

CAPÍTULO 4 TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA

4.1 COMBUSTIÓN

Sin duda, *el uso del fuego* ocupa un lugar de honor entre los signos de identidad más representativos de nuestra civilización. No sólo este uso marcó un hito en los albores de la humanidad sino que, así mismo, condicionó profundamente la evolución socio-económica y, en sentido estricto, fue la fuerza motriz que impulsó (y, aún en gran medida, impulsa) el desarrollo industrial de los últimos siglos. La mitología griega reservó a este hecho una de sus más remarcables leyendas entorno a la figura de Prometeo, verdadero benefactor de la humanidad, que fue castigado por Zeus por entregar a los hombres el fuego que había robado de los cielos.

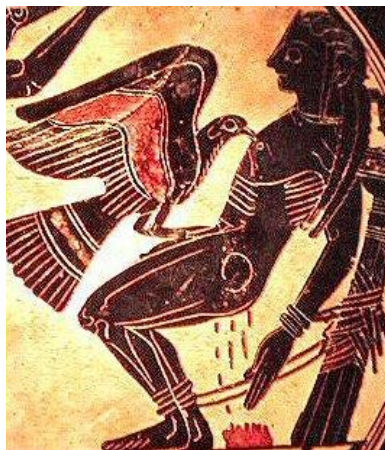


Figura 4.1 *Prometeo castigado por Zeus a permanecer encadenado a una roca mientras, todos los días, un águila le devoraba el hígado que se le regeneraba durante la noche. (Decorado de una antigua vasija griega).*

La combustión, no sólo como fuente de energía térmica para su uso directo sino como una energía primaria susceptible de ser transformada en otros tipos de energía (mecánica, eléctrica,...) necesitó de una evolución social de varios siglos. El primer antecedente, del que se tiene noticia, del uso de vapor para producir trabajo se refiere a las obras de Herón, sabio griego de la escuela de Alejandría, que construyó la eolípila esquematizada en la Figura 4.2: Con el calor de una llama se calienta un recipiente lleno de agua *a* y se genera vapor que se transmite por los conductos *b* al balón metálico hueco *c*, el balón tiene dos salidas asimétricas *d* en forma de L donde, al escapar el vapor a gran velocidad por ellas, se produce una reacción que hace girar el balón en dirección contraria. Además de esta temprana muestra del uso

del vapor con utilidad simplemente lúdica, parece que Herón también ideó la forma de utilizarlo de forma práctica. Sin embargo, más tarde no hay constancia del uso del binomio fuego-vapor hasta finales del siglo XVI. En esa época, el noble navarro Jerónimo de Ayanz, al servicio de los monarcas Felipe II y Felipe III, obtuvo de éste último una cincuentena de privilegios de invención (las patentes de la época) por múltiples inventos entre los que se encuentra el uso del vapor a presión como eyector y para bombear el agua de las minas inundadas. El vapor se generaba calentando una esfera de cobre llena de agua que llamó *bola de fuego*. Los trabajos de Ayanz no tuvieron resonancia fuera de España y han permanecido olvidados hasta recientemente. Sin duda, una consecuencia más de la situación de aislamiento en que se sumió la ciencia española de aquella época, tras un decreto de Felipe II de 1558 en el que se prohibía a los españoles estudiar o enseñar en universidades europeas, en aras de la seguridad del Imperio. Hubo que esperar aproximadamente un siglo, hasta que en 1698, el inventor inglés T. Savery consiguiera patentar lo que llamó su *máquina de fuego*. Curiosamente, tanto la descripción de la máquina de Savery como su supuesto uso, para desaguar minas inundadas, suponen extraordinarias coincidencias con la máquina de Ayanz. Después de la patente de Savery, nuevas mejoras se fueron introduciendo en rápida sucesión hasta conseguir la completa implantación de la máquina de vapor en la sociedad del siglo XIX.

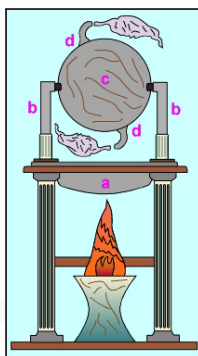


Figura 4.2 Dibujo figurado de la eolipila de Herón de Alejandría.
(<http://automata.cps.unizar.es/animhistoria/3333.html>).

Paralelamente a su propio desarrollo, el estudio del fuego ha contribuido al avance general en el entendimiento de diversas disciplinas científicas: reacciones químicas, dinámica de fluidos, fenómenos de transporte, etc. A pesar de todo ello, en los albores del siglo XXI el fuerte impulso que se está imprimiendo a nuevas fuentes de energía podría parecer que cuestiona la futura utilidad de tan milenaria forma de obtención de energía y cabe preguntarse por el papel que el uso del fuego –y, por extensión, de los procesos de combustión– va a jugar en el futuro próximo.

La energía nuclear, la solar, la eólica, etc., se han ido convirtiendo paulatinamente en opciones, en muchos aspectos, ventajosas y han ido desplazando parcialmente a la combustión en algunos de sus tradicionales usos. Sin embargo, la utilización de estas energías alternativas no están exentas de riesgos y de polémicas, lo que unido a la penalización de cualquier innovación, derivada de una economía de oferta-demanda basada en el rendimiento a corto plazo, confiere una extraordinaria inercia a un mercado energético estructurado en torno a la combustión.

El éxito que el uso de la combustión, como medio de obtención de energía, ha tenido en nuestra sociedad hay que buscarlo en su buena acomodación a la escala humana. Las cantidades de energía liberadas y las velocidades de liberación resultan tan adecuadas a nuestras necesidades que la combustión no parece que pueda tener rival en su papel como fuente de energía a pequeña escala: transporte, calefacción, tareas domésticas, propulsión, etc. Tanto es así que la escasez que necesariamente se vivirá de combustibles naturales, no será signo de su desaparición, sino de la producción masiva de combustibles sintéticos para perpetuar su uso. A mayor escala, la combustión ha permitido, así mismo, la obtención de energía para su distribución y uso en comunidades. Desde la producción centralizada de gas ciudad en el siglo XIX, hasta la de electricidad en el XX, el uso de la combustión (mejor habría de decirse *gasificación* en el primer caso citado) ha permitido la socialización de grados de bienestar otrora reservados a una élite, o simplemente inimaginables.

En la actualidad, se estima que más del 80% de la producción mundial de energía se obtiene de la combustión de combustibles fósiles. Por ello, las profundas implicaciones económicas derivadas de la más mínima mejora en la eficiencia de estos procesos han impulsado la investigación en este campo a todos los niveles. Desde un punto de vista teórico, el análisis de la combustión ha atraído el interés de la comunidad científica dedicada a la matemática aplicada, como ejemplo de sistema de reacción-difusión no isoterma. La exotermicidad de la reacción química, junto a la dependencia exponencial con la temperatura de su velocidad (la ley de Arrhenius), singularizan la combustión y la confieren unas características exclusivas: los fenómenos de ignición, la estructura interna de las llamas, la inestabilidad y la dinámica de la propagación de frentes de llama, la extinción,... Por otra parte, el entendimiento de la combustión en flujos turbulentos representa actualmente el mayor desafío en teoría de la combustión, y empareja estos estudios teóricos con las necesidades reales que se exteriorizan en el diseño y operación de las plantas industriales que basan su producción en procesos de combustión. Además de los procesos clásicos, como los de producción de electricidad, acero, vidrio, cemento, etc., el número de técnicas que utilizan la combustión para el procesado de nuevos materiales se incrementa día a día: fibras ópticas, nanopartículas, *coatings*, etc.

Conjuntamente con las mejoras en la eficiencia de estos procesos, el control de las emisiones –tanto de sustancias químicas nocivas como de aerosoles– se ha convertido en uno de los principales objetos de estudio, como consecuencia de la creciente inquietud social por las consecuencias medioambientales de los

contaminantes atmosféricos. La respuesta a este reto, materializado en una legislación cada vez más exigente, se ha manifestado en un espectacular aumento de actividades de I+D en este sector, mediante el lanzamiento de programas nacionales y supranacionales específicos. En particular, uno de los sectores más afectados es el de generación de energía eléctrica en centrales térmicas. Las nuevas plantas que sustituirán a las actuales de combustión de carbón pulverizado, se basarán en la utilización tanto de calderas de vapor en condiciones supercríticas y ultrasupercríticas como de la combustión en lecho fluidizado circulante a presión y de la gasificación a alta presión en ciclos combinados con turbinas de gases y de vapor. Y al hilo de las plantas de gasificación del futuro, todavía está por desarrollar una tecnología eficiente que haga de la biomasa un verdadero combustible alternativo al carbón, sin que ello suponga una vuelta a modos de la era pre-industrial, sino un paso adelante que ayude a paliar el efecto invernadero de ese arcaico CO_2 que el uso del carbón devuelve a la atmósfera.

El continuo proceso de renovación que sufre la combustión, por las nuevas aplicaciones que se le van encontrando, impide ser ni siquiera medianamente exhaustivo, en esta breve introducción, con la lista de temas *calientes* relativos a la combustión. Baste la trascendencia de los pocos enumerados para pronosticar un prometedor futuro al *uso del fuego* en el siglo XXI, con un nivel de trascendencia para la sociedad quizás aún mayor que el que ha tenido en el pasado.

4.1.1 Centrales térmicas de carbón

Las centrales térmicas son instalaciones en las que se genera electricidad a partir de la energía térmica liberada durante procesos de combustión. Éstos se deben, en general, a la combustión de un combustible que en la mayor parte de los casos se trata de carbón. La central térmica de carbón típica utiliza la expansión de vapor de agua a presión para mover una turbina y producir la energía mecánica necesaria para la generación eléctrica, que está siempre basada en la ley de inducción electromagnética y se produce en una dinamo o alternador coaxial con la turbina.

La transformación de energía térmica en trabajo sigue un ciclo termodinámico cerrado denominado ciclo de Rankine, que corresponde a un ciclo de vapor con combustión externa, representado en un diagrama p - V en la Figura 4.3 (véase el apartado 3.4.3 del capítulo anterior). El fluido de trabajo suele ser agua en un circuito cerrado que, a temperatura T_1 y presión p_1 (normalmente la presión atmosférica), una bomba inyecta en una caldera a presión p_2 donde primero se calienta, con una pequeña variación de volumen, hasta dicha presión (1→2), se sigue calentando entonces a presión constante hasta la temperatura T_3 y se transforma en vapor que se sobrecalienta hasta la temperatura T_4 (2→3→4), el vapor sobrecalentado se expansiona en una turbina de vapor, realiza trabajo, se enfría hasta la temperatura $T_5 = T_1$ y presión atmosférica $p_5 = p_1$ (4→5) y se condensa en un condensador (5→1), para volver a ser bombeada de nuevo a la caldera, con lo que se

cierra el ciclo. En la práctica, la expansión hasta la presión atmosférica (4→5) se hace en varias etapas para evitar la condensación de vapor en la turbina, recalentando el vapor al final de cada etapa de expansión (que suelen ser dos o tres) hasta que, al final de la última etapa, el vapor acaba sobre la línea de condensación. Se consigue así incrementar notablemente el rendimiento y evitar problemas de erosión en los álabes de la turbina.

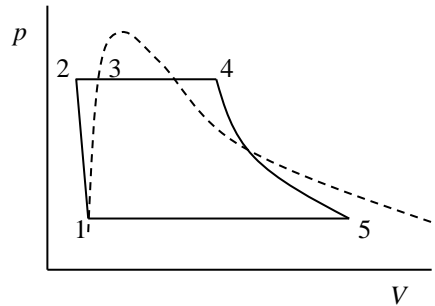


Figura 4.3 Ciclo de Rankine en un diagrama p - V . La línea discontinua es la línea de coexistencia agua-vapor.

Los principales elementos que componen una central térmica están representados en la Figura 4.4, donde el recuadro de fondo azul encierra los elementos del ciclo de vapor. Un esquema más detallado se muestra en la Figura 4.5, que da idea de la compleja disposición de los conductos de agua-vapor para optimizar el rendimiento de la planta: antes de ser reinyectada en la caldera, el agua condensada del ciclo se precalienta haciéndola pasar por el Economizador, para aprovechar la entalpía de los gases de combustión en la última fase de su recorrido (justo antes de aún ser utilizados para precalentar el aire que alimenta la caldera). El vapor de agua generado en la caldera es sobrecalentado en el Sobrecalentador, en la parte alta de la caldera, donde los gases de combustión tienen su mayor contenido entálpico. Este vapor es expansionado en la fase de alta presión de la turbina y, antes de conducirlo a la segunda fase, se le hace pasar por el Recalentador, una zona de gas con contenido entálpico intermedio que provoca un nuevo repunte en la presión del vapor para volver a turbinarlo en la fase de media presión.

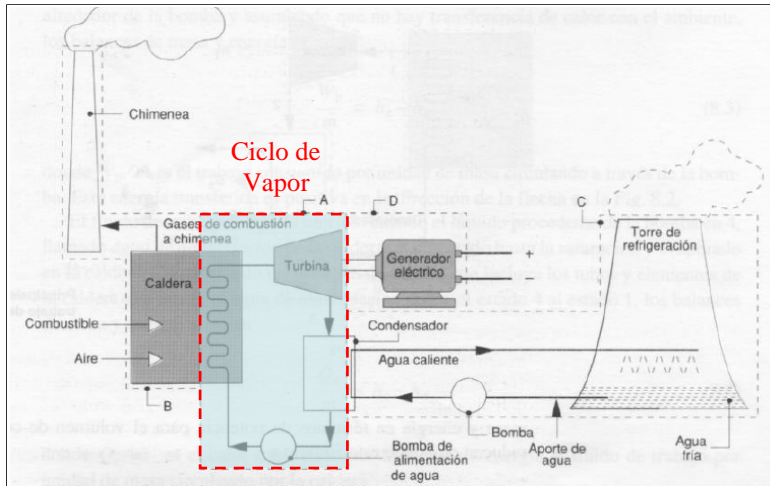


Figura 4.4 Principales elementos de una central térmica.

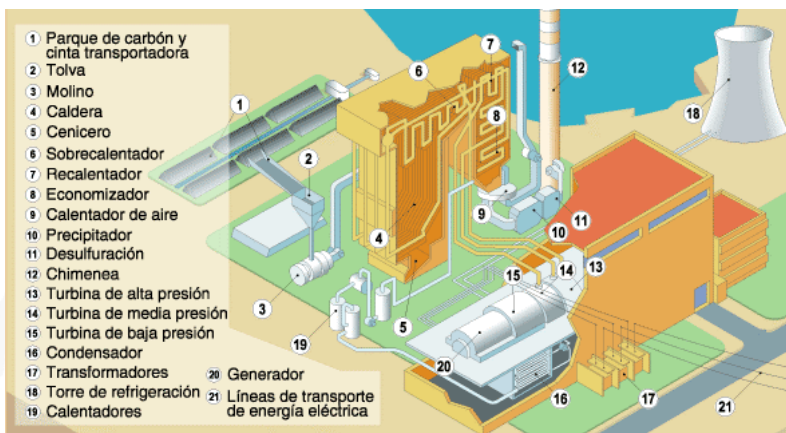


Figura 4.5 Esquema de una central térmica de carbón
(<http://www.unesa.es/graficos.htm>).

4.1.2 Turbinas de gas. Central de ciclo combinado

Las turbinas de gas representan un elemento cada vez más extendido de generación eléctrica en centrales térmicas por la disponibilidad de gas natural. El ciclo termodinámico de una turbina de gas se conoce como ciclo de Brayton (véase apartado 3.4.6), un ciclo similar al de Rankine aunque en él no hay cambio de fase y es de combustión interna, es decir, que el calor se obtiene por combustión del propio fluido de trabajo: aire en el que se ha inyectado combustible. Esto permite que el ciclo sea abierto, liberando los gases de combustión a la atmósfera.

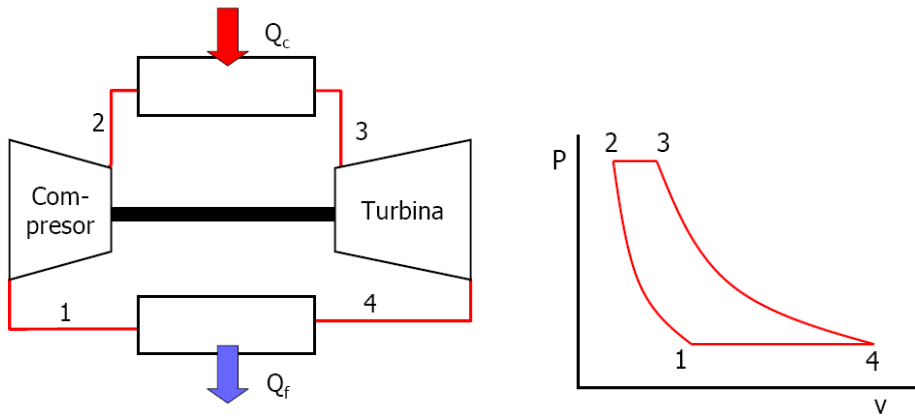


Figura 4.6 Esquema de un ciclo de Brayton y diagrama p - V correspondiente.

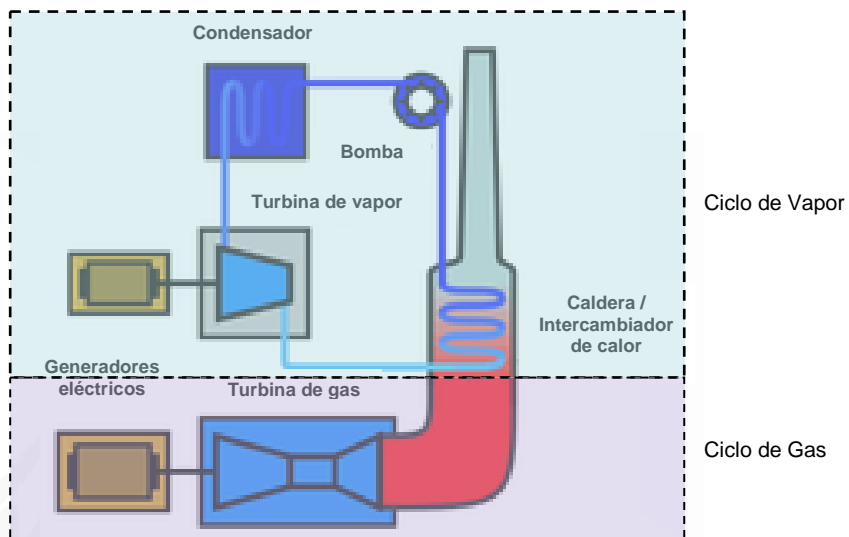


Figura 4.7 Esquema de un ciclo combinado.

El ciclo de Brayton está esquematizado en la Figura 4.6. Su mayor ventaja en generación eléctrica está en la posibilidad de aprovechar la entalpía de los gases de combustión para conducirlos a una caldera y alimentar, al mismo tiempo, un ciclo de Rankine. En la Figura 4.7 se ha esquematizado esta idea, separando los componentes de cada uno de los ciclos.

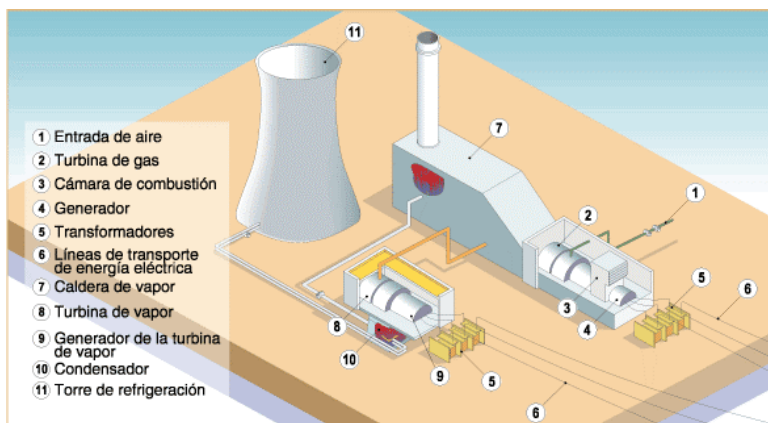


Figura 4.8 Esquema de una central térmica de ciclo combinado (<http://www.unesa.es/graficos.htm>).

Esta tecnología de ciclo combinado es la utilizada en las centrales térmicas de gas, como la esquematizada en la Figura 4.8, pudiendo elevar la eficiencia de la planta hasta el 50%. La misma idea se ha utilizado también para repotenciar antiguas centrales térmicas, combinándolas con una turbina de gas y transformándolas así en centrales de ciclo combinado.

4.1.3 Motores de combustión alternativos

Los motores de combustión alternativos más utilizados son los de encendido provocado (por chispa) y los motores diesel. Este tipo de motores se generalizaron desde que la producción en cadena del modelo de coche *Ford T* permitió su abaratamiento y popularización (Fig. 4.9). Desde entonces, están esencialmente dedicados al transporte, pero también es ventajoso su uso para generar electricidad en ciertos casos.

Los motores de encendido provocado basan su funcionamiento en el ciclo de Otto, utilizando como combustible gasolina. Ésta ha de ser suficientemente volátil para que esté completamente evaporada antes de la ignición en todas las condiciones de operación, además la combustión ha de proceder sin autoinflamación y quemar completamente el combustible, manteniendo bajos niveles de emisiones contaminantes.

La relación de compresión de estos motores se ha ido incrementando para aumentar la eficiencia global y obtener el máximo de potencia. Pero este incremento está limitado por la aparición de detonaciones o la autoinflamación (en inglés, *knocking*). Para medir la capacidad de una gasolina para evitar la autoinflamación se utiliza el índice de octano. La gasolina que se mide se compara con la mezcla de dos

hidrocarburos puros elegidos como punto de referencia: el isoocatano con índice 100 y el n-heptano con índice 0. Para ello, la gasolina se autoinflama en un motor de referencia y se compara con la mezcla binaria equivalente mencionada. El porcentaje en tanto por ciento de esta mezcla estándar con autoinflamación equivalente a la gasolina que se mide es su índice de octano.



Figura 4.9 Henry Ford con el modelo T en Búfalo, NY, (1921).

Los motores diesel se usan extensivamente en transporte, pero también se usan para generar electricidad, sobre todo en islas y otros lugares aislados, así como sistema de emergencia para fallos de la red.

La principal ventaja de los motores diesel es el menor consumo de combustible cuando se los compara con los motores de encendido por chispa. La eficiencia térmica de los motores diesel es considerablemente mayor que la de los motores de gasolina, lo que es debido sobre todo a una mayor relación de compresión, al proceso de autoignición, menores pérdidas de bombeo y a las mezcla pobres que, en media, se usan en el proceso de combustión. No obstante, los motores diesel siempre se han reconocido fácilmente por las emisiones de hollín, junto con cierto olor particular y altos niveles de ruido.

En el ciclo diesel, el aire se comprime sin haber sido premezclado con el combustible, éste se inyecta en estado líquido justo antes del momento de máxima compresión, cuando la condición de autoinflamación está ampliamente sobrepasada. Durante el corto retardo hasta que se produce la ignición, las gotas más pequeñas de combustible se evaporan completamente, el vapor se calienta a temperaturas superiores a la de autoinflamación y la combustión se inicia espontáneamente en estos puntos y se mantiene, mientras retrocede el pistón, de forma aproximadamente isóbara. El índice de cetano refleja la capacidad de autoinflamación de un gasóleo. El comportamiento del gasóleo se compara con una mezcla binaria estándar formada por n-cetano o hexadecano, al que se asigna un índice de 100, y a-metil naftaleno, de índice 0. Análogamente a como se mide el octanaje de las gasolinas, el porcentaje en

tanto por ciento de la mezcla estándar con autoinflamación equivalente al gasóleo que se mide es su índice de cetano.

4.1.4 Cogeneración

El concepto de cogeneración va ligado a la idea de generación distribuida, es decir, generación eléctrica individual al margen de la red general. Se trata de optimizar la generación de modo que ésta se adapte a las necesidades específicas locales y, al mismo tiempo, se aproveche el calor que habitualmente aparece como subproducto de los procesos de generación eléctrica. Así pues, podemos definir la cogeneración como la generación simultánea de electricidad y calor a partir de una fuente primaria de energía. Se suele identificar con las siglas CHP, del inglés: *Combined Heat and Power*.

En general, como fuente energética primaria se utiliza gas natural para alimentar un motor alternativo o una turbina de gas, que se conectan a un generador eléctrico. El calor residual de la combustión es el que se usa como calor de proceso, calefacción, etc. Nótese que, después de realizar trabajo durante su expansión en el motor o turbina, el contenido entálpico de los gases de combustión no es muy alto y, por ejemplo, no podría utilizarse para generar vapor a presión. Para aprovechar al máximo sus ventajas, la planta de cogeneración se ha de situar lo más cerca posible del lugar donde se va a utilizar el calor, porque transportar electricidad es más fácil y barato que transportar calor. Además, es la demanda de calor la que determina el tamaño de la planta. Cuidando estos dos aspectos, se consiguen eficiencias eléctricas netas superiores al 50%.

Las ventajas de utilizar plantas de cogeneración, derivadas de estos hechos, son múltiples:

- Se requiere menos combustible para producir una misma cantidad de energía.
- Evita las pérdidas de transmisión y distribución que ocurren cuando la electricidad se transporta sobre líneas de alta tensión.
- Proporciona electricidad de alta calidad y fiabilidad junto con energía térmica, independientemente de lo que ocurra con la red general, disminuyendo el impacto de los cortes de luz y mejorando la calidad de la potencia para equipos sensibles.
- Al conseguir mayores eficiencias, se reduce la contaminación atmosférica y las emisiones de efecto invernadero.
- Abarata la factura de consumo a los usuarios.

Debido a estas características, la cogeneración está particularmente aconsejada en el caso de procesos industriales, hospitales, hoteles, escuelas, aeropuertos, prisiones, etc.

Los elementos básicos que componen una planta de cogeneración son:

- Motor / Turbina
- Generador eléctrico.
- Sistema de recuperación de calor.
- Sistema de control.

Habitualmente se utiliza un motor de combustión interna o una turbina como generador de energía secundaria (mecánica) que alimenta al generador eléctrico, aunque también se están evaluando sistemas de cogeneración con pila de combustible. En las Figuras 4.10 y 4.11, se han esquematizado dos sistemas CHP basado en un motor y una turbina, respectivamente, señalando los valores típicos de las cifras de generación, así como las principales pérdidas.

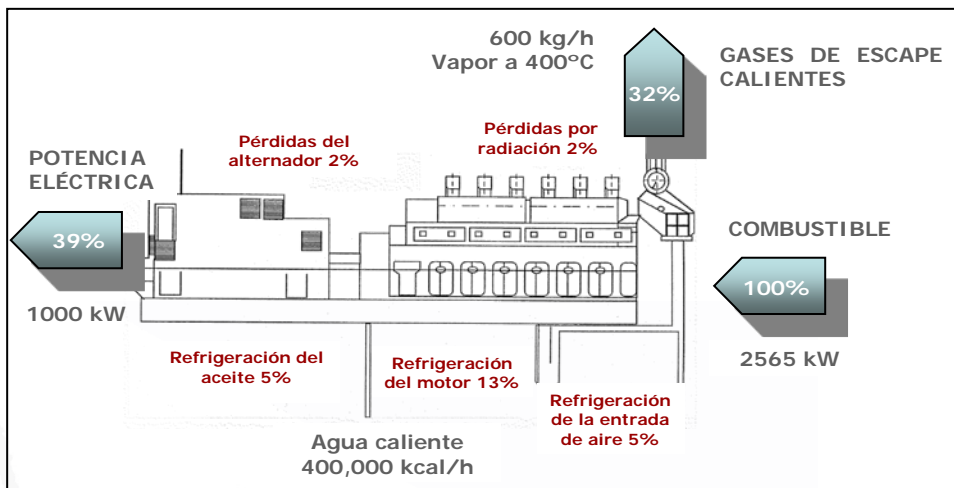


Figura 4.10 Sistema CHP con motor de combustión interna.

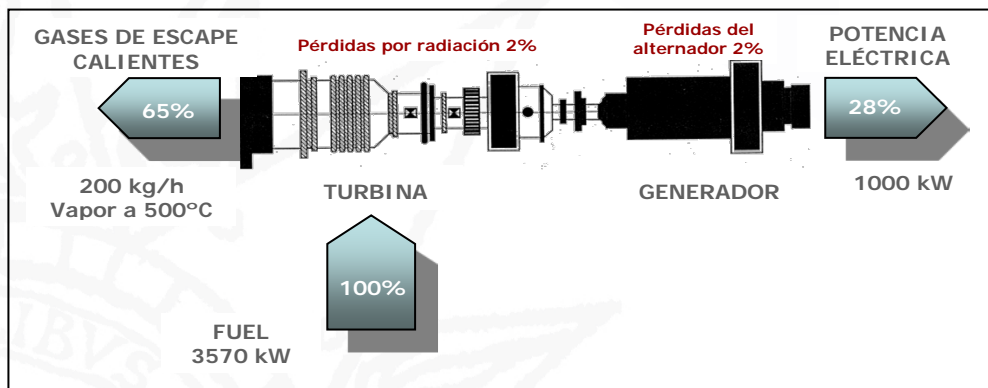


Figura 4.11 Sistema CHP con turbina.

CAPÍTULO 4 TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA

4.2 GENERACIÓN NUCLEAR

La generación eléctrica de origen nuclear se produce aprovechando la energía que se desprende cuando ocurren ciertas reacciones nucleares, en las que los nucleones (es decir, protones y neutrones) de uno o varios núcleos se disgregan y/o recombinan formando nuevos núcleos con un número distinto de nucleones que el inicial y dando lugar, por tanto, a otros elementos.

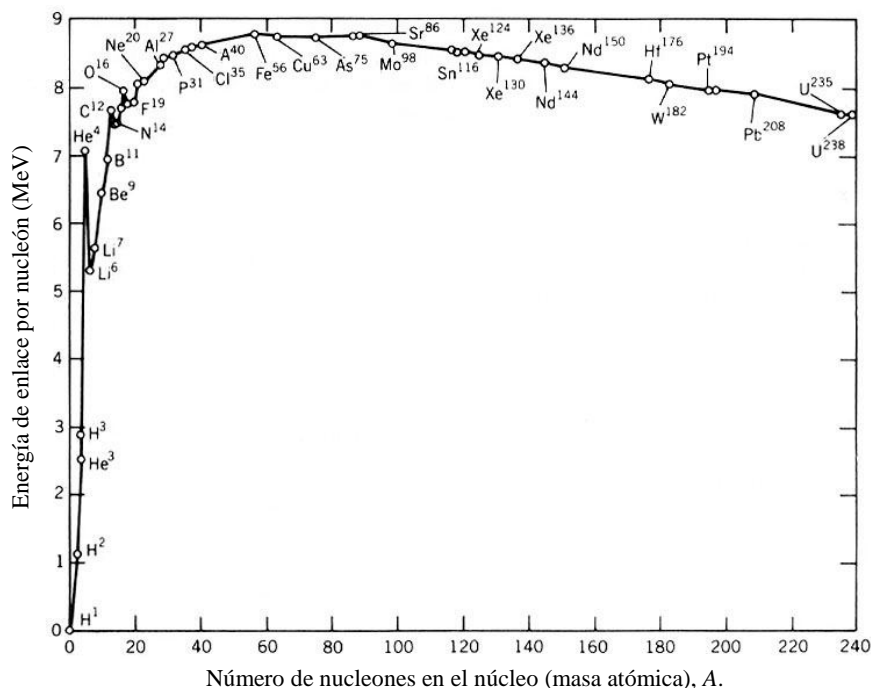


Figura 4.12 Energía media de enlace por nucleón para los diferentes elementos.

Ocurre que la masa de un núcleo no es un múltiplo exacto de la masa del protón. El motivo de esta diferencia puede entenderse fácilmente. Para arrancar un nucleón (protón o neutrón) de un núcleo hay que aportar energía (excepto si se trata de sustancias radiactivas, en las que ocurren espontáneamente desintegraciones sin necesidad de aporte exterior de energía). De acuerdo con la famosa ecuación de Einstein,

$$E = mc^2$$

la pérdida de energía E cuando una partícula elemental se une a un núcleo es equivalente a una pérdida de masa m , siendo c la velocidad de la luz. De esta forma, el núcleo final es más ligero que la suma de las masas de los componentes individuales cuando estaban separados. Veámoslo con un ejemplo numérico. El mayor déficit de masa ocurre en la formación de un núcleo de helio a partir de cuatro núcleos de hidrógeno. La masa molar del helio es 4,0026 u mientras que la masa de cuatro moles de hidrógeno es $4 \times 1,0079 = 4,0316$ u, de modo que la energía liberada en el proceso de formación de un mol de helio es

$$E = (4,0316 - 4,0026)c^2 = 0,029c^2 = 0,26 \times 10^{13} \text{ kJ/mol.}$$

Dicho en otras palabras, esta es la energía mínima que hay que proporcionar para separar un núcleo de helio en cuatro núcleos de hidrógeno. Para hacerse una idea de la magnitud de esta cantidad conviene compararla con la energía que se libera en la combustión de un mol de un hidrocarburo típico, que es del orden de 10^3 kJ. En física nuclear, las energías de enlace se suelen medir en unidades de MeV (1 millón de electron-voltios es la energía que adquiere un electrón cuando se acelera a través de una diferencia de potencial de 1 millón de voltios). En estas unidades la energía de enlace de un mol de helio es aproximadamente 27 MeV, mientras que

las energías típicas ligadas a las reacciones químicas son precisamente del orden de 1 eV (véase el problema nº 5 del Capítulo 1).

Más útil que la energía de enlace por mol es la energía de enlace por nucleón, que en el caso del helio resulta ser cercana a 7 MeV. La Fig. 4.12 muestra el valor de esta energía por nucleón para los diferentes núcleos atómicos conocidos. Estas medidas se realizaron en torno a 1920 y dan información a cerca de las “energías de formación” de los núcleos. La curva, que responde bastante bien a la teoría, pasa por un máximo en las cercanías de $A = 100$, lo que permite prever las reacciones nucleares que conducen a una liberación de energía. En líneas generales, existen dos regiones:

- 1) A la derecha del máximo: Se puede obtener energía del enlace, es decir liberar energía, fragmentando un elemento pesado en elementos más ligeros, es una reacción de *fisión*.

Un ejemplo bien conocido es la fisión del átomo de uranio-235 (Fig. 4.13). Cuando un neutrón térmico es absorbido por un núcleo de uranio-235, se produce en general una fisión del núcleo en dos fragmentos de masa comparable. La energía liberada es grande, del orden de 200 MeV, y la parte más importante (unos 160 MeV) se libera en forma de energía cinética de los fragmentos de fisión. Esta energía cinética no tiene ningún origen misterioso, proviene simplemente de la repulsión electrostática entre los dos fragmentos que inicialmente se encuentran muy próximos. Adicionalmente, se liberan también entre 1 y 3 neutrones, según los casos, con una energía total de unos 5 MeV.

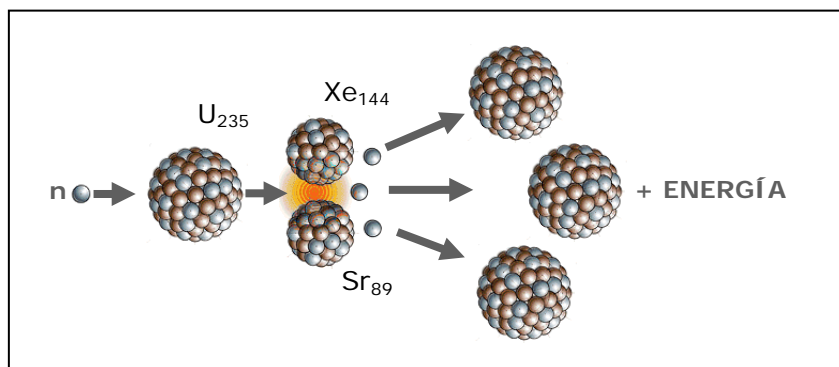


Figura 4.13 Fisión del núcleo de uranio 235 por un neutrón.

- 2) Si ahora nos situamos a la izquierda del máximo de la curva (Fig. 4.12), vemos que en general, para liberar energía, hay que desplazarse de izquierda a derecha, es decir, fabricar elementos más pesados a partir de elementos ligeros. Las reacciones nucleares correspondientes serán reacciones de *fusión*. Un ejemplo típico es la fusión de un núcleo de deuterio con uno de tritio para formar un núcleo de helio (Fig. 4.14).

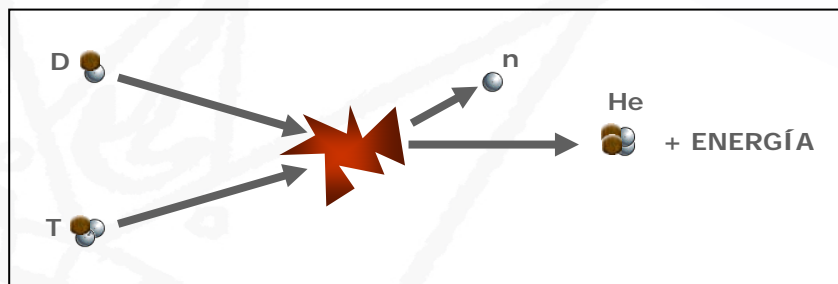


Figura 4.14 Fusión de un núcleo de helio a partir de uno de deuterio y otro de tritio.

Hay que notar que las fuerzas nucleares que aseguran la cohesión del nuevo átomo resultante de una reacción de fusión tienen un radio de acción muy corto frente a las fuerzas de repulsión electrostáticas, que constituyen un obstáculo al acercamiento de los dos núcleos iniciales. Por lo

tanto, el problema es comunicar a los núcleos que se quiere unir una energía cinética suficiente para que tengan una probabilidad grande de franquear la barrera de potencial electrostático que los rodea.

4.2.1 Combustible nuclear

Los principales combustibles nucleares (materiales fisionables) son: el uranio-235, el uranio-233 y el plutonio-239. Únicamente el uranio-235 existe en cantidades notables en la naturaleza, formando una parte del uranio natural por 140 partes de uranio-238. Es relativamente fácil, aunque poco satisfactorio, el fisiónar sólo el uranio-235. Lo más interesante es utilizar las técnicas de *breeding* (del inglés *breeder*: productor) que permiten quemar una cantidad de material fisionable muy superior a la riqueza inicial en uranio-235. El *breeding* o regeneración del combustible consiste en utilizar el excedente de neutrones, no necesario para mantener la reacción en cadena, para transformar en material fisionable ciertos materiales llamados “fértils”. Así, en un *breeder* de neutrones rápidos es posible utilizar el uranio-238 como material fértil y transformarlo en plutonio-239 y, en un *breeder* de neutrones térmicos, el torio-232 puede transformarse en uranio-233. Las cantidades de uranio y de torio presentes en la corteza terrestre son bastante considerables.

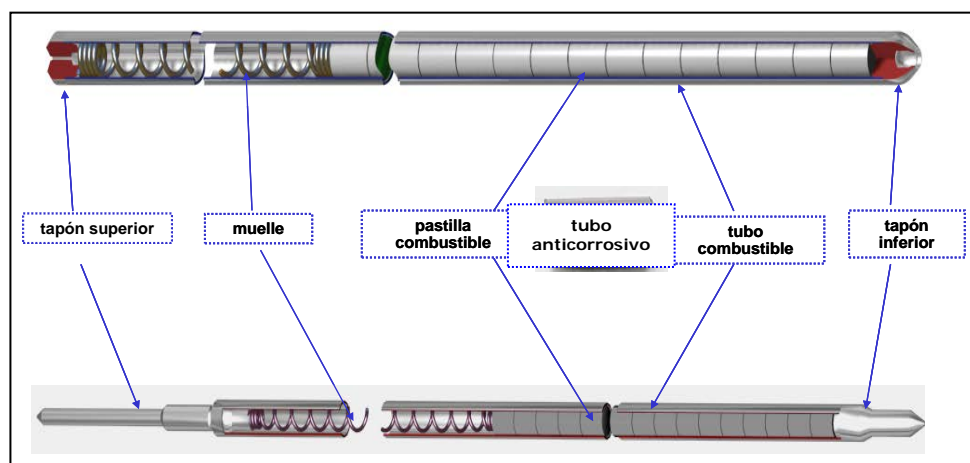


Figura 4.15 Barra combustible

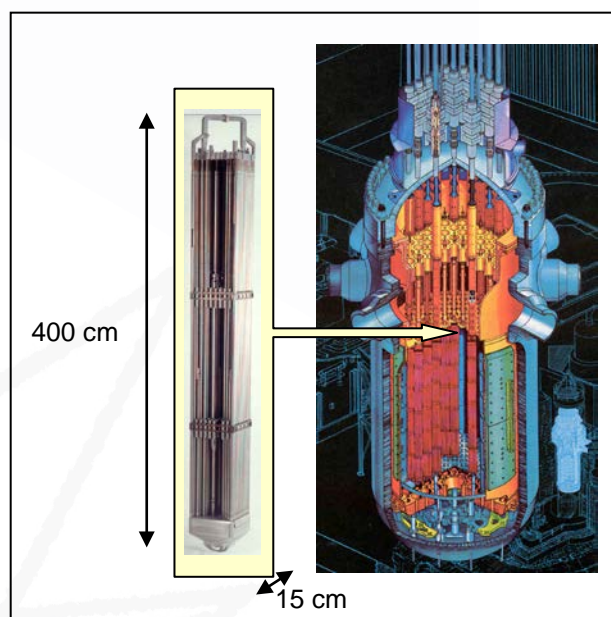


Figura 4.16 Ubicación de un elemento combustible en el reactor.

Dependiendo del tipo de reactor, existe una gran variedad de materiales combustibles. Uno de los más comunes es el conocido como UOX que está constituido por material cerámico de óxido de uranio (UO_2) enriquecido en U-235, prensado junto con un aglomerante orgánico en forma de pastillas que después se someten a altas temperaturas para sinterizar el sólido. Varias de estas pastillas, encerradas en una vaina de Zircaloy (aleación de circonio) de 1 cm de diámetro y 4 m de longitud aproximadamente, constituyen una barra combustible (Fig. 4.15). Las barras se ensamblan en paquetes de 14×14 ó 17×17 para formar los denominados elementos combustibles. Otro importante combustible cerámico es el conocido como MOX (de *Mixed Oxide*) en el que se mezcla plutonio con uranio natural. La mezcla tiene un comportamiento similar al uranio enriquecido.

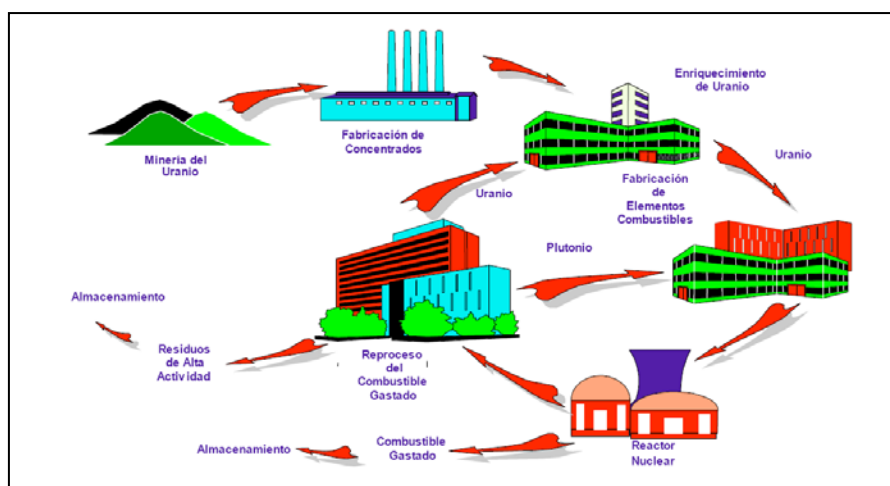


Figura 4.17 *Ciclo del combustible nuclear.*

A modo de comparación, con los 4,8 g del combustible de una pastilla de UO_2 enriquecido al 3,6 % con U-235, una central nuclear genera la misma energía eléctrica que la que se puede conseguir con la combustión de unos 360 kg de fuel o 600 kg de carbón. La única empresa española que diseña y fabrica combustible nuclear es *ENUSA Industrias Avanzadas S.A.*, en su fábrica de Juzbado (Salamanca).

En los reactores habituales, sólo un pequeño porcentaje del combustible nuclear llega a gastarse, por eso se han desarrollado métodos de reprocesamiento del combustible que permiten reutilizar el combustible usado y volver a emplearlo en la elaboración de nuevos elementos combustibles. Estos tratamientos forman parte del ciclo completo del combustible nuclear (Fig. 4.17). Después de su extracción en la mina, el mineral es sometido a procesos físico-químicos para aumentar la concentración de uranio, transformándolo en hexafluoruro de uranio. A continuación, este compuesto se enriquece, aumentando la proporción de átomos de uranio-235 frente a los de uranio-238. Con este uranio enriquecido se fabrican las pastillas cerámicas que se insertan en las varillas de los elementos combustibles. Estos elementos se utilizan en los reactores, formando parte del núcleo de los mismos, hasta que se consume el combustible. El combustible gastado se almacena primero en una piscina de la propia instalación durante un cierto tiempo, hasta que baja la actividad de los productos de fisión de vida corta.

Posteriormente, este combustible gastado puede seguir dos caminos distintos que dan lugar a los denominados: *ciclo abierto de combustible* y *ciclo cerrado del combustible*. En el primer caso, el combustible gastado es considerado como un residuo radiactivo de alta actividad y es almacenado en un Almacén Temporal Centralizado (ATC). Su último destino será, no obstante, el almacenamiento definitivo en un Almacén Geológico Profundo (AGP), donde permanecerá confinado de forma segura durante miles de años. Este proceso se detalla más adelante en el epígrafe 5.3 del próximo capítulo.

Mientras dura su utilización en el reactor, sólo se consume una pequeña fracción del uranio de las pastillas por lo que, en el ciclo cerrado del combustible, estos elementos se reprocesan en plantas de alta tecnología que sólo existen en algunos países. Los procesos de reelaboración recuperan el uranio sin utilizar así como ciertas cantidades de otros productos de la fisión, como el plutonio. Los residuos de alta radiactividad que se desechan

en las plantas de reelaboración se almacenan en repositorios de carácter temporal (ATC) para un eventual reproceso ulterior o bien para su almacenamiento definitivo en el AGP.

4.2.2 Reactores nucleares

El reactor nuclear es el elemento central de las centrales nucleares. En él tiene lugar la reacción en cadena moderada que permite extraer calor a un ritmo adecuado, esta fuente de calor es empleado como foco caliente en un ciclo de tipo Rankine, de forma similar a como se hace en las centrales térmicas.

El núcleo del reactor lo constituyen los elementos combustibles donde las reacciones de fisión generan los neutrones rápidos que mantienen el funcionamiento continuado del reactor. Mediante la colisión con los átomos de un material moderador, estos neutrones se ralentizan y disminuyen su energía cinética con lo que aumenta la probabilidad de que colisionen con los átomos de combustible, manteniendo la reacción. Como material moderador se usa agua, grafito,... Además, el reactor posee un sistema de barras de control que permite iniciar o detener la reacción en cadena. Estas barras se fabrican de cadmio o boro y son capaces de atrapar un gran número de neutrones evitando que continúen las reacciones de fisión. Por otra parte, es necesario extraer calor del reactor con un fluido refrigerante que lo transfiere al ciclo de Rankine mediante un intercambiador. En general, este fluido refrigerante puede ser agua ligera, agua pesada, un gas (por ejemplo, CO_2) e incluso, en algunos reactores, este fluido es un metal líquido como sodio o plomo. Finalmente, por cuestiones de seguridad, todo el reactor se encuentra encapsulado en una vasija de presión construida de un acero especial con un revestimiento interior de acero inoxidable, para que resista la corrosión y las intensas radiaciones que se desprenden del núcleo. Los dos tipos de reactores más comunes son:

- Reactor de agua en ebullición BWR (del inglés: Boiling Water Reactor).

Se utiliza agua como moderador y refrigerante. El combustible es uranio enriquecido. Hay un único circuito de agua que se pone en ebullición con el calor de las reacciones nucleares y el vapor producido se lleva a una turbina que acciona un generador eléctrico. El vapor es luego condensado mediante una torre de refrigeración y se bombea de nuevo hacia el interior del reactor.

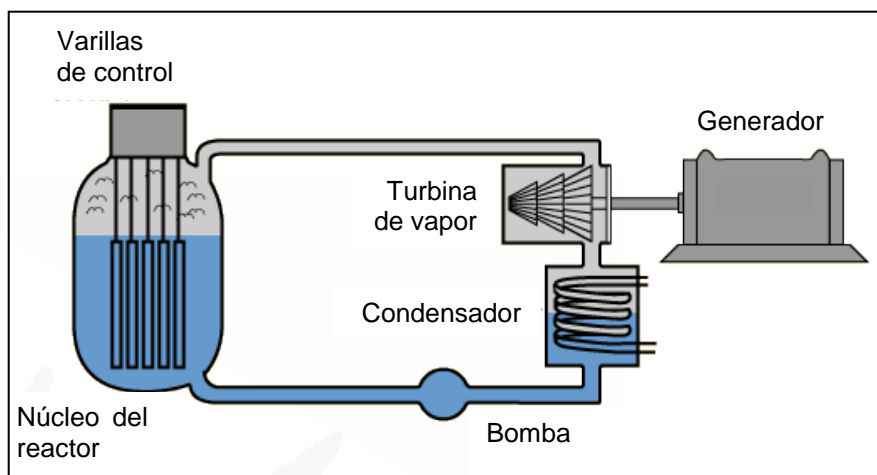


Figura 4.18 Reactor de agua en ebullición.

- Reactor de agua a presión PWR (del inglés: Pressurized Water Reactor)

El refrigerante es agua a presión y el moderador puede ser agua o grafito. De nuevo el combustible es uranio enriquecido. Hay un circuito primario de agua a muy alta presión de modo que su ebullición tiene lugar a temperaturas superiores a los 100 °C. Este circuito está encerrado en el recinto de contención y en él se produce vapor a 600 °C que pasa a un intercambiador de calor donde se enfría y condensa, volviendo al reactor. En el intercambiador se evapora agua de un circuito secundario que se turbinan en el exterior del recinto y acciona un generador eléctrico. Después de condensar, el agua se bombea hacia el interior del recinto de contención para volver al intercambiador de calor.

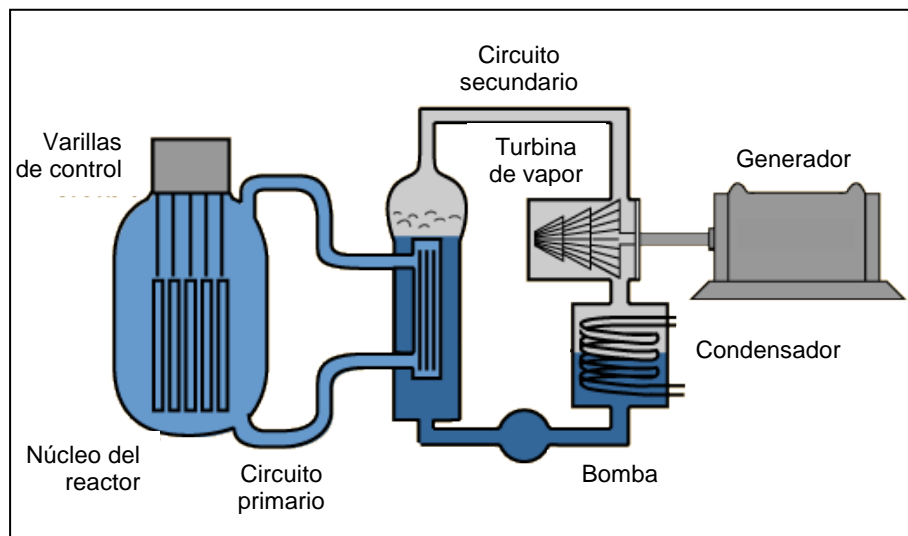


Figura 4.19 Reactor de agua a presión.

4.2.3 Central nuclear

Como ya se ha dicho, el principio de funcionamiento de una central nuclear es el mismo que el de las centrales térmicas de combustibles fósiles: un ciclo de Rankine mantenido por un aporte externo de calor que, en el caso de una central nuclear, lo proporcionan las reacciones nucleares. Sin embargo, el estricto control que exigen las instalaciones nucleares obliga a que los distintos componentes de este tipo de centrales hagan uso de una tecnología comparativamente más avanzada.

De forma general, los principales elementos que forman una central nuclear son el *recinto de contención*, que alberga el reactor, el *edificio de turbinas*, donde tiene lugar la generación, y la *torre de refrigeración*, que juega el papel de foco frío del ciclo. Las distintas unidades de las que a su vez se componen estos elementos están representadas de forma esquemática en la Fig. 4.20.

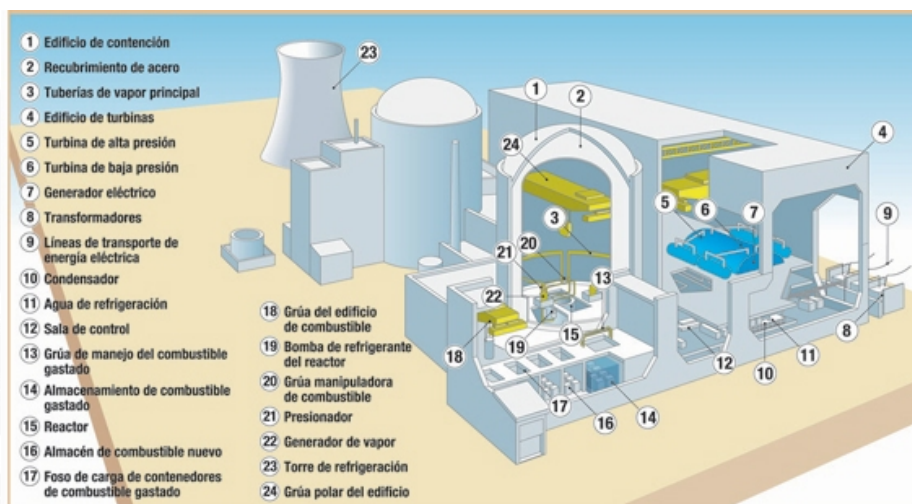


Figura 4.20 Componentes de una central nuclear.

Las centrales nucleares que están funcionando actualmente representan una segunda generación (Generación II), tras la tecnología inicial que dio lugar a las primeras centrales (Generación I). En la actualidad, las centrales que están en fase de construcción incorporan los desarrollos tecnológicos derivados de la experiencia de operación que se ha conseguido, constituyendo la denominada Generación III. La futura generación de centrales que seguirá a éstas, la denominada Generación IV, no presenta novedad en cuanto a los

principios básicos de generación eléctrica, pero sí en cuanto a las características del reactor y los sistemas de seguridad, entre otros. Los principales objetivos perseguidos en la definición de estas nuevas centrales son: Sostenibilidad, Economía, Seguridad y fiabilidad, Resistencia a la proliferación y Protección física.

El conjunto de países que impulsan esta nueva generación de plantas constituyeron, en julio de 2001, el denominado GIF (Generation IV International Forum) formado por: Francia, Canadá, Brasil, Argentina, Estados Unidos, Reino Unido, Suiza, Corea del Sur, Sudáfrica y Japón, a los que más tarde se unió EURATOM (en julio de 2003). Se han seleccionado seis sistemas distintos que se recogen en la Tabla 4.1, correspondientes a seis nuevos conceptos de reactor, con la intención de llegar hasta la fase de demostración en las diferentes alternativas.

Acrónimo	Tipo de Reactor	Neutrones	Ciclo
SFR	Sodium Cooled Fast Reactor	Rápidos	Cerrado
LFR	Lead Alloy Cooled Reactor	Rápidos	Cerrado
GFR	Gas Cooled Fast Reactor	Rápidos	Cerrado
VHTR	Very High Temperature Reactor	Térmicos	Abierto
SCWR	Supercritical Water Cooled Reactor	Térmicos y rápidos	Abierto y cerrado
MSR	Molten Salt Reactor	Térmicos	Cerrado

Tabla 4.1