

Eduardo Montero García

Catedrático de Escuela Universitaria, Área de Máquinas y Motores Térmicos
Departamento de Ingeniería Electromecánica, Escuela Politécnica Superior

Ideas, máquinas y sociedad.

La tecnología de vapor en Europa entre 1769 y 1824

1. Técnica, ciencia y tecnología

La percepción que se tiene hoy en día de que la tecnología ocupa una posición destacada en nuestra cultura es un lugar común de conversación. La mayoría de las personas que pertenecen a las sociedades desarrolladas se han habituado al aparente poder de la tecnología avanzada para cambiar su modo de vida. De hecho, el continuo aumento de ese poder se considera comúnmente un rasgo manifiesto de la vida moderna. Cualquiera que haya sido testigo, por ejemplo, de la llegada del ordenador, sabe muy bien que una nueva tecnología puede alterar la estructura de la vida diaria. Incluso las personas que no usan ordenador han tenido que acomodar sus costumbres a alguno de sus requisitos en los supermercados, bancos, bibliotecas u hospitales.

El papel de la tecnología como agente motor del cambio está muy extendido en la versión popular de la historia moderna, en una sencilla y razonable estructura narrativa de un antes y un después. Así, se dice que la aparición de la brújula y otros instrumentos de navegación en la Europa del siglo XV permitieron a Colón y otros exploradores cruzar el océano Atlántico y colonizar el Nuevo Mundo. De esa manera, se hace creer que los instrumentos de navegación recién inventados fueron una condición previa o una “causa” de la colonización europea de una gran parte del mundo. Otro ejemplo, más clásico y sobre el que versará esta lección, es que la máquina de vapor fue el revulsivo que dio lugar a la Revolución Industrial del siglo XVIII en Inglaterra.

Merece la pena señalar que estas minifábulas llaman la atención sobre las consecuencias de los inventos más que sobre su génesis. Independientemente de que parezca que el nuevo artilugio surge de la nada o del cerebro de un genio, se pone el énfasis en el artefacto material y en los cambios que supuestamente provoca. En su conjunto, se considera que estos relatos de tipo mítico dan origen a la concepción de la tecnología como una entidad independiente, como un agente de cambio casi autónomo. Parece que los inventos, una vez que se introducen en la sociedad, adquieren vida propia.

Esta visión determinista de la tecnología es un tema omnipresente en el debate actual sobre historia y filosofía de la tecnología. En un extremo se sitúan quienes defienden una visión fuerte de este determinismo tecnológico. Desde su punto de vista, los avances tecnológicos llevan a una situación de inevitable necesidad, en la que se impone el denominado “imperativo tecnológico”: lo que técnicamente se puede hacer, hay que hacerlo. Este imperativo se basa en una concepción neutra de la tecnología. Las mismas radiaciones radiactivas salvan personas o las matan. Son los usos de las tecnologías, no las tecnologías mismas, los que no son neutrales. La responsabilidad sobre el uso no habrá que exigirla del tecnólogo, sino del industrial o de la administración que haya

aplicado sus proyectos. En ocasiones, crear esas condiciones equivaldrá a cambiar, incluso, las formas de vida habituales, acomodándolas a lo que la novedad técnica exija. La sociedad acabará siendo, así, producto de una tecnología autónoma que evoluciona a su propio ritmo.

En el otro extremo se sitúan quienes nos recuerdan que la historia de la tecnología es una historia de las acciones del hombre. Para comprender el origen de un determinado tipo de poder tecnológico debemos conocer primero a los actores. ¿Quiénes eran? ¿En qué circunstancias se encontraban? ¿Por qué fue posible en este momento y en este lugar y no en otro? ¿Quién se benefició y quién resultó perjudicado? Estas preguntas sugieren que es más razonable, en lugar de concebir la tecnología *per se* como el agente causal histórico, situar la tecnología en una matriz social, económica, política y cultural mucho más variada y compleja.

Otro de los aspectos cruciales de la tecnología es su relación con la ciencia, así como el de la distinción entre técnica y tecnología, que tiene que ver con el anterior. Por ciencia se entiende una forma del saber que suministra explicaciones causales, dilucidaciones de *por qué* algo sucede y *por qué* lo hace de cierta manera. A partir de aquí se puede establecer una distinción entre técnicas precientíficas y técnicas científicas, para las que reservamos hoy el nombre de tecnologías. La diferencia principal consiste en que una técnica científica o tecnología incide sobre causas científicamente detectadas.

Sería ilustrativo examinar algún ejemplo de desarrollo tecnológico que permitiera arrojar un poco más de luz sobre estas dos cuestiones, el grado de determinismo existente en la tecnología y su relación con la ciencia.

He seleccionado como ejemplo el período simbólico comprendido entre 1769, el año de la primera patente del ingeniero escocés James Watt sobre su máquina de vapor, y 1824, año de publicación de un libro del ingeniero francés Sadi Carnot sobre el estudio teórico de la potencia de las máquinas de vapor. Se pretende elucidar si la invención de la máquina de vapor: (i) respondió al mito tecnológico de ser el motor de la Revolución Industrial, y (ii) se basó fundamentalmente en el conocimiento científico de ese momento histórico.

2. Las máquinas de fuego

En cuanto a la aplicación práctica del fuego, se sabía desde antiguo que el fuego puede producir movimiento, si bien sólo se construyeron algunos aparatos que no dejaron de ser meras curiosidades ornamentales y no máquinas prácticas.

El motivo principal que incitó a los inventores a intentar controlar la fuerza del fuego fue el grave problema de mantener las minas sin agua, una importante limitación para la profundidad a la que podían ser explotadas con beneficios. Al aumentar la profundidad de las minas, los caballos reemplazaron a los hombres, pero el número de caballos que cabía utilizar dependía del acceso al pozo de la mina. Además era necesario permitir que los caballos descansaran con frecuencia y el coste del drenaje continuo se acercaba cada vez más, en muchas minas, al valor del carbón o del mineral extraído. La fuerza hidráulica sólo podía ser utilizada cuando tanto el caudal como la caída de agua eran importantes, conjunto de circunstancias que era excepcional en la mayoría de las minas. Por tanto, existía un poderoso incentivo económico para la búsqueda de una solución

alternativa. Para funcionar con éxito, una máquina de fuego (su denominación inicial) tenía que cumplir tres requisitos básicos: había de ser un medio mecánico seguro y fiable para controlar la fuerza del fuego, debía satisfacer una necesidad claramente reconocida y, finalmente, debía poder demostrarse capaz de satisfacer esa necesidad a un coste menor que cualquier otra solución conocida.

La primera referencia sobre una máquina de vapor para este fin corresponde al ingeniero español Jerónimo de Ayanz, que el 1 de septiembre de 1606 obtiene una Real Cédula de Felipe II por la que se le concedían privilegios exclusivos para la explotación de unas cincuenta invenciones técnicas, entre las que se encontraban sendas bombas de vapor destinadas a extraer el agua de las minas. Estas patentes han sido descubiertas en el Archivo General de Simancas hace tan sólo unos veinte años por el ingeniero e historiador de la Universidad de Valladolid, Nicolás García Tapia. Parece que se trató de construir un modelo operativo para la mina de Guadalcanal (Sevilla), del que no hay constancia documental de que llegara a funcionar.

Las primeras máquinas operativas se beneficiaron de los estudios sobre el vacío realizados con anterioridad por Torricelli (1608-1647), Pascal (1623-1662) y especialmente por Otto von Guericke (1602-1686), que consiguió hacer vacío a gran escala. De hecho, demostró que la fuerza de la presión atmosférica conseguía levantar pesos considerables utilizando un sistema cilindro-pistón en el que previamente había hecho el vacío.

Esta idea de aprovechar la presión atmosférica actuando frente a la depresión del vacío fue utilizada por el ingeniero francés Denis Papin (1647-1712), pero utilizando vapor de agua en vez de aire. El pistón ascendería por la presión del vapor generado al vaporizar agua en su interior, momento en el cual se retiraría el fuego y se dejaría enfriar el cilindro. La subsiguiente condensación del vapor produciría un vacío en el interior del cilindro y la presión atmosférica haría descender el pistón dando la oportunidad de aprovechar el empuje. Papin registró su máquina en 1690, casi cien años más tarde que la patente de Jerónimo de Ayanz. La máquina, sin embargo, no resultó competitiva en la práctica. La necesidad de esperar para la condensación del vapor y para volver a calentar todo el sistema tomaba un tiempo demasiado largo.

La máquina siguiente va a aparecer en 1698 y es la primera que conseguirá funcionar de manera efectiva. Fue desarrollada por el inglés Thomas Savery (1650-1715) y era una máquina específica para elevar agua. Obtuvo la patente en 1698 mediante una ley del Parlamento inglés que otorgó un monopolio de 32 años, es decir, hasta 1730. Mediante un sistema combinado de vacío por condensación e inyección de vapor, impulsaba el agua sin necesidad de accionar una bomba de aspiración. Su deficiencia principal estribaba en la necesidad de un vapor a alta presión en la caldera que las técnicas metalúrgicas de la época no podían garantizar con seguridad. Por tanto, la máquina trabajaba a baja presión, con la consiguiente limitación en la altura de elevación del agua. Por otro lado, la caldera ocupaba demasiado espacio dentro de la mina y se desperdiciaba mucho combustible en los sucesivos enfriamientos y calentamientos del recipiente.

Thomas Newcomen (1664-1729) procedía, como Savery, de Inglaterra. En 1712 puso en marcha su primera máquina de vapor atmosférica en una mina de carbon cerca de Birmingham. La máquina utilizaba el mismo principio que la máquina de Papin, el

empuje de la presión atmosférica sobre el pistón de un cilindro en que se producía vacío por la condensación de vapor. La novedad respecto de las máquinas de Papin y Savery consistía en que el cilindro se refrigeraba con agua por su superficie exterior y también por la inyección de agua fría en su interior, lo que permitía una mayor rapidez en la realización de ciclos, alcanzando un ritmo de 14 veces por minuto desarrollando unos cinco caballos de potencia, que podían trabajar todos los días de la semana. La máquina de Newcomen tuvo un gran éxito. Podía ser construida en los tamaños apropiados para trabajar con grandes cantidades de agua y los émbolos de la bomba podían alcanzar profundidades muy respetables mientras la máquina en sí quedaba al nivel de superficie. Hacia 1760 había más de 100 en funcionamiento en Inglaterra, la mayoría en minas de carbón. Durante el siglo XVIII, se llegarían a construir unas mil máquinas de tipo Newcomen por diversos constructores. El carácter único de esta máquina puede ser plenamente apreciado si se tiene en cuenta que ninguna otra surgió para sustituirla o competir con ella hasta sesenta años más tarde, cuando hizo su aparición la máquina de Watt.

3. James Watt

James Watt (1736-1819) nació un 19 de enero de 1736 en la ciudad portuaria y naviera de Greenock, a unas 25 millas de Glasgow. Su abuelo Thomas Watt (1642-1734) fue profesor de navegación y topografía. Su padre, también James Watt (1698-1782), fue ebanista y constructor naval, y comerciante de instrumentos y maquinaria. El ambiente familiar estaba fuertemente influenciado por su pertenencia a la Iglesia Presbiteriana Escocesa, de carácter severo e inflexible con la holgazanería y el despilfarro. En sus estudios de bachillerato, descubrió su interés por la geometría y por la filosofía natural de Newton. Otra clave de su formación es que aprendió latín y algo de griego, por lo que podemos decir que su formación escolar fue muy completa en las disciplinas básicas.

El otro aspecto fundamental de su formación juvenil fue la habilidad manual. En la naviera de su padre pudo disponer de un taller mecánico al que dedicó innumerables horas de trabajo, construyendo artefactos, maquetas y mecanismos, adquiriendo una maestría considerable con la madera y el metal.

Si bien Watt parecía destinado a continuar la empresa familiar, convence a su padre para que apoye su idea de convertirse en constructor especialista de instrumentos, más que en comerciante. La profesión de constructor de instrumentos ya se había consolidado en Europa en el siglo XVII, especialmente en los estados alemanes y en Flandes. Los nuevos estudios en filosofía natural y medicina trajeron consigo la necesidad de una mayor precisión en la observación y en la medición, por lo que se incrementó la demanda de nuevos y más precisos instrumentos de laboratorio.

Tras formarse durante dos años en Glasgow y Londres, con 20 años recibe la oferta para colaborar con la Universidad de Glasgow en la conservación de una magnífica colección de instrumentos astronómicos donados a la Universidad. Por fin, en 1757 es nombrado Constructor de Instrumentos de la Universidad. Dispone de su propio taller y de sus herramientas traídas de Londres e incluso tiene alojamiento en las estancias de la Universidad. Así comienza su carrera profesional. La relación continua y directa con los académicos va a permitir a Watt entrar en contacto con las élites intelectuales de la

época, como el economista Adam Smith (1723-1790) y el físico Joseph Black (1728-1799).

Si bien los trabajos para los profesores (bombas, mecanismos, barómetros, etc.) le permitían estar al tanto del estado del arte de la ciencia de su tiempo, los ingresos que éstos trabajos producían eran irregulares e insuficientes, por lo que Watt ocupaba parte de su tiempo en la fabricación y venta de instrumentos tradicionales como balanzas, cuadrantes y también instrumentos musicales. El futuro parecía decantarse por continuar y ampliar el negocio de construcción de instrumentos, invertir en nuevas oportunidades comerciales y devenir, como su padre, en un hombre honorable y respetado en su comunidad. Como sabemos, esto no es lo que ocurrió.

La Universidad de Glasgow, al igual que la de Edimburgo o Aberdeen, disponía de un buen conjunto de aparatos y modelos demostrativos que los profesores solían utilizar en sus clases de matemáticas, química o filosofía natural. Así, el profesor John Anderson (1726-1796) utilizaba en sus clases una máquina de fuego. Consistía en un modelo a escala, simplificado y miniaturizado, de la máquina de vapor de Newcomen. Este modelo era uno de los más valiosos de la colección de la Universidad de Glasgow, en la medida en que su modelo a escala real se había convertido de largo en la máquina de vapor dominante en la industria de la época. La cuestión es que este modelo no funcionaba del todo correctamente y que Watt recibió en el invierno de 1763 el encargo de hacerlo funcionar adecuadamente. Watt trabajó en la máquina observando que el modelo se detenía al cabo de un rato de funcionamiento y llegó a la conclusión de que no era un problema del combustible ni de la potencia desarrollada, sino del consumo de vapor. Literalmente, el vapor se iba por todas partes.

Para sus ensayos sigue la metodología aprendida de Black: adopta un modo sistemático de medición y evaluación que permita obtener conclusiones sólidas, no meras intuiciones. Aquí se manifiesta ya el carácter de Watt como un hombre que no sólo es buen mecánico de instrumentos, sino que es verdaderamente un hombre de ciencia. Diseña diversos experimentos, construye sus propios modelos, ensaya con diversos materiales y escalas diferentes y centra su objetivo en determinar lo que denominará “la máquina de vapor perfecta”: un estándar con el que medir cualquier máquina de vapor real, o contra el cual se pudiera evaluar el progreso de un prototipo. Ésta sería una máquina que evitara todo derroche de vapor y que, por tanto, obtuviera el máximo beneficio del combustible gastado para producir la fuerza utilizable.

Durante los siguientes años trabaja en este estándar de la máquina perfecta. Sus estudios previos sobre el comportamiento del vapor con la presión y la temperatura le permitieron comprender perfectamente el funcionamiento de la máquina de Newcomen. Por fin, en 1765, llegó a la conclusión de que la cantidad de vapor necesaria para hacer funcionar la máquina es muy superior a la estrictamente necesaria para llenar el volumen del cilindro: la mayor parte del vapor se empleaba en calentar de nuevo la masa del cilindro, es decir, un despilfarro. ¿Por qué no separar esas dos fases, llevando el vapor a condensar a un segundo depósito y así mantener el cilindro de fuerza permanentemente caliente? La solución fue hacer el vacío en el cilindro de condensación, o condensador, mediante una bomba de vacío accionada por la propia máquina. El vacío succionaría el vapor tanto del cilindro de acción como del condensador y condensaría en este último, sumergido en agua fría. El cilindro de acción permanecería caliente, con el consiguiente ahorro de vapor y de tiempo para iniciar el

ciclo siguiente. Esta solución era brillante por su sencillez. No obstante, llevar a la práctica esta idea en la construcción de un prototipo demostrativo, le llevaría otros cuatro años de trabajo. Algunos elementos comunes como bombas de aire o calderas podían obtenerse de suministradores ya existentes. El resto de piezas y accesorios habrán de ser innovados por el propio Watt.

Sin embargo, el paso de una idea a una máquina operativa requería recursos de los que Watt no disponía. Watt no podía dedicar todas sus energías a una máquina que quizá no funcionara nunca. Sin la ayuda de promotores que le permitieran comprar tiempo, materiales e influencia, la máquina de vapor de Watt se habría ahogado.

El primer apoyo lo encontró en John Roebuck (1718-1794). Éste era un industrial con dinero, recursos técnicos y un dilema. El dilema era que para sus fábricas y fundiciones necesitaba el carbón que obtenía de unas minas arrendadas, que se inundaban de continuo. A pesar de disponer de máquinas de Newcomen, Roebuck, ingeniero bien formado y avisado inversor, pensó que las ideas de Watt podrían llevarse a la práctica para solucionar sus problemas. Puso a disposición de Watt la fundición para llevar a cabo ensayos y le permitió utilizar el taller junto a las minas para hacer sus prototipos con discreción.

Sin embargo, los trabajos irán despacio. Desde 1758, como constructor y vendedor de teodolitos y otros instrumentos topográficos, Watt había comenzado a actuar como supervisor en obras públicas. Desde 1766 trabajó en la industria química, como consultor en fábricas de cerámica, en algunas instalaciones mineras y en la construcción de canales. El James Watt comerciante, vendedor de instrumentos y hombre de negocios se estaba transformando en James Watt, ingeniero. Si bien los trabajos de ingeniero le apartaron de su máquina, la experiencia adquirida con el vapor le resultó valiosísima, pues una parte de su trabajo la dedicó al diseño, construcción e instalación de máquinas de Newcomen. Watt estaba radiante. No importa cuántas lecturas, construcción de prototipos y ensayos hubiera realizado en Glasgow. Nada se podía comparar a la experiencia práctica de construir las mejores máquinas existentes hasta entonces.

En 1768, con todo este bagaje práctico a sus espaldas, Watt volvió al trabajo con su máquina de vapor. Los trabajos requerían financiación y, por fin, consiguió convencer a Roebuck de que invirtiera una considerable cantidad de dinero en la máquina, si bien el precio a pagar era alto: Roebuck accedía a sufragar todos los gastos de desarrollo y de la patente, a cambio de obtener dos tercios de la propiedad de la invención. El 5 de enero de 1769 Watt obtuvo la patente de su máquina de fuego con su brillante novedad, el condensador, con una vigencia de 14 años, tras cuatro años desde su concepción de la idea y tras haber superado muchas decepciones que casi lo hacen abandonar.

La patente se tituló “Nuevo método para disminuir el consumo de vapor y de combustible en máquinas de fuego”. Se podría haber esperado que Watt hubiera depositado en el Alto Tribunal de la Cancillería una detallada descripción de su invención que hubiera permitido, una vez expirada la patente, que otro ingeniero construyera la máquina. De hecho, Watt se esforzó en contextualizar y describir su invención, pero no incluyó finalmente ninguno de los planos y esquemas que había preparado. Watt no patentó ninguna máquina específica o aplicación, sino su método, presentando una serie de principios de guía. Con ello se protegía de otros inventores que presentaran alternativas mecánicas específicas. En la práctica, abarcó toda posible

máquina de vapor con condensador independiente. Incluso, intuyendo el potencial que las máquinas de vapor tendrían en la industria patentó un principio de una máquina de vapor rotativa como complemento de la máquina alternativa ya inventada. Esta forma de actuar conduciría en los años siguientes a muchos otros inventores e ingenieros a ser llevados ante los tribunales y ser declarados piratas.

Cuando, tras enormes dificultades, a finales de 1770, Watt acomete sus últimos ensayos, Roebuck entra en bancarrota y tiene que vender la fundición. Watt vuelve a encontrarse ante el dilema de asegurarse la estabilidad como ingeniero civil o arriesgar su vida y la de su familia en pos de un sueño.

Matthew Boulton (1728-1809) era un destacado fabricante de Birmingham, especializado en novedades de metal tales como botones, hebillas y otros artículos parecidos. Era un empresario dinámico, seducido por la innovación, y bien relacionado en las altas esferas de la política. Boulton era también acreedor de Roebuck y había conocido a Watt tres años antes. Aceptó como pago de su deuda la participación de Roebuck en la patente de Watt. Ningún otro acreedor había valorado esta patente ni en un céntimo.

Si bien el genio de invención de Watt tiene una importancia fundamental para la máquina de vapor, la capacidad empresarial de Boulton merece ser tenida en cuenta. En el momento de constitución de la sociedad Boulton & Watt, el funcionamiento de la máquina a tamaño real no era todavía totalmente satisfactorio como para ponerla a la venta. El tiempo necesario para ponerla a punto era algo incierto y ya habían transcurrido cinco de los catorce años de validez de la patente. Para que fuera rentable, era necesario extender el período de vigencia de la patente, algo que en absoluto resultaba sencillo. Extender la patente significaba obtener un Acta del Parlamento, algo que ya había hecho Savery con su patente de 1698.

Tras innumerables esfuerzo legales y maniobras de alta política, finalmente, la extensión de la patente se resolvió a favor de Boulton & Watt en abril de 1775, y se extendió hasta 1800, nada menos que 25 años. Algunos historiadores señalan que esta resolución, que favoreció a Boulton y Watt, perjudicó claramente a otros ingenieros que proponían máquinas también eficientes. En la práctica, la patente impedía o dificultaba el progreso tecnológico en un tiempo de enorme desarrollo económico e innovación. No es, pues, ninguna casualidad que las máquinas más eficientes de alta presión de comienzos del siglo XIX se fueran a desarrollar en la vecina Francia.

La nueva máquina, aunque era al menos dos veces más económica que la mejor de Newcomen, resultaba extremadamente difícil y, por tanto, cara de construir. El primer y más importante mercado de las máquinas Boulton & Watt fue el de las minas de estaño y cobre en Cornwall. Los propietarios de las minas pagaban un *royalty* por el uso de la patente, consistente inicialmente en el precio de un tercio del ahorro en carbón respecto del consumo de una máquina de Newcomen. En los 25 años siguientes, hasta 55 máquinas de Watt se instalarían en Cornwall.

Al igual que a otros ingenieros, a Watt le resultó evidente que la industria era otra enorme oportunidad para su máquina, si bien la exigencia de obtener un movimiento rotativo directo y una cierta automatización de su funcionamiento eran requisitos

fundamentales para su utilización. Durante la década de 1780 trabaja intensivamente en mejoras de la máquina alternativa y en el diseño de una máquina rotativa, y alcanza una serie de logros totalmente novedosos, traducidos en nuevas patentes de invenciones, que los conocedores de la ingeniería mecánica apreciarán en toda su dimensión: el pistón de doble acción, el engranaje planetario, el regulador de velocidad o el indicador de vapor.

Durante los veinticinco años de vigencia de la patente de Boulton & Watt, entre 1775 y 1800, la empresa construyó casi 500 máquinas, de las cuales unas 200 eran bombas extractoras de agua y alrededor de 300 era máquinas rotativas que accionaban ejes de transmisión. Exportaron máquinas a Francia (1779), Alemania (1788), Holanda (1786) y muchos otros países europeos.

Sin embargo, la demanda de máquinas de vapor no se satisfizo sólo por la Boulton & Watt en su período de “monopolio”, y muchos otros constructores de máquinas de vapor tuvieron gran actividad, incluso dejando aparte la piratería directa. Gran número de máquinas de Savery y Newcomen fueron servidas a clientes que no podían conseguir los productos Watt o que preferían el coste inferior de otras máquinas menos eficientes. Es probable que las máquinas construidas bajo la patente Watt durante el período 1775-1800 no llegasen siquiera a la mitad del total.

Como ya se ha descrito anteriormente, a lo largo de su trayectoria profesional, James Watt fue transformándose de mecánico constructor en ingeniero y hombre de ciencia. Esto no es sólo una valoración de historiadores de la técnica o biógrafos, sino que significativas instituciones científicas de su época lo acogieron en su seno. Fue miembro de la Lunar Society de Birmingham, de la Royal Society of Edinburgh y, finalmente, de la más prestigiosa institución científica del imperio británico, la Royal Society of London. Llegó a ser una personalidad en la Inglaterra de su tiempo, y, de hecho, a partir de 1781, comenzó su reinención como una celebridad nacional, siendo considerado como el genio de una revolución en la producción de energía que promovió otra revolución en la industria y en la sociedad. Los biógrafos y creadores de imagen se pusieron manos a la obra con prontitud, mucho antes de su muerte en 1819, mediante artículos en la *Encyclopaedia Britannica* y diversas biografías. La mitificación consiste en una remodelación del personaje, en la limpieza de sus debilidades, haciendo romántica su historia personal, hasta lograr un nuevo retrato: James Watt, el solitario artesano, el inspirado inventor, y el modesto mecánico convertido en un caballero filósofo de la ciencia. Así, devino un icono, un héroe ligado a Greenock, Glasgow, Escocia o Gran Bretaña, según conviniera. A través del tiempo ha llegado hasta nosotros la leyenda de un joven Watt infante inspirado por la observación de una tetera hirviendo. Si Newton tuvo su manzana, Watt tuvo su tetera.

4. Sadi Carnot

Como hemos visto en las dos secciones anteriores, se podría decir que las máquinas de vapor son inglesas. Durante el período crucial de la vida de Watt antes descrito, en Francia se vivieron períodos de fuerte inestabilidad política, que convulsionaron el país y que se extendió a otros países europeos hasta 1815. Cuando volvió la paz, los observadores franceses quedaron profundamente impresionados al descubrir el notable progreso realizado por la industria británica. No obstante, los ingenieros y científicos franceses, bien preparados y capacitados, se sobrepusieron a esta circunstancia en unas

pocas décadas del siglo XIX, y acabaron de entender las máquinas de vapor tan bien o mejor que los ingleses.

El más importante de estos observadores franceses fue Sadi Carnot (1794-1832).

Sadi Carnot nació en París el 1 de junio de 1796. Su padre, Lazare Carnot era miembro del gobierno a la vez que afamado científico, destacando a nivel europeo por sus trabajos sobre máquinas y mecanismos. En 1812 inscribe a su hijo en la *École Polytechnique*, la más prestigiosa escuela de ingeniería militar. Sadi Carnot cuenta con 16 años, la edad mínima para la admisión. Tras graduarse continuó estudios en la *École de Génie de Metz*, de la que salió subteniente en 1817. Carnot pasa por varias guarniciones antes de ser nombrado sub-teniente de Estado Mayor en París. En 1820, con 24 años, se retira del ejército con media paga. Estudia física y economía política en diversos centros como la Sorbona, el Collège de France y el Conservatoire des Arts et Métiers, donde desde 1819 también impartía cursos de carácter técnico.

No se sabe apenas nada del carácter de Carnot. Se le describe como un hombre reservado y tímido, aficionado a la música. En 1824 Carnot publica el libro titulado *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres a développer cette puissance*. No publicará ninguna obra más. Parece que trabajó durante algún tiempo como ingeniero militar en Lyon y Auxonne en 1828, regresando luego a París para reemprender sus estudios sobre las máquinas y la teoría del calor. Murió en 1832, a los 36 años, víctima de una epidemia de cólera que asoló París. Como era común en las víctimas del cólera, fue incinerado junto con casi todos sus papeles y pertenencias. Sólo se salvaron algunos fragmentos de sus cuadernos de trabajo.

No está claro cómo llegó Carnot a interesarse por las máquinas de vapor. Lo más probable es que el interés viniera de su tradición de ingeniero. En 1819 había asistido a un curso de química industrial de los profesores N. Clément-Desormes y C. B. Desormes, sobre la teoría del uso de la expansión del vapor, técnica común que Watt había patentado e introducido en sus máquinas. En su libro, Carnot realiza un breve repaso de la evolución de las máquinas de vapor, subrayando su carácter eminentemente inglés, y reservando un sitio de honor para el célebre Watt. De todos modos, puntualiza que, a pesar de todo este desarrollo, se constata que el conocimiento teórico de estas máquinas está poco avanzado. Por decirlo con sus propias palabras, “el fenómeno de la producción de movimiento por el calor no ha sido considerado desde un punto de vista suficientemente general”.

A partir de 1820, las discusiones más generales se encaminan en dos direcciones que Carnot señala en su libro. La primera es sobre la potencia de la máquina: ¿Cuánto trabajo puede desarrollarse a partir de una determinada cantidad de calor? El segundo tema es el que se refiere al agente o sustancia, es decir, al fluido empleado por la máquina: ¿es mejor el aire, el vapor de agua o quizá los vapores de otras sustancias? Según Carnot, el estudio debería ser independiente del tipo de fluido y del tipo de mecanismo, si es que se quiere tener un conocimiento de las máquinas de fuego suficientemente general. En suma, Carnot pretende estudiar en general las máquinas de calor (de ahí el uso de la palabra “fuego” en el título de su libro) y no sólo las máquinas de vapor.

Carnot no estaba implicado en el negocio de las máquinas de vapor, como Watt, por lo que es comprensible que adoptara un punto de vista distanciado, más libre de prejuicios profesionales. Por su formación de ingeniero estaba familiarizado con las teorías y la tecnología de las máquinas hidráulicas y, a través de los cursos de Desormes y Clément, conocía también los últimos avances sobre el calor y la expansión de los gases.

La respuesta de Carnot a las dos preguntas planteadas es que, primero, la máxima cantidad de trabajo (movimiento) que se puede obtener de una determinada cantidad de calor sólo depende de la diferencia máxima de temperaturas y, segundo, que ninguna sustancia activa puede ser superior a otra, pues entonces sería posible el movimiento perpetuo sin consumo de combustible de ninguna clase. Esta es la principal contribución de Carnot sobre el funcionamiento de todas las máquinas térmicas.

No podemos dejar de encontrar algunos paralelismos significativos entre los trabajos de Watt y de Carnot. El primero es acerca de la máquina perfecta. Ambos proponen un modelo de máquina perfecta frente a la cual comparar y evaluar el resto de máquinas, si bien Watt lo hace en particular para la máquina práctica de vapor, mientras Carnot lo hace de una manera más generalizada para cualquier máquina de calor. El segundo se refiere al aprovechamiento máximo de la diferencia de temperatura (y de presión) disponible. Para Watt, si se quiere maximizar el rendimiento de la máquina, el vapor debe abandonar el cilindro a una presión casi igual a la del condensador. Para Carnot, el primero en plantear el problema en términos de temperatura, el calor debe abandonar el fluido a una temperatura casi igual a la del escape, o condensador. Dado el conocimiento de la figura de Watt que Carnot expresa en su libro, es difícil no ver aquí la influencia de Watt en el trabajo de Carnot.

Se publicaron 600 ejemplares del libro, a su cuenta. La edición se agotó pronto pero, al parecer, tuvo poco impacto en dos tipos de público concreto. Entre los ingenieros, por la casi total ausencia de fórmulas e cálculo y esquemas constructivos. Entre los científicos, porque un libro estaba, ya en esa época, fuera de los circuitos de difusión de la investigación científica, que eran las revistas especializadas. El conocimiento que muchos ingenieros y científicos actuales tienen de la obra de Carnot no deriva de sus propios escritos, sino de los comentarios de mediados del siglo XIX debidos a Clapeyron, Clausius y Lord Kelvin.

La recuperación del valioso trabajo de Carnot se produce a partir de 1834, año en que Clapeyron publica su *Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur* en el *Journal de l'École Polytechnique*. Es claro que ha leído el libro de Carnot y reconoce sin ambages la fuente de su información. En su obra retoma el ciclo de Carnot, pero lo representa en un diagrama presión-volumen, el mismo que Watt había empleado bajo secreto industrial en su indicador de la máquina de vapor. La obra de Clapeyron se traducirá en 1837 al inglés y en 1843 al alemán, lo que permitirá a Kelvin y a Clausius conocer los trabajos de Carnot.

5. Conclusión

La máquina de vapor fue creada inicialmente para resolver un problema concreto y limitado, como era extraer el agua de las minas, y sus primeros inventores y constructores no manifestaron noción alguna acerca de los ulteriores efectos que sus máquinas producirían en el resto de la sociedad. Innovadores posteriores descubrieron

para ella otros usos y fue fácilmente adaptada a infinidad de tareas, por ejemplo, en la industria manufacturera y en el transporte. Parece como si todos los pasos en la evolución y adaptación de la máquina de vapor a nuevos usos fueran tan lógicos y naturales que, de acuerdo con el imperativo tecnológico, fueran inevitables. Sin embargo, la revisión de la historia es bastante diferente. La máquina de Savery de 1698 no tuvo éxito en el bombeo de agua de las minas, pero fue extensamente utilizada para elevar agua a poca altura en las redes de suministro. La máquina de Newcomen de 1712, que funcionó satisfactoriamente en el drenaje de las minas, permaneció inalterada en su diseño por más de cincuenta años. La misma disposición física de la máquina de Newcomen fue seguida por Watt, aunque la introducción del condensador, regulador de velocidad y otras mejoras la cambiaron en aspectos que no se les habían ocurrido a los demás. Cada aplicación, nueva o continuada, de la energía del vapor ha requerido un juicio de valor por parte de la sociedad de ese momento acerca de la necesidad o prudencia de tales aplicaciones.

La carrera profesional y los logros de Watt tienen un significado general que van más allá de la historia de la máquina de vapor. Cuando realiza su fundamental invención del condensador no era una persona dedicada a las máquinas de fuego, sino alguien casi totalmente ajeno a ellas. Estando la máquina de Newcomen bien implantada por su sencillez y fiabilidad, el lanzamiento de la máquina de Watt fue una proeza empresarial indudablemente importante, dados los problemas técnicos de su fabricación y la competencia de las máquinas rivales. Sus máquinas llevan la impronta del creador de instrumentos científicos, muy distinto del tosco mundo de la minería del siglo XVIII. De hecho, resultaba bastante improbable que un fabricante tradicional de instrumentos llegara a hacer esta notable invención. Un rasgo singular de Watt es su vinculación con la Universidad de Glasgow y, concretamente, su utilización de las nuevas ideas científicas propuestas por primera vez por Black. Ningún otro ingeniero, técnico o artesano de aquellos momentos iniciales pudo haber sabido nada acerca del naciente estudio científico del calor. Hasta las primeras décadas del siglo XIX, la investigación sobre el calor en Gran Bretaña fue monopolio casi exclusivo de médicos y químicos y estuvo, por tanto, muy alejada del mundo de los ingenieros. Se podría afirmar que, si Watt no hubiera tenido el instinto del hombre de ciencia o del perfeccionista de laboratorio, se habría contentado con una máquina mucho más simple.

Sin embargo, concluir que la invención tecnológica es ciencia aplicada está lejos de la realidad. La construcción de máquinas térmicas durante el siglo XVIII se basaba en gran parte en el procedimiento de ensayo y error. Se acumulaban experiencias y éstas resultaban imprescindibles para el proyecto de nuevos modelos y el perfeccionamiento de los antiguos. Con esta experiencia acumulada se desarrollaron las máquinas operativas durante más de ciento cincuenta años, resolviendo problemas prácticos de optimización técnica y económica para su difusión. Sólo después de superar los problemas prácticos más urgentes, como el fiable ajuste mecánico de sus piezas y la seguridad, se podían tratar las cuestiones de rendimiento. Así lo reconoce Watt en sus escritos, atribuyendo a la experiencia práctica un valor crítico para el desarrollo de su máquina real frente al conocimiento científico que le valió para crear su prototipo.

De hecho, la evidencia de las máquinas de vapor, que a principios del siglo XIX se contaban por miles en Europa, atrajo el interés de los científicos de la época muy tardíamente. El tratamiento del calor como fuerza motriz es precisamente la gran aportación de Carnot, que atribuye a la temperatura un papel preponderante en la

potencia desarrollada por la máquina, mientras que los ingenieros de la época empleaban más bien la presión y la gravedad como magnitudes principales. Es evidente que a Carnot le impresionó la idea de Watt de separar la caldera y el condensador de la máquina, dándole una sugerencia para establecer su principio fundamental, por el que se necesita una fuente fría y otra caliente para realizar la potencia motriz del calor. Ya en el comienzo de sus *Réflexions*, Carnot manifiesta de forma rotunda su pretensión de tratar científicamente la producción de potencia motriz del calor, tema que hasta entonces había sido reservado a los ingenieros y constructores. El resultado fue la construcción de una ciencia, la termodinámica, a partir de un problema tecnológico.

La descripción anterior de las condiciones sociales, técnicas y materiales bajo las que se desarrolló la máquina de vapor a finales del siglo XVIII y principios del XIX en Europa se ajustan perfectamente a las características que definen una tecnología. En primer lugar, la máquina de vapor ejerce una acción sistemática, el bombeo de agua o cualquier otra aplicación, sobre un objeto concreto que se transforma, algo propio de la tecnología. En segundo lugar, tal como hemos visto en el ánimo de los trabajos de Watt y Carnot, lo hace de forma eficiente, es decir, por una valoración de costes y beneficios, en este caso energéticos y económicos. Además, se mantiene la búsqueda permanente de incremento de esta eficiencia. Y por último, consigue un resultado valioso, entendiendo que es la sociedad, mediante el conjunto de ideas, creencias y pautas culturales que rigen el comportamiento humano hacia la naturaleza y hacia el resto de grupos sociales, la que determina el valor de los resultados de una determinada tecnología.