

El gran músculo mecánico: la máquina de vapor

*Asdrúbal Valencia Giraldo**

(Recibido el 28 de marzo de 2001)

Resumen

Se hace un estudio de los antecedentes, génesis, concepción y desarrollo de la máquina de vapor. Se analizan las consecuencias técnicas, tecnológicas, científicas, industriales, económicas y sociales de la utilización de la máquina de vapor, así como su influjo en la modelación del mundo moderno y las ideas de la civilización industrial.

----- *Palabras clave:* máquina de vapor, transformación de energía, Revolución Industrial, locomotoras, barcos de vapor.

The great mechanical muscle: the heat engine

Abstract

A study is performed on the antecedents, genesis, conception and development of the steam engine. Technical, technological, scientific, industrial and economic consequences of steam engine utilization are analyzed, as well as the influence on the modern world and industrial civilization modeling.

----- *Key words:* steam engine, energy transformation, industrial revolution, steam locomotive, steamboat.

* Profesor del Departamento de Ingeniería de Materiales. Universidad de Antioquia. avalen@udea.edu.co.

Introducción

Una sociedad industrial se puede visualizar como un sistema complejo que degrada energía de alta calidad hasta convertirla en calor residual asociado con entropía y extrae durante el proceso el trabajo necesario para producir la más variada cantidad de bienes y servicios. Aunque la primera ley de la termodinámica dice que no se puede crear energía de la nada, esa misma ley indica cómo convertir cierta forma de energía en otra, en trabajo o en calor. Utilizando este principio, de manera racional o no, la civilización humana se ha erigido sobre los sucesivos hallazgos de nuevas fuentes energéticas y su encauzamiento por caminos cada vez más eficaces y perfeccionados. Puede decirse que los mejores descubrimientos en la historia de la humanidad entrañaron métodos para convertir la energía.

Ejemplo de lo anterior es el descubrimiento del fuego, que implica convertir en calor y luz la energía química de un combustible como la madera. Esto ocurrió hace aproximadamente medio millón de años, lo que proporcionó al hombre unas reservas prácticamente inagotables de energía y por ello es considerado como el mayor descubrimiento de la humanidad, el que elevó al hombre por encima de su primitivo nivel de animal. Sin embargo, y aunque parezca extraño, debieron de transcurrir milenios —en realidad hasta la invención de la máquina de vapor— para que el hombre discerniera una pequeña parte de sus inmensas posibilidades. Lo empleó para calentar e iluminar el hogar, para cocinar los alimentos, trabajar los metales, hacer cacharros de barro o vidrio... pero, más o menos a eso se redujo todo. Entre tanto se fueron aprovechando otras fuentes de energía, el músculo del hombre y los animales, el agua, el viento y otras pocas.

La subordinación de la potencia del fuego al hombre alcanzó su momento transcendental hacia fines del siglo XVII, aunque ya se habían manifestado algunos indicios tímidos en los tiempos antiguos. El inventor griego Herón de Alejandría construyó, durante los primeros siglos de la Era cristiana (no se puede siquiera situar su vida en un siglo concreto) cierto número de artificios

movidos por la fuerza del vapor. Empleó la expansión del vapor para abrir puertas de templos, hacer girar esferas, etc. El mundo antiguo cuya decadencia se acentuaba ya por entonces, no pudo asimilar esos adelantos prematuros. En los tiempos medievales se perfeccionó el aprovechamiento de la fuerza animal —con el invento de arneses más adecuados y los estribos de las sillas—, del agua, con las ruedas hidráulicas, y del viento, mediante los molinos y las velas [1, 2].

El desarrollo del molino de torreta en Italia hacia el final del siglo XV fue la última adición significativa a la lista de motores primarios hasta la invención de la máquina de vapor. A la Edad Media debe dársele entonces todo el crédito por el trabajo preliminar en el desarrollo de motores primarios de baja potencia, pero es probable que los siglos XVI y XVII estuvieran marcados por un desarrollo substancial en el alcance y carácter de los usos de la potencia. Sin embargo, no hay evidencia real sobre la cantidad de trabajo que podían realizar estos motores primarios usados en el siglo XVI. A muchas máquinas se les daban formas que simplificaran su acople para ser movidas por estos motores capaces de producir rotación, pero hasta que la fuerza no se abarató, no hubo el propósito de moverlas desde una planta especializada de potencia.

Sin embargo, habían aparecido nuevas demandas para la energía, que ejercían una presión positiva hacia su producción en unidades relativamente grandes. Los pueblos más extensos empezaron a percibir la economía de crear un suministro de agua general para la ciudad y el agotamiento de los minerales fáciles de extraer hacía cada vez más esencial llevar las minas hasta profundidades que estaban más allá del alcance de los viejos aparatos hidráulicos para elevar el agua. Toledo fue provista de agua en 1526 por un aparato muy complicado diseñado por el ingeniero italiano Juanello Turiano. Estos sistemas se generalizaron y el volumen de agua se lograba multiplicando el número de bombas y ruedas hidráulicas. Las minas presentaban un problema más difícil, porque no era fácil tener filas de bombas que alcanzaran la profundidad requerida [3].

A principios del siglo XVI, los métodos conocidos para elevar agua eran casi los mismos conocidos por Herón de Alejandría. El único progreso fue la aplicación de las energías animal e hidráulica hasta límites muy superiores a las capacidades mecánicas de la antigüedad. En la práctica, las viejas formas de varios aparatos hidráulicos habían sido transformadas un poco durante la Edad Media [4].

Los problemas anteriores incitaron a los inventores a intentar controlar la “fuerza impelente” del fuego, pues ya habían sido sugeridas las máquinas de vapor. La traducción de la *Pneumática* de Herón fue publicada en Europa en 1575, y una serie de inventores del siglo XVI, Porta, Cardán, De Caus hicieron varias sugerencias para utilizar la energía del vapor en la realización del trabajo [5]. Para funcionar con éxito, una máquina de este tipo tenía que cumplir tres requisitos básicos. En primer lugar, había de ser un medio mecánico seguro y fiable para controlar la “fuerza impelente” del fuego; en segundo lugar debía satisfacer una necesidad claramente reconocida y finalmente debía demostrarse capaz de satisfacer esa necesidad a menor costo que cualquier otra fuente de energía reconocida: la fuerza animal, el viento o el agua. La manera como se logró cumplir con estos requisitos constituye parte de la historia que se cuenta en este trabajo.

Se dice que el 17 de junio de 1543 Blasco de Garay, un oficial naval de la armada de Carlos V, impulsó un barco de 200 toneladas, por medio del vapor, en la bahía de Barcelona. No existen datos de esta maquinaria, excepto que había una gran caldera de cobre, y que tenía ruedas de paletas suspendidas en los lados de la nave. Como todos los inventores antiguos, se negó a explicar el mecanismo. Los testimonios existen en los archivos españoles y su autenticidad no se ha puesto en duda. Esto indicaría que los barcos de vapor fueron inventados en España y que Blasco de Garay debe reputarse como el inventor de la primera máquina de vapor, de la que no quedó evidencia física [6].

En 1629 Giovanni Branca concibió la idea de una turbina de acción, que pretendía impulsar una

máquina de machacar mediante toscos engranajes de madera. Es interesante hacer notar que trabajaba sobre la base de un principio científico diferente al de la eolipila o turbina de Herón. Aquí el vapor adquiría alta velocidad al expandirse hacia una presión más baja a través de un orificio estacionario. Este vapor dotado de alta velocidad golpeaba, entonces, sobre las paletas de una turbina móvil, donde cambiaba su dirección y disminuía su velocidad. La cantidad de movimiento del vapor decrecía, y las paletas recibían un impulso: la fuerza resultante hacía que la turbina rotara y ejecutara trabajo. Las turbinas diseñadas de esta forma se llaman hoy turbinas de acción.

En 1630 el segundo marqués de Worcester inventó una bomba de vapor, transformando el instrumento de juguete científico, que era la eolipila, en mecanismo práctico. En 1633 el marqués consiguió una patente para su máquina “de mando de agua”, y proyectó desarrollar unas obras hidráulicas para suministrar agua a los habitantes de Londres. No resultó nada de aquello, pero fue el inicio de un proceso de invención que necesitó de otros desarrollos antes de llegar a su culminación [7].

Los estudios sobre el vacío y la presión atmosférica realizados después de Torricelli, Viviani y Pascal podrían parecer irrelevantes para el problema de la potencia, pero no lo fueron. El libro de Otto von Guericke *Experimenta nova Magdeburgica de vacuo spatio* (1672) describe su invento de la bomba de aire y los experimentos realizados con ella. Von Guericke consiguió hacer vacío en gran escala y las consecuencias de su trabajo fueron de largo alcance. Las ilustraciones del libro eran excelentes, lo mismo que espectaculares sugerentes. La más conocida es, quizá, una doble página que muestra dos reatas de ocho caballos cada una que intentan separar dos semiesferas unidas de aproximadamente 30 cm de diámetro, de cuyo interior se había extraído todo el aire. Otra imagen muestra un uso práctico de este fenómeno. Se extrae el aire de un cilindro vertical con un pistón de modo que la presión atmosférica impulse el pistón hacia abajo. Mediante una cuerda fijada al pistón y que pase por

una polea situada encima del cilindro, se puede levantar una carga muy pesada. Aquí estaba la sugerencia más clara posible: descubriendo un método sencillo y eficaz de extraer el aire de un cilindro se dispondría de una nueva fuente de fuerza [8].

Casi al mismo tiempo Christian Huygens y Abbé de Hautefeuille propusieron por separado hacer estallar una carga de pólvora para expeler el aire, pero el método habría sido muy costoso y las dificultades prácticas demasiado grandes. Una idea más fructífera fue la propuesta por Denis Papin (1647-1714), en 1690. Consistía en hervir agua en la base del cilindro. El pistón ascendería por la presión del vapor hasta alcanzar el punto extremo, momento en el cual se retiraría el fuego, el cilindro se enfriaría y el vapor se condensaría. La presión atmosférica impulsaría entonces el pistón hacia abajo. Se trataba, en principio, de una respuesta casi totalmente acertada.

La máquina de Savery

Una idea diferente a las anteriores fue desarrollada por Thomas Savery (1650-1715), del condado de Devon, Inglaterra. Savery era un comerciante e inventor que ocupaba, además, un puesto oficial en el Almirantazgo británico. En 1698 se otorgó a Savery una patente por un motor para elevar agua por medio del fuego. En 1699 hizo una demostración práctica con un modelo de su invención en una asamblea de la Royal Society y, aquel mismo año, una ley del Parlamento amplió su monopolio de patente a 31 años. En 1702 expuso una explicación de su motor en un libro titulado *The Miner's Friend*.

Un tubo que parte de una caldera transporta vapor, pasando por un grifo de cierre, hasta lo alto de un gran recipiente de hierro; otro tubo, que parte de la base del recipiente, transporta el vapor a un tubo largo y vertical. Encima y debajo del punto donde el tubo de vapor se une al tubo vertical hay válvulas que se abren hacia arriba. El extremo inferior del tubo vertical que descende menos de diez metros por debajo del recipiente, está sumergido en el agua que se ha de elevar;

el extremo superior está conectado con una cubeta. El vapor de la caldera fluye a través de la válvula superior y es expulsado por el extremo superior del tubo vertical. Entonces, el grifo de cierre debe estar cerrado y se ha de verter agua fría sobre el recipiente de metal para condensar el vapor del interior, que dejará un vacío. El agua, impulsada por la presión atmosférica, ascenderá por el tubo vertical hasta llenar el recipiente. En este momento se abre el grifo de cierre y la alta presión hace salir el agua del recipiente, que asciende por el tubo hasta la cubeta superior. Savery insiste en que no se expulse el vapor por la parte superior, pues sería un gasto innecesario.

Savery estaba familiarizado con las obras de Papin; la idea de condensar el vapor para crear el vacío no era, pues, original, pero la forma peculiar de su máquina plantea cuestiones interesantes. La técnica de impulsión y expulsión, de aspirar el agua y hacerla ascender, a continuación, por un tubo constituía una novedad. Hay pruebas de construcción de cuatro máquinas de este tipo, pero no se sabe hasta qué punto fue satisfactorio su funcionamiento.

Lo cierto es que esta máquina tenía serias limitaciones; por ejemplo, había que calentar el recipiente de hierro junto con el agua una vez por cada carrera o ciclo; la máquina resultaba extremadamente costosa. Vistas estas deficiencias, apenas habría merecido un análisis, de no haber sido la antecesora de la primera máquina de vapor con un funcionamiento indudablemente satisfactorio [9].

La máquina de Newcomen

En 1712 Newcomen y su ayudante John Calley, un plomero de Darmouth quien proporcionó la habilidad manual, crearon la primera bomba operada con vapor de tamaño grande y práctico, la cual fue instalada en Dudley Castle en Staffordshire. Este invento marca el comienzo efectivo de la utilización de nuevas fuentes de potencia, las cuales habían sido buscadas durante más de un siglo. Aunque la fuente activa de presión era la atmósfera, la operación real de-

pendía de la producción de vapor y prácticamente todas estas máquinas eran quemadoras de carbón.

Thomas Newcomen (1664-1729) procedía, como Savery, del sur de Devon. Era de profesión ferretero, con buena formación y cierta prosperidad. Es impensable que no supiera nada de las ideas de su paisano. Aunque su máquina estaba más cerca del modelo de Papin que Savery. Era una máquina bien realizada y su primera actuación con éxito estuvo precedida de una gran cantidad de trabajo de investigación y desarrollo [10].

Como se ha señalado, la contribución de Newcomen fue una mezcla ingeniosa de aparatos conocidos y sus propias ideas, ver figura 1. Utilizó las calderas y los hornos de los cerveceros para suministrar el vapor para los mismos cilindro y pistón usados antes en muchas aplicaciones y condensó el vapor debajo del émbolo dentro del cilindro para crear un vacío parcial que permitía al peso de la atmósfera de encima empujar el émbolo hacia abajo. En vez de usar el método de Savery de crear vacío asperjando agua fría sobre el exterior del cilindro y condensando el vapor, Newcomen roció el agua directamente dentro de su cilindro vertical. Esto condensaba el vapor, creaba el vacío, y permitía que la presión atmosférica forzara el pistón hacia abajo. Para hacer trabajar este jalón hacia abajo, conectó su

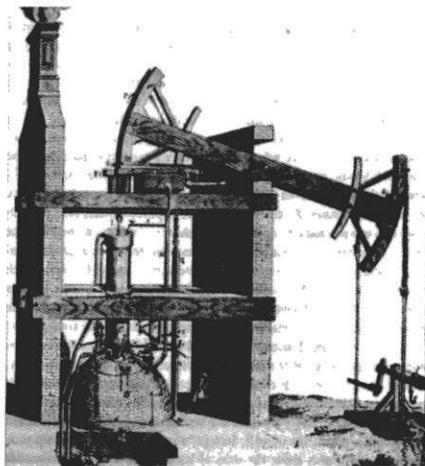


Figura 1 Una máquina de Newcomen [16]

barra con una cadena a una viga horizontal apoyada en el centro, balancín o viga andante, como se le conoció después, y amarró el otro extremo de la viga con cadena y barra al pistón o émbolo en el cilindro de la bomba. A medida que se admitía nuevo vapor debajo del primer pistón y se rompía el vacío, este pistón era elevado de nuevo por el peso en el otro extremo de la viga, y el pistón de la bomba bajaba a su posición original. Entonces el movimiento alternativo, hacia arriba y hacia abajo, era completo.

En los extremos de la viga había arcos circulares sobre los cuales rodaban las cadenas a medida que la viga se mecía y permitían que las barras subieran y bajarán en líneas verticales. Para abrir y cerrar sus válvulas en los momentos adecuados, Newcomen montó un mecanismo que las controlaba con el movimiento de la máquina. Así eliminó la operación manual de las válvulas y aumentó la frecuencia de los ciclos de potencia de 6 u 8 a 15 ó 16 por minuto.

La máquina de Newcomen fue una gran mejora respecto a la de Savery. La viga trabajadora, o balancín, de Newcomen fue durante algún tiempo un elemento fundamental en las máquinas alternativas. Sin embargo, las barras sólo trabajaban bajo tracción. La máquina trabajaba a presión igual o menor que la atmosférica, sin hacer uso de la potencia del vapor. Su eficiencia térmica, o la relación entre el combustible consumido y la potencia producida fue algo que debió ser investigado más a fondo y mejorado por sus sucesores.

Si bien la máquina de Newcomen era tosca e ineficiente, pues perdía enormes cantidades de calor con la condensación, superó en potencia a cualquier otra máquina anterior productora de energía, y mediante la aplicación de la potencia del vapor en la fuente misma, o sea la mina, era posible excavar más profundamente las minas y mantenerlas libres de agua.

En todos los aspectos más generales, como anota Mumford, la industria del siglo XVIII dependía de la mina, los productos de la mina dominaban su vida y determinaban sus inventos y perfeccionamientos característicos. Así la máquina de

Newcomen pasó de la mina a los refinadores de minerales, las fundiciones, las fábricas de textiles y fue cuando más reveló sus limitaciones. La fabricación masiva de hierro fundido y acero permitió la fabricación de puentes pero otro mercado para este material fue la construcción de las máquinas de Newcomen. Las primeras tenían cilindros de latón y calderas de cobre. La dificultad de fundir y barrenar un cilindro recto de un diámetro mucho mayor que el de cualquier cañón, pero con paredes mucho más delgadas, era evidentemente una exigencia excesiva para la industria del hierro. Con la difusión de la fundición con coque y el perfeccionamiento de los taladros, los cilindros de hierro resultaron más baratos que los de latón.

Muchas mejoras se hicieron a la máquina de Newcomen, especialmente en los materiales y la precisión mecánica, como ocurrió con las construidas por John Smeaton (1724-1792), sin embargo faltaban mejoras esenciales, tan profundas como las realizadas por James Watt. Hay que recordar a Smeaton porque fue el primero en llamarse a sí mismo ingeniero *civil*, en contraposición a los ingenieros *militares* de aquellos días.

La máquina de las minas Dannemora

El nombre de Marten Triewald es conocido por todos aquellos que han estudiado la historia de la máquina de vapor, pero pocos están familiarizados con su libro sobre la materia. En primer lugar es extremadamente raro y además fue escrito inicialmente en sueco, un idioma que no está muy extendido entre quienes estudian la historia de la ingeniería.

Triewald, nació en 1691, era hijo de un herrero que le dio una buena educación, al final de la cual se dedicó a los negocios en los que no le fue muy bien, de modo que en 1716 se trasladó a Inglaterra. En Londres conoció mucha gente, incluido el doctor Desaguliers, cuyas conferencias, sin duda, escuchó. Como cuenta en su libro, muy pronto Nicolás Ridley, un conocido de la infancia, lo invitó a que asistiera a la erección de una

máquina de Newcomen que se instalaba para bombear agua del pozo de una mina. De esta manera empezó su proximidad con la máquina. Su estancia en Inglaterra se extendió por diez años durante los cuales trabajó con máquinas y estudió física y mecánica.

En 1726 regresó a Suecia. Pronto dirigió la instalación de la máquina en Dannemora, fundó una empresa de buceo y rescate y fue socio de minas de hierro. Fue miembro de la Royal Society de Londres y uno de los fundadores de la Academia Real de Ciencias de Suecia. Murió en 1747 a la edad de 56 años.

La máquina de Dannemora fue la más grande de su tiempo; con excepción del cilindro, las partes metálicas fueron enviadas de Inglaterra. Sin embargo, a pesar de la precisión y el buen trabajo realizado con la erección de tales máquinas, Triewald no se alejó mucho de las máquinas corrientes en Inglaterra [11].

La máquina de Watt

James Watt (1736-1819) hizo cambios tan fundamentales, que junto con Savery y Newcomen se considera uno de los padres de la máquina de vapor. Como Smeaton, Watt empezó como un fabricante de instrumentos y llegó a ser un ingeniero practicante. Su interés por el mejoramiento de la máquina se incrementó cuando asistió a las disertaciones de Joseph Black (1728-1799) sobre el calor en el laboratorio de la Universidad de Glasgow.

Las reparaciones que James Watt tuvo que hacer a una máquina de Newcomen atrajeron su atención y los estudios de las pérdidas de calor por el calentamiento y enfriamiento del cilindro lo llevaron a considerar la importancia de hacer modificaciones substanciales. El concepto primario de cámara de condensación se le ocurrió en su caminata dominical y el día siguiente probó su idea en el laboratorio. Continuó usando el vapor a presión atmosférica y un vacío parcial, pero utilizó una cámara separada para condensar el vapor, conectada con el cilindro pero aparte de él, alrededor del cual puso una camisa de vapor para

mantener las paredes calientes. Esto ahorró tres cuartos del combustible requerido por la máquina de Newcomen.

Watt llegó a conocer muy bien la máquina de Newcomen y se dedicó a perfeccionarla; entre 1765 y 1769 hizo otras dos mejoras importantes a su máquina. Añadió una bomba de aire para mantener el vacío en su condensado bombeando hacia afuera el agua, el vapor condensado y el aire. También cerró el extremo superior abierto del cilindro, construyó alrededor de la barra del pistón lo que hoy se llama una caja de empaquetado o prensa-estopa, e introdujo vapor para empujar el émbolo hacia abajo. Las cuatro ideas nuevas en su patente son el condensador separado, la camisa caliente para el cilindro, la bomba de aire y el uso de la fuerza expansiva del vapor.

El trabajo de Watt se siguió desarrollando rápidamente a partir de este punto y en los modelos más grandes se llevó a cabo un gran número de refinamientos en el diseño y las funciones. La máquina atmosférica se convirtió en una máquina de vapor en el sentido estricto de la palabra, y en el proceso se transformó en una máquina bien diseñada, basada en una sólida percepción científica de las sobresalientes propiedades del vapor. Esta revisión crítica debe clasificarse como una invención estratégica con inventos suplementarios y una extraordinaria cantidad de nuevos análisis científicos.

Así pues, la invención y realización de una máquina eficaz accionada por vapor, y no por presión atmosférica, para impulsar maquinaria sin el empleo de una rueda hidráulica intermedia se debieron enteramente a Watt. La historia fundamental de su invento está bien documentada. Su concepto de la máquina llevó a Watt más allá de los límites de las instalaciones existentes para construir máquinas. Muchas de las partes presentaban dificultades para los fabricantes de hierro de aquel tiempo. El intento de construir una máquina completa se pospuso incluso después de haber obtenido la patente el 5 de enero de 1769.

También está bien historiado el desarrollo de la máquina, primero en colaboración con John

Roebuck, quien entró en bancarrota, y luego con el clarividente Mathew Boulton, persona afortunada y con determinación (1775). Todo ello ha sido descrito en varios estudios [12], sin embargo debe señalarse que, en vista de los problemas de manufactura y la competencia de fuentes de energía rivales, el lanzamiento de la máquina de Watt fue una proeza empresarial indudablemente importante [13].

En 1774 Watt inventó el motor de vapor de doble efecto y entre 1775 y 1800 construyó 289 máquinas en Inglaterra. Sus máquinas iniciales fueron todas bombas, que se alquilaban con opción de compra, pero era difícil cobrar y la demanda era pequeña fuera de Cornwall donde estaba el carbón. El tamaño de la empresa requería un volumen de producción tal que Boulton encontró que era esencial desarrollar una máquina para uso industrial general. Watt, por consiguiente, empezó a trabajar en el problema de producir movimiento rotatorio a partir del movimiento alternativo. Se obtuvieron patentes en 1781 y 1782 que cubrían la solución de tal problema. Así el inventor organiza el paralelogramo articulado para convertir el movimiento de vaivén en movimiento circular [14].

Este último desarrollo fue esencial para la utilidad general de la máquina y se debe considerar el logro culminante en la carrera de Watt. Del mismo modo, probó ser el punto de retorno en las actividades de la empresa, cuya prosperidad se aseguró muy pronto. La primera máquina rotatoria fue una de doble acción y cincuenta caballos de fuerza que la sociedad de Watt instaló en la Albion Fluor Mill en 1786. En menos de veinte años (tan grande fue la demanda de energía) instaló 84 máquinas en fábricas de algodón, 9 en fábricas de lana y tejidos de estambre, 18 en obras de canales y 17 en cervecerías [15].

El perfeccionamiento de la máquina de vapor por Watt exigió a su vez perfeccionamientos en las artes metalúrgicas. La construcción de la máquina en su tiempo era muy imprecisa; al horadar los cilindros se veía obligado a "tolerar errores en los mismos que llegan al espesor del dedo meñique en

un cilindro de 70 cm de diámetro”. Así pues, la demanda de máquinas mejores, llevó al desarrollo de la máquina de horadar de Wilkinson y a perfeccionamientos en los tornos y otros equipos para construir máquinas todas de metal.

La máquina de alta presión

El siguiente avance importante en la máquina de vapor fue la introducción de máquinas prácticas sin condensación. Aunque Watt había conocido el principio de este tipo de máquinas, no las había perfeccionado, quizás porque usaba el vapor a muy baja presión. Richard Trevithick (1771-1833) construyó una máquina sin condensación hacia 1798. Trevithick instaló el cilindro vertical dentro de la caldera; ésta servía también como camisa de vapor. Así eliminó la viga de trabajo o balancín y creó la primera máquina de acción directa de alta presión cuando puso el cilindro horizontal y conectó el pistón al cigüeñal con una biela. Un trabajo similar desarrolló el inventor estadounidense Oliver Evans (1755-1819).

Jonathan Hornblower nació en Inglaterra dos años después que Evans y diecisiete después de Watt. Miembro de una familia de distinguidos ingenieros, tuvo una educación mejor que la de Evans y, como era inglés, se convirtió en uno de los más poderosos competidores de Watt, a pesar de parecer siempre eclipsado por la mayor reputación y prestigio de éste. Aún así, Hornblower hizo una contribución fundamental al diseño de la máquina de vapor con sus máquinas de varias etapas; en ellas, el vapor a alta presión se usa en un cilindro y entonces, después de que se ha expandido y rebajado su presión, se pasa a otro cilindro, en el cual se expande más. Este era un adelanto fundamental que el inventor no podía comprender o explicar convenientemente con base racional y científica, simplemente porque no se había desarrollado la ciencia en que se basaba. Hornblower no pudo explotar adecuadamente su diseño debido a que las presiones que usaba eran demasiado bajas para aprovechar la doble expansión. Más aún, no contaba con valores exactos de las propiedades del vapor o relaciones termodinámicas que le hubieran permitido calcular correctamente

las dimensiones relativas de los dos cilindros. Después su socio, el ingeniero inglés Arthur Woolf (1776-1837), consiguió obtener un diseño mejor. Las máquinas originales de Woolf eran de dos cilindros, pero los tipos posteriores usaban expansión triple e incluso cuádruple. La ventaja es que se pierde menos energía calentando las paredes del cilindro, con el consiguiente aumento en la eficiencia de la máquina [16].

La máquina compuesta estaba destinada a ser muy importante en años posteriores, pero Watt no admitió en ese momento que la idea era nueva y fundamental, alegando usurpación de sus patentes. Sobrevino un largo y engorroso trámite judicial, ganado finalmente por la firma Boulton y Watt en 1799. Hornblower perdió, principalmente por no haber podido convencer al jurado de las ventajas teóricas que representaba su invento; desgraciadamente él no las entendía bien. La larga batalla legal terminó con la quiebra de Hornblower de la que nunca se recuperó. En otras circunstancias su mente creadora hubiera logrado mayor reconocimiento [17].

La locomotora

Un abate flamenco radicado en China parece haber sido el primero que produjo un vehículo que se movía por sí mismo. Hacia 1670 y usando la turbina de Herón, o eolípila, conocimiento mecánico que había adquirido en sus estudios, su propio ingenio y el tiempo libre que le dejaban sus labores entre los paganos de Beijing, Ferdinand Verbiest (1623-1688) construyó un carrito de juguete de madera liviana, de unos 60 cm de largo con el eje delantero conectado a la eolípila, alimentada por un recipiente lleno de carbones ardientes. Verbiest hizo que su vehículo se moviera en círculo [18].

El científico francés Denis Papin (1647-1712) hizo, en 1698, el segundo modelo de un vehículo autopropulsado, para propósitos militares, y usó en él la idea del cilindro y el pistón. En el año 1763, el oficial de artillería Nicolás Joseph Cugnot construyó, con ayuda del arsenal del Estado, un coche de vapor. Fue ensayado en la calle, pero

como chocó contra una pared fue llevado al arsenal para evitar ulteriores daños. Este incidente paralizó el trabajo de Cugnot.

El ya mencionado Oliver Evans construyó diez años más tarde un coche de vapor que no pudo imponerse, pues encontraba dificultades en las calles irregulares. Por este mismo motivo fracasó también la locomotora de calle inventada por William Symington en 1786, quien la ensayó en Edimburgo. William Murdock, el inventor de la luz de gas, también realizó experimentos con un vehículo parecido, pero sus empleadores, Boulton y Watt le aconsejaron que no prosiguiera con ellos, ya que el propio James Watt había patentado la idea [19].

El mismo argumento no fue aceptado por el impetuoso escocés Trevithick, para quien todo lo que dijera Watt era necesario refutarlo o superarlo. Así fue como con su máquina sin condensación, construida en 1798, desarrolló en 1801 una locomotora de tamaño real en la que planeaba transportar pasajeros. En 1803 envió su máquina de Plymouth a Londres y la hizo rodar por las calles. Era una adaptación de su máquina de alta presión y sus tres ruedas eran de madera, con llantas de hierro. No se tiene información sobre la velocidad de este aparato en una calle plana, pero un evento significativo en la historia del transporte estaba cerca si Trevithick se hubiera esforzado en continuar; sin embargo, su imaginación como ingeniero era más fuerte que su paciencia: cuando su máquina torció la estructura, la puso a trabajar estacionariamente, perdió interés por la locomoción con vapor en las carreteras y dedicó su genio a desarrollar una locomotora para los rieles.

Si hablamos de vías, pensamos obligadamente en las vías férreas y en el tren como inseparables. Sin embargo, la vía tiene dos mil años más que la locomotora. El hombre descubrió muy tempranamente que era más fácil tirar de un carro o trineo si preparaba dos surcos de piedras lisas o tablas de madera paralelos entre sí, o los cavaba en un terreno rocoso. Este último tipo de vía, con surcos de unos 15 cm de profundidad y sepa-

rados entre sí de 20 a 150 cm, era utilizado por los griegos para llevar sus carros adornados a los templos. Habían construido también este tipo de vías para transportar naves a través del istmo de Corinto y evitar así la larga navegación alrededor del cabo de Matapán. Los griegos habían descubierto que un hombre o un caballo podían arrastrar una carga ocho veces más pesada si lo hacían sobre una vía en lugar de hacerlo a través de un camino irregular. También los romanos cavaron surcos en muchos de sus caminos militares [20].

Como tantas otras conquistas técnicas de la antigüedad, también ésta se perdió durante la Edad Media. En el siglo XV se vuelven a encontrar las vías: probablemente aparecieron por primera vez en las minas alemanas, que eran las mejor instaladas de Europa. El carbón y los minerales eran transportados en pequeños vagones, tirados por los propios mineros o por caballos, a lo largo de las galerías. Hacia fines del siglo XVI, mineros alemanes fueron llamados a Inglaterra a fin de modernizar las minas. Los alemanes llevaron con ellos el "Tramway", como lo llamaban en Inglaterra. De este modo llegaron las vías férreas al país que iba a ser cuna del ferrocarril.

Un ingeniero de minas, Richard Reynolds, construyó en 1767 los primeros rieles de hierro fundido y otro inglés, Jessop, creó el corte transversal del riel en forma de hongo, que aún se utiliza en la actualidad. Con estas ideas estaban creadas las condiciones previas para la invención del ferrocarril. Las minas de hierro de Pen-y-Daran, en Gales del Sur, disponían de un "Tramway" que llegaba hasta Cardiff y allí construyó Trevithick la primera locomotora sobre vías: un pequeño y tosco adefesio con una gran volante y un par de ruedas dentadas que unían entre sí los dos ejes. A pesar de todo la locomotora arrastró, sobre una distancia de 15 km y a una velocidad de 8 km/h, diez toneladas de hierro y setenta pasajeros dispuestos en cinco coches.

Ahora Trevithick se decidió a mostrar su ferrocarril primero a los londinenses. En 1808 construyó en la plaza Euston un "circo de vapor": un pequeño circuito de vías sobre el cual se movía

la locomotora con algunos vagones para los viajeros. La vuelta costaba un chelín y los londinenses se entusiasmaron con este nuevo entretenimiento. Pero antes de que Trevithick pudiera amortizar los gastos de la construcción acaeció la rotura de las ruedas, la locomotora cayó y el funcionamiento del circo quedó interrumpido [21].

Desde ese día la mala suerte persiguió a Trevithick: se enfermó de fiebre tifoidea, se vio envuelto en dificultades económicas y emigró al Perú. Al estallar allí una revolución siguió a Colombia, pero sus diferentes tentativas no tuvieron éxito. En 1827 en Venezuela conoció a Robert Stephenson (1803-1859) y pocos años después regresaron a Europa. Trevithick murió en 1833 como hombre pobre; sin embargo, alcanzó a ver el triunfo que a otro inventor –el padre de Robert, George Stephenson– le deparó el ferrocarril.

John Blenkinsop (1783-1831) había construido en 1811 una locomotora con ruedas dentadas sobre una cremallera que podía arrastrar hasta 94 toneladas a 6 km/h y subir pendientes de hasta 5%, pero la máquina era inestable y la tensión sobre la cremallera en un lado apartó los rieles y finalmente la caldera estalló.

George Stephenson (1781-1848) nació en Wylam, cerca de Newcastle. Hijo de un peón minero, no recibió ilustración académica alguna en los primeros años y salió del analfabetismo alternando como aprendiz de zapatero. Su padre se quedó ciego y el joven lo reemplazó en las minas de Kilingsworth. Debieron ser muy distinguidas las facultades que resaltaban en Stephenson y su obra en las minas muy estimada, cuando dos años después se le designaba ingeniero director de las minas. Así observó las debilidades de la máquina de Blenkinsop y decidió que podía construir una mejor “máquina viajera” y antes de acabarla ya había hecho las coordinaciones y ajustes necesarios para lograr la eficiencia técnica y el éxito económico de la locomoción sobre rieles.

El emprendedor ingeniero logró la colaboración pecuniaria de Lord Ravensworth, uno de los propietarios de la mina, y en 1814 luego de dos años

de trabajo, estaba terminada la primera locomotora de Stephenson, llamada “Blucher” en honor del general prusiano que apoyaba a Wellington contra Napoleón. Esta máquina arrastraba ocho vagones con treinta toneladas de carbón y alcanzaba una velocidad de 6,5 km/h en una leve pendiente. No era una máquina muy eficiente y resultaba más cara que una de tracción con caballo, pero demostró que Stephenson tenía razón cuando opinaba que las vías y la fuerza del vapor debían permanecer juntos “como el hombre y la mujer”. Estaba plenamente convencido de que el transporte por tierra del futuro se desarrollaría por ferrocarril.

Un año después construyó una segunda locomotora, que trabajaba más racionalmente, pues había aumentado el rendimiento de la máquina de vapor haciendo retornar a la caldera el vapor del escape. Para las ruedas utilizó acero forjado en vez de hierro fundido; estableció una comunicación directa entre émbolos y ruedas; utilizó articulaciones con cojinetes para el eje de tracción e introdujo una serie de importantes mejoras. Había aprendido mucho con los defectos de la “Blucher”. La primera patente de invención de la locomotora fue inscrita por Stephenson en 1815. Al año siguiente pidió otra para los rieles y con ambos elementos creó el primer ferrocarril de que puede hablar la historia [22].

Largos años dedicó Stephenson a la perfección de la máquina y de los rieles. Al cabo de más de un lustro de incesantes pruebas e innovaciones y ya en posesión de un tipo de locomotora definido, estableció una fábrica de máquinas cerca de Newcastle, la que fue inaugurada en 1824. Llamado a esto, por el gobierno inglés, construyó en los años subsiguientes los dos primeros caminos de hierro establecidos en Gran Bretaña, y destinados a pasajeros; el de Stockton a Darlington y el de Liverpool a Manchester, para lo cual contó con la colaboración de su hijo Robert, a quien había hecho regresar de Estados Unidos. Además el secretario general de la compañía, el señor Booth, adoptó el sistema de la caldera tubular que más tarde se había de elegir para los barcos.

A partir de entonces, Stephenson se dedicó de lleno a la construcción de todos los ferrocarriles de Inglaterra y de las locomotoras para Europa y América. La fortuna sonrió al inventor, se hizo muy rico, e invirtió su fortuna en numerosas minas [23].

El ferrocarril se extendió por el mundo, cambiando el concepto de distancia y modificando el paisaje.

El barco de vapor

Doscientos años después de Blasco de Garay, Papin construyó un barco a paletas y el marqués Jouffrey poseía una embarcación semejante. Papin, quien hubiera podido tener todos los derechos para figurar en la historia como creador del barco de vapor, vio destruida su nave por exaltados que temían la competencia de la técnica contra sus navíos de alto velamen.

La primera persona que construyó un barco de vapor utilizable fue el inventor norteamericano John Fitch (1743-1798). El 22 de agosto de 1787, su barco navegó por primera vez por el río Delaware. Durante algún tiempo el barco viajó entre Filadelfia y Trenton y finalmente fue destruido por una tormenta.

El honor de haber construido el primer barco de vapor relativamente eficiente le corresponde al mecánico escocés William Symington, quien empezó sus ensayos con la ayuda de un banquetero jubilado, Patrick Miller, y de un maestro, James Taylor. El buque quedó terminado en 1788 y con él realizaron viajes de prueba en el lago Dalswinton, en Escocia, donde solo alcanzaron una velocidad de 8 km/h, lo que desilusionó a los socios de Symington. Éste siguió trabajando solo con grandes dificultades y después de catorce años terminó su *Charlotte Dundas*, la primera nave que merecía realmente la designación de *vapor*. Symington navegó con ella, en 1789, al canal de Fortch-Clyde; el buque arrastró dos barcazas de carga de 70 toneladas durante seis horas y contra un viento recio.

La primera consecuencia del viaje experimental del *Charlotte Dundas* fue que las autoridades prohibieran inmediatamente el empleo de barcos de

vapor como remolcadores en los canales ingleses, pues se temía que los golpes de ola perjudicaran las orillas. Cabe consignar que cuando Symington expresaba que algún día el Atlántico sería surcado por barcos de vapor, sólo provocaba las risas burlonas de sus compatriotas. Sin embargo, un estadounidense se apropió de la idea.

Robert Fulton (1765-1815) nació en Little Britain, Pennsylvania y era hijo de unos pobres inmigrantes irlandeses. Primero fue aprendiz de platero en Filadelfia, oficio en el que descubrió sus cualidades de dibujante y pintor y con las que empezó a ganarse la vida. En 1786 se trasladó a Londres, donde dejó un tanto la pintura sin abandonarla completamente. En esta ocasión vio a la *Charlotte Dundas*, y el barco accionado por vapor lo entusiasmó. Sintiendo que en él se desarrollaban poderosas aficiones a la mecánica, estudió con ahínco y se hizo ingeniero, después de lo cual viajó por Europa y se nutrió de conocimientos que habrían de serle valiosos más tarde.

De regreso a Londres, se consagró a la mecánica y tuvo la fortuna de poder asociarse a un célebre mecánico, Remsey, a cuyo lado aprendió todo lo que deseaba sobre la mecánica aplicada a la guerra. En París propuso al Directorio francés la construcción de un barco submarino, que él llamó *Nautilus* y que debía atacar por debajo del agua la invencible flota inglesa. El proyecto fue bien acogido pero nunca se llevó a la práctica. Lo mismo ocurrió con otro invento, el torpedo, un proyectil submarino con impulsión automática que debía ser lanzado desde barcos torpederos. Además interesó a Napoleón en la creación de una armada de vapor, pero éste que buscaba siempre las colaboraciones técnicas en todo lo que no fueran batallas, encomendó a la Academia de Ciencias de Francia el estudio del asunto. El fallo resultó desfavorable, con lo cual el inventor sufrió uno de los mayores desencantos de su vida.

Fulton se salvó de una situación desesperada porque trabó amistad con el embajador de Estados Unidos Robert Livingston, con cuya sobrina se casó, y logró entusiasmarlo con la idea de un barco de vapor. Livingston ofreció su ayuda finan-

ciera y compraron una vieja máquina de vapor fabricada por Watt y la montaron sobre un pequeño bote. Cuando lo quisieron hacer navegar sobre el Sena, en 1803, se desarmó. Construyeron un segundo bote y Fulton solicitó una audiencia con Napoleón. Éste, que había leído el informe desfavorable de sus académicos, preguntó irónicamente a Fulton “¿Así que usted quiere poner en movimiento un barco con humo de cigarrillos?”.

A pesar de todo, Fulton y Livingston siguieron con sus ensayos, que, si bien fueron exitosos, demostraron que era necesario construir una máquina de vapor de un rendimiento mucho mayor. Livingston consiguió una subvención del gobierno estadounidense; se encargó a Boulton y Watt una máquina de 20 HP y el barco, llamado *Clermont*, fue construido en Nueva York de acuerdo con los planos de Fulton; tenía una capacidad de 180 toneladas, 40 m de eslora y una chimenea de 9 m de altura; en la mitad de cada banda había una gran rueda de paletas. El público de Nueva York, que colmaba el dique del Hudson el día del viaje inaugural, lo bautizó *Fulton's Folly* (La locura de Fulton).

Las características fundamentales de la nave eran las que habrían de imponerse desde ese momento y por mucho tiempo. Las pruebas presenciadas por representantes del gobierno estadounidense y por numerosas personas convencieron plenamente y ya el Estado tomó a su cargo el futuro de la marina que había de contar con barcos propulsados por vapor.

Fulton murió ocho años después de estas pruebas, el 24 de febrero de 1815 en Lancaster, pero tres años antes le fue dado presenciar la llegada del primer barco de vapor que navegaba por el océano. Se trataba de *El Cometa*, construido por Enrique Bell en Escocia y que copiaba exactamente el sistema de Fulton en todos sus detalles. No pudo ver el primer barco de vapor estadounidense que cruzó el Atlántico: *El Savannah*, un barco de vela con una máquina de vapor auxiliar, que en mayo de 1819 navegó de Georgia a Liverpool en veinticinco días. Sin embargo, to-

avía pasaron ocho años más hasta que se realizó el primer cruce del Atlántico empleando exclusivamente la fuerza del vapor; el barco holandés *Curacao*, de madera con ruedas de paletas, construido en Dover, necesitó exactamente un mes para cubrir el mencionado trayecto oceánico.

Tanto *El Clermont* como *El Cometa* y los otros barcos mencionados, tenían la propulsión a los costados, mediante grandes ruedas con paletas dispuestas helicoidalmente, tal como se veía en los vapores de los ríos hasta el siglo XX. El sistema de navegación con paletas —hay que recordarlo— es antiquísimo y, por supuesto, ensayado muchos siglos antes de la invención de la máquina de vapor. Descripciones hechas por historiadores latinos permiten establecer que cierta clase de embarcaciones se propulsaba por este procedimiento con el impulso de una especie de noria movida por bueyes situados en la plataforma central de la embarcación. Sin embargo, muy pronto la hélice llegó a reemplazar las paletas en los barcos.

La hélice vino a conquistar para siempre el privilegio del dominio de la marcha en el agua y debían pasar siglos para lograr, con el avión, el dominio del aire.

Muchos contribuyeron al desarrollo de este sistema de propulsión; Bernouilli en 1752 preconizaba la posibilidad de aplicar a los barcos el motor y la propulsión helicoidal. Por su parte el ingeniero francés Pauton, propuso en 1768, reemplazar los remos con hélices. Sarlos Dallery, un mecánico de Amiens, se abstuvo del debate, pero se fue a la práctica y construyó un vaporcito en 1803 y le aplicó dos hélices. Hizo sus experimentos iniciales en el Sena, pero por falta de recursos malogró la realización final que esperaba ilusionado.

Se puede decir que la implantación de la hélice y su consagración definitiva como mecanismo insuperable data de 1805, año en que los constructores ingleses Smith y Remie, practicaron en Inglaterra los primeros experimentos formales de barcos con hélice. Los resultados fueron completamente favorables y ya la teoría pasó, en esta materia, a ser reemplazada por la práctica. La

disposición definitiva de la hélice, es decir, la hélice simple de una sola revolución, fue propuesta y ensayada por un constructor de Bolonia llamado Federico Sauvage, quien falto de recursos, no pudo llevar sus experimentos más allá de lo elemental.

El año 1843 marca el momento en que todos los astilleros comienzan a desterrar el uso de la rueda de paletas y a aplicar la hélice a las nuevas naves, especialmente las dedicadas a los cruceros trasatlánticos. La hélice situada a popa corta las aguas con velocidad extraordinaria y empuja el agua hacia atrás, creando una corriente que sirve a la vez para dar mayor agilidad y fuerza a los golpes del timón, que se halla situado inmediatamente después de aquélla.

La máquina de vapor para barco debía diferir apreciablemente del sistema adoptado por Watt para industrias y minas y la creada por Stephenson para los caminos de hierro. La máquina en sí, era la misma, pero el hecho de hallarse generalmente emplazada hacia la proa y tener la hélice a popa, exigía un eje largo aislado, cuya misma extensión no dejaba de constituir un problema para los primeros ensayistas. Éste y otros problemas fueron superados para hacer que la navegación por vapor llegara a todos los confines antes que otras formas de propulsión se impusieran.

Conclusiones

Las consecuencias de la máquina de vapor se pueden enfocar desde dos visiones: la científica, por no ahondar en la tecnológica, y más concretamente en la génesis de la termodinámica, y la histórica con sus secuelas económicas, sociales, políticas y culturales.

En el terreno del conocimiento y según un dicho conocido, la ciencia debe más a la máquina de vapor que la máquina de vapor a la ciencia. Una de las invenciones de Watt que tiende a confirmarlo fue la de la acción expansiva. Watt había comprobado que, cuando el pistón alcanza el final de su carrera activa, el trabajo recuperable se perdería si se dejara que el vapor irrumpiera en el condensador a la presión de la caldera. Así

pues, propuso interrumpir el suministro de vapor una vez que el pistón había recorrido una distancia corta en su descenso por el cilindro; el vapor encerrado continuaría presionado contra el pistón, aunque la presión descendería constantemente hasta un mínimo cuando el pistón alcanzara el fondo del cilindro. De este modo se obtendría el máximo rendimiento del vapor. Esta intuición habría de ser un elemento esencial en la fundación de la ciencia de la termodinámica.

Watt prestó otro servicio a la termodinámica al adaptar la medida empírica de la eficiencia de la máquina de Newcomen, propuesta por Smeaton, a la medición de sus propias máquinas. Para ello substituyó la medición del volumen de agua elevada por el peso que sus máquinas podían alcanzar mediante la combustión de un *bushel* (32,24 l) de carbón mineral. A esta magnitud la denominó "servicio" de la máquina, concepto que fue también un factor en la creación de la termodinámica. Además, Watt normalizó la unidad de caballo de fuerza. En 1783, cuando comenzó a vender máquinas rotatorias a industriales ajenos a la práctica minera, describió sus máquinas en unidades de "caballos de fuerza" o de vapor, una noción sobre la que todos se hacían cierta idea. Partió del supuesto de que un caballo de vapor equivalía a levantar un peso de 33.000 libras a un pie de altura en un minuto (75 kg a un 1 m en 1 s). La unidad práctica de caballo de vapor sigue siendo la misma.

Desde 1702 cuando Savery apenas empezaba a fabricar comercialmente su máquina de fuego, hasta 1829, en que Stephenson exhibía su locomotora en la histórica competencia de Liverpool, los ingenieros habían desarrollado la máquina térmica con muy poca comprensión teórica de los procesos fundamentales conocidos. Lo cierto es que en la época de Savery se contaba con conocimientos rudimentarios de mecánica y mecanismos y éstos fueron utilizados por los primeros fabricantes de máquinas de vapor en el diseño de palancas, ruedas, ejes y otros componentes de las máquinas, pero poco se conocía sobre las ciencias térmicas.

El desarrollo de la teoría de las máquinas térmicas recibió un gran impulso de la ciencia en 1824

bajo las circunstancias más inverosímiles. Fue la publicación de una memoria titulada “Reflexiones sobre la energía motriz del calor”, de un joven francés, físico conocido y artillero, que se llamaba Sadi Carnot (1796-1832). Este trabajo no originó ningún entusiasmo en su tiempo y pasaron veinticinco años antes de que el eminente físico inglés Lord Kelvin redescubriera a Carnot y junto con el físico alemán Rudolf Clausius, escribiera las memorias definitivas que fundaron la termodinámica clásica. Con esta nueva ciencia los ingenieros pronto estuvieron en condiciones de llevar la máquina térmica al alto nivel de perfección que tiene hoy. Otros muchos nombres contribuyeron a llevar la termodinámica al sitio que ocupa en la actualidad entre las ciencias físicas; lo importante aquí es señalar que surgió del conocimiento empírico, que nació para explicar la eficiencia de las máquinas térmicas y que se ha elevado hasta el punto de explicar la naturaleza y futuro del universo. Ese solo logro de la máquina de vapor es suficiente para tenerla presente en el campo tecnológico-científico [24].

En otra dimensión, la histórica, el influjo de la máquina de vapor es decisivo y está bien documentado en relación con el afianzamiento del capitalismo. Revolución Industrial es un término que se aplica usualmente a los cambios sociales y económicos que marcaron la transición de una sociedad estable, agrícola y comercial a una sociedad industrial moderna. Históricamente se usa para referirse, sobre todo, al período de la historia británica de 1750 a 1850 aproximadamente. Inglaterra se hallaba comprometida, desde el siglo XVII, en un proceso de desarrollo industrial, al menos en ciertos sectores en los que las innovaciones constituían, sobre todo a fines del siglo XVIII, un punto de partida bien modesto en conjunto, y la industrialización a la que habían dado el impulso inicial no alteró de manera decisiva la estructura de la economía inglesa antes de mediados del siglo siguiente. Y, en definitiva, estas innovaciones no constituyen más que la primera de una serie de revoluciones industriales cuyas últimas etapas no conoce todavía el mundo contemporáneo.

La Revolución Industrial se compone de tres partes, que si bien se dan unidas indisolublemente en un proceso único y en donde cada una de ellas es condición indispensable para la existencia de las otras, con fines analíticos es posible diferenciarlas. La primera parte está constituida por el conjunto de innovaciones tecnológicas de gran importancia – en el cual fue central la máquina de vapor– que genera productos o servicios nuevos, al mismo tiempo que transforma los procesos productivos con un incremento sin precedentes de la capacidad de producción. La segunda consta de una serie de transformaciones muy profundas que experimentan las sociedades que se industrializan y que modifican esencialmente su relación con el entorno natural que habitan, su sistema económico, su estructura social, sus instituciones políticas y su ideología, tanto en el nivel consciente y racional como en el inconsciente. El resultado final es el surgimiento de un mundo que se revela como nuevo en todos los niveles de la actividad social de los hombres y separado por esta brecha insalvable del que existía antes de la Revolución Industrial. Y, por último la tercera parte está formada por la metamorfosis del sistema económico mundial [25, 26].

La Revolución Industrial estaba ya en pleno desarrollo antes de haberse generalizado el uso de la máquina de vapor como fuente mecánica de energía; sin embargo ésta la acentuó y le dio ciertas características. La máquina de vapor aceleró el primer paso de la Revolución Industrial pues su aplicación a las bombas de agua y elevadores de carga de las minas permitió ampliar de modo prodigioso la producción de carbón. Como mecanismo de conversión del vapor en energía mecánica, pudo ser adaptado a diversos dispositivos industriales para producir máquinas operadoras, con las cuales se multiplicó la productividad de la tejeduría y la metalurgia. La locomotora revolucionó los transportes terrestres, y el navío de vapor, los marítimos. A partir de 1820, prototipos cada vez más perfeccionados de esas máquinas se multiplicaron en Inglaterra, Estados Unidos y Francia, de donde empezaron a ser exportados como mercancías para todo el mundo, ensanchando las bases de la expansión industrial.

Las transformaciones en las relaciones de producción capitalistas a partir de la Revolución Industrial, estuvieron caracterizadas desde el punto de vista técnico por un cambio significativo en la utilización y producción de energía. Un análisis marxista ortodoxo de 1915 muestra que la producción mundial de hulla entre 1850 y 1911 se multiplicó por más de diez; pasó de 83 millones de toneladas a 1.100 millones de toneladas a una tasa de crecimiento anual del 23% [27].

La producción de energía en gran escala en esa misma proporción transformó también las relaciones de producción en beneficio del capital; fue un trabajador colectivo el que se impuso, desposeído de su saber particular, a la producción capitalista, en contraste con la propiedad individual de la producción artesanal. No hay duda de que el afianzamiento del maquinismo a partir del siglo XIX, cuya base técnica es la utilización de la energía para potenciar las máquinas cada vez más complejas, se basó en el carbón. La Revolución Industrial fue una Revolución de la Energía [28, 29, 30].

La máquina de vapor llevó hacia el monopolio y la concentración. La energía del viento y el agua eran libres, pero el carbón era caro y la máquina de vapor misma, una invención costosa; así también lo eran las máquinas que producía. El funcionamiento durante veinticuatro horas llegó a las industrias que hasta entonces habían respetado las limitaciones del día y de la noche. Impulsados por el deseo de ganar todo el dinero posible sobre sus inversiones, los fabricantes de textiles alargaron el día de trabajo; mientras en la Inglaterra del siglo XV había sido de catorce o quince horas en pleno verano con dos horas y media a tres para el descanso y las comidas, en las nuevas ciudades fabriles fue a menudo de dieciséis horas durante todo el año con sólo una para comer. Funcionando con vapor, alumbradas con gas, las nuevas fábricas podían trabajar las veinticuatro horas. La máquina de vapor marcaba el paso [31].

Como la máquina de vapor exige una atención constante por parte del que la alimenta y del in-

geniero, la energía de vapor era más eficiente en grandes unidades que en pequeñas: en vez de una serie de unidades pequeñas, que trabajaban cuando se les exigiera, se mantenía en continuo movimiento una sola grande. De esa manera la energía del vapor alentó la tendencia hacia grandes instalaciones ya presente en la subdivisión del proceso de fabricación. El tamaño grande, exigido por la naturaleza de la máquina de vapor, se convirtió en símbolo de eficiencia. Los dirigentes industriales no sólo aceptaron la concentración y el gigantismo como condición de funcionamiento, exigidos por la máquina de vapor, sino que además llegaron a creer en ellos por sí mismos, como señal de progreso. Con la gran máquina de vapor, la gran fábrica, la gran granja productora, el alto horno, se suponía que la eficiencia existía en razón directa del tamaño. “Más grande” fue otra manera de decir mejor.

Pero la máquina de vapor tendió también en otra forma hacia la concentración y el volumen. Aunque el tren aumentó las distancias de los viajes y la cantidad de locomoción y de transporte, lo hizo dentro de límites regionales relativamente estrechos. El bajo rendimiento del ferrocarril en pendientes superiores al 2% obligó a que las nuevas líneas siguieran el curso de los ríos y el fondo de los valles. Esto tendió a sacar a la gente del interior del país. Con la integración del sistema de ferrocarriles y el incremento de los mercados internacionales, la población tendió a concentrarse en las grandes ciudades terminales, los empalmes, las ciudades portuarias.

Aunque se inventó el coche de vapor y se puso en circulación en los antiguos caminos en Inglaterra antes que el ferrocarril, jamás constituyó una amenaza para éste, pues una ley del parlamento lo eliminó de las carreteras una vez apareció el ferrocarril. La energía de vapor aumentó, pues, la superficie de las ciudades a lo largo de las principales líneas de transporte y de viaje. En todas las formas, pues, la máquina de vapor acentuó y profundizó esa cuantificación de la vida que había ido teniendo lugar lentamente y en cada sector durante los tres siglos que precedieron a su introducción.

La invención y aplicación en gran escala de la máquina de vapor fue la base de la gran industria: las máquinas pudieron existir antes de ella, pero no pudo haber producción mecánica. La introducción de la máquina de vapor en la producción representaba enormes dificultades: exigía la creación de una nueva rama de la industria con su personal y sus instalaciones. Ya en el transcurso de la invención de la máquina de vapor se evidenciaron los rasgos del capitalismo salvaje con su competencia y la avidez de enriquecimiento: recuérdese cómo Hornblower aventajó a Watt en el aprovechamiento de las altas presiones, pero en lugar de aunar los esfuerzos de los dos inventores, que laboraban en un mismo campo, Boulton el socio de Watt demandó y arruinó a Hornblower.

La invención de la máquina de vapor sentó las bases de la nueva distribución de las empresas industriales. Antes todas las fábricas, impulsadas por la energía hidráulica, podían emplazarse solamente a la orilla de los ríos de corriente caudalosa y rápida. Pero todo cambió: la máquina de vapor podía instalarse en cualquier lugar donde pudiera obtenerse carbón mineral a precio accesible. La hulla abundaba en toda Inglaterra. En adelante, las fábricas podían construirse cerca de los mercados, en los que era posible adquirir materia prima y vender los artículos, aproximarse a los grandes centros de población, en los que se reclutaban los obreros. Las moles de los edificios se apretujaban unas contra otras; en las grandes ciudades se formaron los suburbios obreros [32].

El final del siglo XVIII no sólo sustituyó una producción artesanal relativamente poco elástica por una producción industrial masiva; suscitó también la renovación completa de todas las actividades industriales, que, por su capacidad casi inagotable de producir riqueza y empleos, no iban a tardar en afirmar su preponderancia dentro del conjunto de la economía. Así, este período puede considerarse también como decisivo desde el punto de vista de la historia del equilibrio mundial de fuerzas: al dar origen a un nuevo tipo de economía y de civilización material, agravó, en beneficio de los países en vías de industrializa-

ción, en primer lugar Inglaterra, el desequilibrio que reinaba ya entre las diversas categorías de países [33].

En el desarrollo de sus potencialidades, el primer proceso de civilización fundado en la Revolución Industrial impuso tales alteraciones en los modos de ser de las sociedades humanas, que acabó por integrarlas a todas en un solo sistema interactivo y por configurar una nueva formación sociocultural, también dividida en dos complejos tecnológicos desfasados y económicamente contrapuestos, pero complementarios: el superior, constituido por la aceleración evolutiva de algunas naciones capitalistas-mercantiles hacia la condición de centros de dominación imperialista industrial; y el inferior constituido mediante movimientos de actualización histórica, que provocan tanto la redistribución de las áreas coloniales entre las nuevas potencias como el surgimiento de una nueva forma de dependencia: el neocolonialismo [34].

En el curso de este proceso desaparecieron algunas de las formas más despóticas del sojuzgamiento colonial, como la esclavitud, pero permanecieron, e incluso se profundizaron, los vínculos económicos con carácter de subalternidad. La naturaleza expoliadora de estas relaciones simbióticas entre los centros de poder y las periferias se asentó, en lo fundamental, en la explotación de las ventajas que usufructuaban los sistemas evolucionados en el intercambio comercial con áreas atrasadas. El alto grado de tecnificación y de utilización de energía inanimada de estas economías industriales, les aseguró ventajas de todo orden en los intercambios de su producción con las economías atrasadas, cuyo sistema productivo está movido principalmente por el trabajo humano. Su enorme poder coercitivo obligó a las sociedades que cayeron en dependencia colonial y neocolonial a sufrir toda clase de transformaciones reflejas y las conformó según líneas en las que servían con más eficacia a sus expoliadores.

En el transcurso de un siglo el mundo se convirtió no sólo en interdependiente, sino en el dominio imperial de las ideas occidentales. Con energía extraordinaria y una completa certidumbre los

misioneros de la civilización occidental recorrieron el mundo, no para satisfacer las necesidades sentidas sino para imponer necesidades occidentales a toda la humanidad [35].

De los muchos factores que convergieron para dar origen a la Revolución Industrial, aquí interesa el influjo de la máquina de vapor, es decir de la invención técnica y de la difusión de esa invención.

La invención técnica plantea el problema de la actitud de una sociedad para resolver las dificultades técnicas mediante la innovación. La prontitud entre los pioneros capitalistas (a menudo con pequeños capitales iniciales) en adoptar esas innovaciones técnicas y adaptarlas a las exigencias de la producción y el mercado, al igual que la rapidez con que otros las extendieron, dependían de la maduración de una serie de desarrollos previos que tuvieron lugar a lo largo de un gran intervalo de tiempo. Uno de los prerequisites era la existencia de una clase de hombres acostumbrados a emplear su capital en el comercio y la industria, aunque fuera en pequeña escala. Otro requisito era la existencia de capitales mercantiles significativos, capaces de extender el crédito y de abrir salidas comerciales. Además, debían ya existir mercados, redes de tráfico, vías de comunicación y, en especial, la disponibilidad de una oferta de trabajo móvil (por no decir bastante barata) [36].

Todo ello fue posible porque el escenario económico en Inglaterra presentaba esa serie de circunstancias excepcionales para el florecimiento de una sociedad capitalista. El cambio técnico aumentó rápidamente la productividad del trabajo; presenció también un crecimiento anormal del número de proletarios, junto con una serie de acontecimientos que ensancharon simultáneamente el campo de las inversiones y el mercado de consumo, en una escala sin precedentes. El crecimiento de la industria capitalista en siglos anteriores estuvo limitado por la estrechez del mercado y su expansión estuvo frustrada por la baja productividad de los métodos de producción del período, reforzados estos obstáculos, de cuando en cuando, por la

escasez de mano de obra. Con la Revolución Industrial, estas barreras fueron derribadas simultáneamente y, en cambio, la acumulación e inversión de capital encontraron, desde todos los puntos del ámbito económico, horizontes que se ampliaban continuamente atrayéndolas [37].

Pero junto con este gran salto en la tecnología y en el capital se presentó una caída general en la situación socioeconómica y cultural del pueblo. El crecimiento de las ciudades fue una de las principales consecuencias de la Revolución Industrial. Mucha gente fue empujada a las ciudades a buscar trabajo y al final terminaron viviendo en ciudades que no podían mantenerlos. Con la nueva edad industrial, se estableció una nueva visión cuantitativa y materialista del mundo. Esto hizo que la gente consumiera más de lo que podía, algo que todavía sucede, y viviera con bajos salarios que hacían que los niños tuvieran que trabajar en las fábricas durante largos días.

Aunque la máquina de vapor podía usar una gran variedad de combustibles: madera, aceite y carbón, el último predominó debido a su relativa abundancia, facilidad de transporte y alto contenido calórico. Fue el uso del carbón el que empezó a liberar grandes cantidades de bióxido de carbono. La Revolución Industrial no fue buena para la tierra. Desde su comienzo, la industria ha duplicado la cantidad de bióxido de carbono en la atmósfera. Desde entonces existe la preocupación por el efecto de invernadero. Además, nuestra inclinación al consumismo ha hecho que los recursos naturales del planeta se hayan estado agotando a una tasa alarmante, con todas sus secuelas.

Los inventos derivados de la máquina de vapor fueron trascendentales en el proceso de desarrollo y consolidación de la Revolución Industrial y fueron actividades que hicieron prosperar pueblos, ciudades, la industria y con ello la división del trabajo; como resultado de lo anterior aparecieron otras costumbres, valores y ante todo una nueva sociedad. La principal consecuencia de la Revolución Industrial es la consolidación del capitalismo como sistema, en el cual aparecen dos clases: la burguesía y el proletariado.

La Revolución Industrial en modo alguno fue el resultado directo de desarrollos técnicos como las máquinas de hilado, la utilización del carbón y la introducción de la fuerza del vapor, un punto de vista sostenido hasta por Engels; ya se vio que en ella intervinieron otros factores no menos importantes. De ningún modo la tecnología se desarrolla de una manera independiente con respecto a la sociedad, y subsiguientemente se impone sobre esta última. Las teorías del determinismo tecnológico han proporcionado criterios válidos sobre la relación entre cambio social y cambio tecnológico; no obstante, existe un número de hechos históricos que no se pueden interpretar en términos tan simples [38, 39].

Lo que llegó a ser la sociedad industrial se concibió en el Renacimiento y luego atravesó un largo período de incubación, durante el cual se preparó para transformarse en una cultura orientada hacia las cosas de este mundo. El fenómeno que al fin propició ese cambio fue la Revolución Industrial, la cual, como se ha visto en un sentido muy amplio alude al drástico y acelerado incremento en la capacidad humana para producir, procesar y transportar manufacturas. Mírese como Revolución Industrial en sí misma o como el progreso técnico e industrial que resultó de ella, el hilo común que une estas etapas es que cada cual creó condiciones donde los individuos pueden afirmar: “Hoy disponemos de mucho más de lo que jamás estuvo a nuestro alcance”. Antes de la Revolución Industrial, la gente no creía que el consumo a ultranza fuera posible, deseable ni atractivo, pero en las nuevas circunstancias esa idea pronto cobró popularidad. A fines del siglo dieciocho, la ascética filosofía medieval que rechazaba la codicia y buscaba la belleza en la contención y la represión del deseo estaba abandonando la escena. Cuando el industrialismo cobró arraigo y avanzó hacia nuevas etapas de progreso, arrasó con los valores medievales. Se afianzó la modernidad [40].

Hoy, cuando nos hallamos inmersos en los supuestos éticos y estéticos de la era industrial, se ha hecho carne la idea de que la justicia y la equidad consisten en capacitar a la gente para consu-

mir bienes materiales. Pero incrementar la oferta de bienes disponibles no es la única forma de felicidad que conoce el hombre. La historia humana abunda en ejemplos de épocas y regiones habitadas por gentes que habrían definido la felicidad de modo diferente. Hubo períodos de la historia en que los pueblos de las regiones más avanzadas se aferraban a sistemas éticos y estéticos que no eran disímiles de los de nuestra cultura, pero también hubo épocas en que predominaban conceptos totalmente distintos en todo el mundo. La creencia de “más es mejor”, tan característica de la sociedad industrial, no es una verdad inmutable que el hombre haya reverenciado en toda su historia; ni siquiera suscita el respeto universal de todos los pueblos. Es una creencia moldeada en un entorno en que se dispone de más cosas, más bienes y recursos, que nunca antes; en ese sentido, es un fenómeno distintivamente moderno, con la paradoja de la desproporción alimentaria de la actualidad; un 12% de la humanidad se alimenta medianamente, otro 15% está mal alimentado y el resto padece desnutrición.

Se sabe que han existido numerosas invenciones que fueron ignoradas e incluso suprimidas por la sociedad en la cual nacieron por primera vez y algunas otras fueron redescubiertas o reinventadas muchos siglos después bajo condiciones sociales diferentes. Por ejemplo, ya se vio que la utilización del vapor para poner en funcionamiento ciertas máquinas elementales era ya conocida entre los antiguos griegos y la biblioteca de Alejandría contenía la descripción de un modelo de máquina de vapor que podía funcionar perfectamente. Fue, sin embargo, casi dos mil años después cuando la idea fue utilizada para su aplicación práctica. Aunque esto fue debido parcialmente al hecho de que la sociedad griega en su conjunto carecía de los conocimientos técnicos y mecánicos para explotar las fuentes de energía en gran escala, también fue en parte resultado del hecho de que una sociedad como la antigua Grecia necesitaba apenas importantes mecanismos de producción de energía, o incluso instrumentos a pequeña escala que supusiesen un ahorro de trabajo. Al poseer un abundante número de esclavos, la

producción de energía representaba pocos problemas para las sociedades antiguas [41].

Algo similar puede decirse de los chinos, por lo que no se puede seguir un sencillo modelo de determinismo tecnológico; existe una interdependencia funcional entre los desarrollos tecnológicos por un lado, y el desarrollo económico por otro. Así las máquinas o las técnicas que fueron desarrolladas en cualquier momento de la historia deben su existencia al hecho de que eran las más idóneas para las necesidades de las condiciones económicas imperantes. Esto hace todavía más interesante la historia de la máquina de vapor, su desarrollo y su influjo.

Referencias

1. Asimov, I. *Introducción a la ciencia. Ciencias físicas*. Ediciones Orbis. Barcelona. p. 351. 1985.
2. Gille, B. *La cultura técnica en Grecia*. Ediciones Juan Granica. Barcelona. p. 143. 1985.
3. Burón, J. M. *Evolución histórica de las máquinas y motores térmicos*. Universidad Politécnica de Madrid-Escuela Superior de Ingenieros Industriales. Madrid. 1996.
4. Usher, A. P. *A history of mechanical inventions*. Dover. New York. p. 332. 1988.
5. Woodcroft, B. *The Pneumatics of Hero of Alexandria*. Taylor Walton and Maberly. London 1851.
6. <http://www.history.rochester.edu/steam/garay/>
7. Dircks, H. *The Century of Inventions by Somerset, Edward. Marquis of Worcester*. London. 1665.
8. "Energy conversion". *The New Encyclopaedia Britannica*. Vol. 18. Macropaedia. Chicago 1 p. 332. 1993.
9. Savery, T. *The Miners Friend; or, an Engine to raise Water by Fire*. S. Crouch. London. 1702.
10. Cardwell, Donald. *Historia de la Tecnología*. Alianza Universidad. Madrid, 1996.
11. Triewald, M. *A short Description of the Fire - and Air -Machine a Dannemora Mines*. Bnejamin Gotti, Stokholm. 1734.
12. Gille, B. *Op. Cit.*
13. Roll, E. *An Early Experiment in Industrial Organisation, Being a History of the Firm Boulton and Watt, 1775-1805*. Longmans Green, London. 1930.
14. Mumford, L. *Técnica y civilización*. Alianza Editorial. Madrid. p. 180. 1982.
15. Poveda R. G.. "La revolución mecánica de Watt". En: *Revista Universidad de Antioquia*. No. 219. p. 79. Enero, 1990.
16. Kirby, R. S. *et al. Engineering in History*. Dover, New York. p. 256. 1990.
17. Sandfort, J. F. *Máquinas Térmicas*. EUDEBA. Buenos Aires, 1965.
18. Verbiest, F. *Astronomia Europaea*. Joannem Federle. Dillingen. p. 88. 1687.
19. Sanz, A. *La historia de los inventos y el progreso técnico*. Editorial Kapelusz. Buenos Aires. 1973.
20. Rovira, R. *Los grandes inventores modernos*. Editorial difusión. Buenos Aires. 1945.
21. Danel, J. F. "La revolución técnico-científica: crisis o desarrollo del capitalismo". *La filosofía de las revoluciones científicas*. Grijalbo. México. p. 73. 1977.
22. Williams, T. I. *Historia de la Tecnología*. Siglo XXI. México. 1998.
23. Aristizábal, F. J. "El avance de la humanidad a través de los hitos tecnológicos". *Innovación y ciencia*. Vol. V. No. 2. p. 54. 1996.
24. Valencia, A. *Notas sobre termodinámica metalúrgica*. Universidad de Antioquia, Medellín, 1983.
25. Bujarin, N. I. *El imperialismo y la economía mundial*. P y P. Córdoba. 1971.
26. Cazadero, M. *Las revoluciones industriales*. Fondo de Cultura Económica. México. 1995.
27. Acosta, V. *Revolución Industrial y desarrollo capitalista*. Universidad Central. Caracas. 1986.
28. Scientific American. *La energía*. Alianza Editorial. Madrid. 1982.
29. Grenon, M. *La crisis mundial de la energía*. Alianza Editorial. Madrid. 1974.
30. Álvarez, C. G. *Renta y geopolítica de la energía*. Autores Antioqueños. Medellín. 1988.
31. Berg, Maxine. *La era de las manufacturas 1700—1820*. Editorial Crítica. Barcelona. 1987.
32. Mijailov, M. I. *La Revolución Industrial*. Panamericana. Bogotá. 1998.
33. Bergeron, L. *et al. La época de las revoluciones europeas, 1780-1848*. Siglo XXI. México. 1982.
34. Riberio, D. *El proceso civilizatorio*. Universidad del Valle. Cali. 1993.

35. Crossman, R. H. S. *Biografía del Estado moderno*. Fondo de Cultura Económica. México. 1994.
36. Dobb, M. *Capitalismo, crecimiento económico y subdesarrollo*. Oikos-tau ediciones. Barcelona. 1975.
37. Dobb, M. *Estudios sobre el desarrollo del capitalismo*. Siglo XXI. México. 1975.
38. Elster, J. *El cambio tecnológico*. Gedisa. Barcelona. 1992.
39. Hearder, H. *Europa en el siglo XIX desde 1830 hasta 1880*. Aguilar. Madrid. 1973.
40. Sakaiya, T. *Historia del futuro. La sociedad del conocimiento*. Editorial Andrés Bello. Santiago de Chile. 1994.
41. Dickson, D. *Tecnología alternativa*. Ediciones Orbis. Barcelona. 1985.