

Centrales termoeléctricas: las nuevas máquinas de vapor de Watt

Tomás Perales Benito

tomas-perales@3equipos.com

La obtención de electricidad por procedimiento térmico no es nueva pero sí con la intervención directa de la radiación solar como única fuente para generar el vapor que necesitan las turbinas convencionales que nos nutren del llamado fluido eléctrico. Los trabajos preparatorios para darle utilidad industrial han sido largos, pero gratamente fructíferos. Las instalaciones termoeléctricas basadas en el sol iniciaron su andadura en España en 2004 y sólo unos cuantos años después ya apuntan a la vanguardia de los sistemas renovables con los que reducir el deterioro medioambiental. Es un medio energético de horizonte despejado, que ofrece para empezar tres procedimientos de ejecución. Y convergen en él, a modo de paradoja, lo más primitivo, el calentamiento directo de un líquido con la radiación solar, y lo más moderno de la tecnología electrónica para controlar sus procesos.

Una obra en tres actos

Como sucede en todos los logros significativos para el desarrollo de las sociedades, los caminos que conducen a ellos son previamente limpiados, allanados y hasta cultivados por sucesivas generaciones de obradores. Y de ellos unos consiguen notoriedad, recuerdo y reconocimiento y otros simplemente anonimato.

La tecnología de las innovadoras instalaciones de obtención de electricidad por el procedimiento denominado termosolar, una variante de las energías renovables, debe a tres notables el pulmón del sistema: el dispositivo transformador del vapor conseguido por concentración solar en energía mecánica capaz de mover un alternador, la fuente de la energía eléctrica. Éstos son:

- **Thomas Savery (1650-1715).** Mecánico inglés que trabajó en la minas de Cornealles. La extracción del agua de los pozos mediante las norias convencionales movidas por animales, las



empleadas desde tiempos remotos en la agricultura, le llevó a inventar la primera máquina de bombeo que recurría a la presión del vapor como fuerza motriz. La presentó en 1698 pero no pudo darle utilidad práctica. Sin embargo, a él se deben los fundamentos del sistema. Denis Papin (1647-1714), un físico francés afincado en Inglaterra, contribuyó con sus estudios iniciales a ese logro de Savery. A Papin se debe la olla a presión, dispositivo sin duda antecesor del motor de vapor del mecánico inglés.



Figura 1. Thomas Savery.

- **Thomas Newcomen (1663-1727).** A este ferretero, también inglés, le correspondió continuar los trabajos de Savery, cuya máquina de vapor estaba limitada por la presión, lo que aconsejó no ponerla en marcha durante tiempos prolongados por el peligro de explosión que



Figura 2. Thomas Newcomen.

anunciaban las primeras pruebas. En unión de su socio, Joh Calley, desarrolló una nueva máquina de bombeo destinada a las mismas minas de Cornealles, pero con la diferencia de que tomaba como impulso el vacío creado por la condensación del vapor en el interior del cilindro del pistón. El peligro de la máquina antecesora había cesado. En 1712 presentó su invento y funcionó aceptablemente. Sin embargo, el rendimiento energético era muy bajo. Falta la intervención del tercer notable.

- **James Watt (1736-1819).** Ingeniero escocés con el que nació la máquina de vapor de verdadera utilización industrial. Para ello, Watt se nutrió de los pasos dados por sus dos antecesores inmediatos. No dijo, sin embargo, lo de Newton: “Me he aupado a hombros de gigantes”, para significar la herencia recibida. Pocos lo han hecho.

Watt fue un hombre especialmente dotado para los trabajos mecánicos. Cursó gran parte de sus estudios en Glasgow y un año en Londres, de donde regresó con el firme propósito de instalar un taller de fabricación de instrumentos matemáticos (compases y similares) y de reparación de maquinaria. Esa actividad le aseguraba la independencia económica de su familia.

La máquina de vapor vivía sus primeros momentos, aunque con pasos endebles consecuencia del bajo rendimiento energético. La floreciente industria del carbón miraba aquel artilugio con buenos ojos

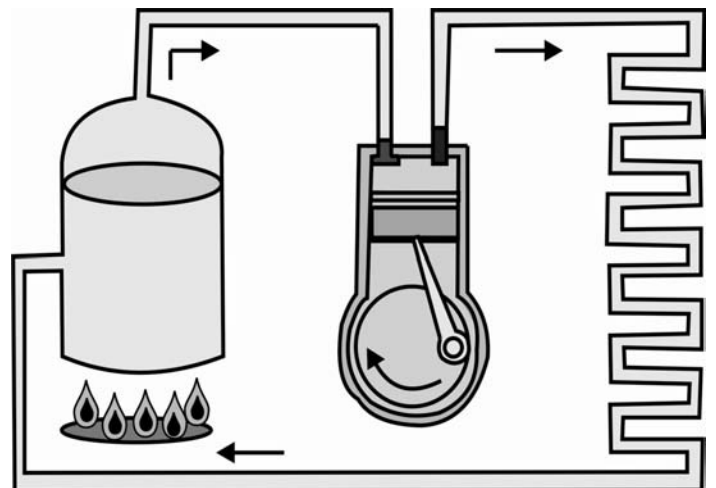


Figura 3. Detalle de la máquina de vapor de Watt. Al calentarse la caldera produce vapor y empuja el pistón mediante la biela en un movimiento constante mientras se produzca energía suficiente. El condensador (derecha) condensa el vapor de salida a modo de recuperación. Un conjunto de válvulas controlan la presión del vapor.

porque podía abaratar la extracción, y todas las mentes dotadas para la física y las matemáticas dirigían a ella sus ideas.

Watt, como tantos otros, observó que la máquina de Newcomen desaprovechaba mucho vapor e ideó una solución de la que surgió en muy pocos años una fábrica de motores de vapor, la primera, y sus máquinas ocuparon un puesto relevante en todas las minas del mundo.

Su idea, que patentó en 1766, consistió en incorporar a la máquina de su antecesor un condensador separado del cilindro para aprovechar más el vapor y, como consecuencia, aumentar muy considerablemente el rendimiento, ya que el vapor se condensaba y permitía al cilindro mantenerse caliente, ahorrando energía. La incorporación de ese componente externo fue decisiva para que aquella máquina saliera de los laboratorios y se posicionara en la industria. También contribuyó el mecanismo de la biela, que permite convertir el movimiento lineal en circular con el que mover desde las ruedas de un vehículo a un generador eléctrico.

En 1782 se asoció con el industrial Matthew Boulton para iniciar en Birmingham la fabricación de su máquina de vapor a gran escala. Se había puesto en pie uno de los pilares fundamentales de la revolución industrial. En 1881 se adoptó el vatio, o W, en honor a Watt, como unidad de potencia.

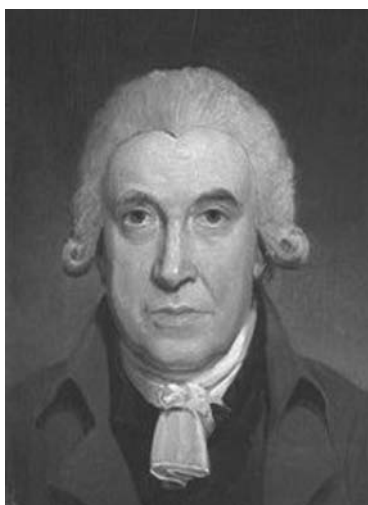


Figura 4. James Watt.

Años después del logro de Watt nació la termodinámica como ciencia. Y lo hizo de la mano del físico francés Nicolás Léonard Sadi Carnot (1796-1832), el cual formuló lo que él denominó la “potencia motriz del fuego”. Su “ciclo de Carnot” es la referencia en todas las máquinas térmicas del momento.

Hijo de un ministro de la Guerra durante la Revolución, ingresó prontamente en el cuerpo de ingenieros del Ejército, en el que se dedicó a estudiar y perfeccionar los sistemas térmicos de las máquinas, del que surgió aquel primer trabajo que sentó las bases que permiten determinar la potencia a obtener en cualquier proceso térmico.

Proceso termoeléctrico solar

Las centrales termoeléctricas, las que emplean como energía primaria la radiación solar, forman dos grupos en razón a la temperatura que se obtiene en el líquido calentado por el sol:

Mediana temperatura: $100 < T < 400 \text{ }^\circ\text{C}$

Alta temperatura: $T > 400 \text{ }^\circ\text{C}$

A su vez, las centrales basadas en el procedimiento térmico pueden adoptar actualmente tres configuraciones para el mismo propósito: obtener electricidad en cantidades suficientes y con las características técnicas adecuadas para unir las a las redes generales de distribución. Por razones obvias se sitúan en la órbita de las energías renovables por su independencia de los combustibles de origen fósil. El nuevo milenio llegó cargado de proyectos de grandes instalaciones, buena parte de ellas ya en producción. El medio ambiente espera mucho de este nuevo procedimiento. Las centrales térmicas convencionales basadas en el carbón y en el gas nos han aportado durante más de un siglo la experiencia necesaria en mecánica y en fluidos para transformar la energía térmica en electricidad.

Dos de las centrales termoeléctricas de las tres que se presentan a continuación recurren a transformar el vapor generado como consecuencia de un proceso de calentamiento de un circuito de agua en electricidad. El vapor mueve un pistón y éste el eje de rotación de un generador eléctrico. La diferencia entre las centrales convencionales y las nuevas solares de las energías renovables se encuentra en la producción del vapor: quemando gas o carbón en las primeras y con los rayos del sol las segundas. La figura 5 muestra un ejemplo de lo indicado, cuyos cuatro bloques responden a las siguientes funciones:

- **Generador de energía térmica.** La radiación solar eleva la temperatura de un líquido (comúnmente aceite sintético) a la condición de temperatura mediana o alta, cuyos valores se han indicado con anterioridad.
- **Transferencia térmica.** Proceso de transferencia térmica entre el líquido caliente proce-

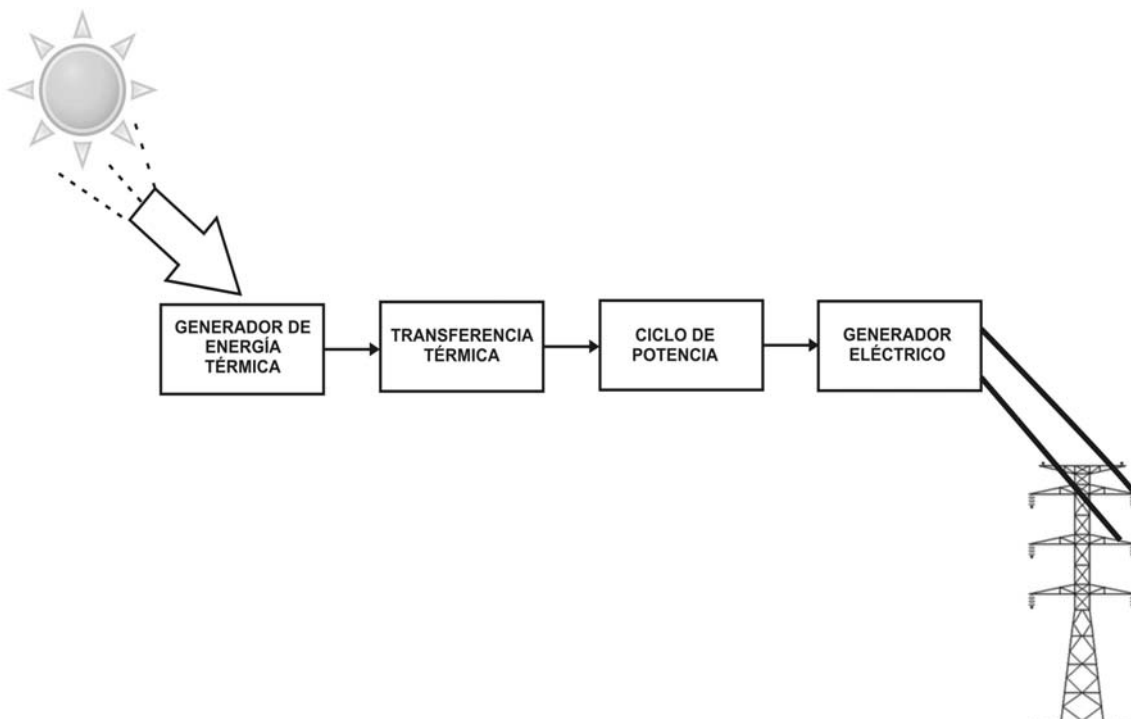


Figura 5. Configuración básica de una central termoeléctrica.

dente del sistema solar y un circuito de agua a gran presión. En él se produce la conversión de aceite/vapor.

- **Ciclo de potencia.** Proceso de conversión del vapor a fuerza motriz circular.
- **Generador eléctrico.** Generador eléctrico movido por el motor de vapor del proceso anterior.

El tercer procedimiento genera electricidad en el mismo dispositivo concentrador solar sin necesidad del proceso descrito. Es el sistema de disco, que incorpora un motor de combustión externa seguido de un generador eléctrico.

Almacenamiento energético

El almacenamiento de energía para utilizarla en tiempos diferentes a los de su captación es el punto débil de todos los sistemas generadores, renovables o no. Los procedimientos fotovoltaico y eólico admiten la incorporación de acumuladores eléctricos, pero sólo para pequeñas capacidades, para las aplicaciones domésticas. Sin embargo, los térmicos ofrecen una alta capacidad de almacenamiento como consecuencia de la propiedad calórica de los líquidos. El acumulador doméstico es un ejemplo. Cuando su líquido recibe calor por efecto Joule o mediante un intercambiador térmico en las instalaciones solares lo

absorbe, lo transmite y lo expande. La capacidad calorífica del líquido determina la energía a almacenar, la cual se calcula mediante la expresión $C_p = J \text{ kg}^{-1} \text{ k}^{-1}$. En el agua a 25 °C es de 4.181 Jkg^{-1} .

Esta propiedad es la empleada en las centrales termoeléctricas de los dos primeros procedimientos para seguir suministrando energía eléctrica cuando el sol se oculta. Pero por razones de las altas temperaturas que se producen, se emplean sales que pasan al estado líquido. Tales sales se disponen en depósitos a modo de grandes acumuladores.

La sal común pasa al estado líquido a 801 °C. Se mantiene estable y presenta una capacidad calorífica similar a la del agua. Las de nitrato lo hacen a temperaturas próximas a los 500 °C. Durante el ciclo de carga (con sol) las sales intercambian calor con el fluido caliente de los colectores solares y se almacena en los citados depósitos, y durante el de descarga (sin sol) la circulación es en sentido contrario; la sal líquida circula por el circuito de los colectores solares para su acción de generar vapor con el que mover el generador eléctrico. Algunas instalaciones actuales están consiguiendo que se almacene energía para más de seis horas de inactividad del ciclo solar. Los depósitos de las instalaciones industriales están formados por grandes tanques de sal fundida, su denominación generalizada, con una capa de aislante para reducir las pérdidas térmicas.

Tecnologías

Las instalaciones industriales basadas en el procedimiento termoeléctrico se distinguen por su dependencia de grandes espacios y por la disposición de espejos de concentración de la radiación del sol. El Ciemat (Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas, organismo adscrito al Ministerio de Ciencia e Innovación) calcula que una instalación de 50 MW requiere un terreno de 1 km² para albergar el sistema concentrador y las unidades de almacenamiento térmico, control y transformación hasta que el fluido eléctrico generado se puede inyectar en las redes públicas de distribución de electricidad. Los concentradores deben encontrarse necesariamente montados sobre sistemas electromecánicos de seguimiento de la trayectoria del sol, una especie de girasol electromecánico. Un sensor fotoeléctrico o similar los guía y los sitúa cada día en la posición de la puesta del sol.

Estas instalaciones emplean tres procedimientos; dos basados en calentar un líquido con el que generar el vapor necesario para mover el generador eléctrico y uno que lo incorpora, como se ha descrito anteriormente. La descripción básica del funcionamiento de los tres es la siguiente:

Concentrador cilindro-parabólico

Corresponde al procedimiento más empleado. Es una superficie especular cuya sección recta es una parábola. Este dispositivo permite concentrar sobre su foco lineal hasta 200 veces la radiación solar. En su punto focal se dispone el tubo absorbedor por el que circula el líquido (aceite sintético) a elevar de temperatura para generar finalmente vapor. El sistema es de media temperatura, con valores próximos a 400 °C. La figura 6 muestra un ejemplo de su configuración.

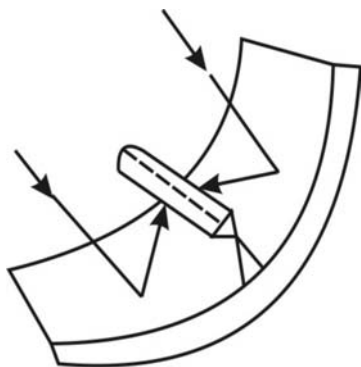


Figura 6. Concentrador cilindro-parabólico.

Para mantener el punto focal en el centro, sobre el tubo receptor, se requiere la incorporación del seguidor solar anunciado, que debe describir con precisión el arco solar a lo largo de las horas de luz. Es sencillo con respecto al de los otros dos procedimientos, ya que requiere movimiento sobre un solo eje.



Figura 7. Concentrador cilindro-parabólico (Abengoa). En la parte posterior se encuentran los mecanismos de seguimiento del sol.

Todos los concentradores que intervengan en las instalaciones se encuentran interconectados en configuración serie o paralelo para aumentar la temperatura o el caudal del líquido caliente.

Central de torre

Es un procedimiento de alta temperatura basado en un conjunto de helióstatos como espejos al sol que dirigen su radiación reflejada a un receptor dispuesto en una torre a gran altura (próxima a 100 metros), de la que toma denominación. La figura 8 muestra un ejemplo de un helióstato dirigido al receptor de la torre.

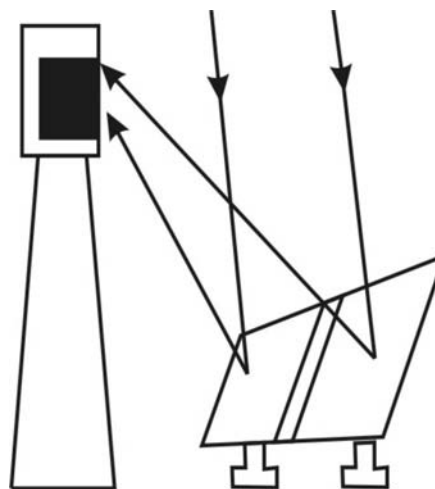


Figura 8 Torre termoeléctrica.

Las centrales basadas en este procedimiento incorporan cientos de heliostatos que concentran la radiación solar sobre el receptor para elevar la temperatura de su contenido, generalmente sales fundidas. Se alcanzan temperaturas próximas a 600 °C, que permiten obtener el vapor necesario para el grupo motor y generador eléctrico. La capacidad de concentración puede ser de hasta 1.000 veces.



Figura 9. Heliostatos (Sener).

Este procedimiento requiere que los heliostatos se encuentren montados sobre seguidores solares de dos ejes (acimut y elevación) para mantener constantemente el punto focal sobre el receptor situado en la torre.

Disco parabólico

El procedimiento de disco se separa de los anteriores basados en el vapor como materia final del proceso térmico. En éste se produce energía eléctrica en la misma unidad y no un líquido caliente para la finalidad ya descrita. El equipo que complementa al disco como medio concentrador de la radiación solar sobre su punto focal es un motor Stirling (un motor de combustión externa) acoplado directamente a un generador eléctrico. Es un sistema de alta temperatura que puede alcanzar 800 °C. Requiere, como el anterior, la incorporación de un seguidor solar de dos ejes, única condición para mantener el foco en su posición durante todo el arco solar. Los tres componentes que intervienen son los siguientes:

- **Disco.** El disco tiene forma parabólica y el foco se sitúa sobre su eje de simetría. Su capacidad de concentración es muy alta: entre 1.000 y 4.000 veces, lo que da lugar a un rendimiento superior al de los anteriores.

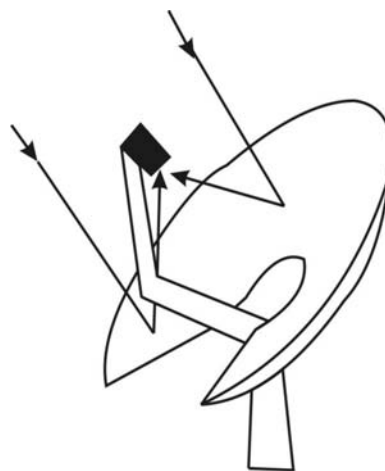


Figura 10. Disco parabólico.

- **Motor Stirling.** El motor, que lleva el nombre del reverendo escocés que lo presentó en 1816, se puede definir como un motor térmico, ya que funciona mediante un diferencial de temperatura entre sus dos focos (es suficiente con 15 °C). La radiación solar concentrada en el punto focal vaporiza un metal líquido, generalmente sodio, con lo que se genera una gran diferencia de temperatura entre los focos frío y caliente. En tal condición, los pistones del motor comienzan un ciclo continuo de deslizamiento lineal. Sus bielas y otros componentes convierten ese movimiento en circular sobre un eje.
- **Generador eléctrico.** El eje del motor Stirling se acopla a un generador eléctrico de configuración trifásica y a la tensión de red elegida. Equi-



Figura 11. Discos de la plataforma solar de Almería.

pos auxiliares de electrónica industrial ponen en fase las salidas de los discos para conseguir una salida unificada en condiciones de poder unirse a las redes públicas de distribución.

||| Rendimiento

El rendimiento es el factor determinante de las instalaciones. Las tres descritas presentan los valores que se indican a continuación en la condición solar-electricidad:

Concentrador cilindro-parabólico: 21%.

Torre: 23%.

Disco: 29%.

Fuente: SolarPaces.

||| Instalaciones en España

España es hoy pionera en estas instalaciones. Los planes de investigación llevados a cabo en los últimos años han permitido a las empresas españolas acometer grandes instalaciones tanto en el territorio propio como en los ajenos, entre ellos Estados Unidos.

Como ejemplo de configuración y potencia se presentan a continuación dos situadas en Andalucía. El número actual de instalaciones realizadas y en proyecto es muy grande.

||| PS-10. Torre

Año de instalación: 2004.

Instalador: Abengoa.

Situación: Sanlúcar la Mayor.

Potencia: 11 MW.

Producción anual: 23 GWh.

Geometría del receptor: Cavidad de 180° con cuatro paneles de 5 x 12 metros.

Altura de la torre: 100,5 metros.

Helióstatos: 624 de 1,2 m².

Tecnología de almacenamiento: agua/vapor.

Ciclo de vapor: 40 bar, 250 °C.

||| Andasol 1. Cilindro-parabólico

Año de instalación: 2008.

Instalador: Abengoa.

Situación: Marquesado del Zañete.

Potencia: 50 MW.

Receptor: Colector cilindro-parabólico.

Geometría de captación: 510 m².

Tecnología de almacenamiento: Sal saturada.

Producción anual: 179 GWh.