

## LA MAQUINA DE VAPOR Y LOS GENERADORES DE VAPOR

La primera realización de una máquina de vapor fue la *máquina de fuego*, empleada para bombear agua y caracterizada por no tener mecanismos móviles, patentada el 25 de julio de 1698, presentada a la Royal Society en 1699 y construida en 1702 por Thomas Savery (Shilston 1650 - 1715). La segunda fue la construida **diez años después** por el plomero y vidriero de Dartford John Calley según los planos y especificaciones de su conciudadano Thomas Newcomen (Dartmouth 1663 - 1729), herrero y predicador. Cuando tenía casi 40 años, Newcomen empezó a estudiar la máquina de Savery, y como éste ya tenía el privilegio de invención, él y Calley se pusieron de acuerdo con Savery para una nueva patente conjunta, que obtuvieron en 1705. Newcomen, a pesar de los consejos en contra del gran físico Robert Hooke, decidió usar por primera vez el cilindro y el émbolo propuesto por Papin, a diferencia de la máquina de Savery, que trabajaba con dos recipientes y un juego de válvulas, y enfriar el vapor introduciendo agua en el cilindro, en vez de hacer circular el agua por el exterior del recipiente como hacía Savery, figura 5 de Chacón, identificación **6**. El uso del émbolo abría las puertas a una verdadera *máquina*, con posibilidad de producir trabajo y no solo de bombear agua.

Estas máquinas se caracterizaron desde un punto de vista termodérmico, por operar con el vacío producido por el vapor, según la idea de crear el vacío condensando vapor, avanzada en 1681 con su marmita para hacer caldo, por Denis Papin, quien también propuso más tarde una máquina *Nuevo modo de producir con pequeño gasto de fuerzas unos movimientos sumamente considerables* (en latín) *Acta Eruditorum*, Leipzig, 1690. Esto, hizo que bastase utilizar vapor sin sobrepresión. Así, Newcomen y Calley utilizaron una holla vieja de una cervecera.

Sin embargo, en la máquina concebida inicialmente, el enfriamiento del cilindro se efectuaba por el exterior y para impedir escapes la parte superior del émbolo estaba revestida de cuero y cubierta de agua procedente del depósito, a fin de tener un buen cierre. Durante unas pruebas del prototipo, Newcomen y Cawley vieron que el émbolo se movía con mucha mayor rapidez que de costumbre. Intrigados, examinaron el dispositivo y vieron que el émbolo tenía grietas por donde se filtraba el agua de sello al cilindro, lo que favorecía una condensación mucho más rápida. En la primera máquina industrial, en las minas de carbón de Duley Castle ya se incorporaba el artificio para la condensación por contacto. Esta máquina tenía unas dimensiones considerables, pues el cilindro tenía 533 mm de diámetro y 2,4 m de altura. Realizaba 12 carreras por minuto y era capaz de elevar 189 litros de agua desde una profundidad de 47,5 m.

Las máquinas de Newcomen tuvieron gran éxito y en 1729 ya se usaban en Alemania, Austria, Bélgica, Francia, Hungría y Suecia. En 1750 llegó a las colonias americanas, la primera para una mina de cobre en Newark y en 1774 se instaló en Kronstadt, para vaciar los diques de varada en la nueva base naval de Catalina la Grande de Rusia. Su robustez era tal que la última máquina desmantelada lo fue en 1934, en Parkgate, después de más de un siglo de funcionamiento. En España se instalaron las primeras máquinas, también para bombear diques, en los arsenales del Ferrol y de La Carraca (Cádiz), existiendo planos de las mismas de 1813.

La tercera ya fue la culminación de la máquina de vapor atmosférica, la de James Watt construida **más de medio siglo después** de la de Newcomen (en 1765), pero también pensada inicialmente para la extracción de agua de las minas de carbón británicas, inundadas por el agua subterránea. Este tercer tipo de máquina, fue fruto de la primera aplicación práctica del conocimiento del calor latente descubierto por Joseph Black (Burdeos 1728 - Edimburgo 1799) catedrático de medicina de la Universidad de Glasgow; en 1762. La efectuó el escocés James Watt (Greenok 1736 - 1819), también en la Universidad de Glasgow. Watt provenía de una familia de maestros, fabricantes de instrumentos y contratistas. Tenía una educación clásica completa y destacó en geometría. A los diecisiete años fue enviado a Glasgow para trabajar como aprendiz en la fabricación de instrumentos matemáticos. Cuando tenía veintiún años

intentó establecer su propio taller, pero el gremio de forjadores se lo impidió, fundándose en que no había completado su aprendizaje. Un amigo de su familia vino entonces en su ayuda, consiguiéndole un puesto de fabricante de instrumentos matemáticos en la Universidad de Glasgow. Se hizo amigo de Joseph Black, para ese entonces sumergido de lleno en sus estudios experimentales sobre el calor, y de otros catedráticos de filosofía natural (ciencias físicas). Dada su competencia, el cuerpo de catedráticos de la Universidad lo respetaba y lo trataba como a un igual. Su interés en la ciencia se extendió a la química, llegando a ser íntimo amigo de Priestley, atribuyéndose a Watt el haber descubierto, antes que Cavendish, la composición del agua. Estudió alemán e italiano para poder leer los trabajos originales de mecánica teórica y otras ciencias. A los cuarenta y ocho años fue designado miembro de la Royal Society de Edimburgo, y, un año más tarde, la Royal Society de Londres le confirió el mismo honor. En 1806 recibió el título de Doctor en Leyes por la Universidad de Glasgow. En 1764, en el taller de la Universidad, donde Watt efectuaba las reparaciones de los instrumentos científicos de la misma, Black encomendó a Watt que arreglase una vieja máquina de Newcomen que pertenecía a la Universidad.

La máquina había sido enviada previamente a Londres para que los técnicos de la fábrica la estudiaran y modificaran, pero los resultados no fueron satisfactorios. Después de analizarla detalladamente, Watt llegó a la conclusión de que el defecto estaba en la caldera. El único método que había entonces para proyectar los generadores, inspiradas en los calderos para calentar líquidos (mosto para cerveza, etc.) era haciendo uso de tablas y ecuaciones empíricas. Sobre la base de este procedimiento empírico parecía que la caldera era suficiente, pero Watt demostró que, en realidad, era pequeña para las exigencias que le imponía la aplicación que se le quería dar. Siguió sin embargo sin darse cuenta que el aprovechamiento del vacío producido por la condensación no tenía nada que ver con la temperatura del vapor, por lo que continuó utilizando una caldera atmosférica de tipo *carreta* (ver figuras 1 y 2 de Martínez y Tacón, identificación 3 y más adelante). El éxito que obtuvo al resolver este problema le animó a dedicarse a estudiar el problema general de la economía y el rendimiento de una máquina térmica.

Las máquinas de Newcomen más modernas fueron adquiriendo todavía mayor tamaño y reemplazaron los delgados cilindros de bronce por cilindros de fundación más gruesos y pesados. En cada nuevo modelo se requería más vapor durante la carrera ascendente del émbolo puesto que el cilindro más pasado necesitaba más calor para alcanzar la temperatura del vapor. Por otra parte, hacía falta más agua para enfriar el cilindro al condensar el vapor en la etapa de la carrera descendente del émbolo. Watt se percató de este problema pero para solucionarlo necesitaba información experimental sobre los calores específicos de los materiales y las propiedades del vapor, especialmente los calores latentes de vaporización y de condensación (en aquella época no era claro que fuesen iguales ya que no lo demostraron Laplace y Gay-Lussac hasta 1780. Puesto que poca de la información disponible era digna de confianza, empezó por determinar él mismo estas propiedades físicas con la mayor exactitud que le permitía el equipo experimental con que contaba. Luego, sobre la base de estos datos originales y mediante balances de *materia de calor* (calórico), calculó que la cantidad de vapor que se requería para operar la máquina, que era la que se necesitaba para llenar el cilindro, más la cantidad adicional para calentar las paredes del cilindro enfriadas, el agua acumulada que quedaba en el cilindro y el agua que constituía el cierre sobre la parte superior del cilindro, teniendo que ser todo ello calentado hasta la temperatura del vapor entrante por medio del calor latente de condensación. Calculó que a esta cantidad había que agregar además, el vapor que se utilizaba en expeler el agua y el aire a través de la *válvula de desagote U*, en la figura de Chacón, en la etapa de la carrera ascendente del émbolo.

Los cálculos de Watt indicaban que sólo un tercio del total del vapor que se consumía en la máquina de Newcomen era utilizado para el objeto que se pretendía darle: llenar el cilindro y producir vacío. Concluyó que se podía salvar la situación mediante un diseño adecuado de la

máquina. Watt patentó en enero de 1769, con el título *Nuevo método para reducir el consumo de vapor y combustible en las máquinas de fuego* un recipiente separado para condensar el vapor durante la carrera descendente del pistón, y un tubo con una válvula que conectaba el recipiente al cilindro de vapor; mediante este sistema podía conservar el cilindro y el émbolo a la temperatura del vapor entrante y reducir, de forma considerable, la cantidad requerida de agua puesto que con este sistema el único calor a eliminar era el calor latente de condensación de vapor consumido. Así inventó el **condensador** de mezcla, aunque había que tomar alguna medida para evacuar tanto el vapor condensado como el agua de enfriamiento inyectada y el aire acumulado en el condensador. Este problema tardaría muchos años en ser comprendido. Todavía en la última década del siglo XIX, M. Magín, exdirector de las Construcciones Navales de la Marina Francesa, afirmaba que la bomba de aire tenía por misión extraer del agua otro cuerpo pero que este cuerpo no era el agua (Widmann, identificación **18**). Watt solucionó el problema mediante una bomba de vacío que había construido algunos años antes. Además intuyó que podría comportar ventajas introducir el vapor por la parte superior en vez de la inferior del pistón, porque de esta manera sería el vapor, en lugar de la presión atmosférica, el que empujaría hacia abajo en la carrera correspondiente. Esto lo consiguió inventando una *caja de empaquetadura o prensa estopa* y una *válvula de equilibrio*, que podía abrirse en el momento apropiado para eliminar el vacío. Watt siguió introduciendo mejora tras mejora. Una de ellas, en 1774, fue que el vapor entrara por ambos lados de la cámara, empujando el émbolo en ambas direcciones, inventando así la máquina de doble efecto, descrita públicamente por primera vez por Betancourt (ver más adelante). Sus máquinas incluyeron otros notables inventos mecánicos, no relevantes para la Termotecnia. En el año 1800 vencieron las patentes de Watt Después de un primer intento fallido, se asoció en 1775 con un rico metalúrgico de Birmingham, Matthew Boulton, para comercializar sus inventos., para esa fecha, la firma Boulton & Watt ya había producido unas 500 máquinas, de las cuales casi el cuarenta por ciento eran bombas y aparatos para suministrar energía rotativa a industrias, molinos textiles, talleres de laminado y molinos harineros.

Watt obtuvo un triunfo de la técnica y contribuyó decisivamente a consolidar el cambio del futuro de la humanidad; sin embargo, las máquinas, al ser atmosféricas, seguían siendo de dimensiones considerables, ya que no mejoró sustancialmente el generador de vapor, que era un generador atmosférico; al parecer por considerar demasiado peligroso el vapor a presión, ya propuesto en 1724 por Jacob Leupold (Planitz 1674 - Leipzig 1727).

Pero los sucesores de Watt, para aumentar la potencia de las máquinas de vapor, si lo hicieron. Richard Trevithick (1771-1833) en Inglaterra y Oliver Evans (1755-1819) en Estados Unidos, inventaron y fabricaron poco después de Watt, en 1800 y 1802 respectivamente, pero **un siglo después** de la máquina de Savery, la caldera a presión, uno de los primeros hitos de la Termotecnia. Estas máquinas carecían de condensador y dejaban salir el vapor a la atmósfera a presiones bastante elevadas, por lo cual eran más ruidosas que las de Watt y se las conocía como *resopladoras*.

Antes, pero, haremos un inciso para ver como, a pesar de ser una aportación tecnológica, la máquina de vapor provocó la aparición de la Termodinámica como ciencia, pues, la utilización industrial del vapor rápidamente lo puso en las cuentas de explotación de las empresas y apareció la preocupación por el rendimiento. Así en 1811, los propietarios de las minas de Cornualles empezaron a publicar informes sobre el rendimiento de sus máquinas, para estimular su aumento. Se vio que cada máquina tenía una relación de conversión del carbón en trabajo diferente y esta relación descendía a medida que las máquinas eran más modernas se mejoraban. Por lo tanto, cabía preguntarse si existía un límite para esta relación de conversión, o por el contrario sería posible el movimiento continuo.

La solución al enigma la encontró Sadi Carnot (Paris 1796 - 1832). Miembro de una familia

ilustre, su padre Lázaro fue general y un gran matemático, y un nieto sobrino suyo, también Sadi, presidente de la República Francesa. Fue un niño débil y sensitivo, dotado de una talento precoz para la mecánica, la física y las matemáticas. Su padre dio una orientación científica a su educación. Sadi se preparó para ingresar en la Escuela Politécnica y fue admitido en 1812, a la edad de dieciséis años. Contaba entre sus profesores a Lagrange y Laplace en matemáticas, Prony en mecánica, etc. Al terminar los estudios, por tradición, quiso entrar en la escuela de artillería de campaña de Metz y seguir una carrera militar. Era demasiado joven sin embargo, y por un tiempo tuvo que continuar estudiando en París. Posteriormente realizó una breve carrera militar, pero trató de aprovechar todas las oportunidades para proseguir su educación. Siguió cursos en el *Collège de France*, la Sorbona, la *École des Mines y la Bibliothèque*. Durante el período de 1819 a 1824 realizó investigaciones sobre gases y vapores, que en la época eran conceptos esencialmente distintos, y prosiguió sus estudios científicos. Sus contemporáneos reconocieron su alto nivel científico y fue designado miembro de la *Association Polytechnique*. La revolución de 1830 interrumpió su investigación porque tuvo que incorporarse al servicio militar. Terminadas sus obligaciones militares, volvió a dedicarse a su tarea científica, quedando su endeble salud resentida por el esfuerzo. Escribió a sus amigos diciendo que tenía *inflamación de los pulmones*, a la que siguió la escarlatina. Cuando se estaba recuperando de su grave enfermedad, sufrió París una epidemia de cólera. Murió a causa de la misma a los treinta y seis años el 24 de agosto de 1832. Tuvo también algunas experiencias en la industria, donde se familiarizó con la máquina de vapor e intuyó su enorme potencial industrial y económico. Con percepción genial concluyó que:

*si se desea elevar el arte de producir fuerza motriz a partir del calor a la altura de una ciencia, debe estudiarse todo el fenómeno desde el punto de vista más general, sin hacer referencia a un motor, máquina o fluido en particular.*

Estas consideraciones le llevaron en 1819, a escribir su trabajo de 118 páginas, *Reflections sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres a developper cette puissance*, que no fue publicado hasta el año 1824. Esta memoria aportó conceptos fundamentales a la incipiente ciencia térmica y aún utilizando el concepto de calórico, sentó las bases de la Termodinámica macroscópica, que Carnot captó claramente. Constató que, desde principios del siglo XVIII, cuando Savery comercializó su primera máquina de fuego en 1702, hasta la mitad del siglo XIX, los ingenieros habían desarrollado la máquina térmica, sin comprender sus fundamentos teóricos. Así, en su memoria, la introducción decía:

*El descubrimiento importante no es el primer intento, sino los sucesivos mejoramientos. Hay una distancia casi tan grande entre el primer aparato en que se usó la fuerza expansiva del vapor y una máquina actual, como entre una balsa y un moderno navío. El honor de ese primer desarrollo pertenece a Inglaterra: Savery, Newcomen, Smeaton, Watt, Woolf, Trevithick y otros.*

*A pesar del trabajo que se realizó sobre todos los tipos de máquina de vapor, su teoría es muy poco comprendida y los intentos para mejorarla todavía están orientados casi exclusivamente por el azar.*

*Se ha planteado a menudo la cuestión de si la energía motriz del calor no tiene fin, si las posibles mejoras a las máquinas de vapor tienen un límite previsible, un límite que la naturaleza de las cosas no permitirá superar por ningún medio, o bien sí, por el contrario, estas mejoras pueden ser llevadas a cabo indefinidamente.*

Prosiguiendo más adelante:

*La producción de movimiento por la máquina de vapor está acompañada siempre de una circunstancia que debemos señalar en particular. Esta circunstancia es el paso de calórico*

*desde un cuerpo cuya temperatura es más o menos elevada otro donde es mas baja...*

*....La potencia motriz del calor es independiente de los agentes empleados para desarrollarla; su cantidad viene determinada solamente por la temperatura de los cuerpos entre los cuales, como resultado final, ocurre la transferencia de calórico*

Carnot pensó, por analogía con una rueda hidráulica, que la potencia motriz dependía tanto de la cantidad de calórico transferida como del salto de temperaturas entre las que se transfería. Después de considerar el calórico como un fluido transferido por diferencias de temperatura (Black, 1760) la idea parece totalmente evidente, pero sólo Carnot en 100 años (hasta Clausius y Kelvin) lo vio claramente, o al menos lo supo expresar. Introdujo el concepto de ciclo ideal recorrido en principio por cualquier sustancia, pero que aplicó al gas ideal. El ciclo podía invertir su funcionamiento, con lo que introdujo la idea de reversibilidad. Llegó además a la conclusión que, para una diferencia de temperaturas dadas y fijada una cantidad de calórico, ningún ciclo podía dar más potencia motriz que su ciclo reversible. Este principio de Carnot sirvió para que Lord Kelvin solucionase el problema del significado de la temperatura, definiendo la escala absoluta en 1851, y todavía se emplea hoy como una de las formulaciones de la 2ª ley de la Termodinámica. Como Carnot murió de cólera, la mayoría de sus papeles fueron quemados para evitar la posibilidad de contagio; sin embargo, quedaron algunas notas manuscritas, redactadas probablemente entre 1830 y 1832, que fueron encontradas por su hermano en 1871 y publicadas en 1878. En esas notas se puede comprobar que Carnot abandonó la teoría del calórico en la que creía en 1819, pues escribió:

*El calor no es otra cosa que la potencia motriz o más bien el movimiento que ha cambiado de forma. Es éste un movimiento en las partículas de los cuerpos. Donde quiera que hay una destrucción de potencia motriz, hay, al mismo tiempo, producción de calor en cantidad exactamente proporcional a la cantidad de potencia motriz destruida. Recíprocamente, en cualquier parte en que haya destrucción de calor, hay una producción de potencia motriz. Se puede entonces establecer como tesis general que la potencia motriz es una cantidad invariable en la naturaleza y que hablando con propiedad no puede nunca producirse ni destruirse. En verdad ella cambia de forma, es decir produce tanto un tipo de movimiento como otro, pero jamás es aniquilada.*

*Según algunas ideas que yo he concebido sobre la teoría del calor la producción de una unidad de potencia motriz necesita la destrucción de 2,70 unidades de calor.*

Este párrafo muestra que Carnot, antes de su muerte en 1832, había formulado el principio de la equivalencia entre el trabajo mecánico y el calor y, además, que había establecido un valor numérico para esa equivalencia que era más aproximado que el que años más tarde obtendría Mayer. En efecto, la unidad de potencia motriz (trabajo) empleada entonces era la dynamie o tonelada-metro, igual a 9.810 J, con lo que el equivalente mecánico del calor resultaba según Carnot  $9,81/2,7 = 3,633$  J/cal.

En la generación que siguió a Watt, dos personajes destacaron por sus contribuciones a la Termotecnia en sus dos vertientes, calor y frío. Uno era norteamericano, Oliver Evans (Delaware 1755 - 1819), el otro inglés, Richard Trevithick (Ilogan 1771 - Dartford 1833). Aquí se citan por la invención del generador de alta presión y en el caso del segundo, además, del **generador de tubos de humos** que ha llegado hasta nuestros días.

Las contribuciones de Evans fueron notables, más si consideramos los grandes inconvenientes con que se enfrentó en su trabajo. Nació en una granja y fue a la escuela rural hasta los catorce años. Trabajó como aprendiz de constructor de carretas, donde evidenció su ingenio mecánico, pero no se contentó con desarrollar solo su habilidad mecánica, sino que decidió a lograr por su cuenta una educación científica. Buscó libros sobre temas de matemáticas y mecánicas y los

estudió durante sus horas libres. A los diecisiete años tuvo oportunidad de estudiar el diseño de la entonces nueva máquina de vapor de Watt con el condensador separado, la cual le causó una impresión tan profunda que dedicó el resto de su vida al desarrollo de la máquina de vapor y su utilización. Se cuenta que un día Evans, que evidentemente no había leído los manuscritos de Leonardo de Vinci, estaba observando ociosamente cómo unos niños que jugaban alrededor del fuego de la herrería; habían conseguido un viejo cañón de escopeta que llenaron con agua, luego taponaron la boca del arma y la colocaron al fuego. Se produjo un estallido y Evans quedó impresionado por la alta energía expansiva del vapor. Este incidente lo convenció de que, en sus máquinas a baja presión, Watt no estaba utilizando apropiadamente esta energía y entonces comenzó a experimentar con el vapor a alta temperatura y su *potencia elástica*.

Evans se enfrentó a grandes obstáculos; era un hombre pobre y de origen humilde, y por ser autodidacta, carecía de prestigio científico, por lo que constantemente sus ideas eran puestas en ridículo por los demás. Con gran perseverancia obtuvo un pequeño respaldo financiero para seguir adelante y en 1786 pidió a los congresos de Pennsylvania y Maryland los derechos exclusivos para usufructuar las mejoras a las máquinas y vehículos de vapor de aquellos Estados. Pensilvania rechazó la parte relativa a los vehículos argumentando que la idea era tan ridícula que no podía perder tiempo en considerarla con seriedad. Sin embargo, el razonamiento de Evans era correcto, pues con su idea se podía elevar la potencia y rendimiento de la máquina hasta el punto de disminuir su tamaño para adaptarla a la impulsión de vehículos terrestres. Sin embargo, las circunstancias citadas, sumadas al hecho de que vivía en una zona de poco desarrollada tecnológicamente, hicieron que tuviese que dedicarse a mejorar sólo las máquinas estacionarias. En 1802, fabricó, en la ciudad de Filadelfia, su primera pequeña máquina de vapor a 3,5 bar (alta presión para la época), con un cilindro de 15 mm de diámetro y 460 mm de carrera, frente a los 533 mm y 2,4 m citados para la máquina de Newcomen, y análogamente las de Watt. La aventura le costó a Evans 3.700 dólares, pero la máquina demostró ser extraordinariamente buena.

Desde el punto de vista de la Termodinámica, lo que interesa es que el generador era también notablemente superior a los anteriores. Era un cilindro horizontal de cobre con el tubo de escape que lo atravesaba por el centro antes de unirse a la chimenea. Los gases calientes pasaban, tanto a través de la caldera, por el tubo, como por su exterior, aumentando así la superficie calefactora y la temperatura del agua. En el libro de Martínez y Tacón (identificación 3, figura 3) se muestra una representación de este generador. Con la máquina trabajando a alta presión, Evans pudo eliminar el condensador, y el vapor salía simplemente a la atmósfera después de haberse expandido en el cilindro. Esto simplificaba el diseño y el costo inicial, pero Evans no sabía que al dejar a un lado el condensador perdía la mayor parte del rendimiento que había ganado con la caldera de alta presión. Sin embargo, los ingenieros descubrieron prácticamente más tarde, sin leer a Carnot, que lo mejor era utilizar *ambas* cosas, la caldera de alta presión de Evans y el condensador de vacío de Watt. , como Carnot justificaría más tarde.

Con este éxito obtuvo rápidamente respaldo financiero adecuado y en 1807 fundó la empresa *Mars Irons Works*. Así llegó finalmente el reconocimiento para Oliver Evans, aunque fue tarde en su vida. Su último gran trabajo fue la construcción de la máquina y calderas para las *Fairmount Waterworks*, en Filadelfia. El cilindro tenía 510 mm de diámetro y 1,5 m de carrera y operaba con cuatro calderas a una presión de 14 bar.

Dieciséis años más joven que Evans, Trevithick, gozó de muchas ventajas que Evans nunca tuvo. Su padre era el gerente general de la mina de carbón de Dolcoath, donde la máquina de Newcomen se instaló cuando Richard todavía era niño. Creció en una atmósfera de ingeniería, tecnología e industrias, y tuvo buena educación en ciencias y matemáticas. Se formó como ingeniero, trabajando como aprendiz junto a Hornblower (inventor de las máquinas de varias etapas o *compound*) y William Murdock, uno de los asistentes de Watt. Era práctica común de las

empresas inglesas entrenar jóvenes ingenieros en sus fábricas como ayudantes en la construcción de máquinas de vapor y enviarlos luego a instalar la máquina y ponerla en funcionamiento para sus nuevos dueños. Como en 1800 había poco control de medidas y tolerancias y las partes no eran intercambiables, la construcción exigía que cada una de las partes y su montaje fuesen realizadas a mano para cada máquina en particular. Esto llevaba mucho tiempo y era frecuente que el ingeniero se quedase con la máquina como empleo permanente.

Este medio absorbente espoleó la inventiva de Trevithick. Llegó a la conclusión, independientemente de Evans, de que debía haber alguna ventaja fundamental en utilizar vapor de alta presión. Alrededor de 1800, mediante un diseño altamente ingenioso. La configuración básica era bastante parecida a la de las calderas marinas tipo escocés de tubos de humos mostradas en la identificación **26** y todavía en uso. Construyó un generador de alta presión (10 bar), para una máquina para bombear agua en minas, de doble efecto y con un cigüeñal. Pero, tal como hizo Evans, a pesar de que la patente de Watt sobre el condensador había caducado, lo descartó como inútil.

Con el desarrollo las calderas de alta presión era inevitable que sobreviniesen accidentes. Este problema fue muy grave hasta principios del siglo XX, como refleja el dictamen del jurado del concurso convocado en 1893 por la Asociación de Ingenieros Industriales de Barcelona, en el que se premia la obra del ingeniero industrial Guillermo J. de Guillen Gracia, sobre explosiones de generadores de vapor (identificación **17**). La 1ª explosión, en rigor estallido, sucedió cuando el operario que cuidaba una de las primeras máquinas de Trevithick, cargó la válvula de seguridad para obtener más potencia de la máquina. Watt había inventado los manómetros de mercurio para medir las bajas presiones en sus calderas, pero los manómetros de alta presión no se perfeccionaron hasta 1848. La única manera de conocer las presiones que se desarrollaban en las calderas de alta presión, era *reventar* válvulas de seguridad ajustadas para presiones preestablecidas. Estas válvulas de seguridad, según se aprecia en las figuras 10, 11 y 12 de Martínez Tacón (identificación **3**), consistían simplemente en pesos conocidos que cubrían orificios de la caldera de área también conocida. Poco se sabía acerca de la teoría de la resistencia de los materiales, y los progresos en el campo del diseño de calderas de alta presión solo llegaron a través de tanteos, a veces con resultados desastrosos.

Trevithick trabajó para mejorar los controles de seguridad; uno de los más efectivos y a prueba de distracciones consistía en un tapón de plomo fusible colocado en la caldera debajo de la línea del nivel del agua, mientras estaba cubierto con agua, el fusible permanecía intacto, pero cuando el nivel era demasiado bajo, el tapón quedaba sin enfriamiento y se fundía, advirtiendo el silbido del vapor al operario. La presión excesiva también hacía volar el tapón si la válvula de seguridad no funcionaba.

De todos modos se tardó en comprender que la calidad del agua, además de un problema de mantenimiento (las primeras calderas requerían limpiezas muy frecuentes, Carranza, (identificación **8**) lo era de seguridad. Aunque Guillén García en su obra (identificación **17**) cita el empleo de desincrustantes y el uso de *agua depurada* el tratamiento no se generalizó hasta el siglo XX. Los primeros tratamientos se efectuaban calentando el agua de alimentación a más de 150°C, con adición de carbonato sódico a veces para precipitar las sales cálcicas, logrando además desprender parte del oxígeno disuelto. A principios del siglo aparecieron los depuradores químicos inicialmente disoluciones de sosa y lechada de cal. Con estos métodos se llegaba a concentraciones en la alimentación de 0,05 g de carbonato de calcio, lo que exigía purgas importantes. La eliminación del oxígeno se realizaba primitivamente con hierro metálico finamente dividido como reductor, aunque a principios del siglo XX ya existían desaeradores mecánicos mediante la vaporización instantánea (flash).

La evolución de los generadores de tubos de humo a partir de, por su simplicidad ha sido escaso. En la, página 55 de la identificación **26**, se muestran las distintas variantes.

### Los generadores de tubos de agua.

Los generadores de tubos de humo se mostraron extremadamente peligrosos, pues la ebullición estancada (*pool boiling*), favorecía la producción de incrustaciones y los excesos de flujo térmico, causaban el fallo de la chapa y el consiguiente estallido por despresurización súbita. En cualquier caso, esta configuración limitaba la capacidad de producción al no poderse superar valores de flujo de calor relativamente bajos. Esto provocó intentos de disminuir la cantidad de agua en la caldera, así como de hacerla circular por la misma, a fin de facilitar el enfriamiento de sus paredes.

De esta forma surgieron los generadores de tubos de agua que permitieron la convección forzada y, más adelante, aprovechar el efecto termosifón. La primera patente de este tipo la de William Blakey en 1774, que alegando una mejora en la máquina de Savery, incluye la nueva disposición del generador mostrada en la figura 1 de de Robertson, identificación **23**. Sin embargo el primer diseño con éxito fue el de James Rumsey, un inventor americano conocido por sus primeras experiencias con la navegación a vapor, quien patentó en Inglaterra en 1788 varios tipos de generadores algunos de los cuales eran del tipo de tubo de agua, que funcionaron.

Por la misma época, John Stevens, también inventó un generador de tubos de agua que consistía en un haz de pequeños tubos cerrados en un extremo y conectado por el otro a un depósito central, figura 3 de la identificación **23**. Este generador se patentó en 1803 en los EE UU. A., gracias a que el propio Stevens, que era abogado, había solicitado al Congreso una ley de patentes para proteger sus inventos.. Tal ley se aprobó en 1790 y se puede decir que la base del sistema de patentes de los EE.UU.A se creó gracias a la invención de las calderas de tubos de agua. Posteriormente Stevens también hizo inventos referentes a la máquina frigorífica y otro generador de tubos de agua patentado por John Cox Stevens en 1805 se ha conservado en el museo de la Institución Smithsonian, en Washington.

Arthur Woolf resucitó el sistema *compound* en 1804 y construyó su primera máquina con varios cilindros en 1814, figura 2 de la identificación **23**.

En 1822 el ya citado Jacob Perkins construyó el generador de tubos de agua que es el predecesor de los generadores de un paso actuales. Una serie de barras de fundición con unos orificios longitudinales de 1 1/4 de pulgada se disponían sobre las llamas en tres hileras conectando los extremos en el exterior del horno con una serie de codos hecho con tubos curvados. El agua se alimentaba por la hilera superior, a fin de que circulase a *contra corriente*, mediante una bomba de alimentación y el vapor recalentado se descargaba de la hilera inferior a un colector. También Perkins patentó en 1831 los tubos dobles para favorecer la convección natural, conocidos posteriormente como *Field*, figura 8 de la identificación **23**, que gozaron de gran popularidad hasta bien entrado el siglo XX.

Entre 1821 y 1825 se inventaron varios generadores de tubos de agua para vehículos, que era uno de los incentivos para los inventores, entre los que se puede destacar el de Maceroni y Squire, figura 84 de Robertson, identificación **23**, que trabajaba a 11 bar y que recorrió 1.700 millas (2.700 km) sin reparaciones importantes.

En este grupo es de destacar por su diseño racional, que favorecía la circulación natural, el generador para vehículo del Dr. Church, de 1832, figura 85 de de Robertson, identificación **23**, en el que los tubos de agua que jugaban el papel de tubos vaporizadores (*risers*) descendían verticalmente de la coronación de la cámara de combustión y hacía un codo en su parte inferior para comunicar con un cámara envolvente concéntrica que contenía agua, haciendo el papel de tubos colectores (*downcomers*).

También para vehículos se patentó en 1833 el generador Hancock, precursor de los cambiadores de placas, como se aprecia en la figura, figura 81 de de Robertson, identificación **23**,. Se llegaron a construir hasta 1840 diez vehículos con este generador.

Cabe señalar que todos estos vehículos a vapor, técnicamente operativos, tuvieron que cesar de funcionar por la oposición de las autoridades de las localidades por donde circulaban.

En 1850 Guillermo Siemens (Lenthe 1823 - Londres 1883) inventó el regenerador que precalienta el agua de alimentación con una extracción de vapor.

En 1856 Stephen Wilcox propuso con éxito un generador de vapor que tenía una configuración racional. El diseño incorporaba unos tubos inclinados que conectaban los acumuladores de agua frontal y posterior permitiendo la circulación de la misma por efecto termosifón y una mayor superficie de calefacción que sus antecesores, figuras 10 y 11 de la identificación **23**.

Una ventaja adicional era el reducido peligro de explosión inherente al uso de los tubos de agua, aunque el diseño tenía el inconveniente de estos eran inaccesibles para limpieza. En una conferencia en la universidad de Cornell, en 1890 George W. Babcock explicaba el principio de su generador, la circulación natural, figura a, b, c, d, y e de la identificación **26**, atribuyendo la idea a Perkins.

En 1866 George Herman Babcock se asoció con Stephen Wilcox patentando su primer generador en 1867, figura 27 de Robertson, identificación **23**, con unas características para facilitar el mantenimiento muy adecuadas.

Sin embargo el primer generador con el diseño conocido como D, con los tubos evaporizadores (*risers*) y colectores (*downcomers*) adecuadamente dispuestos para obtener la circulación por termosifón, fue el *Sochet*, figuras 14 15 de Robertson, identificación **23**, diseñado por el ingeniero francés del mismo nombre, sin embargo el generador fracasó, probablemente por mal diseño de la cámara de combustión, pequeña a la vista de la figura, y en 1859 dejó de fabricarse.

El éxito de los generadores de tubos rectos e inclinados estimuló a los inventores para encontrar nuevos diseños. Así en 1880 Allan Stirling desarrolló un diseño que conectaba los tubos de generación de vapor doblándolos, lo que les permitía absorber mucho mejor las deformaciones térmicas, directamente a un recipiente de separación consiguiendo una baja altura encima de la cámara de combustión, (Robertson, identificación **23**). Así fundó la Stirling Boiler Company que produjo generadores como los mostrados en la figura, figura 69 de la identificación **25**. La compañía Stirling fue adquirida por Babcock y Wilcox en 1906 que incorporó los tubos curvados a sus diseños, resolviendo los problemas que existían para la limpieza del interior de los mismos.

Por razones evidentes de condiciones operatorias, espacio, etc., rápidamente se establecieron dos familias de generadores de vapor: los marinos y los terrestres, estos últimos a su vez incluyendo las instalaciones fijas y las móviles (locomotoras).

El desarrollo de los generadores terrestres fijos estuvo ligado a su uso para generar electricidad, lo que se inició a finales del siglo XIX. Por ejemplo en los EE.UU.A la planta de Brush Electric Light Company, en Philadelphia, fue la primera instalación que generó electricidad a partir de vapor en América, en 1881, mediante cuatro calderas de tubos de agua de 73 HP (55 kW) de potencia cada una. The Fisk Street Station de la Commonwealth Edison Company, fue la primera central térmica, en 1903 en instalar turbinas exclusivamente para generación de electricidad. Esta enorme planta estaba dotada con 96 generadores de 508 HP (cada uno 380 kW) produciendo vapor a 12

bar y 39EC de recalentamiento.

Con las paredes enfriadas con el agua el uso de combustible líquido, fueloil, permitió una reducción del tamaño de los hogares importante, así como la reducción del mantenimiento del hogar y del ensuciamiento de las superficies de calentamiento por convección, resultando una reducción de la superficie específica para generar vapor. Como consecuencia de todo esto los actuales generadores para vapor de alta presión más de 85 bar, trabajan esencialmente por radiación, por lo que consisten en una cámara con paredes de tubos de agua, recalentadores y los accesorios como economizadores (precalentadores de agua) y precalentadores de aire. Los generadores para presiones más baja operan por radiación más convección, por lo que contienen haces de tubos además de las paredes con tubos de agua del hogar.

Una particularidad de los generadores de vapor es que dieron origen a los métodos de diseño de equipos a presión, dando lugar a normativas tan importante como el ASME Power Boiler Code, establecido en 1911 por la American Society of Mechanical Engineers, etc.

Estas instalaciones contribuyeron al desarrollo de los cambiadores de calor, esenciales en la industria química. En su acepción mas general los cambiadores de calor son los dispositivos en los cuales una corriente fluida o sólida más caliente que otra, cede calor a esta última. La transferencia de calor directa, con la presencia simultánea en el cambiador de ambas corrientes se ha realizado de dos formas:

Por contacto directo, con o sin mezcla de ambas. Cuando las corrientes son miscibles se tienen los llamados *cambiadores de mezcla*, en los cuales las corrientes pierden su identidad, convirtiéndose en una sola. Fue introducido por Watt, como ya se comentó.

Manteniendo las corrientes separadas, mediante tabiques sólidos interpuestos que formen dos circuitos independientes, con lo que las corrientes mantienen su identidad después de atravesar el aparato; Estos cambiadores de calor se denominan *recuperadores*, se emplearon por primera vez en los alambiques de destilación y los correspondientes serpentines de condensación. Este último tipo es el cambiador por antonomasia, que consistió tradicionalmente en un serpentín en el interior de un continente con otro fluido estacionario o circulando o bien llama, como en los alambiques o los generadores de vapor.

Los primitivos cambiadores tubulares se introdujeron con las máquinas de vapor, primero los generadores y posteriormente, cuando se apreció la ventaja de recuperar el condensado en los buques y después en tierra, porque había que tratar el agua, los condensadores. En la figura 93 de Fernández y Rodríguez, identificación **15**, se muestra un condensador tubular de vapor. El mismo dispositivo se trasladó inicialmente para los precalentadores de agua, pero sin observar la ventaja que representaba el flujo cruzado obtenido al poner pantallas. Gracias a incorporar éste, en 1901 se describía el precalentador Normand, indicando que su tamaño era muy inferior a los restantes del mercado (obsérvese que llevaba pantallas deflectoras, figura 167, Robertson, identificación **23**).

De los ingenieros españoles teóricos del diseño de generadores de vapor, el pionero fue Agustín de Betancourt y Molina (Las Palmas de Canarias 1758 – San Petersburgo 1824). Fue pensionado en París en 1784 para estudiar *Geometría y Arquitectura subterránea*, por la Secretaria de Indias, que deseaba que dirigiese explotaciones mineras en América, pero al año siguiente Floridablanca le llamó para crear una Academia de Ciencias, que se concibió como una escuela politécnica, aunque el proyecto no culminó. En 1807 decidió abandonar España, estableciéndose definitivamente en Rusia en 1808 donde fue muy apreciado por la corona y desarrolló una amplia labor de ingeniería civil. Entre otros muchos méritos, como el haber hecho los primeros ensayos de telegrafía eléctrica. En cuanto a las máquinas térmicas fue quien, sólo con una inspección visual externa, descubrió y divulgó el funcionamiento de la máquina de vapor de Watt en el

continente, a través de una memoria en francés que presentó en 1789 a la Academia Real de la Ciencia de París y publicada el mismo año con el título *Memoire sur la force expansive de la vapeur de l'eau*, Paris, Chez Lauren libraire, rue de la Harpe nº 18 (se conserva un ejemplar en la ETSI de C. C. y P. de Madrid). También, en cuanto a la termotecnia, realizó el manuscrito *Memoria sobre el método de construir y usar los hornos para extraer el betún que tiene el carbón de piedra quedándose éste purificado al mismo tiempo*, Madrid.

Como Betancourt publicó en Francia y su obra de termotecnia se quedó en manuscritos, el primer termotécnico que publicó obras propias en castellano fue Juan José Martínez Tacón, identificación **3**, cuyo texto era asimismo un tratado de transferencia de calor, como muestra la tabla de conductividades térmicas, (establecida probablemente hacia 1820) tomando como referencia la conductividad del oro, con un índice 1.000. Asimismo, los primeros estudiosos de su operación y mantenimiento, fueron marinos de guerra; cabe citar, con Martínez Tacón, identificación **3**, Francisco Chacon y Orta autor de las dos obras *Breve idea de las Máquinas de vapor y sus aplicaciones* y *Manejo de las Máquinas de vapor a bordo*, identificación **6**, 1852; José de Carranza y Echevarria *Tratado de las Máquinas de vapor aplicada a la propulsión de los buques*, Madrid 1857; etc.,

En cuanto a Cataluña, en 1805 se instaló, en la fábrica de hilados de Jacint Ramón, la primera máquina de vapor, con su correspondiente generador, construida en España (Nadal i Oller, J. *La economía española 1892-1931*. En *El Banco de España. Una historia económica*, Madrid, 1970.). Fue realizada por Francesc Sant Ponç (Barcelona 1756-1821), médico e inventor, que estudió medicina en Cervera y se doctoró en Huesca. En 1786 ganó un premio de la Societè Royale de Médecine de París e ingresó en la Academia de Ciencias y Artes de Barcelona, siendo director de la sección de matemáticas y mecánica en 1816-1820. Aficionado a la mecánica colaboró con Francesc Salvà Campillo en la experimentación de máquinas nuevas. En 1805, cuando construyó la máquina citada, fue nombrado catedrático de Mecánica de la Escuela de la Lonja. Ocupó múltiples cargos y como publicación técnica suya podemos destacar *Principios de Mecánica*, Barcelona 1793.

La invasión napoleónica frustró estas actividades y las sucesivas convulsiones políticas hicieron que, durante la guerra carlista de 1833, se produjese la destrucción de fábricas en muchas poblaciones tradicionalmente manufactureras, como Ripoll, Manresa, Moià Santpedor y Sant Llorens de Morunys, perdiéndose muchas industrias tradicionales y refugiándose los fabricantes en Sabadell y Barcelona, para lo que tuvieron que renovar la maquinaria. (M. Riu *Un segle de vida Catalana 1814-1930*, vol 1, Alcides Barcelona 1961).

Hay que señalar que el ministro de hacienda de aquel entonces, López Ballesteros, concedió un préstamo de 325.000 pta. y permiso para importar libremente durante 5 años el carbón y hierro necesarios, libres de arancel. Así en 1832 comenzó a funcionar la primera máquina de vapor en la fábrica de hilados y tejidos de algodón de Bonaplata, Vilaregut, Rull, Borrel i Cia en la calle Tallers, próxima a las murallas de la ciudad.

El éxito fue tal que siguió Nicolau Tous i Soler, en la próxima calle de las Tapies, etc., quedando la denominación *vapor* como sinónimo de industria. Sin embargo este desarrollo coincidió con el inicio del problema obrero en 1831 entre los tejedores de algodón, problema que marcó la vida industrial catalana durante un siglo culminando con la guerra civil de 1936-39. La literatura sobre el tema es copiosísima. Por ejemplo sobre el papel de los ingenieros industriales se puede ver Gabarron, Ramón *Enginyers Industrials, modernització econòmica i burgesia a Catalunya* L'Avenç, Barcelona, 1982. Señalemos tan solo que precisamente el incendio del *vapor* Bonaplata, en 1835, es el primer gran suceso trágico de su historia.

El desarrollo de la industria comportó la aparición de talleres mecánicos de fundición como *La*

*Barceloneta*, establecida en 1838, aunque en 1821 ya se fundó una pequeña fundición *Comas* en la calle de les Tapies, que prosiguió la tradición térmica catalana de hornos, iniciada con la ya comentada farga. Así por ejemplo en 1844 se efectuó una exposición de la industria catalana cuyo catálogo (identificación 5) incluye dos expositores, D. Valentín Esparó y D. Celedonio Ascacibar, denominados fabricantes de fundición, que exponían maquinarias industriales y agrícolas diversas, incluyendo máquinas de vapor.

## **Referencias**

*Enciclopedia Universal Ilustrada Europeo Americana*, Espasa Calpe, Madrid y Barcelona, 1902 y siguientes.

*Gran Enciclopèdia Catalana. Barcelona: GEC, 1968 i següents*

Sandfort, John F, *Máquinas Térmicas*.Ed, Universitaria de Buenos Aires, 1965.

## **Bibliografía**

*Betancourt. Los inicios de la ingeniería moderna en Europa*, Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, Madrid, 1996.