que cuando una corriente eléctrica atraviesa una unión de metales distintos, genera calor o absorbe calor, según que aquella fluya en un sentido o en otro.

También en ese año de 1834, el ingeniero Benoit-Pierre-Emile Clapeyron (1799-1864) profesor en la Ecole Polytechnique, desarrolló tempranamente la primera versión de la Segunda Ley de la Termodinámica (frecuentemente expresada como que la entropía tiende a aumentar en un sistema cerrado) apoyándose en sus estudios sobre la termodinámica de la máquina de vapor. La ley fue luego generalizada por Rudolf Clausius, como veremos. En 1834 el mismo Clapeyron reinventó el diagrama gráfico-mecánico que presenta la presión contra el volumen de vapor dentro del cilindro, diagrama que Watt había inventado con su máquina de vapor y al cual éste había denominado "diagrama indicador". Era el comienzo de los estudios sobre ciclos termodinámicos. En estos mismos trabajos Clapeyron descubrió la ecuación que gobierna la presión (p) y la temperatura absoluta (T) en un cambio de estado (como la evaporación) que supone un gasto de calor Q por mole-gramo

$$p = A \exp (-Q/RT)$$

(siendo A una constante propia del tipo de fenómeno) y que hoy recordamos con el nombre ecuación de Clausius-Clapeyron. Puede decirse que fue Clapeyron quien introdujo profundamente el Cálculo diferencial e integral en el estudio de los fenómenos térmicos.

Los rápidos avances que hacían paralelamente en aquella época la química y la teoría del calor, combinadas en la Termoquímica, le permitieron en 1840 al químico ruso-suizo Germain Henri Hess (1802-1850) anunciar el descubrimiento de la ley de su nombre, la que establece que la cantidad de calor que se desprende (o que se absorbe) al cambiar una sustancia química en

otra, depende de la naturaleza de esas sustancias mismas, y no de las reacciones químicas intermedias que ocurran.

Otro gran paso en el desarrollo de la Termodinámica ocurrió cuando en 1842 el médico alemán Julius Robert von Mayer (1814-1878) publicó su estimación pionera sobre el equivalente mecánico del calor aunque con alguna inexactitud numérica y dedujo por primera vez su ley de equivalencia y conservación de la energía mecánica y la energía calorífica, dos formas de energía que Mayer asimiló a dos aspectos de una misma cosa. En ese momento Mayer no fue atendido. Pero al año siguiente, en Inglaterra, el químico ya mencionado James Prescott Joule, en su fábrica de cerveza, midió con rigor, por primera vez, ese equivalente mecánico del calor, cuando encontró que 41.800.000 ergios de trabajo mecánico se convierten en una caloría de energía térmica. Lo calculó midiendo el calentamiento de una masa de agua al agitarla mecánicamente con paletas, y comparándolo con el trabajo mecánico requerido para agitar las paletas. Joule extendió su ley de conservación de la energía a la energía eléctrica cuando se convierte en calor, cuya relación mutua él mismo ya había medido, como vimos más arriba.

Coincidentalmente, en el mismo año de 1842, William Thomson (1824-1907), también llamado hoy Lord Kelvin, publica su libro clásico sobre la conducción de calor en los sólidos: "On the uniform motion of heat in homogeneous solid bodies", que es otro de los grandes libros clásicos de la teoría del calor, y donde presenta por primera vez un cuadro completo de la Termodinámica y de los fenómenos térmicos, incluyendo los más recientes desarrollos de su tiempo.

Mientras en Europa se desenvolvía vertiginosamente la Revolución Industrial durante esos primeros decenios del siglo, la Colombia de hoy (la Nueva Granada, en ese tiempo) despertaba lentamente de su ignorancia de siglos. Durante los gobiernos de Francisco de Paula Santander y de José Ignacio de Márquez, estos mandatarios facilitaron la instalación por primera vez en nuestra historia, de una ferrería siderúrgica y de las primeras fábricas con tecnología moderna que surgieran en el país: de tejidos, de papel, de locería, de vidrio y de cervezas. Eran toda una novedad tecnológica. Ellas llevaron a descubrir la hulla en los alrededores de Bogotá, y fueron las primeras formas de usar este combustible para producir coque y hierro, y para alimentar hornos y hogares industriales en Colombia.

En 1824 el ingeniero alemán Jacobo Wiesner, radicado en el país, instaló la Ferrería de Pacho (en Cundinamarca); descubrió carbón en las vecindades;

fabricó coque; construyó un alto horno, y produjo allí arrabio, hierro maleable, piezas fundidas y piezas forjadas. En esa escuela práctica sus obreros y técnicos aprendieron bastante de lo que en su tiempo era la tecnología siderúrgica y la termotecnia. Así ocurriría después en las otras ferrerías que hubo en el siglo XIX en otros sitios del país: La Pradera (Cundinamarca), Samacá (Boyacá) y Amagá (Antioquia).

Y entre 1824 y 1850 vinieron los primeros ingenieros de minas europeos al país para buscar minas de oro y plata y para explotar las que había, en el marco de los acuerdos que firmó el gobierno de la naciente República con sus banqueros prestamistas ingleses. Entre esos ingenieros figuraron Carlos Segismundo de Greiff (sueco), Robert Stephenson (inglés), James Tyrrel Moore (inglés), Jean Baptiste Boussingault (francés), Edward Walker (inglés), Karl Dagenhardt (alemán), Pedro Nisser (sueco), Carlos Greiffenstein (alemán), Alejandro Johnson (estadounidense) y otros. Ellos trajeron y enseñaron de manera práctica, en el trabajo de las minas y de sus talleres, mucho de la tecnología metalúrgica y minera europeas. Enseñaron a fundir metales en crisol, a manejar la pólvora, a extraer carbón mineral y a usarlo, a conocer y a usar el sistema métrico decimal y el inglés, a fundir hierro en cubilote y a manejar muchos nuevos aparatos mecánicos. Y algo más que ya dijimos: desde el mismo año de 1823 comenzaron a navegar en el río Magdalena los primeros barcos de vapor que Colombia conocía, traídos por el empresario alemán Juan Bernardo Elbers. Con ellos conoció el país la máquina de vapor de Watt, las unidades inglesas de medida, los oficios de calderista y maquinista, y el manejo “moderno” (para su época) de empresas de alta tecnología. En esos barcos las calderas y los motores no pasaban de 20 ó 25 caballos de vapor de potencia, y sus eficiencias termomecánicas eran sólo del orden de 8 ó 10% como calor convertido en trabajo mecánico efectivo.

El año de 1852 registró en Europa tres descubrimientos experimentales independientes que habrían de tener después consecuencias teóricas y tecnológicas muy importantes. Una de ellas fue que James P. Joule y William Thomson (ya mencionados) descubrieron en Inglaterra que cuando un gas se deja expandir de manera controlada, y térmicamente aislada, desde una presión alta a una presión baja, se enfría rápida y fuertemente. Este “efecto de Joule-Thomson” recibiría luego numerosas e importantes aplicaciones en los laboratorios y en las fábricas del mundo para producir enfriamiento y para licuar gases.

El segundo descubrimiento aludido fue que el químico francés Henri-Victor Regnault (1810-1878) encontró mediante mediciones precisas que los gases reales se desvían levemente de la ley de Boyle; y midiendo sus coeficientes de expansión térmica, determinó que el “cero absoluto” de Kelvin es de menos 273°C (o sea menos 460°F), aunque no vio claro cuál sería el comportamiento de aquellos gases a esa temperatura, a la que entonces era casi inconcebible pensar cómo alcanzarla.

El tercer gran avance de ese año, fue que el químico alemán Abraham Gesner, destilando petróleo crudo, descubrió y bautizó la fracción que hoy se llama kerosene, la cual comenzó a producirse de inmediato y a venderse en Europa y Norteamérica como combustible muy barato para lámparas y quinqués de iluminación doméstica. En esa época el petróleo crudo y sus derivados casi no tenían ninguna otra aplicación práctica de importancia. Pero desde ese momento el petróleo crudo comenzó a adquirir interés comercial e industrial para destilarlo en alambiques rudimentarios, y producir así el kerosene combustible para alimentar lámparas de iluminación en todos los países del mundo.

Los años de mediados del siglo fueron en Europa sumamente fértiles en avances, tanto en el campo de la ciencia teórica como de los usos técnicos del calor. En 1847, por ejemplo, aparece otro gran libro clásico: “Ueber die Erhaltung der Kraft”, escrito por el médico y físico alemán Ludwig Ferdinand Helmholtz (1821-1894) que, con las obras de Mayer y de Joule, constituye uno de los tres trabajos fundamentales que asentaron y desarrollaron el concepto de la conservación de la energía (primero entre energía mecánica, calor y electricidad, y después para todas las otras formas). Esta ley universal adoptó pronto en el campo de la termodinámica (como veremos más abajo) la forma particular y el nombre de primera ley de la termodinámica.

El más grande aporte de Rudolf Julius Emmanuel Clausius (1822-1888) a la Termodinámica lo hizo en 1857 en su libro “Ueber die Art der Bewegung, welche wir Wärme Nennen” (“Sobre el tipo de movimiento que llamamos Calor”), donde presenta su teoría cinética del calor sobre bases matemáticas y explica cómo ocurre la evaporación.

La Segunda Ley ya había sido entrevista por Carnot y, más claramente, había sido anunciada por Clapeyron. Pero su aparición sorprendente en el mundo de la ciencia se debió al gran físico Clausius quien publicó en 1850, siendo profesor

en la Universidad de Berlín, su opus magna: "Ueber die bewegende Kraft der Wärme" ("Sobre la fuerza motriz del calor"). En este libro Clausius demostró que:

- No todo el calor se puede convertir en trabajo.
- Todas las otras formas de energía se van degradando para terminar en calor.
- En un sistema térmico, el cociente de calor (Q) dividido por temperatura absoluta (T) tiende a aumentar con el paso del tiempo: $((Q/T) = S > 0)$.
- La cantidad de energía útil en un sistema cerrado va mermando (o permanece constante) con el paso del tiempo.

Allí aparece el primer enunciado explícito y formal de la segunda ley de la Termodinámica. Simultáneamente, Clausius le dio nueva forma a la segunda ley y la reformuló en la frase de que "la entropía siempre aumenta en un sistema cerrado" o en el enunciado equivalente de que "la energía en un sistema cerrado cambiará para convertirse en calor y desorden". En otra publicación del año de 1865 el mismo Clausius introdujo al lenguaje de la Ciencia, en su alemán nativo, la palabra "Enthropie" que, con muy pequeños cambios figura hoy en todos los idiomas cultos del mundo y casi con la misma fonética en todos ellos. Era un concepto enteramente nuevo y fundamental en la Ciencia, y hoy su campo de aplicación ha desbordado la mera Termodinámica para extenderse a la teoría de la información, a la cibernética, a la lingüística y a otras áreas del conocimiento.

En los años que siguieron, los físicos se dedicaron a estudiar el enigmático y nuevo concepto de la entropía (que en griego quiere decir "direccionalidad"), así como sus cambios durante los fenómenos térmicos, los procesos adiabáticos (palabra que apareció por entonces), el concepto de sistema cerrado, los procesos reversibles y sus profundas repercusiones en la visión del mundo y en la técnica.

También en esos años tomó su forma como ecuación diferencial la primera ley de la Termodinámica como hoy la conocemos: $dQ = dU + dw$, donde dQ es el calor incremental aplicado a un sistema, dU es el aumento de energía interna del mismo, y dw es el trabajo mecánico externo que por causa de ese suministro de calor haga el sistema. Y también se expresó la segunda ley como $dS/dt > 0$ donde dS es un aumento diferencial de entropía, y dt es un transcurso de tiempo.

Y como novedad técnica que usaríamos en nuestros laboratorios hasta el día de hoy, apareció el humilde y utilísimo mechero que ha servido fielmente en todos los gabinetes de Química y de Física del mundo. Fue inventado en 1855 por un modesto ayudante de laboratorio, C. Desaga, para su jefe el gran químico Robert Wilhelm Bunsen (1811-1899) en la Universidad de Heidelberg. Desde entonces este instrumento muy útil lleva sin justicia el nombre de mechero de Bunsen. Inicialmente, en el siglo XIX, quemaba gas de carbón. Hoy usa gasolina vaporizada, gas licuado de petróleo o gas natural.

Desde que quedó asentada firmemente la segunda ley de la termodinámica, los físicos se dieron cuenta de la importancia que tenía el distinguir entre procesos termodinámicos reversibles y procesos no reversibles. Carnot ya había señalado su gran diferencia, pero, al parecer, había sido olvidada un poco. En efecto: los procesos de conversión de energía que retienen en forma aprovechable la máxima energía útil disponible, son procesos reversibles. En teoría, son reversibles los procesos que se pueden devolver o retroceder invirtiendo la dirección de todos los movimientos y flujos anteriores, para retornar el sistema a las mismas exactas condiciones iniciales. Una propiedad indispensable de estos es que la sustancia que trabaja esté siempre en equilibrio termodinámico y que el proceso no incluya efectos disipativos tales como viscosidad, rozamiento, inelasticidad, resistencia eléctrica o histéresis magnética. Es decir, que los procesos reversibles avanzan cuasiestáticamente, de modo que el sistema pasa a través de una serie de estados de equilibrio termodinámico, tanto internamente como respecto al ambiente. Esta serie de estados puede ser recorrida lo mismo en un sentido que en el otro. Planck en su Termodinámica (ver bibliografía) ha estudiado con especial cuidado y rigor este concepto, así como el de su contrario, que es la irreversibilidad. A propósito, cabe recordar que el ciclo de Carnot y el motor ideal que pensó el joven ingeniero francés son ambos de tipo reversible. Dadas las dificultades de encontrar en la realidad práctica todas las condiciones necesarias para garantizar la reversibilidad, en años recientes viene siendo tema de investigación muy activa e interesante el de la termodinámica no reversible. Planck clasifica todos los procesos elementales en tres categorías: procesos naturales, que conducen a un equilibrio; procesos innaturales, que se alejan de un equilibrio; y procesos reversibles, que son los que hemos descrito.

Por otra parte, una vez aceptado el concepto de entropía por los físicos europeos, Maxwell descubrió cuatro relaciones fundamentales que se refieren a una cierta cantidad de una sustancia, la que ocupa un volumen V , con una presión P , a

temperatura absoluta T , y que tiene una entropía S . Son las llamadas cuatro relaciones termodinámicas de Maxwell:

$$-\left(\frac{\partial P}{\partial S}\right)_V = \left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S = \left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_P = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_S$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial S}\right)_V = \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T = -\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = \left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T$$

En estas cuatro ecuaciones diferenciales parciales, los subíndices que se escriben a la derecha y abajo de cada derivada parcial indican la variable que permanece constante mientras cambian el “denominador” y el “numerador” de dicha derivada. Estas relaciones sirven para deducir numerosas fórmulas termodinámicas. El físico norteamericano Percy W. Bridgeman (1882-1961) dedujo y mostró la colección de todas esas fórmulas lo mismo que la forma de clasificarlas, durante el tercer decenio de este siglo XX. El libro de Slater (ver bibliografía) presenta la tabla completa de esas fórmulas.

El elemento químico fósforo fue aislado en la ciudad alemana de Hamburgo en 1662 por el médico y químico Hennig Brand, a partir de orina humana, en la forma alotrópica llamada fósforo blanco. Algún tiempo después se descubrió el fósforo rojo, que es más estable y menos tóxico. Uno y otro se inflaman con facilidad y por eso los alquimistas usaron frecuentemente sus compuestos para encender fuegos y para luces pirotécnicas. El nombre mismo de “fósforo” significa etimológicamente, en griego, “portador de la luz”. El primer fósforo de seguridad, para uso popular, fue patentado por Johann Lundström en Suecia en 1852, y usaba (como usa hoy) el fósforo rojo. Era ya muy parecido al que usamos todavía hoy en día, según dice Rossotti (Ver bibliografía).

Es bien sabido que un explosivo es una forma de combustible, de alto contenido energético, que quema en décimas de segundo. Hasta mediados del siglo XIX sólo se conocía la pólvora que había llegado a Europa con los árabes o con los mongoles (o con ambos) en el siglo XIII ó en el siglo XIV. Pero en 1846, el químico italiano Ascanio Sobrero (1812-1888) descubrió fortuitamente la nitroglicerina y su violento poder explosivo. Unos cinco a seis años después el ingeniero y químico sueco Alfred B. Nobel (1833-1896) inventó una pasta de

nitroglicerina absorbida en tierra diatomácea (o kiesselgur) mucho más segura de manejar que la nitroglicerina, y que sólo estallaba en contacto con algunos agentes químicos especiales como el fulminato de mercurio. Nobel y otros químicos le hicieron posteriormente otras modificaciones, pero conservando la base nitroglicerínica y conservando el nombre de “dinamita” que le dio Nobel. Poco tiempo después se descubriría el tri-nitro-tolueno, que con la dinamita es uno de los explosivos más usados en el mundo de hoy. El gran poder destructor del TNT ha llevado a convertir la “tonelada de TNT” en una temible unidad de energía demoledora para todos los explosivos modernos, inclusive para la bomba atómica, cuya fuerza de destrucción se expresa hoy en “megatones”, o sea en millones de toneladas de tri-nitro-tolueno.

Mientras que, a mediados del siglo diecinueve, ocurría este acelerado progreso de la Física del calor, sucedieron en el año de 1856 dos espectaculares innovaciones tecnológicas en la industria del acero, la industria que ha sido siempre una de las más intensivas -entonces y hoy- en consumo de energía térmica y de combustibles para sus procesos de producción. El acero había sido conocido y empleado desde la antigüedad y durante la Edad Media (como ya se dijo) como un material que era muy costoso y muy escaso, y que por eso se usaba solamente como metal para espadas, alfanjes, cimitarras y otras armas blancas cuya fabricación se había centrado en algunas pocas ciudades y países: la India, Bagdad, Damasco, Bizancio, Roma, Toledo, Solingen y Birmingham. Para todos los muchísimos usos de los metales duros se usaba el hierro forjado y, para algunas pocas aplicaciones se empleaban el latón y el bronce. Pero en 1856, en Inglaterra ocurrieron dos grandes inventos, mutuamente independientes. Uno fue del ingeniero alemán William Siemens (1823-1883), radicado en Manchester, quien inventó allí el horno regenerativo que quemaba los gases no consumidos en el hogar, alcanzando así altas temperaturas con gran economía de combustible. En ese horno, fundiendo y mezclando hierro forjado y hierro crudo se producía acero de buena calidad, en gran volumen y de precio muy bajo. De aquí Siemens pasó, mediante algunos perfeccionamientos, al horno de hogar abierto que sería durante casi un siglo, el principal método de producción industrial de acero y uno de los aparatos térmicos más eficientes de su tiempo.

En el mismo año (1856) el ingeniero inglés sir Henry Bessemer (1813-1898) inventó y patentó el convertidor que lleva hoy su nombre, consistente en una gran retorta de ladrillo cerámico que contiene hierro crudo (arrabio) fundido. Un gran chorro de aire pasa por la carga líquida y quema el carbono excesivo y

otras impurezas que contiene el arrabio. Así se convierte éste en acero que, por definición, tiene solamente entre 0.2 y 2.5% de carbono. Con los inventos del horno de hogar abierto y el convertidor de Bessemer, el acero pasó a ser en muy poco tiempo el metal principal de la Revolución Industrial, y su fabricación pasó a ser una de las más grandes industrias que ha conocido el mundo. Ha sido también una de las industrias que más combustibles ha requerido en el siglo y medio que ha transcurrido de su historia durante este tiempo que se ha llamado la Era del Acero.

LA SEGUNDA MITAD DEL SIGLO XIX

Por aquellos años del sexto decenio del siglo los químicos ya habían clarificado la noción de peso atómico de los elementos químicos. Más clara aún quedó la noción de peso molecular y de mole-gramo cuando el químico italiano Stanislao Cannizzaro (1826-1910), en Karlsruhe, en 1860, en el primer congreso internacional de química, rescató la memoria de Amadeo Avogadro (1776-1856) y de su conocida hipótesis referente al número de moléculas en una mole-gramo de cualquier sustancia. En esas condiciones, todo quedaba listo para escribir la ecuación general de los gases perfectos (o gases ideales) en la forma que hoy le damos, a saber:

$$p.V = (W/M) R.T$$

siendo p la presión, V el volumen de una masa W , M el peso molecular, R la "constante universal de los gases" y T la temperatura absoluta. Fue Cannizzaro quien aclaró a la ciencia, definitivamente, el concepto y la realidad de las moléculas como constituyentes fundamentales de los cuerpos, y quien inventó esta palabra con la cual hoy denominamos estas partículas elementales componentes de cada sustancia química.

Fue mediando el siglo, en 1848, cuando en la Nueva Granada el presidente, general Tomás Cipriano de Mosquera, fundó el Colegio Militar de Ingeniería, el primero de su género que existiera en nuestro país, destinado a preparar los primeros ingenieros militares e ingenieros civiles colombianos. Su paradigma para crearlo fue la Ecole Polytechnique de Francia. Trajo profesores del exterior. Allí se dieron las primeras clases de Física de nivel superior (para su tiempo) que se impartieron en Colombia. Allí se enseñó por vez primera en nuestro país el sistema métrico decimal de pesas y de medidas. Y los capítulos de los textos franceses de Física que allí se enseñaron y que trataban del calor, fueron el primer contacto de estudiantes colombianos con las nociones de la ciencia y la técnica del calor. Por primera vez se supo en Colombia, a nivel académico, qué es temperatura y qué es la caloría; y qué es calor específico y calor de combustión; y qué es la fusión y la evaporación; y allí se estudió cómo trabaja la máquina de vapor de Watt; y qué es un cheval de vapeur y otros temas de este saber. Y en su rudimentario laboratorio hubo unas balanzas, unos

otras impurezas que contiene el arrabio. Así se convierte éste en acero que, por definición, tiene solamente entre 0.2 y 2.5% de carbono. Con los inventos del horno de hogar abierto y el convertidor de Bessemer, el acero pasó a ser en muy poco tiempo el metal principal de la Revolución Industrial, y su fabricación pasó a ser una de las más grandes industrias que ha conocido el mundo. Ha sido también una de las industrias que más combustibles ha requerido en el siglo y medio que ha trascendido de su historia durante este tiempo que se ha llamado la Era del Acero.

LA SEGUNDA MITAD DEL SIGLO XIX

Por aquellos años del sexto decenio del siglo los químicos ya habían clarificado la noción de peso atómico de los elementos químicos. Más clara aún quedó la noción de peso molecular y de mole-gramo cuando el químico italiano Stanislao Cannizzaro (1826-1910), en Karlsruhe, en 1860, en el primer congreso internacional de química, rescató la memoria de Amadeo Avogadro (1776-1856) y de su conocida hipótesis referente al número de moléculas en una mole-gramo de cualquier sustancia. En esas condiciones, todo quedaba listo para escribir la ecuación general de los gases perfectos (o gases ideales) en la forma que hoy le damos, a saber:

$$p \cdot V = (W/M) R \cdot T$$

siendo p la presión, V el volumen de una masa W , M el peso molecular, R la "constante universal de los gases" y T la temperatura absoluta. Fue Cannizzaro quien aclaró a la ciencia, definitivamente, el concepto y la realidad de las moléculas como constituyentes fundamentales de los cuerpos, y quien inventó esta palabra con la cual hoy denominamos estas partículas elementales componentes de cada sustancia química.

Fue mediando el siglo, en 1848, cuando en la Nueva Granada el presidente, general Tomás Cipriano de Mosquera, fundó el Colegio Militar de Ingeniería, el primero de su género que existiera en nuestro país, destinado a preparar los primeros ingenieros militares e ingenieros civiles colombianos. Su paradigma para crearlo fue la Ecole Polytechnique de Francia. Trajo profesores del exterior. Allí se dieron las primeras clases de Física de nivel superior (para su tiempo) que se impartieron en Colombia. Allí se enseñó por vez primera en nuestro país el sistema métrico decimal de pesas y de medidas. Y los capítulos de los textos franceses de Física que allí se enseñaron y que trataban del calor, fueron el primer contacto de estudiantes colombianos con las nociones de la ciencia y la técnica del calor. Por primera vez se supo en Colombia, a nivel académico, qué es temperatura y qué es la caloría; y qué es calor específico y calor de combustión; y qué es la fusión y la evaporación; y allí se estudió cómo trabaja la máquina de vapor de Watt; y qué es un cheval de vapeur y otros temas de este saber. Y en su rudimentario laboratorio hubo unas balanzas, unos

termómetros, unos balones para gases y otros aparatos para realizar experiencias elementales sobre el calor. Sólo se daría otro paso análogo en Colombia cuando, cuarenta años después abriera sus puertas la segunda escuela de ingeniería del país, la Escuela Nacional de Minas en Medellín, en 1888. Después de muchas peripecias, el Colegio Militar de Ingeniería llegó a convertirse en la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, cuando ésta se fundó en 1867 por obra de otro presidente, el general Santos Acosta. Tarde y lentamente Colombia se asomaba por fin al fabuloso progreso de la ciencia de ese siglo.

En Europa, en 1853, se dio un gran paso adelante en la construcción de la Termodinámica Química. En ese año el químico danés Julius Thomsen aplicó el principio de conservación de la energía, por primera vez en la Química, y reconoció que el calor desarrollado en una reacción equivale a la diferencia del contenido de energía del sistema antes y después de la reacción (Ver Dampier, en la bibliografía), avanzando un paso más adelante de la ley de Hess.

El ímpetu fabuloso que había cobrado la Revolución Industrial y la dispersión universal de la máquina de vapor que se había visto en ferrocarriles, fábricas, vapores de río, barcos marítimos, máquinas industriales y mil usos más, concentraron el esfuerzo de muchos investigadores, ingenieros y físicos europeos en determinar las propiedades del vapor de agua y sus variaciones con la temperatura, la presión, la humedad libre y las demás variables de estado (como decimos hoy). Los ingenieros pragmáticos que construían y operaban máquinas y equipos comenzaron a preocuparse por la manera de aprovechar los conocimientos que los físicos y los químicos ya habían descubierto y seguían descubriendo. Fue así como en 1859, como ya señalamos, el ingeniero escocés William John Macquorn Rankine (1820-1872) publicó en Inglaterra su clásico "Manual of the steam engine", el cual introdujo a los ingenieros en el campo de la Termodinámica, y en el cual Rankine presentó la mayoría de los vocablos técnicos que se usan en esa ciencia: ciclo, eficiencia, proceso, reversibilidad, adiabático, isentropía, isotérmico, psicrometría y otros. Él presentó el diagrama presión-volumen (que Clapeyron ya había sugerido) y el diagrama de entropía-temperatura, los mismos diagramas que todo estudiante de termodinámica conoce, y que permiten medir gráficamente las cantidades de trabajo mecánico y las cantidades de calor que se producen o que se absorben en procesos y ciclos termodinámicos. Allí Rankine mostró la gran utilidad práctica de estos diagramas. Allí apareció la primera carta psicrométrica del vapor de agua, mostrando gráficamente las relaciones de temperatura, presión, humedad y

densidad del mismo. En los años siguientes otros experimentadores enriquecieron la carta psicrométrica y la convirtieron en herramienta fundamental para el estudio de la tecnología del vapor, de la del aire y de la meteorología.

En el mismo año en que Rankine publicó su libro, el ingeniero francés Jean-Joseph-Etienne Lenoir (1822-1900) desarrolló el primer motor experimental de combustión interna, de dos tiempos, el cual funcionó de manera efectiva usando gas de carbón como combustible, aunque su eficiencia termo-mecánica era aún muy baja. Al año siguiente se lo acomodó a un coche de caballos (sin los animales), que fue así el primer vehículo autopropulsado por un motor de combustión interna y no por vapor. Su invento no prosperó industrialmente porque la potencia era todavía muy baja (unos dos ó tres chevaux de vapeur) y la eficiencia era muy escasa (quizás 2 a 4%).

Muy poco después del libro de Rankine, el gran físico James Clerk Maxwell (1831-1879) presentó en 1860, en la misma Inglaterra su brillante teoría estadística sobre la cinética de las moléculas en los gases, donde dedujo las distribuciones de frecuencia que llevan hoy su nombre para las velocidades de las moléculas, para sus energías y para sus caminos libres entre choques. Fue el primer gran empleo que tuvo la Estadística en la Física. Esta brillante teoría maxwelliana de los gases comenzó a ser popularizada desde 1863 por el físico John Tyndall (1820-1893) cuando éste publicó su "Heat as a mode of motion". Allí Tyndall expuso también el fenómeno que hoy lleva su propio nombre, en el cual se aprecia visualmente el movimiento de las moléculas por la vibración que éstas provocan sobre pequeñas partículas que estén suspendidas en agua cuando al líquido lo atraviesa un rayo de luz intensa. Varios años después de que Maxwell lo hiciera en Inglaterra, y de manera independiente, hacia 1884, en Viena, el físico Ludwig Edward Boltzmann (1844-1906) iba a reconstruir la misma teoría cinética-estadística de los gases, desde un punto de vista un poco más abstracto. Por esa razón la teoría lleva hoy, mercedamente, el nombre conjunto de Maxwell-Boltzmann. Ella constituyó la piedra angular de la posterior ciencia fundamental de la Mecánica Estadística.

Del mismo año de 1860 fue el descubrimiento por Michael Faraday (1791-1867) de que el punto de congelación del agua rebaja cuando se le aplica presión, lo cual fue una gran confirmación experimental de las predicciones teóricas de la termodinámica que ya habían elaborado Kelvin y Clausius.

Muy poco después de su trabajo seminal sobre la teoría cinética de gases, Maxwell publicó, en 1864, su obra cumbre "A dynamical theory of the electromagnetic field". Allí Maxwell estableció para siempre:

- Sus famosas cuatro ecuaciones del electromagnetismo;
- que toda perturbación electromagnética se propaga en ondas electromagnéticas transversales, a 300.000 kilómetros/segundo;
- que la luz visible es energía electromagnética radiante,

y mucho más. De inmediato se vio que el calor radiante (o rayos infrarrojos como ya se les decía) es radiación electromagnética con longitudes de onda apenas mayores que la de la luz y con frecuencias vibratorias ligeramente menores. Hoy sabemos que el calor radiante ocupa la banda entre los 3×10^{-1} y los 3×10^4 centímetros de longitud de onda. Esto quedó plenamente ratificado por los experimentos de Heinrich Rudolph Hertz (1857-1894) en 1888, los cuales demostraron rotundamente que todas las radiaciones electromagnéticas se desplazan a la velocidad de la luz, y que ellas se reflejan, se refractan y se polarizan de la misma manera. Desde entonces el calor radiante ha sido entendido como una radiación que es de la misma naturaleza de la luz, de las ondas electromagnéticas y de las ondas ultravioletas, con las cuales forma un solo espectro continuo.

El descubrimiento del kerosene que ya describimos más arriba, y el rápido crecimiento de la demanda por este combustible provocó en Estados Unidos y en Europa (Rumania, Polonia y Rusia) la búsqueda afanosa de rezumaderos naturales de petróleo crudo, durante los años cincuentas. Pero muy pronto esas fuentes naturales resultaron insuficientes o se agotaron y surgió la necesidad de buscar el aceite crudo en fuentes subterráneas. Fue un personaje muy curioso quien se dedicó a esa tarea en 1859 en la aldea de Titusville en el Estado de Pensilvania en Estados Unidos. Era un aventurero. No era ingeniero, ni geólogo, ni científico. Había vendido kerosene, y muchas otras mercancías. Se autotitulaba "coronel" y se llamaba Edwin Lurentine Drake (1819-1880). Tuvo la idea genial de perforar el suelo vecino a unos manantiales naturales superficiales de petróleo crudo que ya se explotaban a mano. Construyó con su propia inventiva una o varias torres rudimentarias de madera que soportaran, cada una, una barra pesada y puntiaguda de acero, pendiente y vertical, que se izara y se dejara caer contra el suelo, con un fuerte impacto, una y otra vez, para ir horadando un hueco vertical en el piso de tierra y roca. El primer pozo saltó

el 28 de agosto, comenzando así la historia de la industria mundial del petróleo, historia multifacética de luces y sombras que sigue desenvolviéndose en el mundo. Inicialmente Drake llevó el crudo a los pequeños alambiques de ciudades vecinas, pero pronto montó su primera refinería, muy primitiva, cerca a sus pozos. Desde entonces el consumo de petróleo y su refinación no han cesado de crecer y de avanzar en todo el mundo, tanto en tamaño como en tecnología, en complejidad y en diversificación. Cuando nació (casi 30 años después) la industria del automóvil, este proceso se aceleró mucho más aún, especialmente por la aparición de la gasolina como combustible casi universal para los motores automotrices de combustión interna del tipo de Otto.

Pero simultáneamente los físicos europeos seguían haciendo avances en el conocimiento del mundo del calor. Así ocurrió en la Universidad de Goettingen, en Alemania, donde el gran físico Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) se dedicó en 1859 a estudiar la radiación de la luz y del calor. Por razones termodinámicas, dedujo al año siguiente que un cuerpo que absorba toda la luz y el calor y no refleje nada cuando está frío (a lo cual Kirchhoff llamó un "cuerpo negro"), cuando sea calentado emitirá con toda intensidad aquellas longitudes de onda de la radiación que más absorbe ese mismo cuerpo cuando está frío. El mismo Kirchhoff, en el mismo año, deduce de las mismas leyes de la termodinámica el teorema de que en un ambiente de temperatura uniforme es imposible distinguir dos cuerpos por la luz y el calor que irradian, aún cuando estén al rojo vivo, y que se necesita una luz externa para distinguirlos. En ese mismo año, Kirchhoff junto con Robert W. Bunsen (ya mencionado) publican sus primeras mediciones sobre las rayas espectrales del sodio y sobre las de otros elementos. Fundan así la ciencia que hoy llamamos Espectroscopia. Con este método pronto descubren el cesio y otros metales que no eran conocidos hasta entonces. Y al año siguiente Kirchhoff publicó todos sus trabajos fundamentales ya mencionados: sobre emisión y absorción de las radiaciones de luz y de calor, sobre el concepto de cuerpo negro, y sobre la radiación de cavidad como realización sencilla y práctica del anterior. Estas ideas serían el punto de partida para los posteriores estudios teóricos y experimentales sobre la luz y el calor radiantes, que llegarían hasta los trabajos de Planck y hasta el descubrimiento de los cuanta de energía radiante que hizo este último.

Desde la más remota antigüedad, los hombres sólo conocían el hielo y la nieve de la naturaleza como agentes refrigerantes, pero sabían que el frío les permitía conservar por más largo tiempo sus alimentos perecibles. En 1755 un mecánico

inglés llamado M. Hoell observó que el aire comprimido que se escapaba de un tubo con aire a presión, se enfriaba fuertemente al escapar desde su contenedor a la atmósfera. Y en 1828 Richard Trevithick propuso a nivel de idea, la posibilidad de una máquina de refrigeración basada en las observaciones de Hoell. Luego, en 1851, en Estados Unidos, el doctor John Gorrie (1803-1855) obtuvo una patente para una máquina inventada por él, la primera que operaba con éxito mediante un ciclo de compresión y expansión de aire. Ya en 1834 el ingeniero estadounidense Jacob Perkins (1766-1849), residente en Londres había señalado que otros gases podían trabajar con más eficiencia que el aire, especialmente si es posible licuarlos fácilmente mediante la compresión. De paso cabe decir que Perkins fue quien construyó y patentó la primera máquina eficaz para comprimir vapor de agua y de amoníaco, en 1834.

Por eso, a comienzos del siglo XIX, cuando ya se conocían muchos tipos de máquinas mecánicas y de máquinas térmicas, varios inventores intentaron construir medios artificiales para producir frío, mediante la evaporación de líquidos y mediante la expansión de gases. En realidad ya se había logrado licuar gases como el bióxido de carbono (CO_2) y el amoníaco (NH_3). Se disponía para este fin de compresores, de máquinas de vapor motrices, de bombas para líquidos, de válvulas, de boquillas de expansión, de supentines enfriadores, de intercambiadores de calor y de termómetros.

En 1844, el mecánico Thomas Masters en Londres patentó una máquina para hacer nieve, que empleaba una mezcla de hielo y sal para rebajar la temperatura de la salmuera. Y años después, en Cambridge, Massachusetts, en 1871, Charles E. Monroe patenta un enfriador de alimentos que se basa en la idea de evaporar agua desde el revestimiento poroso de un refrigerador. Pero el más notable investigador que usó el método de refrigerar mediante la evaporación de líquidos volátiles fue el estadounidense Frederic Tudor (1783-1864). Tudor se dedicó al negocio de cortar y almacenar hielo natural, desde el año de 1804, y a enviar grandes bloques desde el norte de Estados Unidos hasta el sur. Hacia 1834 ese negocio llegaba hasta las costas del mar Caribe, a Suráfrica y a Europa.

Sir John Leslie (ya citado atrás) era un profesor de Matemáticas en la Universidad de Edimburgo que se interesó en observaciones ya hechas experimentalmente por Boyle y por William Cullen (quien descubrió en 1755, en la Universidad de Glasgow, que cuando el agua se evapora espontáneamente, el recipiente que la contiene se enfría). Leslie usó ácido sulfúrico concentrado para absorber el vapor

de agua que se evaporaba de una vasija, y producía así un vacío en un recipiente cerrado; este vacío rebajaba tanto la temperatura de saturación del agua que se podía formar hielo. En 1810 por este procedimiento ya se fabricaban en Inglaterra bloques de hielo de una libra. Desde 1873 en la población de Jefferson, Texas, el inventor David Boyle, de Chicago, producía una tonelada diaria de hielo mediante evaporación y compresión de amoníaco, usando el compresor que Perkins había inventado y que el mismo Boyle había perfeccionado.

El primer sistema de refrigeración que tuvo cierto éxito comercial se basó en estas ideas anteriores y usó aparatos ya conocidos. Fue diseñado, construido, patentado y vendido en 1858 por el ingeniero mecánico francés Ferdinand Carré (1824-1900) usando agua como medio refrigerante, la misma que reemplazó al año siguiente por amoníaco (que es un gas fácil de licuar comprimiéndolo). Conceptualmente operaba como lo que hoy llamamos un ciclo de Brayton reversado, y por eso su eficiencia termo-mecánica era relativamente alta. Pero era también un sistema voluminoso, costoso y riesgoso que sólo se podía usar en escala industrial, para fabricar hielo y para congelar carne y otros alimentos. Fueron necesarios muchos perfeccionamientos, tanto teóricos como técnicos, antes de que, casi ochenta años después, la refrigeración mecánica pudiera llegar al público en la forma de refrigeradores domésticos. Pese a todo, el concepto físico de nuestros refrigeradores aún hoy es en esencia el mismo de Carré: comprimir un gas retirando por irradiación el calor que se genera, licuarlo, dejarlo expandir rápidamente (lo cual produce el enfriamiento) y repetir cíclica y periódicamente la operación. Así trabajan nuestros refrigeradores hogareños.

El sistema refrigerador de Carré se difundió lentamente, y hubo que esperar hasta 1876 a que, en Alemania, el ingeniero Karl Paul Gottfried von Linde (1842-1934) patentara el primer refrigerador práctico y económico para uso en industrias y comercios, basado en el mismo ciclo Brayton de compresión y refrigeración con amoníaco. La máquina de Linde permitía fabricar hielo en grandes cantidades y producir frío en escala industrial. Así nació la tecnología de la refrigeración, que pronto se convirtió en parte esencial de muchas industrias en todos los países. Se puede señalar, para ejemplificar el desarrollo industrial que ya había alcanzado la tecnología de la refrigeración, que en 1881, en la misma Alemania, el técnico y empresario Franz Windhausen fabricaba bloques de hielo de 672 libras cada uno, en su planta industrial. Mediante esa misma tecnología perfeccionada por él mismo, Linde desarrolló después, en 1894, la fabricación industrial de aire líquido, de gas carbónico líquido, de oxígeno líquido

y de nitrógeno líquido, los cuales de inmediato comenzaron a ser usados para numerosos usos técnicos.

Las extensas investigaciones experimentales que hizo en 1861 el gran químico ruso Dimitri Ivanovich Mendeleiev (1834-1907) en San Petersburgo acerca de la expansión de líquidos con el calentamiento y de su contracción con el enfriamiento, lo llevaron a descubrir y a definir el fenómeno y el concepto de temperatura crítica de los líquidos al evaporarse. Poco después el tema fue estudiado más extensamente y más a fondo por el químico irlandés Thomas Andrews (1813-1885) quien halló también el fenómeno de la presión crítica, así como el llamado punto triple de la presión y la temperatura, donde coexisten los tres estados de una sustancia determinada: sólido, líquido y gaseoso. Fue sin duda aprovechando estos nuevos conceptos y los que usó Carré, como en los años de 1869 a 1871 el químico polaco Zygmunt Florenty von Wroblewski (1845-1888), tras un prolijo trabajo experimental y técnico, pudo licuar en su laboratorio, por primera vez, algunas pequeñas cantidades de hidrógeno, logrando para ello temperaturas ya cercanas al cero absoluto. (El hidrógeno sólo se licúa a -253°C ó sea a 20°K). Varios años después, en 1898, el químico inglés James Dewar (1842-1923) lograría de nuevo el mismo resultado, y con mayores volúmenes de hidrógeno licuado, usando y mejorando el método que Linde había inventado para licuar el aire en grandes volúmenes, cuatro años antes, en Alemania.

Desde que comenzaron a observarse -como ya señalamos- las desviaciones de los gases reales respecto de la ley de Boyle -Mariotte y de la ley de Charles-Gay Lussac (desviaciones que se hacen especialmente notorias a altas presiones y a bajas temperaturas), los físicos y los químicos se dieron a buscar cómo corregirlas para encontrar una "ecuación general de los gases reales". Las nuevas nociones de presión crítica y temperatura crítica debían ser tenidas en cuenta y debían ser explicadas por esa nueva ecuación. Fue en 1873 cuando el físico Johannes Diederick van der Waals, en la Universidad de Leyden presentó su gran resultado, la conocida ecuación:

$$(p+n^2a/V^2)(V-nb) = nRT$$

con sus gráficas correspondientes, ecuación que sigue siendo una de las que mejor se ajustan al comportamiento de mayor número de gases, en amplios intervalos de presión y de temperatura; y de las que mejor permite interpretar

la evaporación de los líquidos y la licuefacción de los gases. Así mismo aparecieron en la ciencia las fuerzas inter-moleculares que hasta hoy llevan el nombre de van der Waals. Con sobra de merecimientos y un poco tardíamente, van der Waals recibió el premio Nobel de Física varios años después, en 1910.

Estos grandes avances teóricos abrieron la puerta a muchos otros avances conceptuales y a muchas innovaciones técnicas. Uno de tales resultados fue la licuefacción del oxígeno (a 90°K) que lograron por primera vez en París, en 1877, los químicos Louis-Paul Cailletet (1832-1913) y Raoul Pictet (1846-1929). Y gracias a estos progresos fue como después, en 1905, el físico holandés Willem Hendrick Keesom (1876-1956) llegó a las temperaturas aún más bajas que le permitieron licuar el helio, a 4°K , y descubrir que hay dos diferentes tipos de helio líquido, a temperaturas muy cercanas al cero absoluto. Esta línea de investigación sería exitosamente continuada en Holanda (como veremos más abajo); produciría descubrimientos espectaculares; crearía la ciencia de la criogenia; y daría lugar a la importante industria moderna de fabricar gases licuados para numerosos y variados usos técnicos, así como a otros maravillosos descubrimientos que también más abajo veremos.

En años posteriores al hallazgo de van der Waals, otros químicos y físicos siguieron buscando otras ecuaciones de estado para los gases reales. De tales ecuaciones nuestros libros de físico-química aún recuerdan la de Cailletet-Mathias, la de Dieterici, y la de Beattie-Bridgeman aparecida ya en nuestro siglo.

Mientras van der Waals publicaba su trabajo teórico en Holanda, en la otra orilla del Atlántico, en Boston, 1873, un mecánico desconocido entonces (pero hoy famoso), George B. Brayton inventó el primer motor práctico de combustión interna en dos tiempos que llegó a tener mercado. Su versión moderna es en cuatro tiempos: expansión isobárica, expansión adiabática, compresión isobárica y compresión adiabática. El ciclo termodinámico de Brayton se llama también de Joule y es, en esencia, el que usaron los primeros refrigeradores de Carré y de Linde, cuando trabajaban con amoníaco, pero trabajando en reversa. Ese es también el ciclo que sigue la turbina de vapor de Parsons. (Ver De Camp y Faires en la bibliografía).

También en los Estados Unidos, en los años posteriores a 1876, un modesto profesor de física de la Universidad de Yale, en el Estado de Connecticut,

llamado Josiah Willard Gibbs (1839-1903) le dio a la Termodinámica un trascendental avance teórico que con el tiempo produciría enormes resultados prácticos. Dice Asimov (Ver bibliografía) que desde aquel año, y durante varios más, Gibbs produjo una larga serie de trabajos en los cuales creó muchas grandes nuevas ideas:

Introdujo el uso de la primera y de la segunda leyes de la Termodinámica en el estudio de las reacciones químicas.

Inventó y usó el concepto de "energía libre" $F = U - T.S$, donde

U = energía interna, T = temperatura absoluta, S = entropía) de un sistema de materia, concepto al que hoy damos el nombre de su autor.

Inventó e introdujo el concepto de potencial químico termodinámico, que es hoy de tan enorme importancia teórica y práctica para químicos e ingenieros químicos dentro de la ciencia fundamental de la termoquímica.

Inventó e introdujo el concepto de "grados de libertad" en un sistema termodinámico muy generalizado, que puede ser mecánico, térmico, eléctrico, químico, magnético, o una combinación de éstos.

Descubrió y publicó la "regla de fases" que hoy identificamos con su nombre: $P + F = C + 2$, donde P = números de fases en un sistema, F = número de grados de libertad, y C = número de componentes en un sistema termodinámico.

Gibbs creó así casi toda la ciencia que hoy llamamos la termodinámica química.

Fue quien primero estableció el principio de que un sistema termodinámico en equilibrio estable se encuentra necesariamente en condición de presentar la mínima energía libre, y recíprocamente. Este concepto es tan fundamental en termodinámica moderna que se le puede llamar la Cuarta Ley de la Termodinámica.

Señaló Gibbs que si un sistema S_1 está en equilibrio con el sistema S_2 , y si S_2 lo está con S_3 , entonces y sólo entonces S_1 está en equilibrio con S_3 . Esto es lo que hoy se llama la ley cero de la termodinámica. Se propagó entre los físicos y los químicos en los primeros años treinta de nuestro siglo XX.

Gibbs fue además uno de los grandes creadores de la mecánica estadística y del cálculo vectorial, dos grandes edificios de la ciencia moderna. Sus obras permanecieron desconocidas en Europa hasta cuando, a fines del siglo XIX, Wilhelm Ostwald las tradujo al alemán y las difundió a todo el mundo científico. En 1902, tardíamente, fue publicada su obra cumbre "Elementary principles of statistical mechanics", que es sin duda el texto clásico y fundamental de esta nueva ciencia, la que ha llegado a ser el más sólido respaldo teórico de la termodinámica. Gibbs comparte hoy con Boltzmann el honor de haber sido uno de los dos primeros y los dos más grandes (y casi únicos) creadores de la ciencia de la mecánica estadística.

El crecimiento y la expansión formidables de la Revolución Industrial en Europa; las limitaciones e inconvenientes de que aún adolecía la máquina de vapor; la demanda creciente por una fuente eficiente de energía más liviana pero potente; la aparición de los combustibles derivados del petróleo en el mundo durante los años sesenta; y la disponibilidad de un combustible fácil de almacenar y de transportar, como era el gas de carbón, habían estimulado a numerosos inventores del Continente europeo a desarrollar la idea ya claramente advertida anteriormente por varios teóricos y técnicos, de hacer un motor de combustión interna con combustible gaseoso o líquido. Ya vimos cómo el ingeniero francés Etienne Lenoir casi lo logró con su motor de dos tiempos, pero que no tuvo éxito técnico ni económico por la muy baja eficiencia termomecánica y la escasa potencia de su pequeña máquina. Sin embargo otros ingenieros, académicos y mecánicos empíricos siguieron trabajando en la idea. Más abajo ampliaremos la exposición de este proceso que, sin proponérselo nadie, ha llegado a cambiar la vida del mundo, tanto en sus aspectos técnicos como económicos y sociales.

Fue el ingeniero alemán Niklaus August Otto (1832-1891) quien, después de más de dos años de pruebas y mejoramientos logró construir y patentar (1877) el primer motor de combustión interna que fuera industrialmente utilizable, y cuya operación cíclica era de cuatro tiempos. El motor de Otto empezó a construirse y a venderse exitosamente a nivel comercial, desde ese momento. Trabajaba con gas de carbón (de unas 500 a 700 Btu por pie cúbico de poder calorífico), y en ciclos de cuatro tiempos: compresión, expansión, expulsión y absorción. Fue pues, el antecesor directo de todos los motores de gasolina que han existido y que existen en el mundo. Las primeras máquinas que hizo Otto no superaban los diez caballos de vapor de potencia, y su eficiencia

termomecánica estaba apenas por encima del 5%. Pero era fácil de transportar y no emitía humo espeso, ni hollín, ni chispas, como sí lo hacía una caldera de vapor. Por esas razones fue prontamente adoptado en muchas fábricas de Europa para mover máquinas industriales. En años siguientes el mismo Otto y otros constructores le hicieron mejoras adicionales que permitieron aumentarle la relación potencia/peso, hacerlo con dos o más cilindros y extender su mercado y sus usos. Desde entonces hasta el día de hoy el motor de Otto y su ciclo de cuatro tiempos no han cesado de ser mejorados en sus características técnicas y económicas. Uno de los factores fundamentales para su éxito desde sus primeros años fue el de la aparición simultánea de los combustibles líquidos derivados de la destilación del petróleo, y los muchos mejoramientos que los químicos e ingenieros de petróleos comenzaron a agregarles, desde el principio hasta el día de hoy, a estos combustibles.

El año de 1879 vio aparecer un fenomenal avance tecnológico a ambos lados del Océano Atlántico: la bombilla incandescente. En Estados Unidos, el genial inventor autodidacta Thomas Alva Edison (1847-1931) estaba empeñado en construir una bombilla de iluminación que fuera emitida por la incandescencia de un filamento, y que fuera producida por una corriente eléctrica. En el año citado, después de miles de ensayos, Edison tuvo éxito con un filamento de carbón en una bombilla al vacío y patentó su invento. En Inglaterra un físico de academia, Joseph Wilson Swan (1828-1914), en el mismo año de 1879, tuvo también éxito con una bombilla similar, la que era algo distinta y que Swan desarrolló independientemente de Edison. Posteriormente la bombilla eléctrica ha recibido numerosos cambios en sus materiales: filamento de osmio, atmósfera de nitrógeno, filamento de tungsteno, atmósfera de argón y otros. Aún en el día de hoy, la bombilla eléctrica es uno de los convertidores de energía de uso más universal, a pesar de que la energía eléctrica que consume sólo se convierte en parte pequeña en energía lumínica visible, y a pesar de que la gran mayoría de ella se irradia como calor que no se aprovecha y que se disipa en el ambiente, aumentando así la entropía del mundo.

Casi al mismo tiempo, en Viena, sucedió un gran avance teórico en el conocimiento del calor y de sus leyes. Ya Kirchhoff había establecido en 1859 y 1860, como vimos, la noción de cuerpo negro como idea fundamental para estudiar la radiación de energía de los sólidos calientes; así como además había formulado la noción de radiación de cavidad como realización práctica sencilla de la radiación negra, y otras ideas cualitativas que aquel gran físico dedujo por

consideraciones termodinámicas. Pero aún no había mediciones ni realizaciones cuantitativas. Hasta que en el año de 1879, el físico austríaco Joseph Steffan (1835-1893), profesor de la Universidad de Viena, estudiando el calentamiento de los cuerpos y su enfriamiento por irradiación, y haciendo cuidadosas mediciones de la radiación que emiten aquellos, encontró que la cantidad de energía (en calorías) que irradia un cuerpo negro, por segundo y por centímetro cuadrado de superficie radiante, es proporcional a la cuarta potencia (T^4) de la temperatura absoluta (T) del cuerpo. Este descubrimiento habría de tener trascendentales desarrollos teóricos en manos de un discípulo de Steffan (de nombre Ludwig Boltzann), y sería superlativamente útil para todos los ingenieros e industriales del mundo que tienen que ver con hornos, fogones, superficies calientes y materiales aislantes.

Además, el trabajo de Steffan aceleró la importantísima línea de investigación que iniciara Kirchhoff, y que llevaría hasta el descubrimiento por Planck de la idea trascendental del quantum de energía. El interés en estos estudios experimentales se tradujo, dos años después (1881), en el invento en Estados Unidos por el astrónomo Samuel Pierpont Langley (1834-1906) del bolómetro. Era, y es, un termómetro basado en el efecto termoeléctrico de Peltier (Ver más arriba), de muy alta sensibilidad, que produce una corriente eléctrica cuando se calienta al absorber calor radiante. Langley lo usó para hacer un estudio detallado de la distribución de temperaturas del espectro solar; y su uso se propagó rápidamente para estudiar y medir energías radiantes en espectros de estrellas, de hornos y de sólidos al rojo.

La primera usina o central de generación para producir energía eléctrica en escala comercial que apareciera en el mundo, la construyó Edison en Londres (curiosamente no lo hizo en su patria) en 1880. Era movida por una gran máquina de vapor de las de Watt, que consumía carbón y que movía un dinamo que generaba corriente directa. Sus clientes usaban la energía, casi toda, para iluminar casas y oficinas vecinas. Dos años después (1882) el mismo Edison construyó la segunda de estas plantas en la ciudad de Nueva York, en la calle Pearl Street. Así nació una de las industrias más importantes que hoy en día existen en todo el mundo: la industria de la generación y el suministro de energía eléctrica. Por razones obvias esas primeras plantas eran termoeléctricas de carbón (como se dice hoy). Pero rápidamente la industria eléctrica registró profundos cambios tecnológicos: la corriente alterna reemplazó a la directa; apareció la generación hidroeléctrica; surgió la línea de transmisión a alto voltaje;

se generalizó la aplicación extensiva a motores industriales; Nicola Tesla (1856-1943) inventó el transformador de alta potencia; aumentaron los voltajes y los amperajes en todas las máquinas; se desarrollaron nuevos tipos de motores eléctricos; nacieron las subestaciones y se extendieron rápidamente por el mundo entero. La disponibilidad de energía eléctrica barata estimuló el ingenio de los inventores para aplicarla a muchos usos nuevos. Así por ejemplo, en 1882 en Estados Unidos fue inventada la plancha eléctrica manual para alisar la ropa en casa, por el mecánico Henry W. Seely, pero que demoró mucho en hacerse muy barata y llegar a otros países. (A Colombia vinieron las primeras solamente hacia 1930).

Fue Emile Hilaire Amagat, (1841-1915), en París, en 1880, quien inició el estudio del mundo de las altas presiones en sólidos y en gases, usando prensas hidráulicas y aparatos experimentales que él mismo diseñó. Llegó a alcanzar presiones hasta entonces no imaginadas, logrando llegar a 3.000 atmósferas. Trabajó también con gases confinados en recipientes metálicos rígidos (a volumen constante) y calentados a muy alta temperatura. Experimentalmente, con manómetros y termómetros especiales, comprobó que en esas condiciones, al calentar los gases, el aumento de presión que ellos sufren es proporcional al aumento de temperatura. Por muchos años los autores franceses denominaron ley de Amagat a esta relación cuantitativa. El fenómeno se aprovecharía muchos años después en el funcionamiento del motor de turbina a chorro o de reacción. Varios años después, Amagat publicó sus descubrimientos en su libro "Les lois des gaz" que fue un gran clásico sobre el tema en su tiempo.

Dice Mumford (ver bibliografía) que fue en 1882 cuando el ingeniero sueco Carl Gustav P. de Laval (1845-1913) patentó la turbina de vapor que hoy lleva su nombre, la cual constituía una realización práctica de una idea publicada en el siglo XVI en Italia por Giovanni Branca (Ver más arriba). Consistía en un rodete de metal que portaba una corona de cangilones, sobre la cual incidía un chorro de vapor a alta velocidad, el que hacía girar el rodete con gran rapidez, alto torque, alta potencia y sin vibraciones. Hoy es poco usada porque la turbina hidráulica de Pelton (Lester Allen 1829-1908), inventada en California en 1870, es más sencilla y más barata, y porque la posterior turbina de vapor de Parsons es energéticamente más eficiente. Pero en su tiempo la turbina de De Laval prestó un servicio útil para mover algunas máquinas industriales. Dos años después (1884) el ya mencionado ingeniero naval irlandés Charles Algernon Parsons (1854-1931) inventó la turbina de su nombre, con eje horizontal, con

rotor cónico dotado de muchas coronas de paletas, accionada por vapor de flujo axial a alta presión y alta temperatura. Ella se aplicó primero a la operación de barcos y en este siglo se ha aplicado extensamente a impulsar generadores de energía eléctrica de alta potencia. Aunque físicamente la turbina de gas es un sistema abierto, desde el punto de vista termodinámico opera como un sistema cerrado en ciclo de Brayton. Y aunque Parsons inventó su turbina con el propósito de emplearlo en barcos de la marina inglesa, las autoridades navales de ese país tardaron mucho tiempo en admitir su notoria superioridad, en muchos sentidos, sobre la máquina de vapor convencional de Watt, que todavía usaban todos los navíos militares del mundo. Hoy en día la turbina de vapor de Parsons se usa en muchísimas plantas termoeléctricas del mundo, y ha sido altamente perfeccionada, pese a que su eficiencia termomecánica propia no ha superado el 35%, trabajando en ciclo simple.

Ludwig E. Boltzmann nació, vivió y murió trágicamente en Austria (1844-1906). Fue discípulo aventajado de Steffan (Ver más arriba) de quien aprendió también el interés por las investigaciones sobre el calor. Él retomó el trabajo de Maxwell sobre la cinética molecular de los gases; construyó su teoría fundamental, mecánica y estadística; dedujo el llamado "principio de equipartición de la energía"; mostró la importancia transcendental de la relación $R/N = k$ (en donde R es la constante universal de los gases, y N es el número de Avogadro), siendo k una constante física fundamental de la materia, a la cual llamamos hoy constante de Boltzmann

$$k = 1.3805 \times 10^{-23} \text{ Joules/Kelvin}$$

Además, demostró la importancia de la función de distribución $\exp(-E/k.T)$ donde E es una energía de un micro-sistema térmico, y T es la temperatura absoluta; y lo más importante, dio la famosa definición de entropía

$$S = k \cdot \ln W$$

donde W es una función de probabilidad que depende de las propiedades combinatorias de la colección de estados energéticos posibles y diferentes de un sistema. Esta es una de las más famosas y más usadas fórmulas fundamentales de la Física y está inscrita como epitafio en la tumba de su autor. En 1884 Boltzmann dedujo de su propia teoría la fórmula que Steffan había encontrado empíricamente, sobre la relación de la intensidad de radiación

de un cuerpo negro con la cuarta potencia T^4 de la temperatura absoluta, y por eso hoy se la llama ley de Steffan-Boltzmann. Al año siguiente creó la nueva ciencia que hoy llamamos Mecánica Estadística (ver arriba). Los físicos de su tiempo desestimaron injustamente su trabajo maravilloso, el cual vino a ser reivindicado ya en el siglo XX.

El gran interés científico y técnico que ofrecían las bajas temperaturas y sus muchas aplicaciones previsibles llevaron, a mediados de los años ochentas al ingeniero inglés William Langley Hampson (1854-1926) a inventar un método propio y diferente para producir aire líquido a escala industrial y para obtener de él los gases oxígeno y nitrógeno por destilación fraccionada de aquel. Así nació en Inglaterra la industria de gases licuados para usos industriales y otros, que hoy sigue prosperando en el mundo y avanzando en su tecnología. (Recordemos que ya von Linde había fundado esa industria en Alemania, con tecnología diferente y propia de él.)

Ya vimos más arriba cómo varios inventores europeos habían intentado construir carruajes autopropulsados, unos con máquina de vapor y otros con motor de combustión interna: Rivaz, Cugnot, Symington, Murdock, Lenoir y otros lo habían intentado sin lograrlo. Sus vehículos resultaban muy lentos, eran difíciles de construir, resultaban muy costosos, requerían mucho combustible, eran muy pesados, tenían poca potencia mecánica y adolecían de otros inconvenientes. Fue solamente en 1885 cuando el ingeniero mecánico alemán Karl Friedrich Benz (1844-1929), después de mucho estudio, de mucha experimentación y de varios intentos fallidos, mejorando el motor de "bencina" (como se le decía entonces a la gasolina) que había desarrollado Otto nueve años antes, con un solo pistón, lo acomodó a un carro triciclo y logró hacer marchar a éste varias veces, a lo largo de trechos largos, con velocidades hasta de seis kilómetros/hora (!). Benz patentó su invento, que atrajo la atención de todo el público; y comenzó a vender su vehículo. Este fue el punto de partida de la poderosa industria internacional automotriz que hoy conocemos, y del auge del petróleo en el mundo.

Rápidamente surgieron en otros países, en los años siguientes, otros inventores e industriales que empezaron a perfeccionar el invento de Benz en mil aspectos: las cuatro ruedas, la dirección, la caja de cambios, el clutch de potencia, los frenos, las llantas de caucho, los neumáticos, el carburador, el encendido del motor, la mayor eficiencia del combustible, la lubricación, etc. Peugeot en

Francia, Olds en Estados Unidos, Lanchester en Inglaterra, Masseratti en Italia, Daimler en Alemania y particularmente Ford en Estados Unidos, convirtieron el automóvil en artículo de uso común por el gran público; crearon un inmenso mercado; impulsaron vertiginosamente la demanda de petróleo crudo y de gasolina en el mundo; obligaron a construir carreteras y autopistas; e impulsaron a las nubes el consumo mundial de la energía almacenada en el petróleo.

Dos años antes del invento de Benz, otro ingeniero alemán, Gottlieb Daimler (1834-1900), había logrado construir un motor de combustión interna que era análogo al de Otto, pero de alta velocidad, y lo montó en una lancha que fue la primera embarcación rápida del mundo. En 1887 hizo un motor de gasolina de dos tiempos, pequeño, y lo instaló en una bicicleta que fue así la primera motocicleta. Daimler tuvo también éxito desde el primer momento con sus vehículos motorizados, los que él se dedicó a producir y a vender. Algún tiempo después se asoció con Benz y constituyeron la empresa Benz-Daimler Gesellschaft que sigue siendo una de las mayores del mundo en la industria automotriz, después de cambiar de nombre algunas veces.

James Dewar (1842-1923) de quien ya hablamos, fue un distinguido físico inglés que dedicó su vida al estudio experimental de las bajas temperaturas. Primero repitió la producción de aire líquido y de sus gases componentes; y para poderlos conservar en el ambiente de su laboratorio inventó en 1885 el frasco aislado que aún se identifica con su nombre. Tiene doble pared con un espacio intermedio que está aislado por vacío. Dewar lo llamó "frasco-termo" y hoy se le usa, como entonces, para mantener líquidos calientes sin enfriarse y líquidos fríos sin calentarse, en los laboratorios, en las fábricas y aún en la vida doméstica de todos los días. Trece años después (1898) Dewar inventaría un método para producir hidrógeno licuado en cantidades industriales. (Von Wroblewski lo había hecho hacía más de 30 años pero solamente en muy pequeña escala en su laboratorio). La temperatura que alcanzó Dewar en estos experimentos sería por largo tiempo la más baja que se hubiera alcanzado.

En el otro extremo, el de las altas temperaturas, experimentaba en ese momento con arcos eléctricos, el físico francés Henri Moissan. El fenómeno del arco eléctrico había sido descubierto en Inglaterra, hacia 1807, por el físico y químico Humphry Davy (1778-1829), y mucho tiempo después, en 1876, había sido aprovechado por el ingeniero ruso-alemán Paul Jablockoff (1847-1914) para construir una lámpara eléctrica con arco de carbones, que alcanzó a usarse en

varios países como iluminación para calles, plazas y otros espacios abiertos. Pero Moissan lo quería usar más bien en procesos de producción industrial y en 1886 patentó el primer horno eléctrico, con el cual se dedicó por largo tiempo a tratar de fabricar materiales artificiales. Pensaba especialmente en producir diamantes y otros materiales muy duros, como el carburo de silicio. En 1892 construyó una versión, con electrodos de grafito, mucho más perfeccionada, que le permitió alcanzar temperaturas más altas con menos consumo de energía eléctrica, y llegar hasta 3.000°C de temperatura. El horno eléctrico se ha usado desde entonces en el mundo en procesos que requieren temperaturas de varios miles de grados. En hornos eléctricos de arco se fabrican hoy en todo el mundo el acero, el ferroníquel, el ferromanganeso y otras ferroaleaciones, el carburo de silicio, el carburo de calcio, el corindón artificial y el grafito artificial. En Colombia el primer horno para producir acero eléctrico industrial que existió, comenzó a operar en 1940, en la ciudad de Medellín para fabricar acero a partir de chatarra. En años posteriores se instalarían otros varios en algunas acerías. Y en 1964 se inauguró uno muy grande en la población antioqueña de Nare, para producir carburo de calcio. (Esa instalación dejó de producir aproximadamente en 1985).

En el mismo año ya mencionado de 1886, en Estados Unidos, el físico anglo-norteamericano Elihu Thompson (1853-1937), en sus extensos experimentos con la electricidad y el electromagnetismo, inventó el primer caudín o soldador por resistencia eléctrica, que fue utilizable ya a nivel industrial para soldar a mano con soldadura de estaño-plomo. Cada vez que usemos un caudín de mano o un secador de pelo (que es casi lo mismo) debiéramos recordar a Thompson. No sobra recordar aquí que los antiguos sumerios y egipcios sabían soldar oro, plata y cobre desde el cuarto milenio antes de Cristo, con forja, crisol y martillo.

Al mismo tiempo, en 1886 en Francia, un químico, Francois-Marie Raoult (1830-1901) descubrió la ley que lleva su nombre, según la cual un solvente merma su presión de vapor y aumenta su punto de ebullición, de manera numéricamente proporcional a la concentración molar del soluto, salvo que éste sea un electrólito. Poco tiempo después se descubrió que una ley análoga es válida respecto al punto de fusión, el cual desciende en proporción a esa misma concentración. Tiempo después las leyes de Raoult serían re-elaboradas para incluir el caso de las soluciones iónicas. Este fenómeno es de enorme importancia, no solamente en el aspecto teórico y experimental sino también

en el industrial en procesos fisico-químicos fabriles como son la destilación, la evaporación, el secado, la congelación y la liofilización de soluciones de sólido en líquido y de líquido en líquido.

Raoult es un ejemplo distinguido de los muchos químicos que han aportado conocimientos e ideas nuevas a la ciencia del calor y a la termotecnia gracias a su trabajo experimental. También lo hizo en esos tiempos Robert W. Bunsen, quien en 1887 inventó el calorímetro de vapor, que es hoy una herramienta esencial en los laboratorios del mundo para medir calores específicos, calores sensibles y calores de combustión de líquidos, gases y vapores.

En el mundo de la tecnología del calor, el año de 1886 se recuerda porque el químico sueco Alfred Bernhard Nobel (1833-1896) patentó entonces la primera forma de lo que hoy llamamos dinamita, (con el nombre de balistita) hecha de nitroglicerina absorbida en una matriz de aserrín, y cuyo poder explosivo es mucho mayor que la pólvora común que se usaba hasta entonces. Además, la dinamita no genera tanto humo como la pólvora negra. Bien se sabe la importancia trascendental que ha tenido la dinamita en la historia desde entonces. Tres años después (1889) los químicos ingleses Frederick Augustus Abel (1827-1902) y James Dewar (ya mencionado) inventaron la "pólvora sin humo" que ellos bautizaron con el nombre de "cordita", hecha a base de nitrocelulosa y que permitió utilizar universalmente el fusil en todas las batallas del mundo.

El año de 1888 es famoso en la historia de la ciencia y la tecnología porque, como lo anotamos más arriba, el físico alemán Heinrich Hertz (1857-1894), en la Universidad de Karlsruhe, demostró con sus extensos experimentos que todas las radiaciones electromagnéticas cumplían las mismas propiedades de la luz, tal como lo aseveró Maxwell en 1864. De inmediato los físicos europeos pudieron configurar la estructura básica del espectro electromagnético, desde las ondas de radio (en las bajas frecuencias y las ondas largas), pasando por la radiación de calor o infrarroja, continuando por la luz, y llegando hasta los rayos ultravioleta. Poco después (1895) también en Alemania, Wilhelm Konrad Röntgen (1845-1923) descubrió los rayos X que fueron incorporados al espectro electromagnético, a continuación de los ultravioleta, hacia el lado de las más altas frecuencias y de las menores longitudes de onda.

El químico francés Henri-Louis Le Chatelier (1850-1936) no pensaba estar haciendo un aporte específico a la teoría del calor, sino formulando una

PRODUCCIÓN MUNDIAL DE COMBUSTIBLES FÓSILES (Crecimiento de 1860 a 1970)

Años	(Millones de toneladas métricas)				
	Carbón	Lignito	Petróleo	Gasolina Natural	Gas Natural (10 ⁹ m ³)
1860	132	6			6
1870	204	12	1		8
1880	314	23	4		11
1890	475	39	11		13
1900	701	72	21		16
1910	1057	108	45		34
1920	1193	158	99	1.2	64
1930	1217	197	197	6.5	128
1940	1363	319	292	6.9	193
1950	1454	361	523	13.6	332
1960	1809	874	1073	1073	689
1970	1808	793	2334	2334	1144

Fuente: Carlo M. Cipolla. Historia económica de la población mundial. Barcelona, 1978. Pag. 62.

observación empírica sobre fenómenos físico-químicos, cuando en 1888 enunció el principio que hoy llamamos con su nombre. Según este principio, cuando en un sistema físico o químico en equilibrio estable se modifica alguna de las variables que lo determinen, el equilibrio cambia de manera que contrarreste el efecto de ese cambio. Así por ejemplo, si en una reacción química endotérmica se aumenta la temperatura, la reacción se acelera; pero si se baja la temperatura, la reacción disminuye su velocidad. Este es y será siempre un principio utilísimo en el estudio de toda clase de procesos térmicos y en el diseño de equipos necesarios para realizarlos.

El carbón mineral era hasta entonces el combustible universal para caldear calderas, hornos, fogones, crisoles, parrillas y todos los mil dispositivos térmicos que requería la pujante expansión de la Revolución Industrial. Ya había dado lugar a otros dos combustibles que entonces eran usados en todos los países que crecían en su industria: el coque y el gas de carbón (en inglés: "water gas" o "city gas"). En esos años finales del siglo XIX los países de Europa y

Norteamérica consumían grandes cantidades de hulla, no sólo como combustible, sino también como materia prima para producir coque, gas de retorta, gas sintético (con vapor de agua y oxígeno), amoníaco, ácido sulfúrico y un gran número de productos químicos orgánicos, cuyo desarrollo iba configurando un gran sector industrial que se denominó desde entonces la industria carboquímica. En el cuadro anterior se presenta la serie cronológica estadística, que muestra cómo creció en el mundo la producción y el consumo de carbón y de los otros combustibles sólidos, desde 1860 hasta 1970.

Wilhelm Wien (1864-1928) fue uno de los numerosos físicos europeos que - como Boltzmann- se interesó en profundizar el importante trabajo que habían iniciado Kirchhoff y Steffan sobre la emisión de radiaciones por los sólidos (o radiación negra). Todos los fundidores y herreros del mundo habían sabido siempre que cuando un trozo de metal se va calentando, primero toma un color rojo oscuro, después un rojo brillante, después un anaranjado, luego se torna amarillo y luego "blanco". Ya se sabía también que un sólido caliente emite todos los colores del espectro de la luz y del calor, pero con distintas intensidades relativas; y que la conservación de la energía exige que, a cada temperatura haya un "color" cuya intensidad sea la máxima en su espectro. Haciendo muchos experimentos y apoyado en la teoría-termodinámica ya entonces conocida, Wien demostró en 1893 que la longitud de onda del color más intenso (λ_m) es inversamente proporcional a la temperatura absoluta (T) del cuerpo negro radiante y que por eso, a medida que éste se calienta o se enfría, lo hace cumpliendo la condición de que:

$$\lambda_m \cdot T = \text{constante} = 0.2896 \text{ cm} \times \text{grado Kelvin}$$

A esta relación se le llama actualmente la ley de desplazamiento (del color más intenso, con la temperatura) y se le agrega el nombre de Wien. Años después, cuando Planck introdujo el concepto cuántico de la radiación y su famosa constante de acción "h", se dedujo de allí, teóricamente que, en efecto

$$\lambda_m \cdot T = h \cdot c / (4.9650 k)$$

siendo c la velocidad de la luz y k la constante de Boltzmann. Por su magnífico trabajo en éste y en otros problemas de la radiación negra, Wien recibió el Premio Nobel de Física en 1911.

Casi nadie había estudiado experimentalmente, ni teóricamente los efectos de calentar o enfriar imanes, hasta que a fines del siglo comenzó a hacerlo Pierre Curie (1859-1906) quien ya había descubierto el efecto piezoeléctrico en el cuarzo (1880) cuando comenzó sus investigaciones experimentales sobre el magnetismo. En 1895 descubrió el “efecto Curie” que consiste en que un imán, al llegar a cierta temperatura (que depende del metal) pierde de modo repentino y total su magnetización. A esa temperatura se le llama “punto de Curie” y hoy ya ha sido medido para todos los materiales ferromagnéticos.

En el mismo año de 1895, como ya lo señalamos, fueron descubiertos los rayos X en Alemania por Wilhelm Konrad Röntgen (1845-1923). Y en el año siguiente, en París, Henri Becquerel (1852-1908) motivado por el descubrimiento de Röntgen, descubrió la radioactividad en los minerales de uranio. Este fenómeno se convertiría, en el mundo de hoy, en una de las más grandes y promisorias fuentes de calor. En 1903 Becquerel recibió con los Curie el Premio Nobel de Física por sus respectivos trabajos, que fueron mutuamente complementarios. Así se abría una nueva era en la historia energética y tecnológica del mundo: la era de la energía nuclear.

Rudolf Diesel (1858-1913) era un distinguido ingeniero de familia alemana que nació en París, y que se interesaba especialmente en las máquinas térmicas. La más exitosa de éstas a fines del siglo XIX era el motor de Otto de cuatro tiempos; pero Diesel quiso superarlo con un motor que no requiriera sistemas de ignición externos, que alcanzara una eficiencia termomecánica más alta, que tuviera mayor relación de compresión y que usara un combustible más barato que la bencina (nombre que se daba entonces a la gasolina). Ensayó, rediseñó y probó desde 1893 hasta 1898. En 1897 obtuvo su primera patente para su nueva máquina; y en 1898 el motor Diesel comenzó a construirse en escala comercial. Hoy en día los motores diesel en el mundo mueven maquinaria pesada, trenes, centrales eléctricas, grandes tractocamiones y hasta los más grandes barcos del mundo. Es más grande y más costoso que el de Otto. Pero es más eficiente en energía; no necesita sistema externo de ignición; usa un derivado del petróleo más barato que la gasolina; es más confiable, y alcanza potencias (p.e. de 20.000 HP) que son imposibles de lograr con el de Otto. Hoy en el mundo funcionan algo así como 400 ó 500 millones de motores diesel.

Quizá el último gran invento tecnológico del calor en el siglo XIX fue la soldadura con arco eléctrico y electrodos y corriente directa que fue patentada en Rusia

en 1895 por un ingeniero oriundo de ese país que a lo largo de la historia ha sido tan parco en inventos. A nuestra patria llegó esta técnica solamente durante el cuarto decenio de nuestro siglo XX.

Estimulados por el éxito creciente de la joven industria eléctrica en Estados Unidos y en Europa, muchos inventores se dedicaron a buscar usos térmicos industriales para la electricidad. Dice Astigarraga (Ver bibliografía) que uno de esos innovadores fue el ingeniero francés Paul Louis Toussaint Héroult (1863-1914), quien en 1886 empezó sus trabajos para diseñar y construir un horno de arco eléctrico para fundir metales. En 1889 construyó y patentó su primer horno aplicable a la industria metalúrgica. Pero solamente en 1902 se hizo la primera fusión a escala industrial, en un horno cuya cuba admitía dos toneladas de acero, alimentado por un transformador monofásico de 300 kilovoltamperios. La colada duró 10 horas pero fue un éxito técnico y comercial. A partir de entonces el horno eléctrico para producir y fundir acero fue entrando lenta pero firmemente en la industria siderúrgica de los países más avanzados del mundo.

El interés que seguía existiendo entre los físicos académicos por lograr las temperaturas más bajas llevó al persistente James Dewar, en 1898, a alcanzar la temperatura, bajísima entonces, de 14° Kelvin, a la cual consiguió producir hidrógeno sólido en su laboratorio, en Inglaterra. Y en el año siguiente, en Alemania, a escala industrial, Karl Gustav von Linde (el mismo de quien ya hablamos) comenzó a producir aire líquido, oxígeno puro (líquido y gaseoso) y nitrógeno puro (líquido y gaseoso). La tecnología de von Linde sigue siendo aún hoy (1999) la más usada en el mundo para producir gases puros del aire, gaseosos y líquidos, lo cual es hoy una actividad industrial importante que se realiza en muchos países, incluyendo a Colombia.

La curva que describe cómo se distribuye la energía en el espectro de un cuerpo negro radiante, caliente, había sido descubierta y medida de forma experimental por Wien cuando hacía el trabajo que ya describimos arriba. Esa densidad de energía tiende a cero cuando la longitud de onda es muy corta, y también en el otro extremo del espectro, cuando dicha longitud tiende a infinito. Muchos físicos intentaron encontrar una explicación teórica de esa curva. En el año de 1900 el químico y físico John William Strutt (Lord Rayleigh, 1842-1919) y tres años después su colega James Jeans (1877-1946), en Inglaterra, propusieron una solución; y el ya nombrado Wilhelm Wien, en Alemania, propuso otra.

Pero ninguna de estas dos "leyes" satisfizo la curva experimental. Este era el estado de cosas cuando el joven Max Karl Ernest Ludwig Planck (1858-1947) se graduó en Física, en la Universidad de Berlín, con una brillante tesis doctoral denominada "De Secunda Lege Fundamentale Doctrinae Mechanicae Caloris", en 1885. Durante los años posteriores el joven físico se dedicó a la enseñanza universitaria y a pensar en la radiación negra. Por eso en 1900 encontró y publicó su solución al problema de la distribución de energía en el espectro de frecuencias de la radiación negra, solución que se basaba en la hipótesis revolucionaria de que en el nivel atómico la energía electromagnética solamente se emite, existe y se absorbe en "paquetes" o "cuanta" (o "cuantos", como decimos hoy en español) de magnitud $h \cdot f$ en donde "f" es la frecuencia (o "color") de la onda y "h" es una constante fundamental que hoy en día lleva el nombre de quantum de acción de Planck. La fórmula de Planck dice que la cantidad de energía irradiada por el cuerpo negro, en cada segundo, dentro de un intervalo df de frecuencias, vale

$$\frac{2 h f^3}{c^2 (e^{hf/kT} - 1)} df$$

donde $c = 2.99 \times 10^{10}$ cm/segundo es la velocidad de la luz, k es la constante de Boltzmann, y $h = 6.62 \times 10^{-27}$ ergio-segundo es la constante de Planck. Por eso y por más, su autor ganó el Premio Nobel de Física en 1918. De este resultado de Planck se obtienen de manera teórica (y se confirman) la ley de desplazamiento de Wien (por derivación) y la ley de T^4 llamada de Steffan-Boltzmann (por integración). El descubrimiento de Planck abrió la puerta al mundo maravilloso y vastísimo que hoy llamamos la teoría de los cuantos.

FERROCARRILES Y FUNDICIONES EN COLOMBIA SIGLO XIX

Después de que comenzaran a navegar los barcos de vapor en el río Magdalena, en 1823, y de que comenzara la herrería de Pacho en 1825, Colombia no volvió a aprender nada nuevo de la Revolución Industrial. Más bien al contrario: varias de las modestas y pocas fábricas que se establecieron en esos años se cerraron posteriormente por falta de mercado y por deficiencias técnicas. El ferrocarril de Panamá a Colón se construyó desde 1851 hasta 1855 pero ello no significó nada en la historia tecnológica de nuestro país. Era un mero y típico enclave colonial en un extremo lejano de la patria, como lo era el Istmo en ese momento.

El país conoció la primera locomotora de vapor en 1870 cuando unos empresarios ingleses con ingenieros alemanes construyeron para el "estado soberano" de Bolívar el pequeño ferrocarril que iba de Barranquilla (que era puerto del río, pero no del mar) al pequeño puerto marítimo muy cercano de Sabanilla. Luego, en 1875 empezó la construcción del ferrocarril de Puerto Berrío hacia Medellín, y en 1878 se inició el del río Zulia a Cúcuta. Pero después de 1878, por el interés de los gobiernos de Julián Trujillo, de Rafael Núñez y de los de sus sucesores, se iniciaron las ferrovías de Buenaventura hacia Cali, de Honda a La Dorada, del actual Puerto Wilches hacia Bucaramanga, de Girardot hacia Bogotá, y de Bogotá hacia Zipaquirá. Así el país conoció la ingeniería ferroviaria, el tránsito y el nivel de precisión, las locomotoras y sus máquinas, las carrileras, los oficios de mecánicos y de maquinistas, las líneas de telégrafos, los trenes, la reparación de equipos mecánicos, la luz de arco que llevaban los fanales de las locomotoras, la fundición del hierro y del acero, el cubilote para fundir metales, el coque siderúrgico, los fósforos de seguridad, la dinamita, los puentes de hierro y de acero, la fundición de piezas de cobre y de bronce, las herramientas mecánicas manuales, y los otros muchos elementos técnicos que venían incorporados a los procedimientos y a los equipos para construir y operar los ferrocarriles y sus trenes, que en ese momento eran lo que hoy llamaríamos una innovación tecnológica "de punta".

Pero en esos años hubo más novedades en la tecnología energética en nuestro territorio. Se inició la navegación en barcos a vapor en el río Cauca, entre Cali y Cartago, la del río Sinú, la del Lebrija, la del Atrato y la del Meta, y se extendió

la del Magdalena hasta Neiva. El número de vapores en el Magdalena aumentó para atender el rápido crecimiento del tráfico de café que se exportaba. En Panamá y Cartagena surgieron pequeñas plantas a motor de gasolina para generar y vender electricidad. Las mayores minas de oro en Antioquia trajeron muchos ingenieros norteamericanos, ingleses y alemanes, e introdujeron dragas de vapor, plantas térmicas electrogeneradoras, la dinamita como explosivo con la mecha de seguridad, el kerosene con los quinqués y los fogones que lo usaban, y otras novedades técnicas. En 1899 llegó a Medellín el primer automóvil que entrara a Colombia.

En Antioquia aparecieron en esos años, motivados por la relativa prosperidad del café y de la minería, varias fundiciones y talleres para reparar máquinas, así como fábricas de fósforos, chocolaterías, cigarrerías, molinos de granos, locerías, vidrierías, curtiembres y otros establecimientos manufactureros. Varios de ellos trajeron e instalaron las primeras máquinas de vapor con sus respectivas calderas, para mover sus máquinas. En Bogotá se instaló en 1890 la primera central eléctrica de generación a vapor. En Bucaramanga se montó la primera pequeña central generadora hidroeléctrica, en 1892, y en Medellín otra un poco mayor en 1898. En esta última ciudad abrió sus puertas la Escuela Nacional de Minas en 1888 para preparar ingenieros de minas e ingenieros civiles, y allí comenzó a enseñarse algo de lo que ya Europa sabía sobre la tecnología y la ciencia del momento. Todavía no se enseñaba nada con el nombre específico de Termodinámica, pero sí se enseñaban los principios prácticos y la operación de las máquinas de vapor, de la combustión y de los combustibles; y se enseñaba a usar algunos instrumentos relacionados con esos temas, tales como termómetros, pirómetros ópticos, calorímetros, barómetros y manómetros. Y en el curso de Física General de los primeros grados del programa de estudios de ingeniería se enseñaban los elementos de la física del calor. Lo mismo estaba ocurriendo en la facultad de ingeniería civil de la Universidad Nacional en Bogotá.

En estas diversas maneras, informales en su mayor número y algunas pocas formales, comenzaba a saberse en nuestro país acerca de los rudimentos de la ciencia y de la tecnología de la energía y del calor. Muchos de sus propagadores fueron los "mecánicos" empíricos de los vapores, de los ferrocarriles, de las minas y de las pocas e incipientes fábricas. Algunos otros comenzaban a prepararse en unas pocas escuelas de "artes y oficios", y en las que habían abierto en esos años los sacerdotes salesianos en Bogotá y en otras dos o tres ciudades menores.

LOS MOTORES DE EXPLOSIÓN Y SU INGRESO A COLOMBIA

Los motores de combustión interna fueron, aún cuando menos directamente que el motor de vapor, el fruto de la aplicación de conocimientos científicos que la termodinámica había adquirido recientemente.

Ya en una época tan temprana como el siglo XVII los científicos que estudiaban el mundo físico pensaron en usar la energía almacenada en ciertas sustancias para producir energía mecánica y movimiento. Así por ejemplo, hay documentos que indican que hacia 1685, el físico holandés Jan Christian Huyghens (1629-1695) y su ayudante francés Denis Papín trataron de construir una máquina de combustión interna usando pólvora como combustible. Pero no tuvieron éxito. Las dificultades técnicas existentes en esa época para realizar una idea similar eran prácticamente insuperables. Esto explica sin duda el hecho de que transcurriera un siglo sin que se volviera a intentar realizar la idea. Pero los "filósofos naturales" del siglo XVIII tenían una curiosidad y una creatividad tan grande como para volver a intentar otra vez el proyecto de un motor de combustión, aunque el único combustible disponible y barato en su tiempo era el carbón. De todas maneras, en 1794 en Inglaterra el mecánico Robert Street intentó construir un motor de explosión que funcionaba con hulla, pero nuevamente su proyecto terminó sin éxito. Cinco años después, en Francia, el ingeniero Philippe Lebon volvió a tratar de hacer un motor de combustión interna, con un fracaso análogo a sus predecesores, tal como ya lo dijimos.

Pero en 1807 alguien consiguió construir un motor de combustión. Y algo más, también: construyó un vehículo, le acopló su motor y lo hizo mover. En efecto, en ese año el inventor español Isaac de Rivaz (1752-1829) obtuvo la primera patente de que se tenga noticia en esta historia para un vehículo automóvil (literalmente: "movido por sí mismo") y que era propulsado por un motor de explosión que usaba gas combustible de carbón. Pero el motor y el carro de Rivaz adolecían probablemente de muchos problemas: el arranque, el almacenamiento y suministro de combustible, la combustión, las vibraciones, etc. El hecho es que su motor y su automóvil cayeron en el olvido.

Pero en esos años iniciales del siglo XIX, pasada la época convulsionada de la Revolución Francesa y de las guerras napoleónicas, la Revolución Industrial cobraba nuevo impulso en Europa, despertando la inventiva de los técnicos y de los hombres amantes de la ciencia. Las ideas sobre un motor de combustión volvieron a tomar vida. En ese ámbito, en 1817, en Inglaterra, un sacerdote y científico aficionado, Joseph Stirling, diseñó y construyó con buen resultado un tipo de motor de combustión externa, en donde el calor es aplicado a los gases actuantes desde el exterior de su cámara de movimiento, motor al que hoy se conoce con el nombre de su inventor. Pero el tiempo propicio para los motores de combustión no había llegado aún. Por eso, cuando en 1833 el ingeniero sueco-británico John Ericsson (1803-1889) inventó otro motor de combustión externa, este permaneció siendo recordado como una curiosidad de laboratorio sin aplicaciones prácticas. Lo mismo les ocurrió en 1854 en Italia al Pbro. Eugenio Barsanti y a Felipe Matteuci, quienes inventaron a escala de laboratorio y presentaron el primer motor de combustión interna que llegara a operar en forma permanente y práctica y que se recuerde en la historia.

No se sabe si el ingeniero francés Jean-Joseph-Etienne Lenoir (1822-1900) estaba enterado de los trabajos de los precursores que mencionamos. El hecho es que en 1859 Lenoir construyó en Francia el primer motor de combustión interna que se recuerde por su operación práctica y con posibilidades de aplicación útil. Era un motor movido por gas de alumbrado (gas de carbón) mezclado con aire, de tipo experimental, y que fue el predecesor directo de todos los motores de explosión que vendrían después. Sus posibilidades de uso práctico quedaron demostradas cuando al año siguiente (1860) Lenoir pudo construir el primer "coche sin caballos" que usara un motor de combustión y no un motor de vapor (como el que construyera en 1767 Joseph Nicolas Cugnot, también en Francia).

Como en aquel momento los físicos ya tenían clara la idea de la conservación de la energía y de las propiedades termodinámicas de los gases, el ingeniero Wilhelm Schmidt en Alemania pudo establecer en 1861 las condiciones teóricas y los procesos básicos para el funcionamiento de los motores de combustión interna. Y paralelamente, entre 1856 y 1862 el ingeniero francés Alphonse Beau de Rochas (1815-1891), siguiendo la gran tradición analítica de los ingenieros de l'Ecole Polytechnique, hace varias investigaciones que publica en un pequeño libro en el que, basándose en los principios de la Termodinámica,

estableció un ciclo teórico constituido por ciertos procesos termodinámicos que un gas puede experimentar dentro de un cilindro rígido, y que sería capaz de sustentar el funcionamiento de una máquina de combustión interna, de cuatro tiempos, funcionando con gas combustible, y que fuera eficiente.

La ocasión ya estaba madura para volver a intentar la construcción de coches autopropulsados con motor de combustión interna. En Europa y en Estados Unidos se había generalizado ya el uso de los derivados del petróleo como combustibles para calderas y para lámparas de iluminación. Ya podía pensarse en motores de combustión que usaran kerosene, gasolina u otro derivado del petróleo. En esas condiciones propicias un mecánico alemán, Siegfried Markus (1831-1899), construyó en 1864 su primer coche con motor de gasolina, coche que probó su operación satisfactoriamente. Pero Markus decidió seguir perfeccionando su coche y su motor en los años posteriores, hasta 1875, cuando hubo de abandonar esta tarea por falta de recursos financieros.

El año de 1877 puede considerarse como el del nacimiento definitivo del motor de combustión de cuatro tiempos, con gasolina. Porque, como ya dijimos, en ese año el ingeniero alemán Niklaus August Otto (1832-1891), ayudado por su auxiliar mecánico Eugen Langen (1833-1895), inventó un motor de combustión combinando el ciclo del motor de gas ideado por Beau de Rochas con el antiguo ciclo de Newcomen para la máquina de vapor, con pistón libre, en cuatro tiempos, quemando gas combustible y relativamente silenciosa.

El interés por hacer y mejorar motores de combustión había prendido en Francia, Alemania e Inglaterra. En esa tónica George Brayton (1830-1892) inventó en Estados Unidos, en 1873, el motor que lleva su nombre, movido a kerosene. Y en 1876 el ingeniero escocés Dugald Clark (1854-1932) construyó el primer motor de gas, de dos tiempos, que lleva su nombre. Este inventor dedicó desde entonces doce años de su vida a investigar sobre motores de gas, tanto de dos como de cuatro tiempos.

Poco después, entre 1883 y 1885, el ingeniero alemán Gotlieb Wilhelm Daimler (1834-1900) trabajó para perfeccionar en su taller el motor que Otto había inventado unos años antes, con un solo cilindro, vertical, operando con gasolina y obteniendo así velocidades más altas. Daimler usó su prototipo para mover un bote de hélice en el río. Casi al mismo tiempo, en 1885, en Inglaterra, el inventor Priestman ensayó el funcionamiento del motor de Otto con aceites pesados. Y al

mismo tiempo, de 1883 a 1886, Karl Benz (1844-1929) en Alemania estuvo dedicado a perfeccionar un motor con el ciclo termodinámico de Otto, trabajando con petróleo y a alta velocidad. En 1885, Benz construyó el primer coche exitoso con motor a gasolina, de cuatro tiempos, con dos ruedas atrás y una adelante, con un solo cilindro de combustión, dispuesto horizontalmente. El coche de Benz alcanzaba una velocidad de cinco millas por hora. Después de éste, Benz siguió fabricando otros coches a los cuales iba introduciendo nuevas mejoras mecánicas y térmicas. En 1893, cuando tuvo resuelto el problema mecánico de la dirección, comenzó a construir vehículos de cuatro ruedas. Cabe notar que Benz y otros constructores de automóviles, que aparecieron por aquellos mismos años, aprovecharon muchas ideas mecánicas de la bicicleta que ya se conocía y que alcanzó su forma definitiva en 1886.

Uno de esos nuevos fabricantes de automóviles fue Daniel Peugeot, en Francia, quien hacia 1890 emprendió en su país la producción industrial de coches, utilizando motores de diseño de Daimler, con dos cilindros gemelos. Y en 1892, Ferdinand Forest (1851-1914), en Francia, logró mejorar la eficiencia y la velocidad de los primeros automóviles que él empezaba a construir en ese país, dotados de los nuevos motores de explosión a cuatro tiempos. Los primeros automóviles fabricados en Estados Unidos fueron hechos a partir de 1893 por los hermanos Duryea. Estaban equipados con motores de dos cilindros gemelos, y operaban con gasolina según el ciclo de Otto de cuatro tiempos. Y en muy pocos años aparecieron en ese país otros fabricantes de coches automóviles, como fueron Edward Butler, Charles B. King, Rene Panhard, Emil Levasor, Henry Ford, Elswood Haynes, Ransom Olds y otros. En 1896, Henry Ford (1863-1947), que había hecho numerosos perfeccionamientos en los sistemas mecánicos de los automóviles, instaló en Detroit su primera fábrica, organizada según el concepto de línea de montaje en serie, para construir los vehículos diseñados por él. Este sistema de la producción industrial en serie había sido inventado por Cyrus McCormick (1809-1884) para construir la cosechadora mecánica que también él mismo había inventado antes, y que Eli Whitney (1765-1825) había complementado con el uso de partes intercambiables para producir en serie. Luego el ingeniero Frederick Winslow Taylor (1856-1915) lo había estudiado a fondo y había creado toda una doctrina sobre la "administración científica" basada en el planeamiento cuidadoso de los procesos y las operaciones de manufactura para ahorrar etapas y movimientos. La fábrica de Ford creció aceleradamente; y en 1908 sacó lo que él consideró el modelo más satisfactorio que hubiera producido y que llamó el "modelo T".

Mientras tanto, en Inglaterra, el ingeniero Friedrich W. Lanchester (1868-1946) adicionaba un gran número de perfeccionamientos a los automóviles. En efecto, sus modelos fueron los que incluyeron por primera vez el engranaje epicíclico, el acelerador manual y de pedal, la ignición magnetoeléctrica, el freno de mano, el engranaje de transmisión de tornillo, el control preselector y la lubricación forzada.

A Colombia vinieron los primeros automotores particulares en 1899 y los primeros comerciales en 1903. Durante la administración del general Rafael Reyes, este gran gobernante se dio cuenta de la enorme fuerza de transformación y de progreso que representaba esta formidable innovación del transporte. Reyes ordenó de inmediato a su recién creado Ministerio de Obras Públicas, dirigido por el ingeniero Modesto Garcés, que se comenzaran a construir carreteras para los nuevos vehículos. Las dos primeras que se abrieron fueron la de Bogotá a Facatativá y la de Bogotá a Tunja, a las cuales siguieron agregándose muchas otras en todo el territorio del país. En realidad la construcción de carreteras se convirtió desde entonces en uno de los más importantes entre los muchos frentes de trabajo de los ingenieros civiles de Colombia, como ocurrió en todos los países del mundo. Hoy (1999) hay en Colombia más de 4.5 millones de vehículos automotores en operación que ruedan en todas las ciudades y pueblos del país y en los 120 mil kilómetros de carreteras que hay construidas por toda Colombia.

Estrechamente asociado al desarrollo del motor de Otto de cuatro tiempos estuvo el del motor diesel, que fue inventado por el ingeniero alemán, nacido en París, Rudolph Diesel (1858-1913) quien desarrolló su invento entre los años de 1893 a 1898. A Colombia llegaron los primeros motores diesel en algún momento entre 1910 y 1920, probablemente como parte de grupos electrogeneradores destinados a minas, fábricas o puertos del país. Desde entonces los motores diesel han operado en nuestro país en muchos tipos de servicio, especialmente como motores para embarcaciones, en grupos generadores, y como motores para grandes vehículos y para maquinaria pesada móvil.

FUENTES TERMOENERGÉTICAS USUALES (Ayer y Hoy)

- Leñas (Biomasa)
- Estiércol seco de vaca
- Asfalto natural
- Petróleo fluido
- Petróleos pesados
- Esquistos petrolíferos
- Arenas petrolíferas
- Emulsiones de petróleo pesado (orimulsiones)
- Breas y asfaltos de refinería
- Bunker-oil
- Fuel-oil (combustóleo)
- Diesel-oil, ACPM o gas-oil
- Kerosene
- Gasolinas
- Gas de coquería (o de retorta)
- Gas de refinería
- Turba
- Lignito
- Hullas
- Antracitas
- Mezclas densas de carbón (coal-slurries) binarias y ternarias
- Alquitrán de carbón
- Gas de alto horno
- Coque
- Aceites vegetales (oliva, soya, girasol)
- Aceites y grasas animales (anchoas, anchoveta, ballena, foca, búfalo, cerdo)
- Fisión nuclear (reactores atómicos)
- Hidrógeno (combustible)
- Pólvoras
- Gas natural (hidrocarburo)
- Gas de carbón, bajo poder calorífico (steam gas)
- Gas de síntesis (de carbón), medio poder calorífico
- Gas de síntesis (de carbón) alto poder calorífico
- Etanol (anhidro o hidratado para motores)
- Metanol
- Insolación (heliotermia)
- Vapor geotermal
- Madera en chips
- Biogas de digestor
- Bagazo de caña
- Basuras orgánicas biodegradables

- Electro-resistencia (efecto Joule)
- Caldeo por inducción (alta frecuencia)
- Caldeo dieléctrico (alta frecuencia)
- Arco eléctrico (en hornos)
- Radiación infrarroja (fototermia)
- Fusión nuclear
- Dinamitas
- Nitrato de amonio técnico
- Reacciones químicas exotérmicas.

CALORES DE COMBUSTIÓN DE ALGUNOS COMBUSTIBLES ACTUALES

1 tonelada métrica de	Barriles ⁽¹⁾ de petróleo equivalente ⁽²⁾	EQUIVALENTE A		Giga - Joules ⁽⁴⁾
		Toneladas ⁽³⁾ de petróleo equivalente ⁽²⁾	Toneladas ⁽³⁾ de carbón equivalente	
Carbón ⁽³⁾	5.05	0.70	1.00	29.3
Lignito	2.01	0.28	0.40	11.7
Turba	2.53	0.35	0.50	14.7
Coque	4.91	0.68	0.97	28.5
Carbón vegetal (briquetas)	4.98	0.69	0.99	28.9
Leña (secada al aire)				
Pino	2.34	0.32	0.46	13.6
Maderas duras deciduas	1.60	0.22	0.32	9.3
Bagazo (30% humedal)	2.17	0.30	0.43	12.6
Desechos agrícolas	2.00	0.28	0.40	11.6
Estiércol de ganado, seco	1.53	0.21	0.30	8.9
Conchas de nueces	3.40	0.47	0.67	19.7
Paja seca	3.02	0.42	0.60	17.5
Gas natural licuado (GNL)	9.10	1.26	1.80	52.8
Gas licuado de petróleo	7.79	1.08	1.54	45.2
Gasolina motor	7.59	1.05	1.50	44.0
Kerosene o jet - fuel	7.43	1.03	1.47	43.1
Gas oil, ACPM y auto - diesel	7.36	1.02	1.46	42.7
Diesel - oil industrial	7.29	1.01	1.44	42.3
Petróleo residual (fuel - oil)	7.07	0.98	1.40	41.0
Asfaltos	7.22	1.00	1.43	41.9
Aceites lubricantes	7.14	0.99	1.41	41.4
Destil. Para petroquímica (Petrochemical feedstocks)	7.59	1.05	1.50	44.0
Coque de residuo pesado (Petroleum coke)	6.00	0.83	1.19	34.8
Alcohol etílico	4.76	0.66	0.94	27.6
Alcohol metílico	4.10	0.50	0.71	20.9

	Barriles ⁽¹⁾ de petróleo equivalente ⁽²⁾	Toneladas ⁽³⁾ de petróleo equivalente ⁽²⁾	Toneladas ⁽³⁾ de carbón equivalente	Giga -Joules ⁽⁴⁾
1 barril de				
Gas natural licuado (GNL)	0.60	0.08	0.12	3.5
Gas licuado de petróleo	0.67	0.09	0.13	3.9
Gasolina motor	0.90	0.12	0.18	5.2
Kerosene o jet - fuel	0.97	0.13	0.19	5.6
Gas oil, ACPM o diesel oil	1.00	0.14	0.20	5.7
Diesel industrial	1.02	0.14	0.20	5.9
Petróleo residual (fuel - oil)	1.05	0.15	0.21	6.1
1 tonelada métrica de				
Asfaltos	1.21	0.17	0.24	7.0
Destil. Para petroquímica (Petrochemical feedstocks)	0.90	0.12	0.18	5.2
Coque de residuo pesado (Petroleum coke)	1.29	0.18	0.26	7.5
Alcohol etílico	0.60	0.08	0.12	3.5
Alcohol metílico	0.47	0.06	0.09	2.7
1.000 m ³ normales de				
Gas natural	6.00	0.83	1.19	34.8
Gas de alumbrado (Town gas)	2.88	0.40	0.57	16.7
Producer gas (Gas sintético de carbón)	1.02	0.14	0.20	5.9

NOTAS:

- (1) Un barril (de petróleo) = 42 galones = 42 x 3.7851 litros
- (2) Se trata de petróleo crudo normalizado a 10.000 calorías/ gramo
- (3) Son toneladas métricas de 1.000 kg cada una
- (4) Un giga - joule = 10⁹ joule = 10⁹/ 4.18 calorías
- (5) Los datos que se dan son calores específicos netos (menores que los valores brutos en el vapor latante de evaporación del agua que se forma en la combustión). Es lo usual en Europa. En EE.UU. se usan preferentemente los calores de combustión brutos. Algunas relaciones típicas entre uno y otro dato son:

Combustible	Cuociente neto/bruto
Gas natural	0.90
Fuel - oil	0.94
Carbón equivalente	0.96

EL SIGLO XX ANTES DE LA II GUERRA MUNDIAL

El alba del siglo XX fue muy rica en nuevos desarrollos teóricos de la Física relacionada con el calor y la energía, y en avances técnicos dentro de los muchos campos de sus aplicaciones. En este último sentido los frentes tecnológicos que hacían más espectaculares avances cualitativos y que lograban crecimientos más acelerados eran tres, estrechamente relacionados con los combustibles y la combustión: la energía eléctrica, los vehículos automotores y la industria petrolera. En el primero se veían surgir nuevas centrales eléctricas en todo el mundo, más que todo de las plantas que son alimentadas por carbón y, en menor escala, en las que son alimentadas por derivados del petróleo como el asfalto pesado, el "mazout" (nuestro fuel-oil o bunker-oil), el kerosene y el aceite combustible para motores (nuestro diesel oil). Por todo el mundo se encendían día tras día nuevas ciudades y poblaciones iluminadas por energía eléctrica. Además sus aplicaciones industriales se multiplicaban en variedad y en multitud: motores eléctricos, transformadores más grandes, fogones eléctricos, nuevas lámparas, hornos de arco, calderas eléctricas, plantas de refrigeración, y muchas más. Una de las muchas innovaciones electrotécnicas de esos años fue el invento de la lámpara de iluminación de vapor de mercurio, patentada en 1901 por Peter C. Hewitt en Estados Unidos, la que era, y es, mucho más potente en su iluminación que la lámpara de incandescencia, y también mucho más costosa en valor comercial. Y otra gran novedad en 1902: Willis H. Carrier (1876-1950) en ese mismo país inventa y patenta el primer sistema (aún imperfecto) de acondicionamiento de aire, accionado por motores eléctricos, y que es hoy una comodidad que se usa en el mundo entero.

En Francia, Italia, Inglaterra, Alemania y Estados Unidos acababan de nacer y seguían naciendo fábricas de automóviles y paso a paso surgían innovaciones técnicas en los vehículos que se fabricaban: nuevos elementos mecánicos, motores más grandes y mejores, mayores velocidades, el encendido por chispa de alto voltaje, los acumuladores (o baterías) de plomo y ácido, los frenos de asbesto, nuevos materiales, aceros y hierros mejores, más comodidades y muchas otras innovaciones popularizaban los nuevos vehículos movidos por los motores de Otto de cuatro y de dos tiempos. El primer automóvil que vino a Colombia fue traído a Medellín en 1899 por el comerciante e industrial acaudalado, señor

Carlos Coriolano Amador. La guerra civil de los Mil Días (1899-1902) interrumpió esas importaciones; pero en 1903 y 1904 se reanudaron y los automóviles y camiones comenzaron a rodar por algunas calles y carreteras de nuestro país. Entre la multitud de invenciones específicas que estaba incorporando la industria automotriz por ese entonces, citamos aquí solamente la bujía de encendido (inventada por Robert Bosch) y la bobina de ignición con distribuidor sincronizado (por George Honod), inventos ambos que fueron patentados en 1902, en Estados Unidos.

En esos primeros años del siglo la industria petrolera mundial ya era dominada por unos pocos y grandes monopolios que lo hacían todo: exploraban para buscar nuevas fuentes, lo extraían, lo refinaban, transportaban el crudo y sus refinados por tubos y por vehículos, y vendían los derivados. Actuaban en todas las regiones del mundo que les interesaba: en Estados Unidos, Rusia, el Medio Oriente, Rumania y en otros países productores y, por supuesto, en todo el mundo desarrollado que día tras día gastaba más y más gasolina, más kerosene, más mazout y más diesel-oil. Una gran realización tecnológica de aquellos años fue la perforación del primer pozo petrolero en el mar (costa afuera) que se hizo en 1901 en el Golfo de Méjico, en la costa del Estado de Texas.

Albert Einstein (1879-1955) sorprendió al mundo entero en 1905 con tres artículos científicos revolucionarios. Uno de ellos creó la relatividad especial. Otro trató sobre los cuantos de energía electromagnética (que hoy llamamos fotones) como partículas dotadas de momento mecánico. Y el tercero desarrolló la interpretación estadística del movimiento browniano. Pocos días después presentó su fórmula maravillosa

$$E = m \cdot c^2$$

que pone en equivalencia una masa m con una energía E y recíprocamente, y que se convertiría unos años después en la clave para desencadenar el poder gigantesco de la energía nuclear. Entre muchas otras implicaciones prácticas y teóricas, la fórmula de Einstein unificó la ley de la conservación de la masa material con la de conservación de la energía y las fundió en una sola ley de conservación de la masa-energía. El calor sí "pesa" (contra lo que pensaron Rumford, Joule y Clausius). Y la materia sí puede transformarse en calor. Un gramo de materia tiene un equivalente en energía (térmica o mecánica) que es

$$\begin{aligned} E &= m \times c^2 = 1 \text{ gramo} \times (3 \times 10^{10} \text{ centímetros/segundo})^2 \\ &= 9 \times 10^{20} \text{ ergios} \\ &= 9 \times 10^{13} \text{ Joules} = (9 \times 10^{13} / 4.18) \text{ calorías} \\ &= 2.15311 \times 10^{13} \text{ calorías} \\ &\quad \text{y una caloría "pesa"} \\ &(1/2.15311) \times 10^{-13} \text{ gramos} = 4.64444 \text{ billonésimas de gramo.} \end{aligned}$$

En otro de estos tres trabajos Einstein mostró que la energía electromagnética radiante (como lo son la luz y el calor radiante) tiene el carácter dual de ondas y de corpúsculos, a los que hoy llamamos "fotones" y que transportan consigo tanto energía como momento mecánico. La energía de un fotón es igual a $h \cdot f$, donde $h = 6.6261 \times 10^{-34}$ Joule-segundo, y f es la frecuencia de la onda asociada; y el momento mecánico es $p = hf/c$, siendo $c =$ velocidad de la luz.

El movimiento browniano había sido descubierto en 1827 por el botánico inglés Robert Brown (1773-1858) al observar a través de un microscopio que pequeñísimas partículas de polen suspendidas en agua están constantemente moviéndose erráticamente, en todas direcciones, al azar, por efecto de la agitación térmica de las moléculas. Einstein lo interpretó correctamente como evidencia de los impactos de las moléculas de agua que en su permanente vibración térmica golpean cada partícula; y construyó sobre esa base la teoría estadística de este movimiento aleatorio. A partir de los resultados teóricos de Einstein y usando un original método experimental, el físico francés Jean-Baptiste Perrin (1870-1942) pudo medir en 1908 la constante universal de los gases, R , observando una dispersión de partículas de humo en aire, y pudo calcular por primera vez el tamaño de una molécula de agua.

Recordemos además que, dos años después, en 1907, Einstein partió de la noción cuántica de Planck y dedujo la fórmula que lleva su nombre para el calor específico de los elementos químicos que son sólidos, por grado Kelvin y por mole-gramo, a volumen constante:

$$C_v = 3R \frac{e^{hv/kT}}{(e^{hv/kT} - 1)^2} \left[\frac{hv}{kT} \right]^2$$

en donde: R es la constante universal de los gases; h es la constante de Planck; v es una frecuencia determinada de vibración de los átomos en el

crystal, que vale $\nu = (N^{1/3}/\pi)\sqrt{3R/2} \sqrt{T_f/A.V_A}^{2/3}$ y se llama "frecuencia característica de Einstein"; N es el número de átomos en un átomo-gramo, o número de Avogadro; T_f es la temperatura de fusión del sólido; A es el peso atómico del elemento sólido; V_A es el volumen de un átomo-gramo; $k = R/N$ es la constante de Boltzmann; y T es la temperatura absoluta del sólido. Einstein trataba de explicar las desviaciones que desde mediados del siglo XIX los físicos y los químicos habían observado respecto a la ley de Dulong y Petit en el calor específico de los metales a bajas temperaturas. La fórmula de Einstein tiende, al bajar la temperatura T hacia los 0°K, a ser muy aproximadamente coincidente con la fórmula sencilla

$$C_v = \text{constante} \times T^2$$

Además la fórmula exacta y la aproximada tienden hacia $C_v = 0$ en el cero absoluto. Esto último significa que según la fórmula de Einstein no es posible alcanzar, con rigor, el cero absoluto. Y esto último es la tercera ley de la termodinámica que Nernst acababa de revelar, en el año anterior, en 1906.

Pero los físicos experimentales encontraron en los años siguientes, algunos desacuerdos entre la fórmula de Einstein y sus propias mediciones de los calores específicos de sólidos a bajas temperaturas. En 1912 el físico holandés Pieter-Joseph-Willem Debye (1884-1966) propuso una nueva teoría sobre el fenómeno (teoría audaz pero útil) y encontró otra fórmula alternativa que ha satisfecho más a los experimentadores. Según Debye, el calor específico molar, a volumen constante, de un sólido cristalino a baja temperatura vale (Ver Ritchmeyer y Kennard, en la bibliografía):

$$C_v = 9R \left[4 \left(\frac{T}{\theta_D} \right)^3 \int_0^{\theta_D/T} \frac{x^3}{e^x - 1} dx - \frac{\theta_D}{T} \frac{1}{e^{\theta_D/T} - 1} \right]$$

siendo R la constante universal de los gases, y siendo θ_D una temperatura específica del material sólido que se llama temperatura característica de Debye, y que vale $\theta_D = h\lambda_D/k$; siendo h = constante de Planck; θ_D es la frecuencia característica de Einstein; y k es la constante de Boltzmann. Es fácil comprobar en esta fórmula que cuando la temperatura T tiende a cero, entonces C_v vale $C_v = \text{constante} \times T^3$, y por lo tanto $\lim C_v = 0$, como lo requiere la tercera ley.

Por eso a la fórmula de Debye se le llama también la fórmula de T^3 para los calores específicos. Por otro lado cuando T aumenta hacia las temperaturas ambientes, C_v tiende a adoptar la forma

$$C_v = 3R = 6.2 \text{ calorías}/(^{\circ}\text{K-mol})$$

es decir que tiende a hacerse constante, como lo pide la ley de Dulong y Petit.

El año de 1906 registró otros tres nuevos avances conceptuales muy importantes tanto para la formación de la teoría del calor como para sus aplicaciones útiles. Sin duda la más importante fue el descubrimiento intelectual del gran físico alemán Walther Hermann Nernst (1864-1941) de que la entropía de toda sustancia químicamente pura en el cero absoluto de temperatura, donde sólo puede estar en estado líquido o sólido, es cero; de que por esta misma razón, el calor específico de toda sustancia tiende a cero cuando la temperatura absoluta tiende a 0 grados Kelvin; y que por lo tanto el cero absoluto de temperatura no se puede alcanzar por ningún medio. Esta observación trascendental ya había sido visualizada por Planck, pero éste nunca lo demostró tan contundentemente como Nernst. Por eso a este resultado se le llamó inicialmente el teorema de Nernst o principio de Planck; pero hoy se le conoce mejor como la tercera ley o el tercer principio de la Termodinámica. Fue una revelación impresionante y desconcertante, máxime cuando ya en ese momento Dewar había alcanzado temperaturas muy bajas, y Kammerling-Onnes y sus discípulos trataban de descender aún más. Precisamente en 1909 el físico holandés William Hendrick Keesom (1876-1956) descendió hasta 0.5°K y logró solidificar uno de los dos tipos en que se presenta el helio líquido, siendo que Heike Kammerling-Onnes (1853-1926) no lo había logrado aún (como veremos más abajo).

También fue en 1906 cuando en París el físico Jacques-Arsène D'Arsonval (1851-1940) y el químico Francois Bordas, trabajando juntos en el tema de las bajas temperaturas y usando el diagrama de fases del agua, desarrollaron a escala de laboratorio el procedimiento de deshidratar alimentos y otros materiales sólidos por ultra-congelación, procedimiento al que hoy llamamos liofilización, y que tiene tantas aplicaciones en las industrias de alimentos en todo el mundo.

En ese mismo año de 1906, en Estados Unidos, el geólogo Clarence Edward Dutton (1841-1912) descubrió la causa del calor que se siente en las minas profundas y que brota de la corteza terrestre hacia el exterior. Él explicó

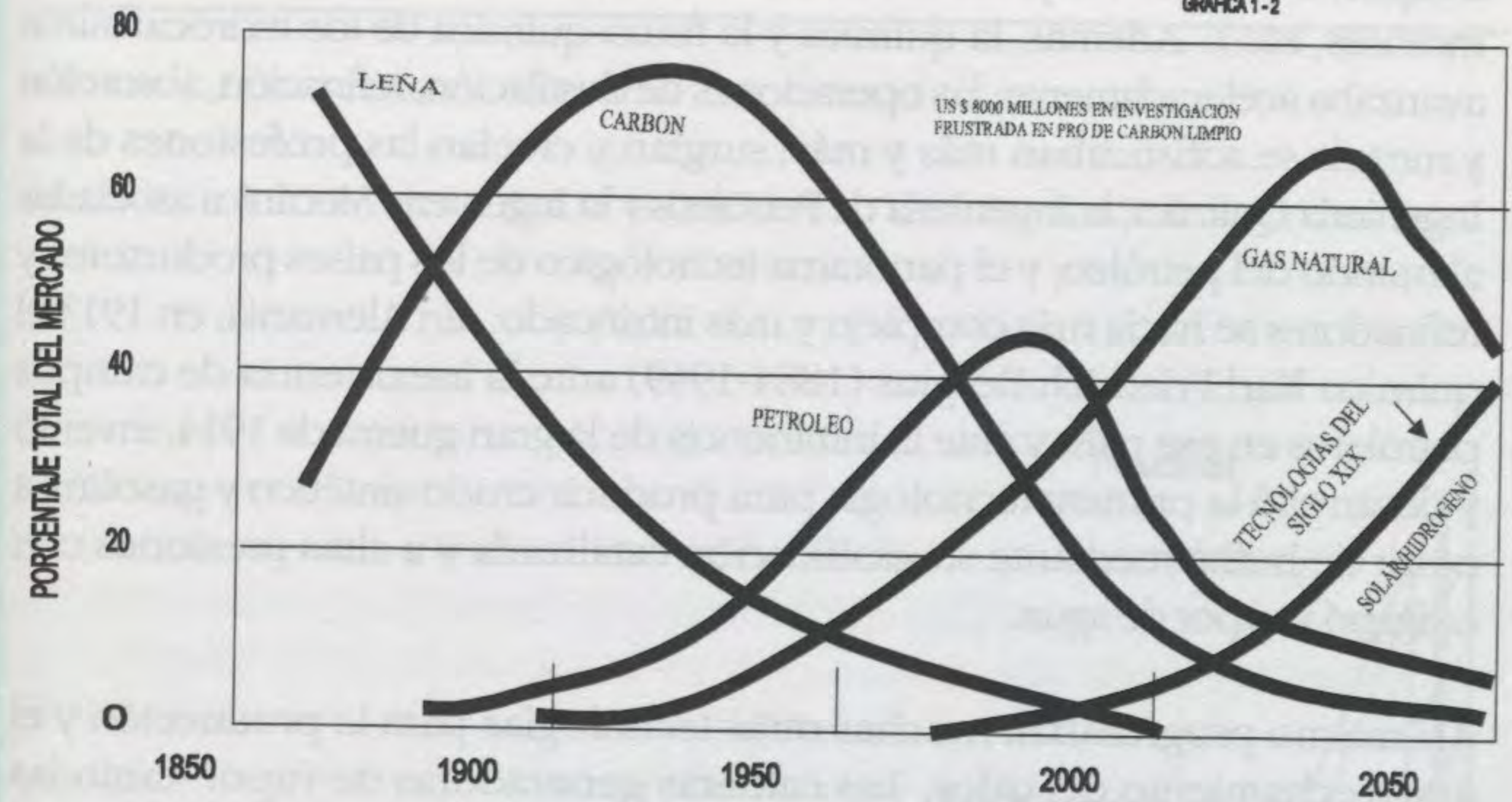
certeramente que este calor es el resultado de la descomposición radiactiva del uranio, el torio y el radio que están contenidos en muchos minerales naturales de las rocas. Esto explica también el calor de la litosfera terrestre que mantiene líquida la lava de los volcanes, y el agua caliente que brota de geysers y de fuentes termales. Hoy en día esa fuente primaria de energía es aprovechada con el nombre de energía geotérmica en países que manifiestan un vulcanismo activo como son Italia y Nueva Zelandia.

Fue en ese primer decenio del siglo y también en Estados Unidos, cuando comenzó a usarse en escala importante y creciente el gas natural, al mismo tiempo que en el mundo de los países industrializados se iba deteniendo el crecimiento del consumo de carbón para ser reemplazado por el petróleo y sus derivados. Precisamente el gráfico de la página siguiente muestra el comportamiento histórico de estas fuentes de energía y de otras, así como sus tendencias para comienzos del siglo XXI.

El descubrimiento de la tercera ley de la Termodinámica no fue óbice para que varios físicos -especialmente holandeses, alemanes e ingleses- siguieran buscando cómo llegar cerca al cero absoluto. El más exitoso, y hoy muy famoso, fue el holandés Heike Kammerling-Onnes. Este brillante discípulo de van der Waals -y sucesor de éste en la Universidad de Leyden- logró en 1908, mediante procedimientos muy ingeniosos, por primera vez, licuar el helio a 4°K . Avanzando en su trabajo con este elemento bajó hasta 0.8°K pero no logró solidificarlo. En sus extensos trabajos sobre la termodinámica de las bajas temperaturas, Kammerling-Onnes inventó la palabra "entalpía" para referirse a la función termodinámica $H = U + PV$, donde U es la energía interna de un sistema, P es la presión y V es el volumen. Él inventó también la palabra "criogenia" para referirse a la ciencia y la tecnología de las muy bajas temperaturas, las mismas que él tanto contribuyó a fundar y a desarrollar. En 1911 descubrió que a temperaturas de dos ó tres 0°K , el mercurio, el estaño y otros metales pierden completamente su resistencia eléctrica, o sea que su conductividad se vuelve infinita y que por esa razón permiten el flujo indefinido de una corriente eléctrica, sin una fuente de fuerza electromotriz que la sostenga. Kammerling-Onnes llamó "superconductividad" a este fenómeno, el cual hoy en día está encontrando posibilidades muy promisorios en la electrotecnia de altas potencias. En 1913 le fue otorgado el Premio Nobel de Física por sus enormes aportes a la ciencia y a la tecnología de las bajas temperaturas.

MUNDO: SUSTITUCION DE ENERGIA PRIMARIA

GRAFICA 1-2



Fuente: C Marchetti y Nekicovnik © 1992 - The GHK Company - The Hefner Report, Dec. 1994

* LAS LINEAS FINAS ONDULADAS REPRESENTAN CONSUMOS HISTORICOS

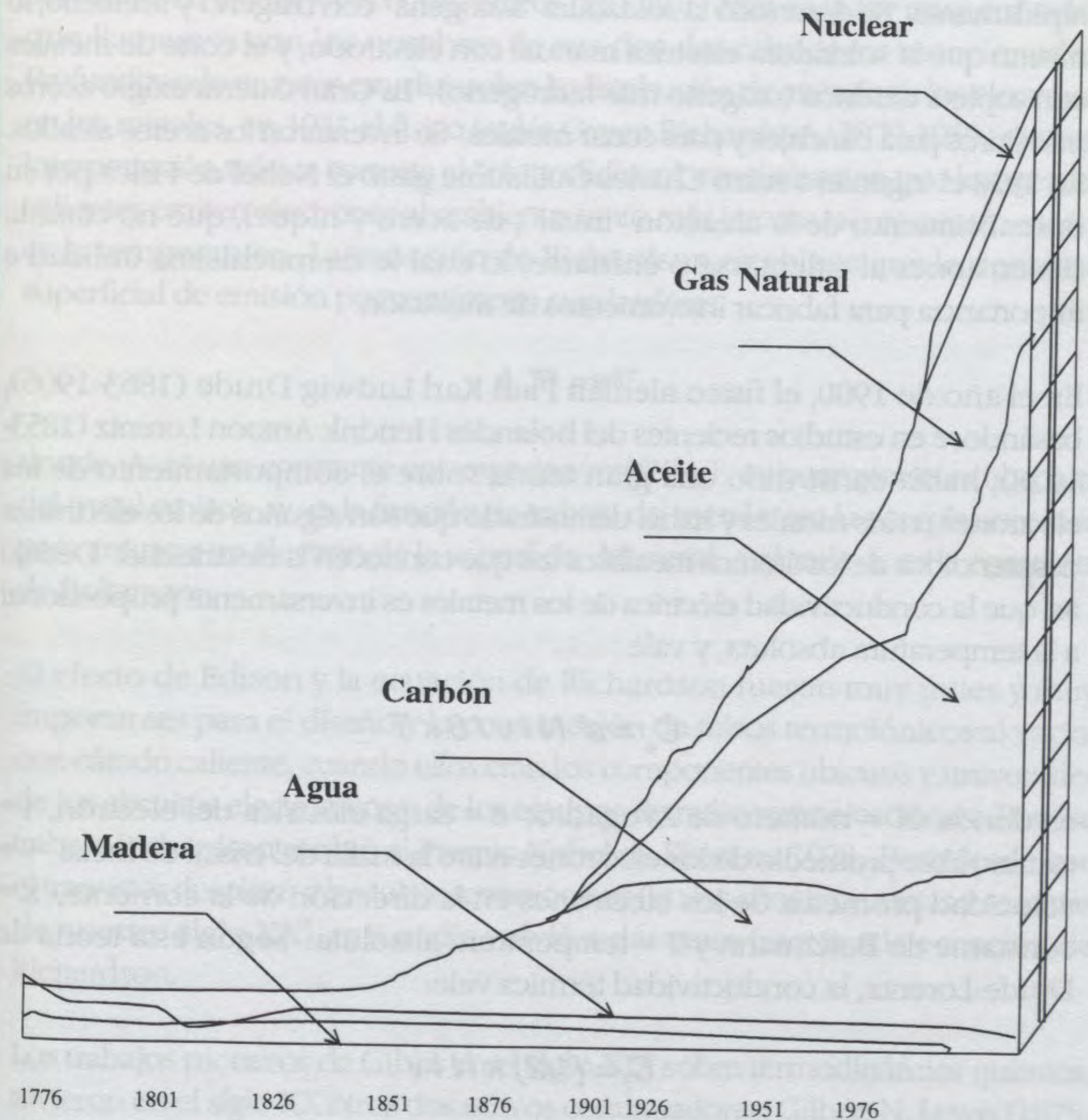
* LAS LINEAS MAS GRUESAS DENOTAN PROYECCIONES

Los dos primeros decenios del siglo XX vieron un proceso de crecimiento espectacular de la industria petrolera internacional. No solamente la producción mundial crecía con ritmo aceleradísimo, sino que cada año se abrían más campos de producción; se instalaban más torres de perforación; se instalaban y se ensanchaban más refinerías; se perforaban pozos en las plataformas continentales; aparecían y se extendían nuevos oleoductos; en los mares navegaban los nuevos barcos "tanqueros" cada vez más grandes; el consumo de refinados crecía a saltos, y el mundo veía crecer con asombro esta nueva industria energética, dominada por un oligopolio de compañías gigantes que ya dominaban el negocio en casi todos los países del planeta. Pero además: las torres perforadoras ya eran de acero; los motores que las accionaban pasaban a mayores potencias; los barrenos taladraban más rápidamente y descendían a profundidades mayores; las torres de refinación crecían en tamaño, en eficiencia y en selectividad; aparecían la destilación en vacío, el cracking hidrotérmico, el cracking catalítico (William Burton, en 1911, en Estados Unidos) y la reformación molecular catalítica; surgían nuevos usos para los derivados del petróleo (como la gasolina de aviación, el amoníaco del metano, los solventes

orgánicos aromáticos, el fuel-oil para las nuevas y crecientes centrales eléctricas a vapor, el gas licuado para cocinas domésticas, el diesel-oil para estos nuevos motores, etc.). Además, la química y la físico-química de los hidrocarburos avanzaba aceleradamente; las operaciones de destilación, refinación, absorción y mezcla se sofisticaban más y más; surgían y crecían las profesiones de la Ingeniería Química, la Ingeniería de Petróleos y la Ingeniería Mecánica asociadas al mundo del petróleo; y el panorama tecnológico de los países productores y refinadores se hacía más complejo y más intrincado. En Alemania, en 1913 el químico Karl Friedrich Bergius (1884-1949) ante la inexistencia de campos petroleros en ese país, y ante la inminencia de la gran guerra de 1914, inventó y desarrolló la primera tecnología para producir crudo sintético y gasolina a partir de hulla, mediante su gasificación catalizada y a altas presiones con oxígeno y vapor de agua.

Así mismo progresaban muchas otras tecnologías para la producción y el aprovechamiento del calor. Las calderas generadoras de vapor -tanto las acuatubulares como las piro-tubulares- crecían en tamaño, en temperaturas y en eficiencias, en presiones y en volúmenes de vapor; las parrillas y quemadores de los hogares y hornos eran cada vez mayores; el fuel-oil entraba como nuevo combustible; los aislamientos térmicos, ahora a base de asbesto, mejoraban y se propagaban; la carta psicométrica era más precisa y mejor aprovechada. La refrigeración mecánica era cada vez más eficiente; alcanzaba más bajas temperaturas; enfriaba mayores volúmenes de materiales por hora; mermaba en costos de construcción y en costos de operación; se descubría el método de refrigeración por absorción (sin necesidad de compresores sino de una llama pequeña); se construía en unidades más pequeñas y transportables; incorporaba el concepto de "tonelada de refrigeración" o "frigoria"; y llegaba a más fábricas y más países. En 1913, por ejemplo, en Chicago, una empresa puso en venta los primeros refrigeradores domésticos, basados en las ideas de Linde y de Carré. Y en 1917, en Estados Unidos Clarence Birdseye desarrolló a nivel industrial la ultracongelación (bajo cero grados centígrados) para preservar alimentos en gran volumen.

COMPORTAMIENTO DE LOS CONSUMOS DE FUENTES PRIMARIAS DE ENERGÍA EN ESTADOS UNIDOS (1776 - 1976)



Los hornos para producir cerámicas y para fundir vidrio mejoraban en diseño; lograban temperaturas más altas; usaban materias primas mejores; aumentaban en kilos de producto por hora y en kilos de productos por tonelada de carbón, o por barril de bunker-oil (nuestro combustóleo de hoy); desarrollaban nuevos productos (como es el vidrio pyrex al boro-silicato, refractario a altas temperaturas y resistente a cambios bruscos, que fue inventado en 1915, en Estados Unidos).

La tecnología del calor en el campo de la metalurgia también avanzó rápidamente. Se desarrolló la soldadura "autógena" con oxígeno y acetileno, lo mismo que la soldadura eléctrica manual con electrodo, y el corte de metales con soplete oxídrico (oxígeno más hidrógeno). La Gran Guerra exigió aceros más duros para blindajes y para cortar metales. Se inventaron los aceros aleados. En 1920 el ingeniero suizo Charles Guillaume ganó el Nobel de Física por su descubrimiento de la aleación "invar", de acero y níquel, que no cambia dimensiones al calentarse o enfriarse, lo cual le da muchísima utilidad e importancia para fabricar instrumentos de medición.

En el año de 1900, el físico alemán Paul Karl Ludwig Drude (1863-1906), basándose en estudios recientes del holandés Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928), había construido una gran teoría sobre el comportamiento de los electrones en los metales y había demostrado que son algunos de los electrones desprendidos de los átomos metálicos los que conducen la electricidad. Dedujo así que la conductividad eléctrica de los metales es inversamente proporcional a la temperatura absoluta, y vale

$$C_e = e^2 N l v / 6 k T$$

en donde N = número de Avogadro, e = carga eléctrica del electrón, l = camino libre promedio de los electrones entre la malla del cristal de metal, v = velocidad promedio de los electrones en la dirección de la corriente, k = constante de Boltzmann y T = temperatura absoluta. Según esta teoría de Drude-Lorentz, la conductividad térmica vale:

$$C_t = (1/2) k N l v$$

En 1902 los dos físicos alemanes Gustav Heinrich Wiedemann (1826-1899) y Richard Franz (1807-1902), dedujeron de la misma teoría de Drude y Lorentz

que la relación entre ambas conductividades es independiente del tipo de metal, es decir que

$$C_t / C_e = 3 (k/e)^2 T$$

es decir, que el cociente de las dos conductividades es directamente proporcional a la temperatura del metal. Esta relación tan importante significa algo que los experimentadores ya habían encontrado empíricamente: que los mejores conductores de la electricidad (como la plata, el cobre y el aluminio) son también los mejores conductores del calor. Esta es la ley muy conocida que llamamos con los nombres de sus dos descubridores mencionados. Profundizando en estos estudios sobre la distribución de energía de los electrones en los metales, en 1911 el físico inglés Owen Richardson (1879-1959) dio una interpretación teórica correcta al "efecto Edison" consistente en que los metales calientes emiten electrones al ambiente, tanto más intensamente cuanto mayor es la temperatura. La ecuación de Richardson establece que la densidad superficial de emisión por centímetro cuadrado es

$$A T^2 e^{-w/kT}$$

donde A es una constante en amperios/ $\text{m}^2 \cdot \text{K}^2$; T es la temperatura absoluta del metal emisor; w es la función de trabajo del metal o sea la energía necesaria para arrancar un electrón de la superficie del metal; y donde k es la constante de Boltzmann.

El efecto de Edison y la ecuación de Richardson fueron muy útiles y muy importantes para el diseño y la construcción de tubos termoiónicos al vacío, con cátodo caliente, cuando ellos eran los componentes ubicuos y universales de los circuitos electrónicos y de los equipos de radiocomunicaciones. Por ese trabajo Richardson recibió el Premio Nobel de Física en 1928. Pero desde que el transistor desplazó a los tubos termoiónicos (en los años cincuentas y sesentas de nuestro siglo XX), casi nadie volvió a dar tanto interés a la ecuación de Richardson.

Los trabajos pioneros de Gibbs en el siglo XIX sobre termodinámica química, tuvieron en el siglo XX otros dos activos continuadores: Gilbert N. Lewis (1875-1946) y su colaborador Merle Randall (1888-1950), ambos estadounidenses, como su eminente predecesor. Ellos publicaron sus mejores trabajos en 1923

en el libro "Thermodynamics and the free energy of chemical substances", que hoy es uno de los clásicos en la ingeniería de los procesos de transformación química en las industrias del planeta. Ellos introdujeron en la termodinámica química los conceptos muy importantes y sumamente útiles de "actividad química" y de "fugacidad", que son fundamentales y universalmente empleados hoy en los cálculos térmicos y energéticos de dichos procesos industriales.

La tecnología de la criogenia, apenas recién nacida, ganaba nuevos campos de aplicaciones y producía nuevos recursos técnicos. En 1925 logró un gran avance teórico y experimental gracias al mismo Debye quien creó también la teoría de las moléculas polares y encontró así un método completamente nuevo, de tipo magnético, para llegar a temperaturas de un grado Kelvin o menos. Aprovechando estas ideas y otras de la criogenia, así como equipos muy especiales, otros físicos descubrieron en 1930 la superfluidez del helio líquido. En 1937 el físico soviético Pieter Kapitza (1894-1984) le dio su explicación teórica y termodinámica al fenómeno, y en 1941 le dio el nombre ya mencionado a esa nueva propiedad de los líquidos ultrafríos.

A estas alturas una de las pocas objeciones que todavía merecían los motores de combustión interna era su alto nivel de ruido y su brusca trepidación estando en operación. Esto indujo al ingeniero alemán Félix Wankel (1902-1988) a inventar y patentar, en su patria, en 1929, un motor de combustión interna, a gasolina, rotatorio, muy liviano y poco ruidoso que hoy aparece en los libros de termotecnia con el nombre de su autor. Pero el invento no tuvo éxito comercial en ese momento y se le ignoró durante casi medio siglo, hasta que a fines de los años setentas se le reivindicó como motor automotriz de mejor eficiencia para automóviles pequeños. Pese a todo, aún hoy (1999) el motor de Wankel es muy poco usado en el mundo. En los ochocientos millones de automotores que ruedan hoy sobre el planeta entero trabaja hoy, sin rival, el motor de Otto de cuatro tiempos; y en los camiones pesados trabaja, sin émulos, el motor diesel de cuatro tiempos.

Hay que citar aquí, en 1929, la visión futurista del físico francés Georges Claude (1870-1960) quien se dio cuenta y señaló la posibilidad teórica y práctica de aprovechar como fuente de energía para la humanidad futura el gradiente térmico del mar, o sea la diferencia en algunos grados Celsius entre la temperatura más cálida de las aguas superficiales y la más fría de las aguas profundas, temperaturas que resultan de la absorción de la luz y el calor solar, así como del fenómeno

natural de la convección de las aguas del mar que mantiene permanentemente esa diferencia. Todavía hoy sigue siendo una mera posibilidad teórica, debido a las enormes obras y a las formidables inversiones que requeriría una presunta planta termoeléctrica de esta clase.

Un gran adelanto técnico y económico que sucedió en esos años fue el descubrimiento del di-cloro-di-fluoro-metano o freón, y otros cloro-fluoro-carbonos (CFC), que resultaron mucho más eficientes como gases refrigerantes, y más económicos que el amoníaco que se venía usando para ese fin. Lo logró el químico Thomas Midgley Jr. (1889-1944) en Estados Unidos, en 1930. En pocos años todos los refrigeradores del mundo, grandes y pequeños, industriales y domésticos, abandonaron el amoníaco, se multiplicaron por millones y pasaron a usar el freón y otros "CFC". Ya sabemos cómo el químico mejicano Mariano Moreno descubrió recientemente el enorme costo ambiental de estos gases, que está representado por los daños que ellos le causan a la capa natural de ozono de la atmósfera. Por este aporte Moreno ganó el Premio Nobel en 1996.

El trabajo experimental del ingeniero estadounidense Clarence Birdseye (1886-1956), que realizó en 1917, para congelar y conservar alimentos se convirtió en realidad industrial y comercial en Estados Unidos en 1930 cuando la compañía fabricante Postum Company comenzó a vender al público alimentos congelados. Esta innovación industrial supuso grandes perfeccionamientos en la tecnología de la refrigeración como proceso industrial. Precisamente en ese momento, en ese país (todavía no en Europa) se popularizaba rápidamente el refrigerador doméstico, lo que aseguró el éxito de la innovación de la Postum (hoy General Foods Corp). La refrigeración comercial y doméstica no sólo ha engendrado una vigorosa rama industrial en muchos países sino que ha beneficiado en alto grado a la humanidad al permitir el salvamento y el aprovechamiento de grandes cantidades de alimentos en todo el mundo, ayer y hoy.

La posibilidad que hoy contemplamos de llegar a disponer de energía en grandísimos volúmenes a partir del hidrógeno por fusión nuclear, se abrió a la Ciencia en 1932 cuando el químico estadounidense Harold C. Urey (1893-1981) descubrió el isótopo ^2H al cual él mismo bautizó como deuterio, y con el cual su colega (ya aludido) Gilbert N. Lewis obtuvo el agua pesada (D_2O). Esta es, por otra parte, un material utilísimo para la generación de energía térmica y eléctrica por fisión de núcleos radiactivos en los reactores atómicos.

Advirtamos que ya desde 1915 un físico inglés, William Draper Harkins (1873-1951), había señalado la posibilidad teórica de obtener grandes cantidades de energía si fuera posible fusionar núcleos de hidrógeno y obtener así núcleos de helio.

UNIDADES DE ENERGÍA

$$1 \text{ electrón - voltio} = 1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Joule} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ coulombio - voltio}$$

$$1 \text{ mega - electrón - voltio} = 1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-13} \text{ Joule}$$

$$1 \text{ giga - electrón - voltio} = 1 \text{ GeV} = 1.6 \times 10^{-10} \text{ Joule}$$

$$1 \text{ alfa - voltio} = 1 \alpha \text{ V} = 2 \text{ eV} = 3.2 \times 10^{-19} \text{ Joule}$$

$$1 \text{ quantum de luz del sodio} = 1 \text{ foton de luz del sodio} = 1 h \cdot \nu_{\text{Na}} = 3.3625 \times 10^{-19} \text{ Joule}$$

$$(h = 6.62377 \times 10^{-34} \text{ Joule - seg}; \lambda_{\text{Na}} = 589 \times 10^{-9} \text{ m.})$$

$$1 \text{ ergio} = 1 \text{ dyna - cm} = 1 \text{ gr} \times \text{cm}^2 / \text{seg}^2 = 10^{-7} \text{ Joule}$$

$$1 \text{ libra - pie} = 1.356 \text{ Joule} \rightarrow 1 \text{ ton (inglesa) - pie} = 2.712 \times 10^3 \text{ Joule}$$

$$1 \text{ poundal - pie} = 1 \text{ lb} \times \text{pie}^2 / \text{seg}^2 = (1/32.3) \text{ libra - fza} \times \text{pie}$$

$$1 \text{ galón (de agua) x ft} = (3.78 \text{ lts}). (1 \text{ kg/lt}). (9.81 \text{ m/seg}^2). (0.3048 \text{ m}) = 11.3025 \text{ Joule}$$

$$1 \text{ kilográmetro} = 1 \text{ kilogramo - fuerza} \times 1 \text{ metro (en París)} = 9.81 \text{ Newton - m} = 9.81 \text{ Joule}$$

$$1 \text{ lt} \times \text{atmósfera} = 10 \text{ kilográmetros}$$

$$1 \text{ Joule} = 1 \text{ Watio - segundo} = 1 \text{ Newton - metro}$$

$$1 \text{ lt} \times \text{metro de agua} = (10^{-3} \text{ m}^3). (10^3 \text{ kg/m}^3). (9.81 \text{ m/seg}^2). (1\text{m}) = 9.81 \text{ Joule}$$

$$1 \text{ Watio - hora} = 1 \text{ Wh} = 3.600 \text{ Joule} = 3.413 \text{ Btu}$$

$$1 \text{ kWh} = 3.6 \times 10^6 \text{ Joule}$$

1 Volt - amperio - segundo = 1 voltio - coulombio = 1 vatio - segundo = 1 Joule

1 Tera - vatio - hora = TWh = 10^{12} Wh = 1 billón de Wh

1 Horse power = 1 HP = 33.000 lb (fuerza) - pie/min = 550 lb (fza) - pie/seg = 744.9804 Joule/seg

1 HP - hora = 2.6820×10^6 Joule

1 cheval de vapeur = 1 CV = 75 kilogrametros/seg., en París

1 Poncelet = 100 kilogrametros/seg., en París

1 caloría - gramo = 1 gramo de agua x capacidad calórica de agua a 15°C x 1° celsius = 4.184 Joules

1 kilo - caloría = 1 caloría grande = 10^3 calorías - gramo = 4.184×10^3 Joule

1 Btu = 1 lb de agua x capacidad calórica del agua a 32°F (0°C x 1°F = 1.055 x 10^3 Joule

1 Termia = Ton métrica de agua x capacidad calórica del agua a 15°C x 1° celsius = 10^6 calorías = 1 mega - cal = 4.184×10^9 Joule

1 Therm (inglés) = 10^5 Btu = 105.5×10^6 Joule

1 Quad = 10^{18} Btu (= one quadrillion Btu) = 1.055×10^{18} Joules

1 seg. insolación terrestre = 173×10^{15} Joule

1 Ton - petróleo - equivalente = 1 TPE = 10^{10} cal = 4.18×10^{10} Joule

1 segundo fotosíntesis terrestre = 40×10^{12} Joule

1 Ton - Carbón - equivalente - 1 TCE = 7×10^9 calorías = 2.9260×10^{10} Joule

1 barril - petróleo - equivalente (16 API) = 6.57×10^6 Btu = 6.9313×10^9 Joule

1 Ton (tri - nitro - tolueno) = energía explosiva de 1 Ton de tri - nitro - tolueno (TNT)

1 Kilo - ton = 10^3 Ton (TNT)

1 mega - ton = 10^6 Ton (TNT)

1 ft³ gas natural equivalente = 1 ft³ N. GNE = 1.1×10^3 Btu

1 gramo de materia ($E = mc^2$) = 9×10^{13} Joules

1 dalton de energía = 1 UAM (energía) x c^2 = $(1/12) \cdot 12$ gr/mole-gramo x $(1 \div 6.025 \times 10^{23} / \text{mole-gramo}) \times (2.99 \times 10^{10} \text{ cm/seg})^2$ = 1.4838×10^{-3} dyna - cm = 1.4838×10^{-10} Joule

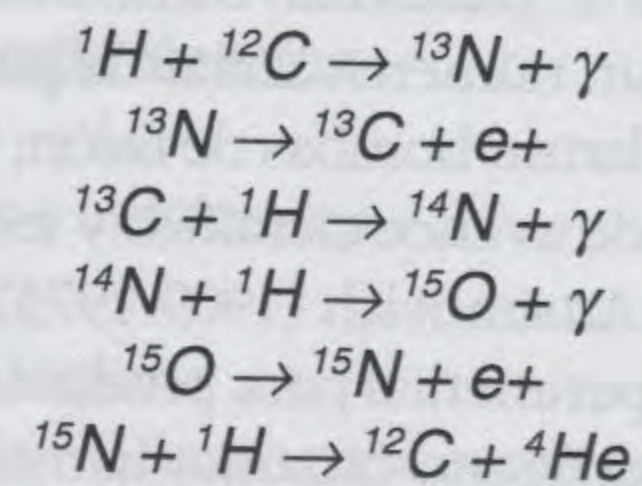
Mientras la Física avanzaba aceleradamente en el conocimiento del átomo y de su construcción, otros investigadores seguían explorando el nuevo territorio de la criogenia. En 1933 el químico estadounidense William Francis Giauque (1895-1982) logró descender a 0.25°K usando métodos sofisticados basados en la magnetización y desmagnetización repetida de materiales paramagnéticos. Dos años después, mediante un método perfeccionado de este tipo, este mismo científico logró licuar el helio a 0.1°K . Giauque recibió el premio Nobel de química por sus investigaciones sobre la química de las muy bajas temperaturas. En los mismos años treintas, en Inglaterra, el físico germano-británico Franz-Eugen-Francis Simons (1893- ?), usando el paramagnetismo molecular y sus spines nucleares, con grandes y costosos medios técnicos, logró llegar a temperaturas de 0.0185°K . Desde luego la tercera ley de la termodinámica seguía -y sigue- indemne.

Fue en los primeros años treintas cuando fue generalmente reconocida la llamada ley cero de la termodinámica (primero vista por Gibbs), a saber que si un sistema S_1 está en equilibrio termodinámico con otros sistema S_2 , y si éste lo está con S_3 , entonces y sólo así S_1 está en equilibrio con S_3 . Es decir que el equilibrio termodinámico entre sistemas es una relación transitiva. Y como también es reflexiva y simétrica, resulta ser una relación ecualiforme, como se dice en Lógica Matemática.

Uno de los desarrollos energéticos más espectaculares del siglo XX ha sido la cohetaría de largo alcance. A principios del siglo un físico en Rusia, Konstantin E. Tsiolkovsky (1857-1935), y otro en Estados Unidos, Robert Hutchings Goddard (1882-1945), sin saber el uno del otro, independientemente, como curiosidad personal, y con poquísimos recursos técnicos en ambos casos, comenzaron a construir pequeños cohetes experimentales. Tsiolkovsky empezó a escribir sobre cohetes, combustibles líquidos, el oxígeno líquido como comburente (hoy se dice propelente) y vuelos espaciales desde los últimos años del siglo XIX y durante los principios del siglo XX. Y aunque poco se sabe de su vida y su trabajo, es seguro que ensayó numerosos modelos experimentales, y probablemente lanzó con éxito algunos de mayor porte antes de morir en 1935, quizá todo ello mantenido en secreto y bajo el poder del gobierno soviético, el cual ya veía venir la guerra con Alemania.

De Goddard se sabe bastante más. En 1914 comenzó a diseñar y a construir cohetes de un metro de largo y a ensayarlos; y en 1919 apareció su libro seminal "A method of reaching extreme altitudes" donde ya sugirió la posibilidad de enviar cohetes a la luna. En 1926, desde el patio de su casa lanzó su primer cohete, con combustible líquido (gasolina). Medía 1.20 metros de altura por 10 centímetros de diámetro y se elevó solamente 60 metros. Luego, en 1929, Goddard lanzó el primer cohete con instrumentos de medición a la alta atmósfera. Ese fue el primer paso en el camino fabuloso de los viajes espaciales. La idea se extendió a Alemania, país de muy alto nivel científico y tecnológico, con una industria poderosa y dueña en ese momento de grandes proyectos bélicos. En 1931 el ingeniero alemán Alexander Winkler (según Hellemans y Brunch), en ese país, disparó el primer cohete que se viera en Europa, y que ya tenía combustible líquido y propelente de oxígeno líquido. Tres años después, otro ingeniero alemán, Werner von Braun (1912-1977) construyó otro cohete con combustible líquido y oxígeno líquido, que alcanzó a 2400 metros de altura. El gobierno de Hitler tomó el asunto en sus manos, con exclusividad, y construyó en la isla de Peenemunde, en el mar Báltico, un gran polígono de pruebas y la primera fábrica de cohetes experimentales con propósitos bélicos. Allí, en 1937, se probaron los primeros cohetes de varios kilómetros de alcance, bajo la dirección de Walter Dornberger y de von Braun. En 1938 allí se construyeron cohetes que alcanzaban hasta 18 km de distancia horizontal. Y en 1944 cayeron sobre Londres, ya al terminar la guerra, las primeras "bombas voladoras" V1 y V2. El resto de esta historia ya es bien conocida.

El motor de propulsión a chorro (en inglés "jet propulsion engine") fue otra criatura de la segunda guerra mundial. Lo concibió y lo patentó como idea el ingeniero británico Frank Whittle en su patria, en 1930. En 1937, apoyado por el gobierno británico que veía venir la guerra, el mismo Whittle construyó prototipos que funcionaron eficazmente, con alta eficiencia y que eran de costo moderado de construcción y de operación. El primer avión del mundo propulsado por motor a chorro despegó de Inglaterra en 1941 y era un avión militar. Los alemanes tomaron la idea y el ingeniero Pabst von Ohain construye el primer motor de reacción que impulsó el primer avión de este tipo. Después, durante la guerra (1939-1945) ambos países contrincantes comenzaron a usarlo en aviones de combate con éxito creciente. Llegada la paz, al motor jet se le transformó también y se le usó como turbina de gas, estática, para mover generadores eléctricos y consumiendo fuel-oil, kerosene o gas natural. Hoy en día, con el desarrollo del ciclo combinado, las plantas termoeléctricas que usan dos turbinas en dos escalones de temperatura han alcanzado eficiencias electrotérmicas hasta de 55%, que no hace muchos años eran casi impensables. Fue en el año de 1938 cuando el físico germano-estadounidense Hans Bethe (1906- ?) descubrió mediante razonamientos teóricos el mecanismo químico-nuclear que produce la energía en el interior del sol, que es la fuente de toda la energía -en sus diversas formas- que poseemos en la Tierra. En resumen, este mecanismo funde cuatro protones y forma con ellos un núcleo de helio-4, más dos positrones y dos neutrinos. En detalle, el ciclo es:



Se le llama el ciclo del carbono-nitrógeno de Bethe. Su autor ganó el premio Nobel de física en 1967 por este descubrimiento, el cual ha sido uno de los más importantes en la historia del conocimiento de la energía y de la comprensión del Universo.

La reacción en cadena de la fisión del uranio la descubrieron en Alemania los físicos Otto Hahn (1879-1968), Lise Meitner (1878-1968) y Fritz Strassmann (1902-1980), en 1938, en vísperas de la guerra. Esta última circunstancia

desencadenó un interés febril en los cuatro grandes países que iban a protagonizar el conflicto: la misma Alemania, la Gran Bretaña, Francia y Estados Unidos. Se trataba en primer lugar de construir un aparato que generara energía controlada, en cantidades mayores; y luego, de construir una bomba nuclear. Fue en Estados Unidos donde primero se lograron ambos resultados. En 1942, en la Universidad de Chicago, Enrico Fermi (1901-1954) construyó la primera "pila atómica"; y con su ayuda y bajo la dirección de Robert Oppenheimer, ese país produjo y lanzó las dos primeras bombas atómicas, en agosto de 1945. Así terminó la guerra.

Desde ese momento la energía nuclear por fisión de uranio o de plutonio se ha ido extendiendo en su uso por numerosos países del mundo como fuente primaria de energía termoeléctrica comercial para uso de la población. Los avances técnicos y económicos en estos cincuenta años han sido muchos y muy vastos: han aumentado en número y en tamaño los reactores nucleares experimentales e industriales; apareció en 1952 el reactor criador (en inglés: breeder reactor) en Estados Unidos; nació la primera central termoeléctrica nuclear, en Inglaterra, en 1952; pronto le siguieron otras centrales en Estados Unidos, Francia, la Unión Soviética, Alemania y Canadá; se han producido doce elementos químicos (metales) transuránicos, artificiales y se ha descubierto su química; se han producido centenares de isótopos de los elementos naturales; se construyó la bomba de hidrógeno, de fusión y se ha lanzado muchas veces en "pruebas no bélicas"; unas dos docenas de países han comenzado a generar electricidad de plantas termonucleares; un número similar de países ha ido adquiriendo la posibilidad de construir y lanzar bombas de fisión; la física del núcleo atómico ha llegado a altos grados de avance científico y tecnológico; en 1955 el físico soviético Lev Andreevich Artsimovich (1909-1973) diseñó y construyó en ese país el primer aparato experimental para producir cantidades moderadas de energía por fusión de hidrógeno (aparato llamado el Tokamagk). Se han construido y se operan submarinos nucleares; y se han alcanzado cientos de aplicaciones industriales, médicas y agrícolas de la energía nuclear. Es uno de los campos de la física de altas energías que hoy se investiga más activamente, especialmente en el tema de la manera de generar energía por fusión de núcleos de hidrógeno.

APARATOS, EQUIPOS Y SISTEMAS ACTUALES PARA CONVERTIR ENERGÍA

Energía mecánica en energía térmica

Refrigeradores domésticos e industriales por evaporación

Energía eléctrica en energía térmica

Estufas, calefactores y hornos de resistencia eléctrica, de todo tipo

Hornos de inducción para fundir metales

Hornos de micro-ondas para caldeo dieléctrico para fundir metales y para otros usos industriales y domésticos

Hornos de arco eléctrico para fundir metales y minerales, de varios tipos

Calderas de vapor, eléctricas

Soldadores de arco

Energía térmica en energía mecánica

Máquina de vapor de Watt

Turbina de vapor de Parsons

Mecanismos mecánicos accionados a vapor

Energía térmica en energía eléctrica

Pares termoeléctricos

Energía térmica en energía térmica

Intercambiadores de calor

Refrigeradores domésticos e industriales

Flash-dryers

Calderas y generadores de vapor

Autoclaves, marmitas y ollas al fuego para cocción de materiales orgánicos

Unidades y centrales de acondicionamiento de aire

Energía térmica en energía química

Reactores, digestores, biodigestores y autoclaves para procesos químicos endotérmicos

Hornos estáticos para calcinar minerales

Hornos rotatorios para calcinar minerales

Columnas de destilación

Retortas para pirólisis y coquización de carbón

Hornos estáticos para tostar granos vegetales y alimentos
 Ollas para cocción de alimentos
 Alto horno siderúrgico
 Gasificación de carbón a gas de síntesis

Energía química en energía mecánica

Motor de gasolina de Otto
 Motor de Wankel
 Sistemas de ciclo combinado de gas y vapor de agua
 Automóviles de todo tipo
 Armas de fuego
 Motores "jet" a reacción
 Locomotoras diesel
 Motores diesel
 Motor de Stirling
 Camiones y tracto-camiones
 Detonadores de explosivos
 Turbina de gas
 Cuerpo humano

Energía química en energía térmica

Quemadores de todo tipo para combustibles de todo tipo
 Calderas alimentadas por combustibles
 Reactores químicos exotérmicos
 Turbina de gas
 Estufas domésticas a combustión
 Soldador de acetileno
 Soldador oxídrico

Radiación electromagnética en energía térmica

Calentadores solares de agua
 Hornos solares
 Secadores y evaporadores solares
 Energía nuclear en energía térmica
 Reactores nucleares (pilas atómicas) de todo tipo para generar vapor y calor

La física de las bajas temperaturas y la tecnología del frío han seguido progresando en la teoría, en la práctica experimental y en sus aplicaciones técnico-económicas. Así por ejemplo, en 1940, en Estados Unidos, comenzó a usarse en escala industrial el secado por ultracongelación (o liofilización) para conservar alimentos perecederos por largo tiempo, y desde entonces esta técnica y esta industria se fueron extendiendo por todo el mundo. Y en 1955 otro producto de esta tecnología llegó a los hogares domésticos cuando en ese mismo país comenzaron a venderse los primeros "deep freezers" (o congeladores) para usar en casa con el propósito indicado.

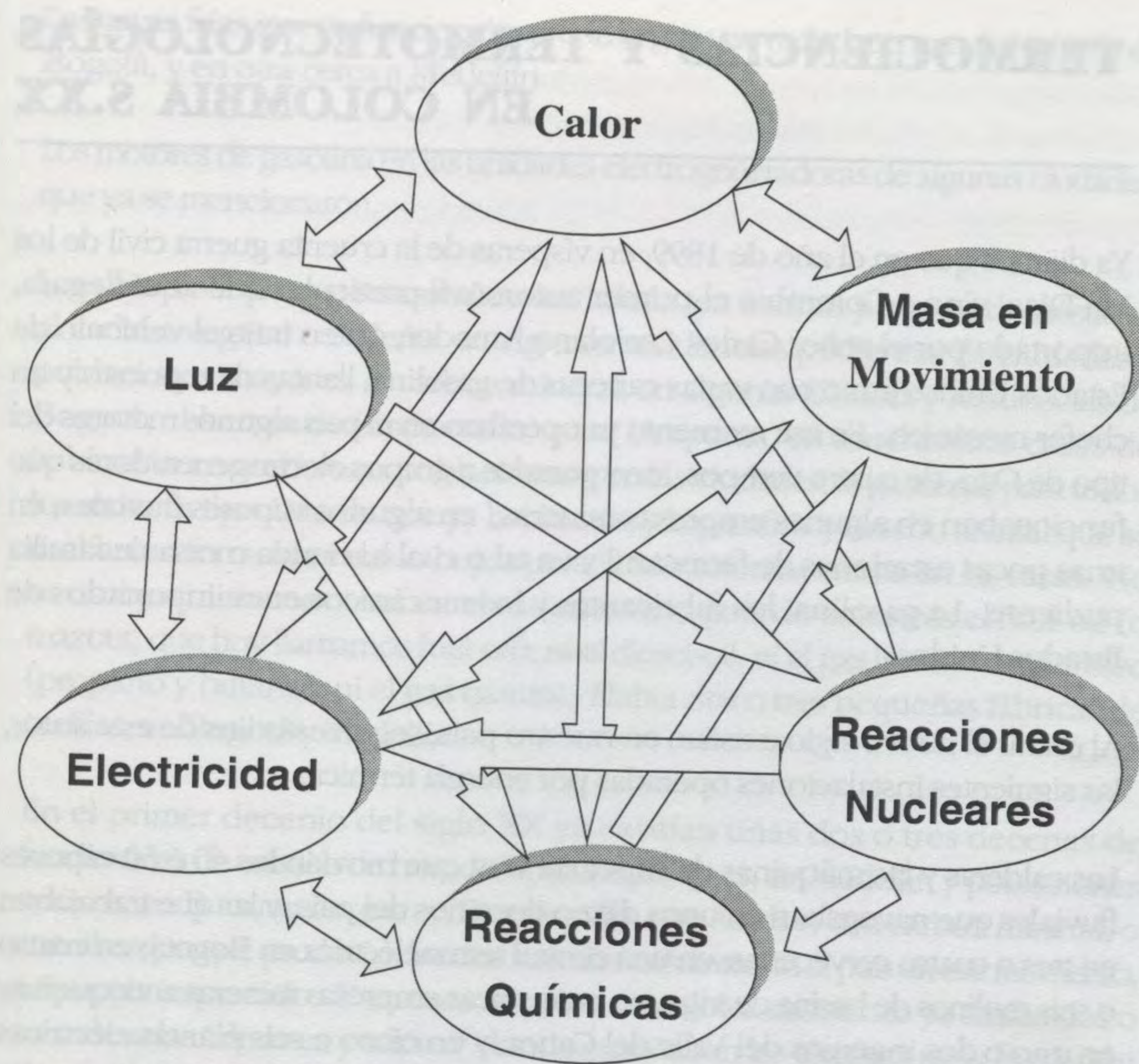
Ya se indicó que en 1925 el físico Giauque logró temperaturas de 0.025 grados kelvin. Después se llegó a 1/50.000 K; y en 1962 el físico británico Heinz London (1907-1970) usando una mezcla de helio-2, helio-3 y helio-4, mezclándolos y separándolos, logró temperaturas aún más bajas y más difíciles de alcanzar. Luego, combinando esta técnica con técnicas magnéticas se ha llegado hasta la millonésima de grado kelvin. Pero la tercera ley sigue en pie.

Los años cincuentas y sesentas vieron avances espectaculares en la tecnología del calor, a la cual hoy llamamos Termotecnia o Termotecnología, en castellano. En esa época se expandieron por el mundo las turbinas de reacción para aviones y las turbinas estacionarias de gas para generadores; apareció el gas natural en grandes volúmenes en el mercado mundial de combustibles; se extendió por el mundo y creció la industria petroquímica; se aprendió a producir metales resistentes a muy altas temperaturas (como de 5.000°C); se inventó y se generalizó el horno electromagnético de alta frecuencia para tratar metales y para fundirlos; la ultra-congelación entró a todas las industrias agroalimenticias de cien países; la electricidad termo-nuclear se volvió una realidad cotidiana; se inició el estudio experimental y teórico de los plasmas ionizados a muy alta temperatura de miles o millones de grados (llamados el cuarto estado de la materia); comenzó a estudiarse la energía foto-voltáica; los químicos y físicos empezaron a experimentar con celdas electroquímicas de combustible (en inglés "fuel-cells"); comenzó a explotarse la energía geotérmica en otros países; la multiplicidad de explosivos y materiales pirogénicos (incendiarios) siguió y sigue aumentando en número y en poder destructivo; se elevó en gran medida la escala de tamaños y de potencias de las calderas de combustión; los automotores de Otto y de diesel proliferaron y siguen proliferando en escalas no previstas; la tecnología petrolera desarrolló muchas nuevas técnicas de exploración, de producción, de refinación y petroquímicas; el petróleo pasó por encima del

carbón como mayor combustible en el mundo; se inició en Estados Unidos y en la URSS la era de la cohetaría espacial; apareció en el mercado automotriz internacional el motor Wankel (1952, en Alemania); comenzó a acelerarse la recarga de CO₂ a la atmósfera; mejoró sustancialmente la eficiencia termomecánica de los motores de combustión interna; la demanda agregada de combustibles creció a tasas antes no conocidas; etc.

El disparo hacia arriba del precio del petróleo y de sus derivados, en 1973, desencadenó en los grandes países consumidores y muy industrializados una carrera técnico-científica para economizar energía térmica y termoeléctrica en todas sus aplicaciones, y para buscar más petróleo en otras regiones del mundo. La industria automotriz, cuyos vehículos dependen de los hidrocarburos para funcionar, se dedicó a perfeccionar los motores térmicos y los dispositivos mecánicos que le permitieran a sus automóviles y camiones marchar más millas con menos galones de combustible. Se redescubrió el ciclo de Stirling; se comercializó el motor Wankel; el motor diesel se adaptó a automóviles; se “descubrió” el concepto del ciclo combinado; se aligeró el peso de los vehículos; se estudiaron combustibles posibles y antes no usados, como el metanol, los aceites vegetales y el etanol; se desarrolló la ignición controlada electrónicamente; se introdujo el turbo-cargador de diesel-oil para tales motores; y aparecieron muchas otras innovaciones que han mejorado apreciablemente la economía de combustibles que se obtienen del petróleo.

El más reciente break-through en las ciencias térmicas ha sido el descubrimiento en 1987 de las cerámicas que son superconductoras a las “elevadas” temperaturas de 30 °K, por los físicos Karl Alex Mueller (suizo) y Johannes Georg Bednorz (alemán). Este descubrimiento abre las puertas a promesas fantásticas de cambios en la ingeniería eléctrica de todo el mundo.



TERMOCIENCIAS Y TERMOTECNOLOGÍAS EN COLOMBIA S.XX

Ya dijimos que en el año de 1899, en vísperas de la cruenta guerra civil de los Mil Días, vino a Colombia el primer automóvil particular que aquí llegara, importado por el señor Carlos Coriolano Amador, quien trajo el vehículo de Estados Unidos junto con varias canecas de gasolina, llantas de repuesto y un chofer-mecánico. En ese momento ya operaban en el país algunos motores del tipo de Otto, de cuatro tiempos, incorporados a grupos electrogeneradores que funcionaban en algunas empresas mineras, en algunos vapores fluviales, en unas pocas estaciones de ferrocarril y en tal o cual hacienda o casa de familia pudiente. La gasolina, los lubricantes y los mecánicos eran importados de Estados Unidos.

Al entrar el nuevo siglo existían en nuestro país, según estudios de este autor, las siguientes instalaciones operadas por energía térmica:

Las calderas y las máquinas de vapor de Watt que movían los 40 ó 50 vapores fluviales que navegaban en unos diez o doce ríos del país; y las que trabajaban en tres o cuatro cervecerías; en una central termoeléctrica en Bogotá; en cuatro o seis molinos de harina de trigo; en unas pocas empresas mineras antioqueñas; en uno o dos ingenios del Valle del Cauca; y en cinco o seis plantas eléctricas municipales.

Quizá una o dos docenas de rudimentarios hornos de alfarería para producir ladrillos cocidos en media docena o una decena de las ciudades y poblaciones mayores.

Los hornos cerámicos de las dos fábricas de locería que ya funcionaban: una en Bogotá (Fábrica Faenza) y otra cerca a Medellín (Locería de Caldas).

Las 20 ó 30 locomotoras de vapor que había en los pocos ferrocarriles que operaban en ese momento, alimentadas por leña.

Quizá un centenar de hornos paneleros, dispersos en todas las regiones andinas de Colombia, con sus grandes hornillas alimentadas con el bagazo de la caña.

Las cavas frías que ya funcionaban, como gran novedad, en una cervecería en Bogotá, y en otra cerca a Medellín.

Los motores de gasolina en las unidades electrogeneradoras de algunas ciudades, que ya se mencionaron.

Los combustibles que se usaban eran: la leña, en cocinas y hornos domésticos; el carbón vegetal o de leña, en algunas residencias pudientes de ciudades y poblaciones mayores; el carbón mineral, en algunas fábricas y residencias de Bogotá; el kerosene (importado) para lámparas, en muchísimas casas de habitación en numerosas poblaciones y en las ciudades; la gasolina, para todos los motores tipo Otto de que ya hablamos; y la parafina y el sebo animal que se usaban en forma de velas o bujías para iluminación nocturna en las casas. No se usaban ni se conocían en el rudimentario país de entonces el fuel-oil (o mazout, que hoy llamamos fuel-oil), ni el diesel-oil, ni el gas licuado de petróleo (propano y butano), ni el gas natural. Había dos o tres pequeñas fábricas de cerillas, en Bogotá y Medellín.

En el primer decenio del siglo XX ya existían unas dos o tres decenas de fundiciones de crisol o de horno-cúpula, en Bogotá, en Medellín y poblaciones vecinas, en Bucaramanga y en Barranquilla, que fundían con carbón mineral, o con el coque que producían las dos ferrerías existentes en el país en ese momento, o que era importado. Y en esos años los sacerdotes salesianos ya tenían dos o tres escuelas "de artes y oficios" donde enseñaban las técnicas de la fundición de metales, entre otras varias especialidades.

Es oportuno anotar que en 1908, en Cartagena, el señor Diego Martínez recibió del gobierno de Reyes el "privilegio" para instalar en esa ciudad la primera refinería de petróleo que funcionó en Colombia. Importaba petróleo crudo, producía gasolina, kerosene y brea, y duró en operación varios años. También en esos años se comenzó a construir a la orilla del Canal del Dique, el segundo ingenio azucarero colombiano (que fue posterior a Manuelita, situada en el Valle del Cauca y la cual venía del siglo XIX). Lo emprendió el señor Carlos Vicente Danies, apoyado también por el gobierno progresista del general Reyes. Sus grandes calderas para generar vapor eran alimentadas por bagazo porque en la región no había ni hay carbón mineral ni bosques.

En 1909 empezó a trabajar otra industria que era nueva en el país y que ha sido siempre intensiva en consumo de calor: los hermanos Samper Brush fundaron en Bogotá la primera fábrica de cemento que existió en Colombia. Producía unas 20 toneladas diarias. Consumía carbón mineral de las abundantes minas de La Sabana y abasteció por varios años la demanda nacional de cemento, la que iba en crecimiento rápido. En efecto, entre 1905 y 1910 se construyeron quizá 400 kilómetros de nuevas ferrovías y 200 ó 300 kilómetros de carreteras para los automotores que ya estaban rodando y aumentando en el país. En ese quinquenio, gracias al esfuerzo del gobierno, llegaron por la razón anterior muchas nuevas locomotoras de vapor para los nuevos ferrocarriles. Eran de variadas marcas y procedían de distintos países: Baldwin, de Estados Unidos; Henschel, de Alemania; Creuzot-Loire, de Francia; Skoda, de Checoslovaquia; Porter, de Estados Unidos; Tubize, de Bélgica; y Mikado, de Japón. Estas nuevas máquinas ya traían sus propios grupos electrogeneradores a motor de gasolina, para iluminarse e iluminar los trenes que aquellas arrastraban. Y también en esos años muchos municipios introdujeron sus primeras plantas públicas de electricidad, movidas por motores de gasolina y tal cual motor diesel para las pocas plantas más potentes.

Entre 1910 y 1920 se fue generalizando en Bogotá, Medellín y Cali el empleo de hulla, trayéndola de los yacimientos que rodean a estas tres ciudades, para alimentar sus ferrocarriles vecinos y las fábricas que se iban multiplicando dentro de sus perímetros urbanos o en sus entornos. Este fenómeno de la hulla como combustible nunca llegó a los barcos de vapor por razones obvias. En los vapores de los ríos se quemó siempre leña, hasta que, en los años veintes se inició el uso de fuel-oil. En 1921 entra en producción el campo petrolero de Infantas, cerca a Barrancabermeja, el primero de Colombia en su historia.

Poco después de que terminó la primera guerra mundial en Europa, vinieron en 1919 a Colombia algunos aviones supervivientes del conflicto bélico, y varios pilotos, especialmente de origen alemán. Eran aviones marca Junker y Henschel, para acuatizar y despegar en los ríos, algunos de ellos monomotores y otros pocos bimotores. Fueron los primeros motores aeronáuticos que se conocieron en nuestro país. Con ellos y con sus pilotos era necesario importar la gasolina especial que consumían, los lubricantes, los repuestos y los mecánicos. Eran motores que hoy nos parecerían pequeñísimos pues su potencia era solamente del orden de 50 a 80 HP.

Fue en los astilleros fluviales de Barranquilla y Cartagena, y en los talleres ferroviarios de Facatativá y Girardot (Cundinamarca), Chipichape (Valle) y Bello (Antioquia) donde se comenzó a usar la soldadura oxi-acetilénica, o soldadura autógena. Había sido inventada en los Estados Unidos a comienzos del siglo y durante la contienda mundial (1914-1918) había sido fuertemente perfeccionada y empleada para fabricar tanques de guerra y otros equipos militares. No era utilizable para construir fuselajes de aviones porque éstos eran, como siguen siendo, de aluminio, metal que no soporta las temperaturas muy altas de la llama oxi-acetilénica. Desde entonces, a lo largo de los setenta u ochenta años últimos del siglo XX, la soldadura autógena ha entrado a todos los talleres y fábricas del país para soldar hierro, acero, cobre y otros metales industriales.

Otro paso importante en el desarrollo de la tecnología térmica en el país, se dio a lo largo del decenio de los años veintes, cuando se fueron abriendo varios ingenios azucareros en el departamento del Valle del Cauca: Central Castilla, Providencia, Riopaila, Chipichipi y otros. Proliferaba así otra industria, nueva para su tiempo en el país, y muy intensiva en consumo de vapor para sus procesos de producción. Su combustible casi exclusivo era el bagazo que queda como residuo después de moler la caña fresca. Y en la misma época, en otro sitio del país, en Barrancabermeja, comenzó a trabajar otra gran empresa industrial que ha sido siempre prototipo de altos consumos energéticos y productora de los combustibles que hoy mueven al mundo. Se trataba de la refinería de petróleo de Barrancabermeja, la cual inauguró en ese año de 1922 su primer alambique para destilar petróleo crudo. Comenzó produciendo gasolina, kerosene, fuel-oil, diesel-oil (llamado entonces "ACPM: aceite combustible para motores"). Y paralelamente los motores diesel comenzaban a funcionar en algunas motonaves fluviales y en los primeros "grandes" camiones diesel que estaban entrando a las carreteras colombianas, traídos desde Europa y desde los Estados Unidos.

Desde los primeros años del siglo XX habían comenzado a abrirse numerosas fábricas en Medellín muy especialmente pero también en Bogotá y Barranquilla. Sus fuentes de energía eran las pequeñas plantas eléctricas locales y la hulla obtenida en minas cercanas. De manera que al comenzar el decenio de los años treintas funcionaban en Colombia algo más de 100 fábricas, que eran pequeñas o medianas, de textiles, cervezas, chocolates, fosforeñas, imprentas, fundiciones, ingenios, manufacturas metálicas, gaseosas, jabones, vidrio, y locería. Todavía muchas de ellas trabajaban con calderas y máquinas de vapor

de Watt. En otras ya empezaba a generalizarse el empleo del motor eléctrico. Es de interés hacer notar que en esos años, y una vez superada la crisis económica mundial que castigó al país entre 1930 y 1934, comenzaron a llegar los primeros refrigeradores domésticos, que eran como lo son hoy, operados por electricidad y que termodinámicamente trabajaban y trabajan según el ciclo Brayton inverso. En los mismos días comenzaron a llegar a algunas residencias pudientes en Bogotá y Medellín, los primeros fogones eléctricos para sus cocinas. Y en el mundo industrial colombiano ese período se caracterizó también por dos fenómenos: la rápida proliferación de talleres de fundición en ciudades y poblaciones, que surgían equipados con horno de cubilote (también llamado de cúpula); y la aparición de la soldadura eléctrica de arco, gracias a la expansión del servicio público de electricidad en las principales ciudades que se industrializaban.

En el ámbito académico, los ingenieros que se habían graduado en la Universidad Nacional, en el Instituto Técnico Central, en la Universidad de Popayán, en la Universidad de Cartagena y en la Escuela de Minas de Medellín, habían recibido lecciones sobre la física del calor, a nivel más bien elemental; y no pocos de ellos habían visto trabajar en la vida práctica esos conocimientos en algunos ferrocarriles, en fundiciones, en vapores fluviales, en motores de vapor industriales y en hornos. Pero iba a ser necesario que en 1938 se fundara la primera facultad de Ingeniería Química en el país, en la Universidad Pontificia Bolivariana, en Medellín, para que comenzara a dictarse en Colombia la primera cátedra formal de Termodinámica. En los años siguientes le seguirían otras facultades de esa misma profesión en Barranquilla, en la misma Medellín, Cali, Bogotá y Bucaramanga. Hoy se imparte esa asignatura por lo menos en 60 ó 70 escuelas de ingeniería de distintas denominaciones, en toda Colombia: Ingeniería Química, Mecánica, Eléctrica, Metalúrgica, de minas, de petróleos y alguna otra. En esas carreras se dictan también otras materias relacionadas con la ciencia del calor y con la termotecnología aplicada, como son la Física-Química, la Termoquímica, la de Combustión, los Combustibles, los Hidrocarburos, la Neumática, las Calderas, la Cinética Química, el Diseño de Reactores, los Hornos, las Centrales Termoeléctricas y la Electrotérmica.

En todo este tiempo, en el ámbito industrial las aplicaciones del calor se multiplicaban y crecían. En 1937 se montó en Medellín el primer horno rotatorio para calcinar calizas y clincker en la fabricación de cemento. En la misma ciudad se instaló en 1939 ó 1940 el primer horno eléctrico del tipo que inventó

Hérault, de arco abierto, destinado a fundir chatarra ferrosa y fabricar así el primer acero que se fabricó en Colombia. Cinco o seis años después vendría otro de estos hornos a Bogotá. Hoy hay más de 20 ó 30 hornos de arco en esta industria metalúrgica, y son mucho más grandes y mucho más eficientes que aquellos primeros. Algunos alcanzan potencias de 25 megawatios o más.

A lo largo del decenio de los años cuarentas se multiplicaron los usos de la energía térmica; y con el crecimiento general del país sus indicadores de magnitud crecieron con rapidez. Se hicieron o aparecieron muchos ensanches y nuevas instalaciones de plantas termoeléctricas, cubilotes de fundición, hornos cerámicos y de vidrio, más locomotoras de vapor, camiones diesel, nuevos y mayores grupos electrógenos diesel y a gasolina, nuevos hornos de cementos, calderas industriales acuatubulares y pirotubulares, torres de destilación para alcohol, nuevos ingenios azucareros, más y más barcos de vapor, y más motonaves diesel en los ríos.

Durante los primeros años cincuentas se establecieron nuevas grandes industrias de cuantiosa demanda energética: la planta de alcalis sódicos en Zipaquirá; los ensanches de la refinera de Barrancabermeja; las mini-refinerías de petróleo (o "flash-colector") en El Guamo, Tibú y La Dorada; la siderúrgica de Paz del Río; la carboeléctrica de Paipa; los primeros campos productores de gas natural (Casabe y Cicuco) con su gasoducto a Cartagena; la refinera de petróleo de Cartagena; la planta de amoníaco-úrea de Barrancabermeja; los primeros autoclaves o reactores químicos en algunas plantas. Se construyen por entonces dentro del país las primeras calderas de vapor y los primeros refrigeradores domésticos; se monta el primer turbogenerador a gas en Barrancabermeja usando gas residual de refinera; la primera turbina de vapor a carbón para generar electricidad, en Yumbo (Valle); nuevas fábricas de cemento en Barranquilla, Cali, Ibagué y otras localidades; nuevas plantas de acabado de textiles y varios ensanches; crecimiento extraordinario del parque automotor; ensanches y nuevas cervecerías en varias ciudades; plantas diesel mayores para electrogeneración en ciudades medianas; y mucho más. Como indicadores estadísticos de la intensificación de los usos de la Termotecnología en el país en esa época, baste mencionar que el consumo de carbón mineral pasó de 1.180.000 toneladas en 1950 a 2.300.000 toneladas en 1960; y la producción nacional de gasolina pasó de 1.6 millones de barriles en el primero de esos años a 8.69 millones de barriles en el segundo de los indicados.

En los años sesentas el país continuó su crecimiento termoenergético: la termoeléctrica de Zipaquirá; el crecimiento continuado en la demanda de combustibles; las nuevas plantas termo-intensivas de pulpa y papel en Cali y otras ciudades; las primeras fabricaciones de grandes equipos de refrigeración industrial; varias nuevas escuelas de ingeniería mecánica y metalúrgica; la adopción de los hornos de inducción para fundir metales y su difusión en el país; los primeros aviones a motor "jet" que llegaron al país; las primeras plantas petroquímicas, en Mamonal (Cartagena); la primera fábrica de dinamita, en Soacha (Cundinamarca); la primera planta carbotérmica, en Nare (Antioquia), para producir carburo de calcio; la primera planta cementera por vía seca, en Tolúviejo (Bolívar); la primera planta industrial para liofilizar, en Chinchiná (Caldas), para hacer café soluble. En 1972 se descubrieron los primeros campos grandes de gas natural, en la plataforma marina continental de la Guajira.

La historia más reciente está en la memoria común del país y no presenta nuevos ni grandes sucesos termoenergéticos que justifiquen tratar estos últimos tres decenios del siglo XX en Colombia. El lector que se interese puede consultar los libros de Poveda Ramos que se relacionan en la bibliografía.

PRODUCCIÓN DE CARBÓN EN COLOMBIA 1948 - 1997 (Cantidades en miles de toneladas métricas)

AÑO	CANTIDAD	AÑO	CANTIDAD
1948	1150	1973	3360
1949	1178	1974	3600
1950	1180	1975	3800
1951	1200	1976	3647
1952	1230	1977	3830
1953	1180	1978	3809
1954	1200	1979	3778
1955	1230	1980	4112
1956	1550	1981	4325
1957	1850	1982	4669
1958	2000	1983	5192
1959	2000	1984	6637
1960	2300	1985	8974
1961	2500	1986	10737
1962	2600	1987	13454
1963	2800	1988	15277
1964	3000	1989	18469
1965	3200	1990	20468
1966	3000	1991	20830
1967	3100	1992	23300
1968	3100	1993	21223
1969	3317	1994	22665
1970	2500	1995	25740
1971	2800	1996	29232
1972	2900	1997	40000 aprox.

Fuente: Documento de la Empresa Colombiana de Carbones

BIBLIOGRAFÍA

- ASHTON, T.S. La Revolución Industrial. México: Fondo de Cultura Económica, 1950. 195 p.
- ASIMOV, Isaac. Enciclopedia biográfica de ciencia y tecnología. Madrid: Revista de Occidente, 1973. 782 p.
- . Cronología de los descubrimientos. Barcelona: Editorial Ariel, 1989. 865 p.
- ASTIGARRAGA Urquiza, Julio. Hornos de arco para fusión de arco. Madrid: Mc Graw-Hill, 1995. 192 p.
- ATKINS, P.W. La segunda ley. Barcelona: Prensa Científica, 1992. 230 p.
- BERNAL, John D. Ciencia e industria en el siglo XIX. Barcelona: Martínez Roca, 1973. 191 p.
- . Ciencia e industria en el siglo XIX. Barcelona: Martínez Roca, 1973. 193 p.
- BOORSTIN, Daniel J. The discoverers. New York: Vintage Books, 1985. 745 p.
- BRUN, Edmond. Les chaleurs spécifiques. París: Collection Armand Colin, 1940. 222 p.
- BURKE, James. Connections. London: Little, Brown and Company, 1978. 304 p.
- CARDWELL, Donald. From Watt to Clausius. New York: Heineman and Cornell University Press, 1971. 280 p.
- . The Norton history of technology. New York: W.W. Norton and Company, 1994. 565 p.
- CASTELLAN, Gilbert W. Físicoquímica. Wilmington: Addison Wesley Iberoamericana, 1986. 835 p.
- CIPOLLA, Carlo M. Historia económica de la población mundial. Barcelona: Ed. Crítica, 1982. 178 p.
- . Guns, sails and empires. Technological innovation and European expansion 1400-1700. New York: Barnes and Noble, 1996. 192 p.
- CHALLONER, Jack. L'Energie. París: Gallimard, 1993. 63 p.
- CROFT, Terrell. Practical heat. New York: McGraw Hill, 1939. 726 p.
- DAMPIER, William Cecil. Historia de la ciencia. Madrid: Aguilar, 1950. 734 p.
- DAVIES, Eryl. Inventions. Ontario: Firefly Books, 1995. 160 p.
- DE CAMP, L. Sprague. Heroes of American invention. New York: Barnes and Noble, 1993. 290 p.
- DERRY, T.K. y Trevor I. Williams. A Short history of technology. Oxford: Oxford University Press, 1960. 783 p.
- EMSCHWILLER, Guy. Chimie et thermodynamique. París: Collection Armand Colin.
- FABRY, Charles. Propagation de la chaleur. París: Collection Armand Colin, 1949. 215 p.

- FAIRES, Virgil Moring. Applied thermodynamics. New York: Macmillan, 1940. 450 p.
- FLINN, M.W. Origins of the Industrial Revolution. Londres: Longmans and Green Co., 1966. 114 p.
- GENERAL Motors. The story of power. Ann Arbor, Mich.: General Motors Corporation, 1958. 51 p.
- GIES, Frances and Joseph. Cathedral, forge and waterwheel. Technology and invention in the Middle Ages. New York: Harper Collins Publishers, 1994. 357 p.
- GILLE, Bertrand. Histoire de la métallurgie. París: Presses Universitaires de France, 1966. 126 p.
- GOUDSBLOM, Johan. Fire and civilization. London: The Penguin Press, 1992. 247 p.
- GREENE, Jay E. 100 Grandes científicos. México: Ed. Universo, 1992. 446 p.
- GRIMBERG, Carl. Historia universal Daimon. Tomo 11. El siglo del Liberalismo. Madrid: Daimon, Manuel Tamayo, 1967. 432 p.
- HALL, A. Rupert. La Revolución Científica 1500-1750. Barcelona: Editorial Crítica, 1985. 549 p.
- HELLEMANS, Alexander y Bunch, Bryan. The timetables of science. New York: Simon and Schuster, 1988. 656 p.
- HENSELING, Karl Otto. Bronze, Eisen, Stahl. Hamburg: Rowohlt Taschenbuch Verlag GmbH, 1984. 219 p.
- HUMPHREYS, Mary Beggs, Humphreys, Hugh Gregor y humphreys, Darlow. The Industrial Revolution. London: George Allen and Unwin Ltd., 1976. 48 p.
- JAMES, Peter y Thorpe, Nick. Ancient inventions. New York: Ballantine Books, 1994. 672 p.
- JOOS, Georg. Theoretical physics. New York: Dover Publications Inc., 1958. 885 p.
- KRANZBERG, Melvin y Purcell, Carrol W. Historia de la tecnología. La técnica en Occidente de la Prehistoria a 1900. 2 v. Barcelona: Gustavo Gili, 1981. 876 p.
- LEICESTER, Henry M. The historical background of chemistry. New York: Dover Publications, 1971. 260 p.
- LINNELL, Paul. Simply switch on...! South Wigston, England: Woodland Books, 1995. 40 p.
- LOCQUENEUX, Robert. Préhistoire et histoire de la thermodynamique classique. París: Librairie A. Blanchard, 1996. 332 p.
- MESSADIÉ, Gérald. Los grandes inventos de la humanidad. Madrid: Alianza Editorial, 1995. 315 p.
- MOTZ, Lloyd y Jefferson Hane Weaver. The story of physics. New York: Avon Books, 1989. 412 p.
- MUMFORD, Lewis. Técnica y civilización. Madrid: Alianza Editorial, 1971. 522 p.
- O'BRIEN, Robert. Machines. New York: Time Life International, 1965. 200 p.
- PARKER, Sybil P., ed. Mc Graw Hill concise encyclopedia of science and technology. New York: Mc Graw Hill, 1984. 2065 p.

- . Mc Graw Hill encyclopedia of physics. New York: Mc Graw Hill, 1993. 1624 p.
- PARTINGTON, J.R. A short history of chemistry. New York: Dover, 1957. 415 p.
- POVEDA RAMOS, Gabriel. Ingeniería e historia de las técnicas. Bogotá: Colciencias, 1993. 2 v.
- . Los vapores fluviales en Colombia. Bogotá: Colciencias, 1998. 425 p.
- . Minas y mineros de Antioquia. Bogotá: Banco de la República, 1984. 175 p.
- . Políticas económicas, desarrollo industrial y tecnología en Colombia. Bogotá: Colciencias, 1977. 163 p.
- . Ingeniería e historia de las técnicas. Bogotá: Colciencias, 1993. 2 v.
- PLANCK, Max. Treatise on thermodynamics. New York: Dover Publications Inc., 1926. 297 p.
- PLUM, Werner. Ciencias naturales y técnica en el camino de la Revolución Industrial. Bonn: Hildesheimer Druck-und Verlags Gmb H., 1975. 154 p.
- REY PASTOR, Julio y Drewes, N. La técnica en la historia de la humanidad. Buenos Aires: Atlántida, 1957. 326 p.
- RICHTMEYER, F.K. y Kennard, E.H. Introduction to modern physics. New York: Mc Graw Hill, 1947. 759 p.
- ROSSOTTI, Hazel. Fire. Oxford: Oxford University Press, 1993. 288 p.
- SEARS, Francis W. Thermodynamics, the kinetic theory of gases and statistical mechanics. Cambridge, Mass, 1953. 390 p.
- SÉDILLOT, René. Historia del petróleo. Bogotá: Editorial Pluma, 1977. 303 p.
- SEMAT, Henry. Física atómica y nuclear. Madrid: Aguilar, 1959. 566 p.
- SKROTSKI, Bernhardt G.A. Basic thermodynamics. New York: Mc Graw Hill, 1963. 504 p.
- SLATER, J.C. Introduction to chemical physics. New York: Mc Graw Hill, 1939. 521 p.
- STREETTER, Arthur y William Alexander. Metals in the service of man. London: Penguin Books, 1995. 309 p.
- "The HISTORY of Technology", En: The New Enciclopedia Britannica. Macropaedia. 15th De. Chicago; 1995. Vol.28, p. 440-447.
- USHER, Abbott Payson. A history of mechanical inventions. New York: Dover, 1988. 450 p.
- VARCHIM, Joachim y Radkau, Joachim. Kraft, energie und arbeit. Energie und Gesellschaft. Reinbeck bei Hamburg, 1981. 324 p.
- WHITE, Lynn. Tecnología medioeval y cambio social. Barcelona: Paidós, 1990. 190 p.
- WILSON, Mitchel. Energy. New York: Time-Life International, 1965. 200 p.
- ZEMANSKY, Mark W. Temperaturas muy bajas y muy altas. México: Van Nostrand Momentum Books, 1968. 139 p.

ÍNDICE ONOMÁSTICO

- | | |
|-----------------------------------|--------------------------|
| Abel, Frederick Augustus | 1827 - 1902 |
| Amador, Carlos Coriolano | Fines s. XIX Ppio. s. XX |
| Amagat, Emile Hilaire | 1841 - 1915 |
| Amontons, Guillaume | 1663 - 1705 |
| Andrews, Thomas | 1813 - 1885 |
| Appert, Francois Nicolás | 1750 - 1841 |
| Aristóteles | 384 - 322 a.C. |
| Arquimedes | 287 - 212 a.C. |
| Arquitas | ca. 420 a.C. |
| Artsimovich, Lev Andreevich | 1909 - 1973 |
| Avogadro, Amadeo | 1776 - 1856 |
| Bacon, Francis | 1561 - 1626 |
| Bacon, Roger | ca. 1214 - 1294 |
| Batu Khan | ca. 1203 - 1255 |
| Bauer, Georg (Agricola, en latín) | 1494 - 1555 |
| Becher, Johann Joachim | 1635 - 1682 |
| Becquerel, Henry | 1852 - 1908 |
| Bednorz, Johannes Georg | FI.ca. 1987 |
| Benz, Karl Friedrich | 1844 - 1929 |
| Bergius, Friedrich | 1884 - 1949 |
| Bernouilli, Daniel | 1700 - 1782 |
| Bessemer, Henry, Sir | 1813 - 1898 |
| Bethe, Hans | 1906 - ? |
| Biot, Jean Baptiste | 1774 - 1862 |
| Birdseye, Clarence | 1886 - 1956 |
| Biringuccio, Vanochio | 1480 - 1539 |
| Birkinshaw | |
| Black, Joseph | 1728 - 1799 |
| Blacket, John | |
| Boerhave, Hermann | 1668 - 1738 |
| Boltzmann, Ludwig | 1844 - 1906 |
| Bordas, Francois | |
| Bosch, Robert | FI. ca. 1910 - 1915 |
| Boulton, Mathew | 1728 - 1809 |

Boussingault, Jean Baptiste	1802 - 1887
Boyle, Robert	1627 - 1691
Braca, Giovanni	FI.ca. 1630
Brand, Hennig	1630 - ca. 1670
Braun, Werner von	1912 - 1977
Brayton, George B.	1830 - 1892
Bridgeman, Percy William	1882 - 1961
Brown, Robert	1773 - 1858
Brunel, Isambart K.	1806 - 1859
Bunsen, Robert Wihelm	1811 - 1899
Butler, Edward	? ?
Cailletet, Louis - Paul	1832 - 1913
Caldas, Francisco José	1768 - 1816
Callinico (Callinicus)	620 a. C. ?
Cannizzaro, Stanislao	1826 - 1910
Carnot, Nicolás Léonard Sadi	1796 - 1832
Carré, Ferdinand	1824 - 1900
Carrier, Willis H.	1876 - 1950
Caus, Salomón de	1567 - 1630
Celsius, Anders	1701 - 1744
Charles, Jacques Alexandre - César	1746 - 1823
Christin, Jean Pierre	FI. ca. 1745
Cisneros, Francisco Javier	1836 - 1898
Clapeyron, Benoit Pierre - Emil	1799 - 1864
Clark, Dugald	1854 - 1932
Claudee, Georges	1870 - 1960
Clausius, Rudolf Julius Emmanuel	1822 - 1888
Crawford, Adair	? 1795
Ctesiblus	ca. 170 a. C.
Cugnot, Joseph Nicolas	1725 - 1804
Curie, Pierre	1859 - 1906
D' Arsonval, Jacques - Arséne	1851 - 1940
Dagenhardt, Karl	? ?
Daimler, Gottlied Wilhelm	1834 - 1900
Dallery, Adam	
Danies, Carlos Vicente	FI. ca. 1905 - 1910
Darby, Abraham III	1735 - 1791
Dary, Humphy, Sir	1778 - 1828

Debye, Peter Joseph Wilhelm	1884 - 1966
Desaguliers, John Theofile	1683 - 1744
Dewar, James	1842 - 1923
Diesel, Rudolf	1858 - 1913
Domberger, Walter R.	FI. ca. 1935
Drake, Edwin Larentine	1819 - 1880
Drude, Paul Karl Ludwig	1863 - 1906
Dulong, Pierre - Louis	1785 - 1838
Dutton, Clarence Edward	1841 - 1912
Edison, Thomas Alva	1847 - 1931
Eglin, Raphael (Hapelius, en latín)	FI. ca. 1605 - 1610
Einstein, Albert	1879 - 1955
Elbers, Juan Bernardo	1776 - 1853
Empédocies	490 - 430 a. C.
Ericsson, John	1803 - 1889
Evans, Oliver	1755 - 1819
Fahrenheit, Grabriel Daniel	1687 - 1736
Faraday, Michael	1791 - 1867
Farmer, Moses G.	1820 - 1893
Ferdinando II gran duque de Toscane	1610 - 1670
Fermi, Enrico	1901 - 1954
Fillón de Bizancio	ca. 300 a. C.
Fitch, John	1743 - 1798
Ford, Henry	1863 - 1947
Forest, Ferdinand	1851 - 1914
Fourier, Jean Baptiste, barón	1768 - 1830
Franklyn, Benjamín	1706 - 1790
Franz, Richard	1807 - 1902
Fulton, Robert	1765 - 1815
Gadolin, Johan	1760 - 1853
Galileo, Galilei	1564 - 1642
Garcés, Modesto	1845 - 1906
Gay - Lussac, Joseph - Louis	1778 - 1850
Gengis Khan	1160 ? 1227
Gesner, Abraham	1797 - 1864
Giauque, William Francis	1895 - 1982
Gibbs, Josiah Willard	1839 - 1903
Glauco de Chios	ca. 700 - 600 a. C.

Goddard, Robert Hutchings	1882 - 1945
Gorrie, John	1803 - 1855
Greiff, Carlos Segismundo de	1793 - 1870
Greiffestein, Carlos	ca. 1834 - 1894
Guerike, Otto von	1602 - 1686
Guillaume, Charles Edouard	1861 - 1938
Hadley, William	
Hahn, Otto	1879 - 1968
Haimont, Johann Baptiste von	1576 - 1644
Hampson, William Langley	1854 - 1926
Harkins, William Draper	1873 - 1951
Haynes, Elswood	
Helmholtz, Ludwig Ferdinand	1812 - 1894
Helmont, Johann Baptiste van	1579 - 1644
Heráclito	537 - 470 a. C.
Herón	ca. 20 - 105 d. C.
Hérault, Paul Louis Toussaint	1863 - 1914
Herschel, William, Sir	1738 - 1822
Hertz, Heinrich Rudolf	1857 - 1894
Hess, Germaín Henri	1802 - 1850
Hewitt, Peter C.	FI. ca. 1920
Hitler, Adolf	1889 - 1945
Honod, George	FI. ca. 1910
Hooke, Robert	1635 - 1703
Huyghens, Jan Christian	1629 - 1695
Jablockoff, Paul	1847 - 1914
Jeans, James	1877 - 1946
Johnson, Alejandro	1824 - 1877
Jouffroy D'Abbans, Claude	1751 - 1832
Joule, James Prescott	1818 - 1889
Kammerling - Onnes, Heike	1853 - 1926
Kapitza, Pieter	1894 - 1984
Keesom, Willem Hendrick	1876 - 1956
Kelvin, Lord Thomson, William	1824 - 1907
King, Charles B.	? ?
Kirchhoff, Gustav Robert	1824 - 1887
Lanchester, Friedrich W.	1868 - 1946
Langen, Eugen	1833 - 1895

Langley, Samuel Pierpont	1834 - 1906
Laplace, pierre Simon, marqués de	1749 - 1827
Laval, Karl Gustav de	1845 - 1913
Lavoisier, Antoine Laurent	1743 - 1794
Le Chatelier, Hemi - Louis	1850 - 1936
Lebon, Phillipe	1767 - 1804
Lenoir, Jean - Joseph - Étienne	1822 - 1900
Leslie, John, Sir	1766 - 1832
Leupold, Jakob	1624 - 1727
Leurichon	FI. ca. 1625
Levason, Emil	? ?
Lewis, Gilbert Newton	1875 - 1946
Liebig, Justus von, barón	1803 - 1873
Linde, Karl Paul Gottfried von	1842 - 1934
Lomonosov, Michael Ivanovich	1711 - 1765
London, Heinz	1907 - 1970
Lorentz, Hendrik Antoon	1853 - 1928
Lundström, Johann	1815 - 1888
Mamby, Aaron	
Marco el Griego (Marcus Graecus)	S. XIII - XIV
Mariotte, Edmé	1620 - 1684
Markus, Siegfried	1831 - 1899
Martínez, Diego	FI. Ca 1900 - ca. 1915
Masters, Thomas	
Maxwell, James Clerk	1831 - 1879
Mayer, Julius Robert von	1814 - 1878
Mayow, John	1641 - 1679
McCormick, Cyrus	1809 - 1884
McNaungh, william	1813 - 1881
Meitner, Lise	1878 - 1968
Mendeleiev, Dimitri Ivanovich	1834 - 1907
Midgley Jr., Thomas	1889 - 1944
Mohr, Friedrich	1806 - 1879
Moissan, Ferdinand Frédéric Henry	1852 - 1907
Moore, James Tyrrel	1803 - 1881
Moreno, Mariano	FI. ca. 1970 - 1990
Mosquera, Tomás Cipriano de	1798 - 1878
Mueller, Karl Alex	FI. ca. 1986

Murdock, William	1754 - 1839
Mutis, Jose Celestino	1732 - 1811
Napoleón	1769 - 1821
Nernst, Walther Hermann	1864 - 1941
Newcomen, Thomas	1663 - 1729
Newton, Isaac	1642 - 1727
Nisser, Pedro	ca. 1800 - 1878
Nobel, Alfred Bemhardt	1833 - 1896
Nollet, Jean - Antoine	Fl. ca. 1740 - 1750
Núñez, Rafael	1825 - 1894
Ohain, Pabst von	Fl. ca. 1940
Ohm, Georg Simon	1787 - 1854
Oppenheimer, Robert	1904 - 1967
Ostwald, Wilhelm	1853 - 1932
Otis, Elisha Graves	1811 - 1861
Otto, Niklaus August	1832 - 1891
Panhard, Rene	1841 - 1908
Papin, Denis	1647 - 1712
Parsons, Charles Algemon, Sir	1854 - 1931
Pedro I El Grande	1672 - 1725
Peltier, Jean - Ch - Ath.	ca. 1795 - 1845
Pelton, Lester A.	1829 - 1908
Perkins, Jacob	1766 - 1849
Perrin, Jean - Baptiste	1870 - 1942
Petit, Alexis Therese	1791 - 1820
Peugeot, Daniel	Fl. ca. 1890
Pickard, James	Fl. ca. 1780
Pictet, Raoul	1846 - 1929
Planck, Max Karl Ernest Ludwing	1858 - 1947
Poisson, Simeon Denis	1781 - 1840
Ponce de León, Manuel	1829 - 1899
Porta, Gianbattista della	1535 - 1615
Prévost, Pierre	1751 - 1839
Priestley, Joseph	1733 - 1804
Prout, William	1785 - 1850
Ramos, Abelardo	1852 - 1906
Randall, Merle	1888 - 1950
Rankine, William John Macquorn	1820 - 1872

Raoult, Francois - Marie	1830 - 1901
Réaumur, René Antoine Ferchault de	1683 - 1757
Regnault, Victor	1810 - 1878
Reyes, Rafael	1848 - 1921
Richardson, Owen	1879 - 1959
Rivaz, Isaac de	1752 - 1829
Rochas, Alphonse Beau de	1815 - 1891
Rontgen, Wilhelm Konrad	1845 - 1923
Rumford, Barón de	1753 - 1814
Samper Brush, Hermanos	Fl. Ca. 1885 - ca. 1915
Savery, Thomas	1650 - 1715
Scheele, Karl Wilhelm	1742 - 1786
Schmidt, Wilhelm	? ?
Seebeck, Thomas Johann	1770 - 1831
Seguín, Marc	1786 - 1875
Sennert, Daniel	1572 - 1637
Siemens, William, Sir	1823 - 1883
Simons, Franz Eugen Francis	1893 - ?
Sobrero, Ascanio	1812 - 1888
Somerset, Edward, Marqués de Worcester	Fl. ca. 1660
Stahl, Georg Ernest	1660- 1734
Steffan, Joseph	1835 - 1893
Stephenson, George	1781 - 1848
Stephenson, Robert	1803 - 1859
Stevens, John Cox	1749 - 1838
Stirling, Robert	1790 - 1878
Strassmann, Fritz	1902 - 1980
Strutt, John William, Lord Rayleigh	1842 - 1919
Swan, Joseph Wilson	1828 - 1914
Symington, William	1763 - 1831
Tales de Mileto	640 - 546 a. C.
Tylor, Frederick Winslow	1856 - 1915
Tesla, Nicola	1856 - 1943
Theodoro de Samos	530 a. C.
Theofrasto	371 - 300 a. C.
Thompson, Benjamín, Barón véase Rumford	1753 - 1814
Thompson, Elihu	1853 - 1937
Thompson, William (Lord Kelvin)	1824 - 1907

Torricelli, Evangelista	1608 - 1647
Trevithick, Richard	1771 - 1833
Trujillo, Julián	1828 - 1883
Tsen Kung - Liang	ca. 1045
Tsiolkovsky, Konstantin E.	1857 - 1935
Tu Shih	Siglo I d. C.
Tudor, Frederic	1783 - 1864
Tyndall, John	1820 - 1893
Usey, Harold C.	1893 - 1981
Vinci, Leonardo da	1452 - 1519
Vitruvio, Marco Pollio	Ca. 70 - 25 a. C.
Volta, Alessandro	1745 - 1827
Waals, Jahannes Diederick van der	1837 - 1923
Walker, Edward	ca. 1799 - ca. 1860
Wankel, Félix	1902 - 1988
Watt, James	1736 - 1819
Wedgewood, Josiah	1730 - 1795
Westinghouse, George	1846 - 1914
Whitney, Eli	1765 - 1825
Whittle, Frank	FI. ca. 1937
Wiedemann, Gustav Heinrich	1826 - 1899
Wien, Wilhelm	1864 - 1928
Wiesner, Jacobo	FI. Ca. 1800 - ca. 1825
Wilkinson, John	1728 - 1808
Winkler, Alexander	1838 - 1904
Winsor, Frederick	1763 - 1830
Wllcke, Johan Carl	1732 - 1769
Wroblewski, Zygmunt Florenty von	1845 - 1888
Young, Thomas	1773 - 1829



Este "cuaderno" se terminó de imprimir en el Taller de la Editorial de la Universidad Pontificia Bolivariana en el mes de agosto de 2002. Sistema de Impresión Digital.

ISSN 0124755-7



**Colección de
Avanzada**