CENTRALES TERMICAS



Pedro Fernández Díez

pfernandezdiez.es

I.- INTRODUCCIÓN A LOS GENERADORES DE VAPOR

pfernandezdiez.es

Generadores de vapor; Metodología	*2*
Metodología	*4*
Configuración del sistema	*6*
Prediseño del generador de vapor	*9*
Influencia de la fuente energética	*10*
Influencia de las condiciones del vapor	*12*
Fundamentos de la generación de vapor	*12*
Vaporización	*12*
Vaporización en tubos	*13*
Circulación natural	*13*
Circulación forzada	*14*
Componentes del generador de vapor de combustible fósil	*15*
Hogar	*16*
Sobrecalentadores y recalentadores	*16*
Banco de caldera	*17*
Economizador	*18*
Calderín de vapor	*18*
Calentador de aire	*19*
Sistemas de flujos	*19*
Sistemas de flujo agua-vapor	*19*
Sistemas de combustión y auxiliares	*21*
Circuito del flujo de gases	*21*
Control de emisiones	*22*
Tabla de emisiones y subproductos de un generador de vapor de 500 MW que quema carbón	*23*
Sistemas nucleares de generación de vapor	*23*
El sistema nuclear de vapor (NSS)	*25*
Reactor de agua a presión (PWR)	*25*
Componentes del sistema nuclear de vapor NSS	*25*
Esquema del flujo del sistema de refrigeración del reactor	*26*
Componentes de un reactor de agua a presión (PWR)	*27*
Esquemas de la vasija del reactor PWR y partes internas	*28*
Generadores de vapor correspondientes a los NSS	*29*
Generador de vapor de un paso (OTSG)	*29*
Generador de vapor de recirculación (RSG)	*29*
Módulos con barras de control y haz de barras de combustible	*30*
Clasificación de los sistemas nucleares de vapor (NSS)	*32*
Reactor de agua presurizada (PWR)	*32*
Reactor de agua en ebullición (BWR)	*32*
Reactor de agua pesada presurizada (PHWR) CANDU	*32*
Reactor refrigerado por gas (GCR)	*32*
Reactor reproductor (BR)	*33*
Seguridad de las centrales nucleares de generación de vapor	*33*
Diseño del sistema de vapor	*34*
Aire comburente	*39*
Agua de alimentación	*39*
Referencias	*41*

I.1.- INTRODUCCIÓN

Las calderas utilizan el calor para convertir agua líquida en vapor, que se destina a una gran variedad de aplicaciones, entre las que se encuentran
- *la producción de energía eléctrica*
- *el calentamiento en procesos industriales*

El vapor de agua es un recurso fundamental por
- *su*
  - *disponibilidad*
  - *naturaleza no tóxica*
- *sus propiedades ventajosas*

Los flujos de vapor y sus condiciones de presión y temperatura, pueden variar:

- Desde 0,1 kg/seg para su utilización en procesos, hasta más de 1250 kg/seg en el caso de grandes plantas de generación de energía eléctrica

- Desde 1 bar y 100ºC para algunas aplicaciones de calentamiento, hasta más de 310 bar y 600ºC en plantas energéticas de ciclo avanzado

La utilización de determinados combustibles
- *carbón*
- *petróleo*
- *gas natural*

y sus diferentes formas de manipulación, aumentan la complejidad y variedad de las unidades generadoras de vapor.

La energía nuclear tiene también un papel importante en el sector de la generación de energía eléctrica, aunque su futuro, al menos en España, sigue siendo incierto a corto plazo.

Otras fuentes de calor para la generación de electricidad, son una gran variedad de materiales de biomasa y de subproductos de procesos industriales, como la turba, la madera y sus desechos, la paja, los posos del café, las cáscaras de cereales, los desechos de las minas de carbón, el calor residual de factorías siderúrgicas, las energías geotérmica y solar, y los procesos de generación de vapor asociados a los de recuperación de subproductos en determinados procesos, como la fabricación de pasta de papel, los residuos sólidos municipales y la destrucción de residuos sanitarios peligrosos.

Los generadores de vapor diseñados para cumplimentar estos objetivos, pueden ser:

a) Pequeñas calderas prefabricadas montadas en factoría, completamente equipadas y automatizadas, que queman gas y pueden suministrar vapor, a las que sólo hay que acoplar la chimenea y conexiones

b) Calderas energéticas de potencia, como la de la Fig I.1, que genera 1300 MW, que entran dentro del grupo de las grandes calderas energéticas; se montan y construyen en el lugar de emplazamiento y pueden producir más de 1250 kg/seg de vapor, a 275 bar y 550ºC; estas unidades, o sus equivalentes nucleares, forman parte de los sistemas actuales que se encuentran en explotación, siendo de gran complejidad.

c) Otras calderas energéticas de menor potencia, como las utilizadas en plantas de generación de electricidad que queman 700 Tm/día de residuos en masa incandescente, Fig I.2, o las de combustión en lecho fluido circulante, etc

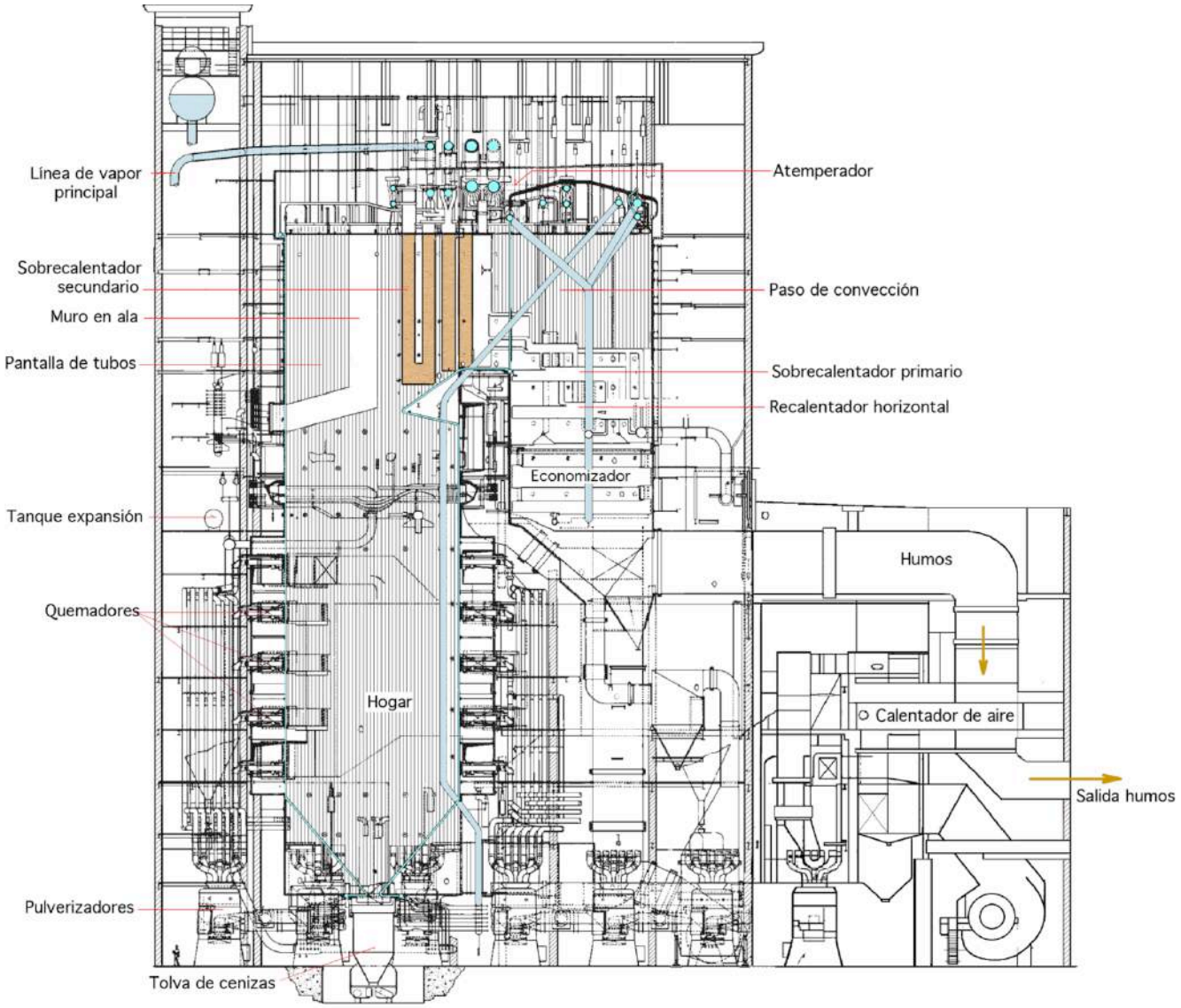


Fig I.1.- Generador de vapor Zimmer de carbón pulverizado para planta energética de 1300 MWe.- Cincinnati G&E / Dayton P&L / AEP-Columbus Southern Power.- Presión de salida 26,5 MPa; temperatura vapor 543°C / 538°C (año 1990)

Para obtener un sistema generador de vapor que cumplimente las características de un determinado suministro de vapor en cualquiera de estas aplicaciones, hay que compaginar na serie de factores como, la ciencia fundamental, la tecnología, datos empíricos y experiencia, con el equipamiento más económico posible.

Otros factores que se integran en el proceso de diseño son:

- *Las características del combustible*
- *La protección del medio ambiente*
- *El rendimiento térmico*
- *Las características funcionales*
- *Los costes de explotación (producción-control-mantenimiento)*
- *Los requisitos legales y las condiciones climatológicas y geográficas locales, etc.*

por lo que el diseño implica ponderar todos los factores mencionados tan complejos y, a veces, tan contrapuestos. Por ejemplo, la reducción del contaminante NO_x puede requerir una caldera con gran volumen de hogar, elevando los costes de inversión e incrementando los de mantenimiento. Hay que procurar que el diseño del generador de vapor se oriente hacia determinadas tendencias, para facilitar la mejor opción posible en base a las siguientes consideraciones:

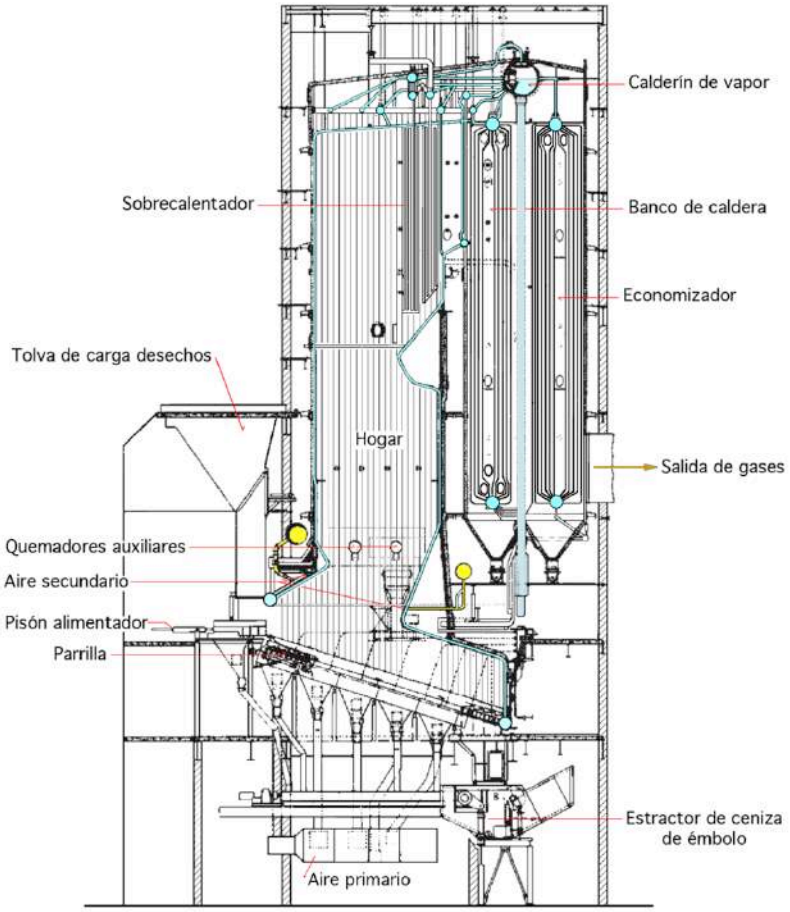


Fig I.2.- Caldera para planta energética quemando 680 Tm/día de residuos en masa incandescente

- El precio de los combustibles se incrementa en cuanto el suministro se haga más inseguro, por lo que se hace necesario mejorar la eficiencia, al tiempo que se flexibiliza la utilización de los combustibles

- Las crecientes exigencias en el campo de la protección medioambiental tienen que conducir a mejorar la combustión, para reducir la formación de los NO_x y las emisiones de CO_2

- El aumento de la demanda en muchas regiones puede conducir a la necesidad de mantener, en el generador de vapor, determinados ciclos de carga que se harán más frecuentes y rápidos.

I.2.- METODOLOGÍA

Para cumplir con los requerimientos de funcionamiento de un generador de vapor se puede utilizar el método de *iteración múltiple* en el que siempre es muy difícil encontrar una solución di-

recta, debido a la complejidad y a las interacciones que se presentan.

El proceso de iteración comienza por presuponer una solución y un sistema particular, para el que se definen condiciones tales como
- *Requisitos de flujo de vapor*
- *Fuentes de combustibles*
- *Dinámica funcional*
- *Límites de emisiones, etc.*

A partir de estos datos se diseña el generador de vapor teniendo en cuenta diversas opciones, y la necesidad de equipos para atender las características funcionales que se hayan fijado.

Para una caldera que queme carbón, el método incluye:

- Los requisitos de suministro de vapor, para definir las entradas de
- *combustible*
- *aire*
- *agua*

, así como las condiciones de salida que se deriven de esas entradas

- El cálculo de los balances térmicos y, en particular, la absorción de calor de cada tipo de superficie intercambiadora integrada en el generador de vapor

- El cálculo de la combustión para definir el aporte de calor y los flujos de gases, (aire y humos)

- La configuración del sistema de combustión para completar el proceso, minimizando las emisiones, que afecta a la preparación del combustible, a la combustión y a la manipulación del aire comburente

- La configuración de
- *el hogar*
- *de las superficies de transferencia térmica*

, atendiendo a temperaturas, materiales y relaciones características funcionales del sistema global

- El dimensionado de los demás componentes, tanto del lado del agua, como del lado del vapor

- Las zonas de recuperación de calor en los intercambiadores finales, como los economizadores y los calentadores de aire

- La comprobación de las características funcionales del sistema generador de vapor para asegurar que se cumplen los criterios de diseño de todos sus equipos auxiliares

- La repetición de los pasos anteriores, para todo el campo de cargas especificado, hasta que se alcancen el flujo y las condiciones de presión y temperatura del vapor

- La utilización, en el diseño de las partes a presión, de las normas del Código ASME

- El equipo de protección medioambiental necesario para alcanzar los niveles obligados de emisiones, y otros equipos auxiliares, como
- *el sistema de limpieza de las superficies intercambiadoras*
- *los ventiladores*
- *la instrumentación de control , etc*

Una consideración a tener en cuenta radica en el ciclo de vida de la unidad generadora de vapor y de sus sistemas auxiliares; en la actualidad, algunos generadores de vapor se construyen para que puedan funcionar de forma eficiente y fiable durante 60 años, período en el que, se supone, los componentes se deterioran a causa del medio ambiente agresivo o habrán quedado obsoletos.

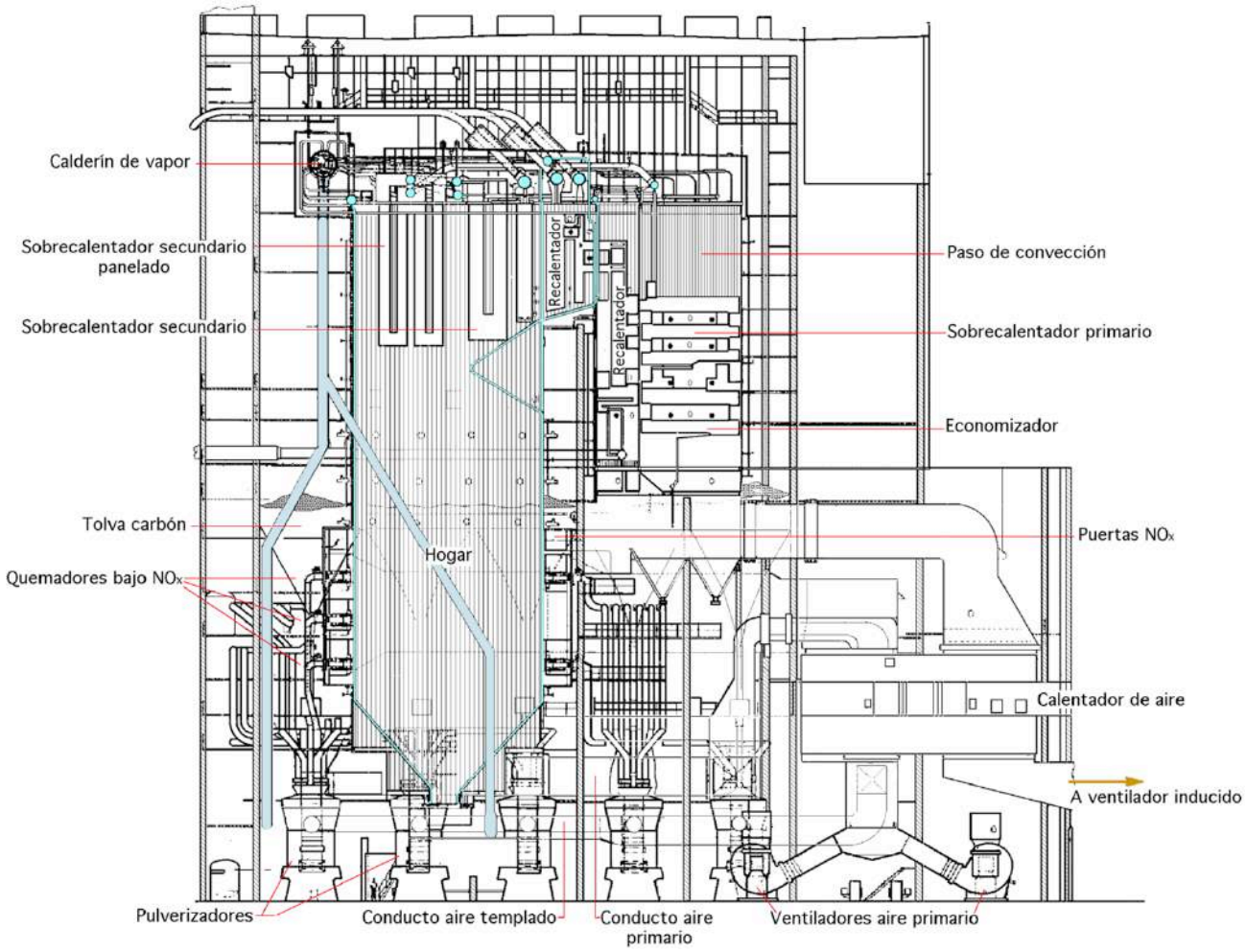


Fig I.3.- Caldera de carbón y circulación natural de 455 MW

Para garantizar una determinada fiabilidad, se precisan inspecciones rutinarias de las partes a presión, monitorizando los procesos de funcionamiento transitorios de la instalación que influyen en la reducción de vida de ésta.

Las prácticas operativas que incluyen { *- el tratamiento de aguas en todos sus niveles* / *- los procedimientos de funcionamiento cíclico* / *- los programas de mantenimiento* } pueden afectar significativamente a la disponibilidad y fiabilidad del generador de vapor y sus auxiliares.

Los componentes principales de la unidad generadora de vapor tienen que ser susceptibles de poderse modernizar para mejorar sus características funcionales, decisiones que se toman en la fase de diseño.

I.3.- CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA

La mayoría de las aplicaciones de la generación de vapor se destinan a los sectores de:

- *Producción de electricidad*
- *Suministro de vapor a procesos*

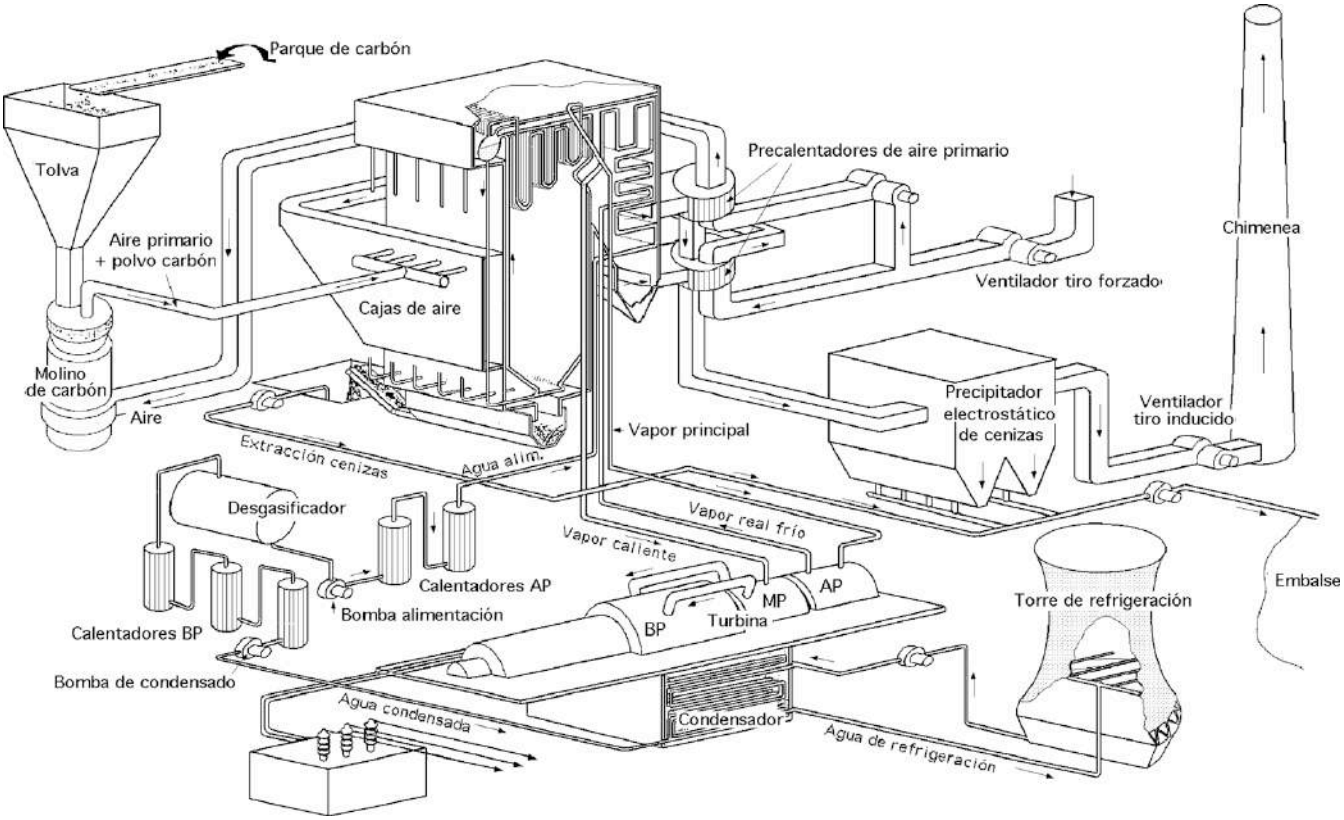


Fig I.4.- Perspectiva de una planta de generación de energía que quema carbón

A veces se emplean al mismo tiempo combinaciones de estas dos aplicaciones, y se habla entonces de cogeneración.

En toda aplicación de vapor, el generador constituye el componente más importante del sistema, estando integrado por otros subsistemas y componentes. En la Fig I.4 se indican los subsistemas principales de una planta de generación de energía que quema carbón, que comprenden:

- La recepción y preparación del combustible

- El generador de vapor

- El equipo de combustión

- La protección medioambiental

- El grupo turbina-alternador

- El equipo de eliminación de calor residual, incluyendo la torre de refrigeración

- El recorrido de $\begin{cases} \text{- el combustible} \\ \text{- los productos de combustión} \end{cases}$*, se puede seguir teniendo en cuenta que:*

- El sistema de manipulación de combustible comprende su suministro, su preparación para la combustión y su transporte hasta el generador de vapor

- El sistema de aire asociado suministra el comburente a los distintos quemadores, por medio de un ventilador de tiro forzado

- El subsistema del generador de vapor, (que incluye el calentador de aire), quema la mezcla combusti-

ble-aire, recupera el calor liberado y genera el vapor a alta presión y temperatura

- Los humos abandonan el calentador de aire y pasan a través de los subsistemas de separación de partículas y de eliminación de SO_2 para retener los contaminantes

- La ceniza y los residuos sólidos del depurador de humos se evacúan

- Los humos se envían a la chimenea con ayuda de un ventilador de tiro inducido

El generador de vapor vaporiza el agua y suministra vapor a alta temperatura y presión, en condiciones controladas; a continuación, el vapor se lleva a la turbina conectada a un alternador que se encarga de generar electricidad; una vez expansionado el vapor en la turbina pasa al condensador, en el que se evacua su calor residual, condensando.

Antes de que el condensado retorne a la caldera, el agua procedente del condensador pasa a través de varias bombas y calentadores de agua, para incrementar su presión y temperatura.

El calor absorbido en el condensador se evacua a la atmósfera por medio de torres de refrigeración, que son los componentes más visibles de toda instalación de producción de energía.

La torre de refrigeración de tiro natural es una estructura casi cilíndrica, por cuyo interior circula aire ascendente y agua pulverizada descendente que cede el calor evacuado por el condensador al aire que circula; estas torres, en distintas versiones, existen en la mayoría de los emplazamientos de las modernas plantas generadoras de energía eléctrica.

En una instalación de energía nuclear, la manipulación de carbón de una planta de combustible fósil se sustituye por un dispositivo para la manipulación y almacenaje de los paquetes de barras de combustible nuclear. En una planta nuclear de producción de electricidad, no se precisan los grandes equipos requeridos para el control de la contaminación atmosférica, característicos de las centrales de combustible fósil.

Prediseño del generador de vapor.- La función principal del sistema generador de vapor es transformar en calor el contenido energético relativo al combustible (químico o nuclear), que se utiliza en producir vapor a alta presión y temperatura.

La amplia variedad de $\begin{cases} \textit{- fuentes de combustibles} \\ \textit{- temperaturas altas de los procesos} \\ \textit{- interfaces del sistema} \end{cases}$, hacen que la fase de diseño sea complicada, siendo los pasos iniciales en la evaluación del sistema de generación de vapor los siguientes:

- La necesidad del suministro energético o de la fuente de vapor adicional

- La selección del combustible y del tipo de sistema productor de vapor más económicos

- La ubicación de la planta

- El ciclo energético y las características del vapor de proceso que se desean

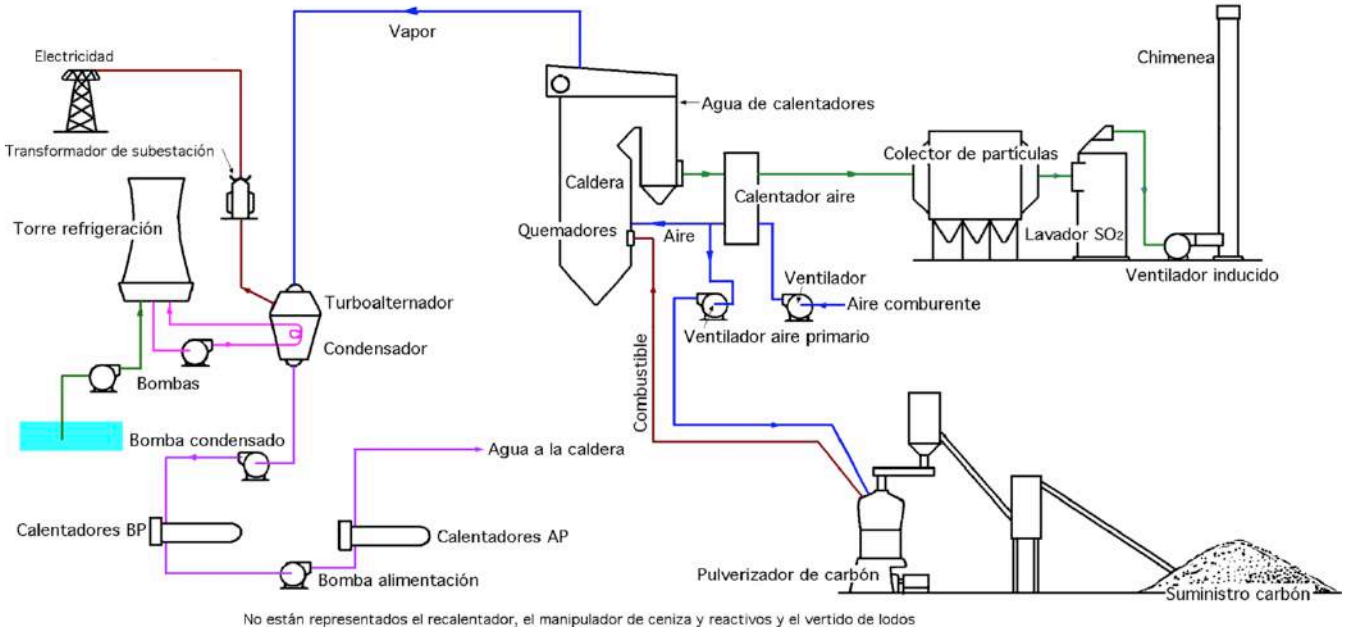


Fig I.5.- Esquema de una instalación de generación de energía que quema carbón

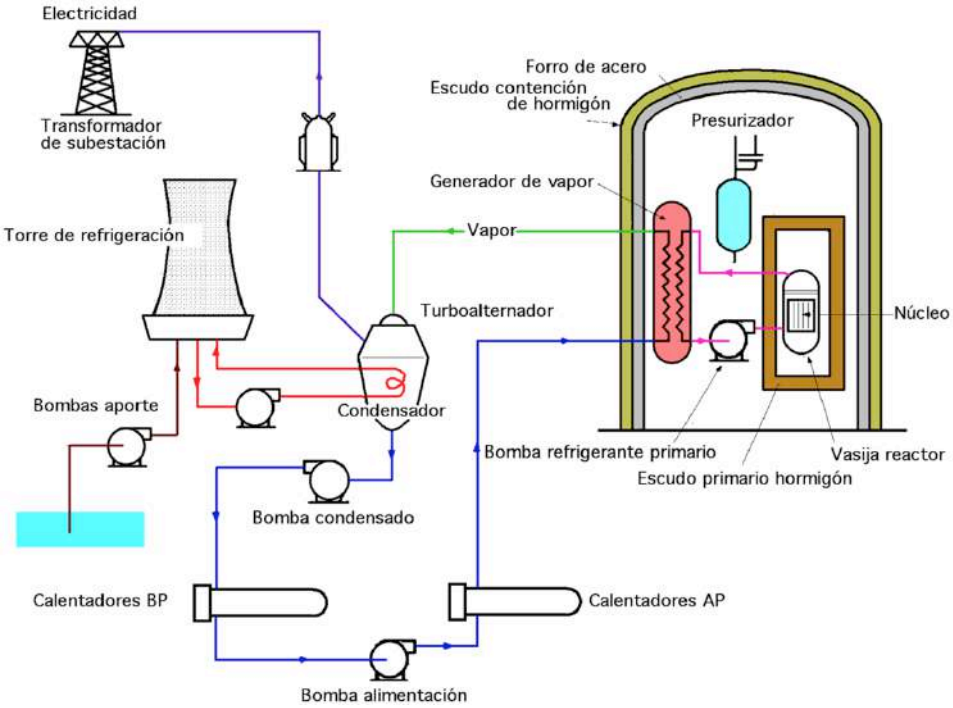


Fig I.6.- Esquema de planta energética de combustible nuclear

Los requerimientos principales se pueden clasificar en:

- Flujos mínimo, medio y máximo del vapor, la necesidad de una o más etapas de vapor recalentado, la utilización del vapor por el equipo auxiliar y otros requerimientos

- Fuente de aporte del agua a renovar, como consecuencia del vapor consumido, y su tratamiento químico y temperatura antes de introducirla en el generador de vapor

- Tipos de combustibles considerados y sus características, incluyendo el del peor supuesto, junto con el análisis químico inmediato de cada combustible o de mezclas de los mismos

- Altura de la planta sobre el nivel del mar, historial y previsiones climatológicas globales, posibilidad de terremotos, limitación de espacios, etc

- Requerimientos de control de emisiones locales, comarcales, y estatales, así como la legislación y normas gubernamentales aplicables

- Los diferentes equipos auxiliares, eficiencia global de la planta y caldera, accesos, penalizaciones a considerar en las evaluaciones, modos operativos previstos incluyendo los requisitos en ciclicidad, como el servicio de carga $\begin{cases} \text{- punta} \\ \text{- intermedia} \end{cases}$ *y probable uso futuro de la planta.*

Una vez establecidos estos requerimientos, se inicia el diseño y evaluación de la caldera de vapor.

Influencia de la fuente energética.- El combustible principal seleccionado es el que tiene más influencia sobre la configuración y el diseño del generador de vapor.

En el caso de la energía nuclear, se ha desarrollado un sistema único para contener el combustible y los productos de la reacción nuclear, dando especial importancia a la seguridad y protección pública a la exposición radiactiva.

Como puntos vitales en el diseño del sistema se deben tener en cuenta unas características:

- Aceptables en los materiales, frente al medio ambiente de la radiación

- Termohidráulicas y mecánicas, mantenidas a largo plazo

Las previsiones para la manipulación y preparación de combustibles fósiles, biomasa y subproductos, varían mucho en lo que respecta a su combustión, recuperación de calor, ensuciamiento de las superficies intercambiadoras, corrosión de los materiales y control de las emisiones de la planta.

Por ejemplo, *para una unidad que quema gas,* Fig I.7, en lo que atañe al sistema de almacenamiento y manipulación del combustible, se tienen unas necesidades mínimas; sólo se precisa de un pequeño hogar para la combustión y se pueden utilizar superficies intercambiadoras que estén poco espaciadas, ya que no hay deposición de cenizas.

El sobreespesor de corrosión de la unidad que quema gas, que se contempla en todo el diseño, es relativamente pequeño y el control de emisiones se reduce finalmente al NO_x térmico formado en la combustión, resultando un diseño relativamente pequeño, compacto y económico.

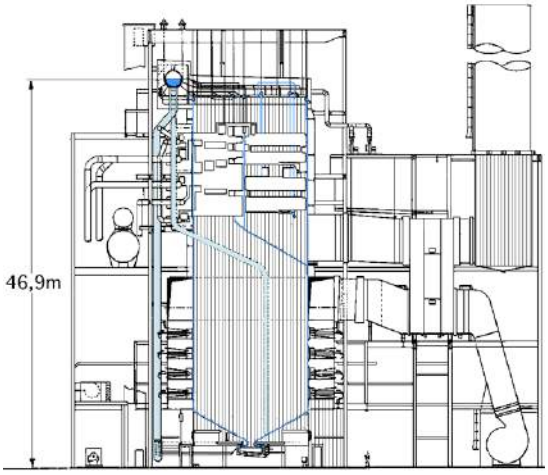


Fig I.7.- Esquema de planta energética que quema gas

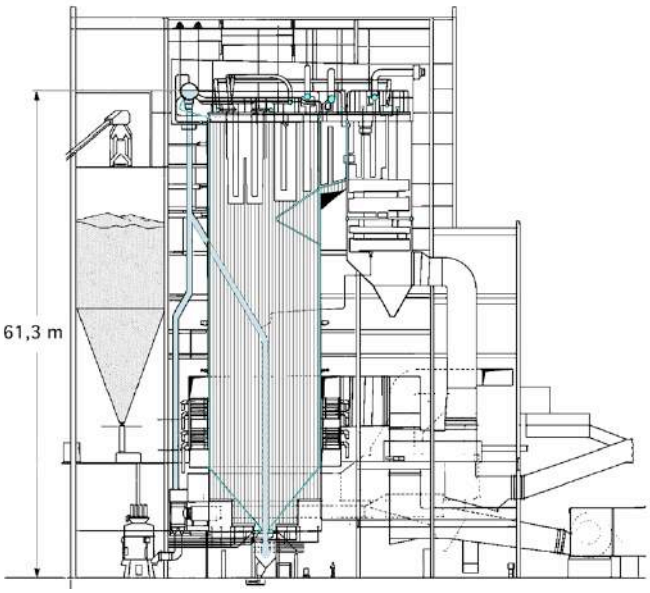


Fig I.8.- Esquema de planta energética que quema carbón

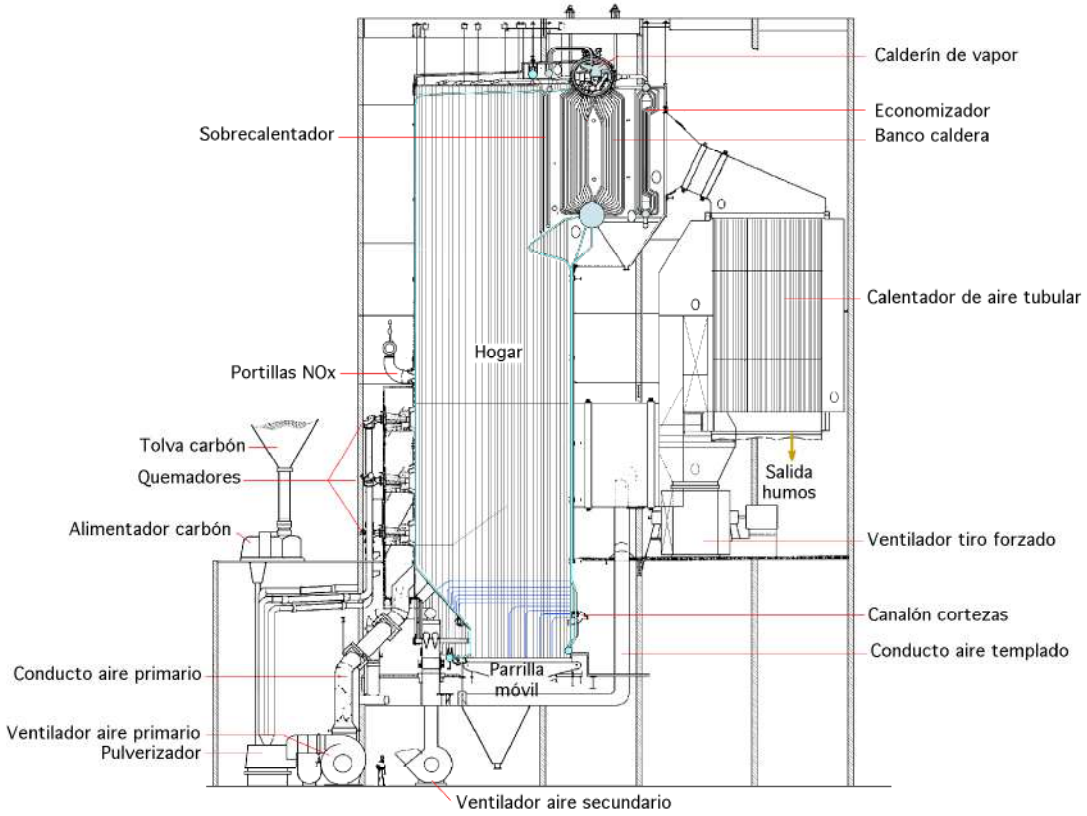


Fig I.9.- Esquema de planta energética que quema varios combustibles

Cuando se utiliza *un combustible sólido* como el carbón, que tiene un notable nivel de cenizas, el sistema global es siempre muy complejo, debiendo tener en cuenta que:

a) El sistema incluye instalaciones de manipulación y almacenamiento del combustible

b) Se precisa un hogar mucho mayor para poder completar la combustión y unas superficies intercam-

biadoras que tienen que estar mucho más espaciadas que en el caso precedente del gas

c) Hay que contar con equipamiento adicional, para:

- La limpieza (reducir el efecto del ensuciamiento y de la corrosión)

- El calentamiento de aire que se destina a secar el combustible y que se utiliza como aire caliente comburente para la mejora de la combustión

- Recoger y evacuar los residuos sólidos

La influencia del combustible en una caldera destinada a una planta de generación de electricidad, se observa en las Figs I.7.8, en las que se representan dos generadores de vapor para producir la misma cantidad de vapor, uno quemando gas y el otro carbón.

Cuando se queman diversos combustibles sólidos, las dificultades particulares se muestran en la Fig I.9, en la que se observan previsiones para quemar carbón pulverizado en *lecho suspendido* por medio de quemadores adecuados, y también para quemar trozos y cortezas de madera, sobre *parrilla móvil* (hogar mecánico) en la parte baja del hogar de la unidad.

Influencia de las condiciones del vapor.- La presión y temperatura del vapor producido en los diversos tipos de generadores, tienen gran influencia en el diseño de los mismos; la Fig I.10 identifica diversos tipos de calderas clásicas y detalla el aporte calorífico relativo necesario para el calentamiento del agua, vaporización, sobrecalentamiento del vapor y su eventual recalentamiento. La energía que se precisa para la vaporización se reduce incrementando la presión de la operación, por lo que las superficies intercambiadoras (en general configuradas por tubos), pueden ser muy diferentes.

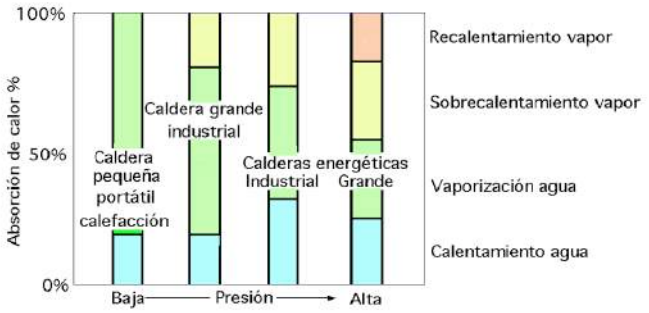


Fig I.10
Absorción energética en el generador, según la función a desempeñar

I.4.- FUNDAMENTOS DE LA GENERACIÓN DE VAPOR

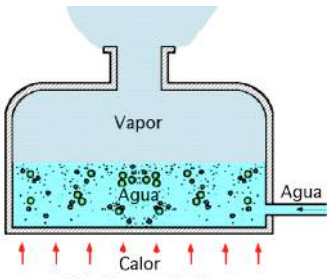


Fig I.11.- Caldereta

VAPORIZACIÓN.- Si se aplica calor a una caldereta con agua, ésta incrementa su temperatura y, para una presión dada, se alcanza la temperatura de vaporización, (saturación), comenzando la formación de burbujas en el seno del agua que se está calentado, Fig I.11. Si se sigue aportando calor, la temperatura permanece constante, el proceso de vaporización continúa y el vapor escapa por la superficie libre del líquido. Si el vapor se elimina del recipiente continuamente, la temperatura se man-

tiene constante hasta que se haya vaporizado todo el agua; a partir de este momento, si el aporte de calor se mantiene se incrementan la temperatura de la caldereta y la del vapor que queda en el interior de la misma. Para tener un proceso de vaporización continuo, es necesario un suministro regular de agua hacia la caldereta, igual a la cantidad de vapor producido y evacuado.

Vaporización en tubos.- Consiste en calentar tubos de diámetro relativamente pequeño, por los que circula un flujo de agua, Fig I.12a. El agua subenfriada (a una temperatura por debajo de la de saturación), entra en un tubo al que se le aplica calor. Conforme fluye por el tubo, el agua se calienta hasta su punto de vaporización, se forman burbujas y se produce vapor húmedo. En la mayoría de las calderas que utilizan el tubo vaporizador se obtiene una mezcla *vapor-agua*, que entra en un recipiente de grandes dimensiones (calderín de vapor), en el que el vapor se separa del agua; a continuación, el agua separada se mezcla con el agua de aporte y este conjunto retorna al tubo vaporizador. Un caso especial lo constituye la *caldera de proceso directo,* (*paso único),* Fig I.12b, en la que el flujo de vapor y el aporte de calor se controlan de forma muy precisa, para que todo lo que salga del tubo sea vapor, por lo que para esta clase de generador de vapor no es necesario el calderín de vapor.

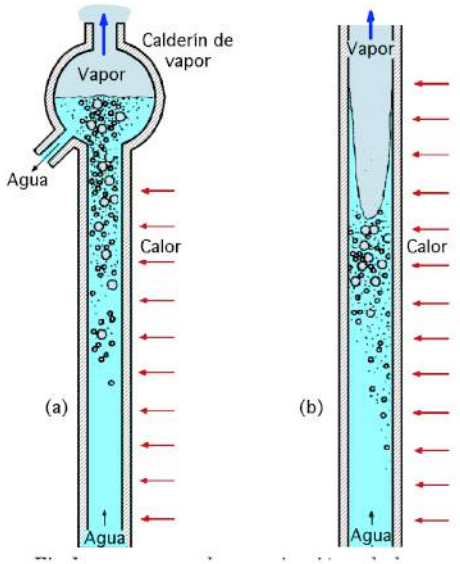


Fig I.12.- Proceso de vaporización tubular:
(a) Generación de vapor parcial
(b) Generación de vapor total

CIRCULACIÓN.- En un sistema de producción continua de vapor, el agua se hace circular por el interior de los tubos en flujo { *- natural (termocirculación)* / *- forzado (bombeo)*

En la *circulación natural*, Fig I.13a:

- En el segmento de tubo no calentado (AB) no hay presencia de vapor

- La aplicación de calor produce una mezcla vapor-agua en el tramo (BC)

- Como la densidad de la mezcla en el tramo (BC) es menor que la del agua en el tramo (AB), la gravedad provoca un flujo descendente en (AB) y ascendente en el (BC) hacia el calderín de vapor

La velocidad del movimiento del agua depende de la diferencia entre la densidad media del agua no calentada y de la mezcla citada *vapor-agua*.

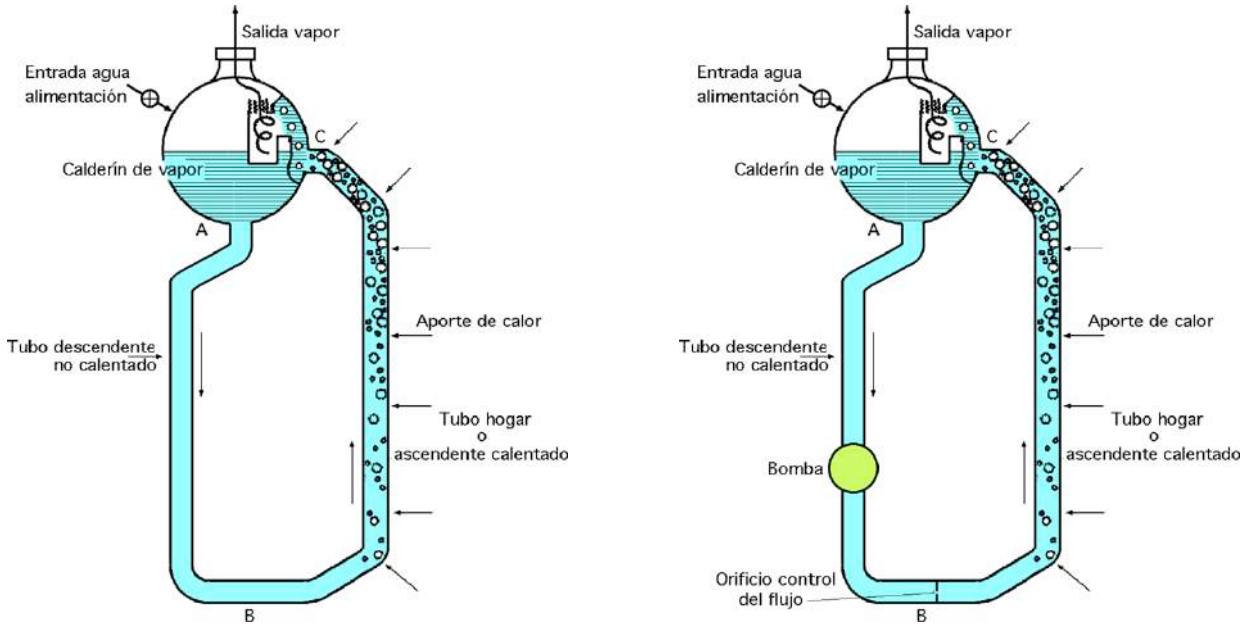
El caudal que circula depende principalmente de los siguientes factores:

- La altura geométrica de la caldera

- La presión de operación del vapor generado en la misma

- El aporte calorífico

- Las secciones de paso libre equivalente que ofrezcan los componentes



(a) Lazo simple circulación natural o térmica ; (b) Lazo simple circulación forzada o bombeada

Fig I.13.- Sistemas de circulación simplificados

Las calderas más altas proporcionan mayor presión diferencial entre las dos ramas, calentada y no calentada, y por eso pueden producir mayores gastos másicos de vapor.

Las presiones de vapor más elevadas dan lugar a densidades superiores, lo mismo en el lado del agua que en lado de la mezcla *vapor-agua*, lo que reduce la diferencia total de gasto entre las ramas calentada y no calentada, por lo que el flujo total tiende a disminuir.

La velocidad de circulación aumenta con un :

- Aporte calorífico mayor que incrementa la cantidad de vapor en los segmentos calentados y, por tanto, reduce la densidad media de la mezcla vapor-agua

- Incremento de la sección de paso del flujo, lo mismo del lado del agua, que de la mezcla vapor-agua

Por cada kg de vapor generado, la cantidad de agua que entra en el tubo está en la relación $\frac{3}{1} \div \frac{25}{1}$

La ***circulación forzada*** se representa en la Fig I.13b. Si se adapta una bomba al circuito simple del flujo considerado, la presión diferencial creada controlará la velocidad del flujo de agua.

En el caso de calderas pequeñas de baja presión, la separación *vapor-agua* se puede llevar a cabo utilizando un calderín grande lleno de agua, aproximadamente hasta la mitad de su volumen; la separación natural *vapor-agua* por efecto de la gravedad puede ser suficiente.

Sin embargo, en las actuales unidades de potencia elevada y altas presiones, en el interior del calderín se instalan separadores mecánicos centrífugos, para lograr un vapor exento de humedad a

la salida de éste, reduciéndose considerablemente el tamaño del mismo en relación con el que se requeriría sin los separadores y, por tanto, el coste de la inversión baja.

Para presiones muy altas no se usa calderín, por cuanto al aumentar la presión se alcanza el punto crítico, a partir del cual ya no se produce la vaporización; por encima de la presión crítica, 221 bar, la temperatura del agua aumenta, conforme prosigue la aplicación de calor, pudiéndose diseñar generadores de vapor que operen con presiones de funcionamiento superiores a la crítica, no necesitándose calderines de vapor, ni separadores *vapor-agua*; los generadores de vapor supercríticos funcionan en un proceso directo o de paso único.

Para calcular el flujo de vapor en un determinado diseño con unas condiciones específicas de operación, existen criterios que establecen el:

- *Mínimo valor del flujo*
- *Máximo contenido de vapor admisible para cada uno de los tubos individuales*
- *Máximo flujo permisible en el calderín de vapor*

I.5.- *COMPONENTES DEL GENERADOR DE VAPOR DE COMBUSTIBLE FÓSIL*

Los modernos generadores de vapor están constituidos por configuraciones de secciones termohidráulicas complejas, con flujos de vapor y agua, que $\begin{cases} \text{- calientan y vaporizan el agua} \\ \text{- sobrecalientan el vapor} \end{cases}$; estas superficies de intercambio térmico se disponen de forma que:

- *El combustible se queme completa y eficientemente, minimizando las emisiones posibles*
- *El vapor se genere a los valores especificados de caudal, presión y temperatura*
- *La energía se recupere en la mayor cuantía posible*

Los principales componentes del sistema de $\begin{cases} \text{- generación de vapor} \\ \text{- recuperación del calor} \end{cases}$ son:

- *El hogar y el paso de convección o zona recuperadora de calor*
- *Los sobrecalentadores de vapor, primario y secundario*
- *El recalentador de vapor*
- *La caldera o banco vaporizador (en calderas industriales)*
- *El economizador*
- *El calderín de vapor*
- *El atemperador y el sistema de control de la temperatura*
- *El calentador de aire*

que a su vez incluyen otros equipos auxiliares, como: $\begin{cases} \text{- Molinos de carbón} \\ \text{- Sistema de combustión} \\ \text{- Conductos de humos y aire} \\ \text{- Ventiladores} \\ \text{- Equipo de limpieza del lado de humos} \\ \text{- Equipo de evacuación de cenizas} \end{cases}$

HOGAR.- Es un espacio libre, amplio y cerrado, para la combustión del combustible y la refrigeración de los humos, antes de que entren en el paso de convección o zona de recuperación. Una temperatura excesiva de los humos a la salida del hogar, hacia los bancos tubulares, puede provocar una acumulación de partículas en el lado exterior de los tubos o una excesiva temperatura del acero de los mismos.

La geometría y dimensiones del hogar dependen del combustible y del equipo de combustión.

Las superficies intercambiadoras del sobrecalentador, recalentador y economizador se sitúan en secciones horizontales y verticales, con flujo descendente de humos dentro del cerramiento de la caldera, constituyendo el *paso de convección*. En los modernos generadores de vapor, el hogar y las paredes del paso de convención están formadas por tubos de acero al C ó de baja aleación, refrigerados por vapor o agua, para mantener la temperatura del metal tubular dentro de límites aceptables. Los tubos se conectan por la parte inferior y por la superior, a colectores o distribuidores que reúnen o distribuyen el agua, el vapor o las mezclas *vapor-agua*.

En la mayoría de las unidades modernas, los tubos de las paredes del hogar sirven también como componentes para la generación del vapor; van soldados entre sí con varillas de acero interpuestas a lo largo de los mismos, formando las *paredes membrana*, que son continuas, rígidas y estancas a gases.

Los tubos que configuran una pared membrana se construyen en paneles, con las aberturas necesarias para instalar
- *los quemadores*
- *los sopladores de limpieza del lado de humos*
- *las lumbreras de inyección de gases*

SOBRECALENTADORES Y RECALENTADORES.- Se diseñan en forma de bancos de tubos alineados con flujos cruzados, que incrementan la temperatura del vapor saturado; son intercambiadores de una sola fase, con flujo de vapor por el interior y flujo de humos por el exterior.

Se fabrican con aceros aleados, por las altas temperaturas de operación y están configurados para controlar:
- *La temperatura de salida del vapor*
- *El mantenimiento de la temperatura del metal dentro de límites aceptables*
- *La caída de presión en el flujo del vapor*

La diferencia principal entre un sobrecalentador y un recalentador radica en:

- *La posición (primero el sobrecalentador)*
- *En la presión del vapor*

En una caldera con calderín, si la presión de salida del sobrecalentador es de 180 bar, la presión de salida del recalentador es del orden de 40 bar.

El diseño y ubicación de las superficies (que pueden ser horizontales o verticales), depende de:

- *Las temperaturas de salida*
- *La absorción calorífica*
- *Las características del combustible*
- *Las peculiaridades del equipo de limpieza del lado de humos*

El sobrecalentador, (a veces también el recalentador), está dividido en múltiples secciones, para facilitar el control de la temperatura del vapor y optimizar la recuperación del calor.

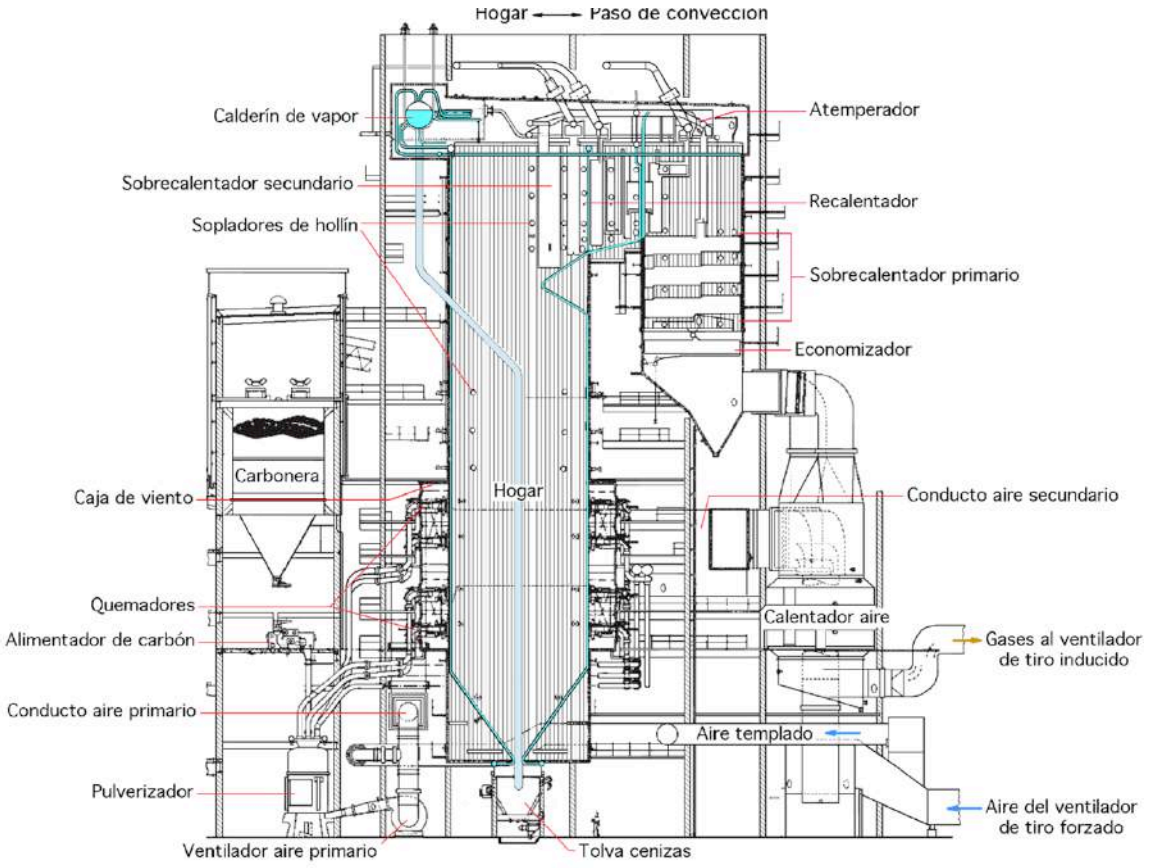


Fig I.14.- Caldera simple que quema carbón pulverizado soplado al interior del hogar, en el que se quema en suspensión.

BANCO DE CALDERA.- La superficie intercambiadora del hogar puede ser insuficiente para generar el vapor requerido por la aplicación final, por lo que se puede añadir un *banco de caldera* o banco vaporizador, necesario en muchas calderas industriales pequeñas (de baja presión), no siéndolo en las de alta presión que equipan las plantas termoeléctricas.

El banco de caldera se compone de: $\begin{cases} \text{- un calderín de } \begin{cases} \textit{vapor en la parte superior} \\ \textit{agua en la parte inferior} \end{cases} \\ \text{- una serie de tubos que conectan ambos calderines} \end{cases}$

Las partes internas del calderín de vapor y el tamaño de los tubos del banco vaporizador, se disponen de forma que el agua subenfriada descienda por el interior de los tubos más alejados del hogar, hacia el calderín inferior (de agua); en éste, el agua se distribuye entre los demás tubos, a lo

largo de los cuales se convierte parcialmente en vapor en su retorno al calderín superior. El calderín de agua se designa frecuentemente como colector de fangos, porque en él se depositan y recogen los sedimentos del agua de la caldera.

ECONOMIZADOR.- Es un intercambiador de calor de flujos en contracorriente que recupera la energía residual de los humos, aguas abajo del sobrecalentador y del recalentador, incrementando la temperatura del agua del sistema que entra en el calderín de vapor. El banco tubular dispone de tubos en serpentín horizontales paralelos, con el flujo de agua por el interior de los tubos, en contracorriente con el flujo de los humos; en los tubos del economizador, normalmente, no se genera vapor.

El espaciado de los tubos tiene que ser el menor posible para facilitar:

- *El intercambio térmico*
- *La limpieza de la superficie tubular exterior*
- *Una caída de presión limitada en el lado de hum*os

CALDERÍN DE VAPOR.- Es un recipiente cilíndrico de grandes dimensiones, con un diámetro de 0,9÷1,8 m y longitud que llega a los 30 m, ubicado en la parte alta de la caldera, en el que el vapor saturado se separa de la mezcla *vapor-agua* que sale de los tubos de la caldera. Se fabrican con virolas gruesas de acero laminado y fondos hemisféricos, alojan los equipos de:

- *Separación vapor-agua*
- *Purificación del vapor*
- *Mezcla del agua de aporte y de los productos químicos*

e, incluso, facilitan un limitado almacenamiento de agua para atender pequeños cambios instantáneos de carga de la unidad.

Las principales conexiones del calderín de vapor son las que:

- *Reciben más mezclas vapor-agua desde los tubos de caldera*
- *Evacúan el vapor saturado, que suelen ser muy pocas*
- *Añaden el agua de aporte al sistema, que se reducen a una ó dos*
- *Retoman el agua casi saturada y la llevan a la entrada de los tubos de caldera*

El diagrama de control de la temperatura del vapor incluye:

a) La recirculación parcial de los humos, bien hacia la parte baja del hogar (recirculación de humos), o bien hacia la parte superior del mismo (atemperación de humos), desde el punto de toma ubicado al final del generador de vapor en el lado de humos

b) Un ajuste adecuado del sistema de combustión, modificando determinados parámetros

c) Aplicando al flujo de vapor de alta temperatura, vapor o agua de baja temperatura, (atemperación

del vapor); el componente más frecuente en este caso, (que es el más extendido en la vertiente del agua), se denomina atemperador atomizador

En las grandes unidades termoeléctricas, para el control dinámico se utiliza (debido a su rapidez de respuesta) un atemperador de inyección directa de agua o de vapor, que está diseñado para resistir el choque térmico propio del proceso; se ubica a la entrada del sobrecalentador o entre dos secciones del mismo, para controlar mejor y con más seguridad la temperatura del metal tubular en la sección de salida del sobrecalentador, que es donde el metal alcanza mayor temperatura.

CALENTADOR DE AIRE.- No forma parte de los circuitos agua-vapor, pero juega un papel importante en la transferencia de calor y en la eficiencia del sistema generador de vapor.

En las calderas de alta presión, la temperatura de los humos a la salida del economizador es bastante alta, por lo que el calentador de aire recupera una gran parte de esta energía residual y la añade al aire comburente, para ahorrar así en consumo de combustible.

Los diseños de los calentadores de aire incluyen los { *- cambiadores de calor tubulares* / *- de chapa* / *- regenerativos*

I.6.- SISTEMAS DE FLUJOS

Sistema del flujo agua-vapor.- Los *componentes del circuito agua-vapor* se disponen para conseguir el sistema más económico posible, con vistas a un determinado suministro continuo de vapor. Un *esquema de circulación del flujo* (excluido el recalentador) para una unidad de circulación natural a presión subcrítica, con calderín, se presenta en la Fig I.15, a partir de la cual se desarrolla lo siguiente:

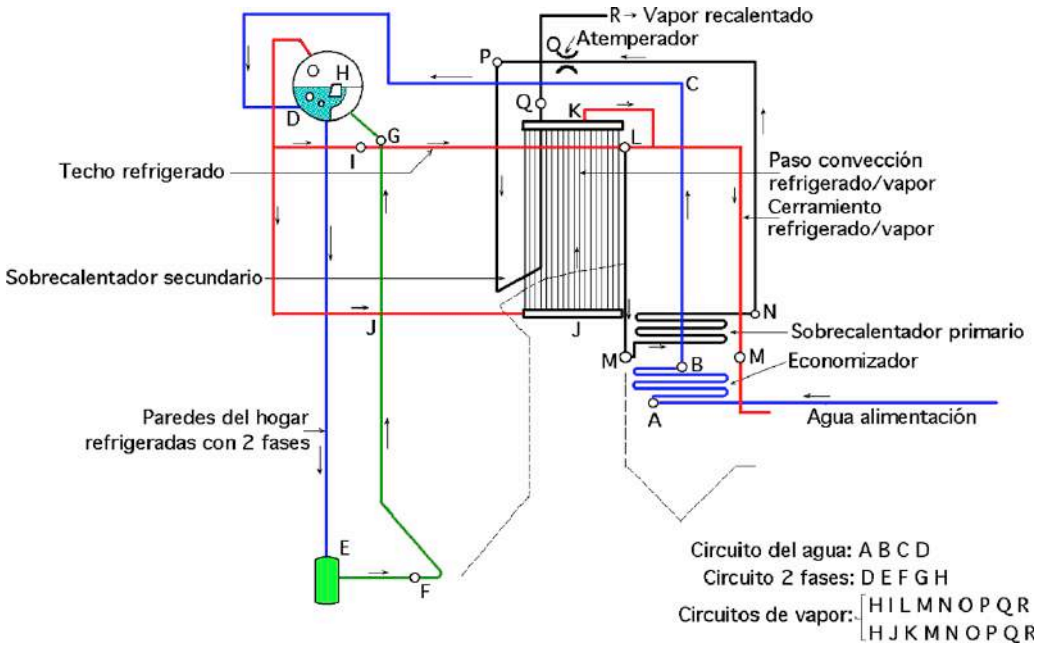


Fig I.15.- Esquema de circulación del agua-vapor en la caldera que quema carbón

El agua de alimentación llega al colector inferior A del economizador y circula en éste hacia arriba, en sentido contrario al flujo de humos; el agua se recoge en el colector de salida B del economizador, que también puede estar situado dentro del flujo de humos; finalmente el agua de alimentación fluye por un determinado conjunto de tuberías (BCD), que conectan el colector de salida del economizador con el calderín de vapor D. A veces es conveniente disponer el recorrido de las tuberías (BC) a lo largo del paso de convección, hasta el colector de salida del economizador, ubicado en la parte superior de la caldera. Estos tubos se utilizan como soportes refrigerados por vapor, para mantener el sobrecalentador horizontal, cuando los bancos tubulares tengan vanos demasiado grandes, para poder soportarlos sólo en sus extremos. El agua de alimentación se inyecta en el calderín de vapor D dentro del cual se mezcla con el agua descargada por los separadores *vapor-agua*, antes de que entre en las conexiones de los tubos bajantes (DE), hacia la parte inferior del hogar.

Desde la parte baja del hogar, los tubos alimentadores (EF) llevan el agua a los colectores individuales F de cada una de las paredes membrana del hogar. El agua circulante asciende a continuación por las paredes del hogar, alcanzando el colector de salida G y absorbiendo en este trayecto la energía térmica necesaria para transformarse en una mezcla *vapor-agua*. Estas mezclas abandonan los colectores de salida de las paredes del hogar, por los tubos ascendentes (GD), para descargar en el calderín de vapor a través de los separadores *vapor-agua*. El equipo de separación retorna el agua, libre de vapor, hacia las conexiones de los tubos bajantes (DE).

La humedad residual que pueda quedar en el vapor cuando sale de los separadores primarios, se elimina mediante separadores secundarios. El vapor ya completamente seco sale por las conexiones de salida (HI y HJ) en el calderín de vapor.

El conjunto de los circuitos de vapor tiene dos funciones:

- *La refrigeración del cerramiento correspondiente al paso de convección*
- *La generación de vapor sobrecalentado, con las condiciones requeridas*

El vapor seco procedente del calderín pasa a través de múltiples conexiones hasta un colector I que alimenta los tubos del techo del recinto de la unidad, y alcanza también unos colectores J, alimentando el conjunto de paredes membrana del paso horizontal de convección.

A continuación el vapor fluye por las paredes membrana de las paredes, hasta que alcanza los colectores de salida K; el vapor procedente de los colectores K y el que viene de los colectores L de salida de los tubos del techo, facilita la refrigeración del cerramiento del paso vertical de convección (LM). Este vapor desciende por los paneles del cerramiento y se recoge en los colectores de salida M, aguas arriba del banco correspondiente al economizador, en el lado de los humos.

Posteriormente, el vapor asciende por el sobrecalentador primario hasta su colector de salida N, desde el cual se dirige al colector P de entrada al sobrecalentador secundario, por medio de tube-

rías de conexión equipadas con un atemperador atomizador O. El vapor sale del sobrecalentador secundario por su colector de salida Q.

Finalmente, el vapor sobrecalentado se saca al exterior R del generador de vapor, por medio de una tubería que atraviesa el cerramiento de la unidad y se conduce por una tubería de vapor principal hasta las válvulas de control y la turbina de vapor.

Sistemas de combustión y auxiliares.- En los generadores de vapor que queman carbón, la mayoría de los componentes no integrados en el sistema de vapor y sus auxiliares, forman parte de sistemas de $\begin{cases} \text{- } \textit{preparación del combustible} \\ \text{- } \textit{la combustión} \end{cases}$, pudiéndose citar los siguientes:

- *Sistemas de preparación del combustible:* $\begin{cases} \text{- } \textit{alimentadores} \\ \text{- } \textit{pulverizadores de carbón} \end{cases}$

- *Sistemas de combustión: quemadores, detectores de llama, ignitores, controles, cajas de aire*

- *Manipulación de aire/humos: ventiladores, conductos de aire, conductos de gases, cortatiros, sistemas de medida y control, silenciadores*

- *Otros componentes y auxiliares: sopladores (equipo de limpieza de superficies intercambiadoras, lado humos), equipo de captación y manipulación de ceniza, equipo de control y monitorización*

El sistema de combustión tiene una gran influencia sobre el diseño global del hogar. Los quemadores habituales, generalmente dispuestos en paredes, se pueden ver en la Fig I.14. Todas las unidades modernas que queman carbón, aceite o gas, están dotadas con quemadores montados en paredes, aunque también se utilizan otros sistemas de combustión, como:

- *Diversos tipos de hogares mecánicos*
- *Hogares ciclón*
- *Unidades de combustión en lecho fluidificado*

en los que hay que procurar $\begin{cases} \text{- } \textit{el control de la formación y emisión de posibles contaminantes} \\ \text{- } \textit{una combustión completa} \\ \text{- } \textit{manipular la ceniza contenida en el combustible} \end{cases}$

Las características del combustible juegan un papel fundamental frente a cómo se pueden cumplimentar estas funciones, y en el diseño y dimensionamiento de cada componente del equipo.

Circuito del flujo de gases.- En la Fig I.14 se pueden ver algunos de los auxiliares que se identifican a lo largo del recorrido del flujo de aire y humo de una planta generadora de electricidad, con una caldera grande que quema carbón.

El aire se suministra por un ventilador de tiro forzado A, que lo impulsa hacia el calentador de aire B, en el que se calienta para recuperar calor y mejorar la combustión; gran parte de ese

$aire_{secundario}$ (70 ÷80)%, pasa directamente a las cajas de aire C desde las que se distribuye a cada uno de los quemadores.

El resto del $aire_{primario}$ soplado por el ventilador de tiro forzado A (20 ÷30)%, pasa a un ventilador que lo envía a los molinos D, en los que el carbón se seca y pulveriza convenientemente; este $aire_{primario}$ caliente transporta el carbón seco y pulverizado a los quemadores E neumáticamente, en los que se mezcla con el $aire_{secundario}$ y el carbón, para lograr una combustión completa.

El carbón y el $aire_{primario\ y\ secundario}$ forman una mezcla que se quema rápidamente en el hogar F, ascendiendo los gases de combustión hacia la parte superior del hogar; durante esta ascensión, los humos se refrigeran fundamentalmente por radiación hasta que alcanzan la salida G del hogar.

Posteriormente los humos cruzan el $\begin{cases} \text{- } sobrecalentador\ secundario \\ \text{- } recalentador \\ \text{- } sobrecalentador\ primario \\ \text{- } economizador \end{cases}$, antes de abandonar el cerramiento H del generador de vapor y, finalmente, pasan a través del calentador de aire B y de algún equipo de control de contaminación, para llegar al ventilador de tiro inducido I, previo a su evacuación a la atmósfera.

I.7.- CONTROL DE EMISIONES

Un elemento básico en el diseño de un sistema de generación de vapor que queme combustible fósil, lo constituye la protección medioambiental, existiendo un amplio campo de reglamentaciones que establecen los límites de las emisiones primarias de gases, líquidos y sólidos, que se pueden tolerar en un proceso de generación de vapor.

Para las unidades que queman carbón, aceite o gas, las emisiones principales de contaminantes atmosféricos incluyen el SO_2, los NO_x y las partículas sólidas de polvo volante.

En la evacuación de líquidos hay que tener presente las trazas de productos químicos utilizados en el control de la corrosión y del ensuciamiento, así como el calor evacuado desde el condensador.

Los residuos sólidos comprenden la ceniza residual del combustible y de cualquier absorbente que se haya empleado en el sistema de control de la contaminación.

Los *residuos sólidos y gaseosos* procedentes del combustible y del proceso de combustión se minimizan actuando sobre: $\begin{cases} \text{- } La\ selección\ de\ un\ combustible\ adecuado \\ \text{- } El\ control\ del\ proceso\ de\ combustión \\ \text{- } El\ equipo\ ubicado\ aguas\ abajo\ del\ generador\ de\ vapor \end{cases}$

Las emisiones de SO_2 se pueden reducir $\begin{cases} \text{- utilizando combustibles con bajo contenido en } S \\ \text{- con la combustión en lecho fluidificado} \\ \text{- mediante lavadores o depuradores de postcombustión} \end{cases}$

Las emisiones de NO_x se controlan con $\begin{cases} \text{- quemadores especiales, con baja producción de } NO_x \\ \text{- combustión en lecho fluidificado} \end{cases}$

La ceniza volante en polvo o partículas suspendidas en el seno de los humos se retiene por medio de un $\begin{cases} \text{- filtro de tela o sacos} \\ \text{- precipitador electrostático} \end{cases}$, con rendimientos operativos del 99%.

El equipo de recogida de partículas, así como los subproductos sólidos que se generan en los depuradores de SO_2, se deben $\begin{cases} \text{- verter con cuidado al medio ambiente} \\ \text{- utilizar para alguna aplicación industrial} \end{cases}$

La descarga de productos químicos se minimiza cuando los sistemas se diseñan con descarga cero. En la Tabla I.1 se indican algunas valores de emisiones, antes y después del control, para una unidad de producción de electricidad de 500 MW.

Las descargas de aguas se minimizan instalando sistemas de refrigeración en circuito cerrado, con grandes torres de refrigeración, para disipar en el aire el calor residual del ciclo energético, en lugar de emplear otras fuentes acuosas en circuito abierto; éstos equipamientos se disponen en todas las plantas energéticas nuevas, sean de combustible fósil o nuclear.

Tabla I.1.- Emisiones y subproductos de un generador de vapor de 500 MW que quema carbón

Potencia: 500 MW
196 Tm/hora ó 49,4 kg/seg (Carbón bituminoso)
Subproductos: Azufre = 2,5% ; Ceniza = 16%
Potencia calorífica = 28750 kJ/kg
Factor de carga = 65%

Emisiones	*Equipos típicos control*	*Tasa emisiones ton/h, (t/h)*			
		Sin control		*Con control*	
SO_x medido en SO_2	*Lavador húmedo con caliza*	*9,3*	*8,4*	*0,9*	*0,8*
NO_x medido en NO_2	*Quemador bajo NO_x*	*2,9*	*2,6*	*0,9*	*0,7*
CO_2	*No aplicable*	*485*	*440*	*485*	*440*
*Polvo a atmósfera **	*Precipitado electrostático o filtro de tela*	*22,9*	*20,8*	*0,05*	*0,04*
Descarga térmica en aguas	*Torre de refrigeración, tiro natural, 10^9Btu (MWt)*	*2,8*	*821*	*0*	*0*
*Ceniza a vertedero **	*Vertido controlado*	*9,1*	*8,3*	*32*	*29*
Lodos de lavador, yeso+agua	*Vertido controlado*	*0*	*0*	*25*	*22,7*

***** *La reducción en emisión de polvo se traduce en más ceniza vertida*

I.8.- SISTEMAS NUCLEARES DE GENERACIÓN DE VAPOR

Los sistemas nucleares de generación de vapor incluyen una serie de intercambiadores de calor, recipientes a presión, bombas y componentes diversos, todos ellos altamente especializados, y utilizan el calor generado por las reacciones de la fisión nuclear, para producir vapor con eficiencia y seguridad; el sistema se basa en la energía liberada por los átomos de ciertos materiales, como el

uranio, cuando se fracturan o fisionan. La fisión tiene lugar cuando un núcleo de un átomo fisionable, captura una partícula subatómica libre (neutrón); ésto desequilibra las fuerzas internas que mantienen unido al núcleo atómico, dividiéndose el núcleo, y produciendo átomos y un promedio de 2 a 3 neutrones, radiación gamma y energía térmica.

El sistema nuclear de vapor (NSS) se diseña para cumplimentar una serie de funciones, que se resumen en los siguientes puntos:

- Alojar el combustible nuclear

- Controlar el régimen de las reacciones nucleares durante su funcionamiento

- Estimular la fisión controlada del combustible nuclear

- Recoger el calor y generar el vapor

- Contener y almacenar de forma segura los productos formados por las reacciones nucleares

- Proveer los sistemas de emergencia necesarios para evitar la liberación de material radiactivo al medio ambiente, contaminación que se puede originar lo mismo en la atmósfera, que en el agua

El sistema actualmente empleado para la producción de energía eléctrica, en operación comercial, es el denominado *reactor de agua a presión (PWR)*, Fig I.16.

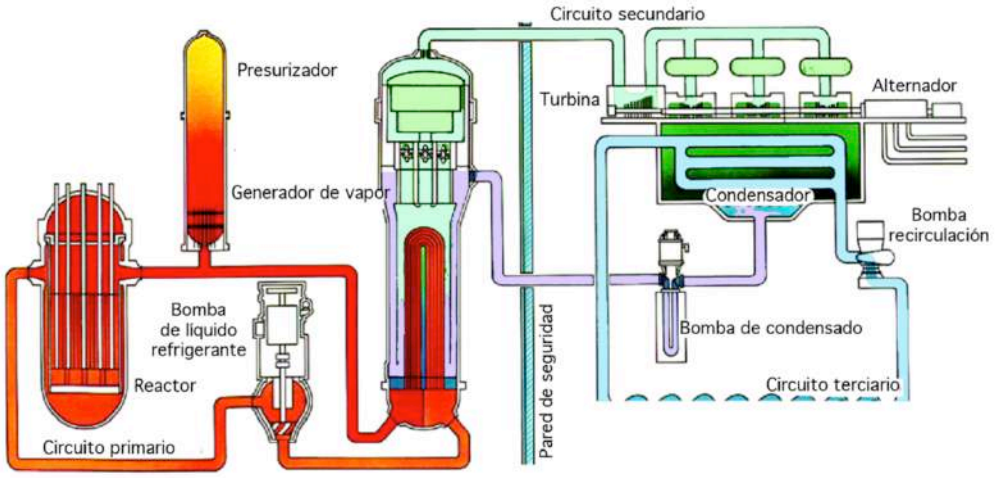


Fig I.16.- Esquema de un reactor de agua a presión (PWR)

Una diferencia fundamental entre los sistemas que funcionan por energía nuclear y por energía química radica en la cantidad del combustible involucrado. La energía liberada por unidad de masa por un combustible nuclear, es de un orden de magnitud muy superior al de un combustible fósil (energía química). Por ejemplo, 0,454 kg de uranio enriquecido al 3% producen la misma cantidad de energía térmica, que 45 Tm de carbón, en un sistema convencional de vapor. Para una central de 500 MW de potencia eléctrica, en un sistema de vapor convencional, hay que manipular del orden de 1.000.000 Tm/año mientras que en una planta nuclear, sólo se precisan 10 Tm/año de combustible nuclear.

La planta de combustible fósil se debe diseñar para un proceso continuo de suministro de combustible, mientras que la mayoría de las plantas nucleares utilizan un método de recarga de combustible, en el que se sustituye, aproximadamente, sólo un tercio del total de la carga del reactor, en períodos de indisponibilidad programada (paradas periódicas); una vez generado el vapor, el resto del sistema productor de energía de la planta nuclear (compuesta por turbina, condensador, sistema de refrigeración, etc.) es similar al utilizado en cualquier planta de combustible fósil.

Componentes del sistema nuclear de vapor NSS.- Este sistema nuclear de vapor consta de dos circuitos de refrigeración: $\begin{cases} \text{- principal o primario} \\ \text{- secundario} \end{cases}$

El *circuito primario* enfría el reactor, transporta el calor a dos o más generadores de vapor, Fig I.16, (sólo uno está representado) y retorna el refrigerante hacia el reactor, por medio de cuatro o más bombas de refrigerante primario (sólo se representa una).

El refrigerante es agua subenfriada y de alta pureza, que fluye en regímenes elevados:

- *Entre 22,1÷28,4 m^3/seg*
- *Presiones del orden de 150 bar*
- *Temperaturas de 300ºC*

El circuito primario cuenta con un presurizador que mantiene la presión operativa de la unidad, (en todo el circuito), en los niveles de diseño.

El *circuito secundario* comprende la generación de vapor y las interfaces con el resto de la planta energética. El agua de alta pureza, que proviene del último calentador del agua de alimentación, pasa al generador de vapor y se convierte en vapor. Desde la salida del generador de vapor (sobrecalentado o saturado), el vapor fluye hacia el exterior del edificio de contención o zona biológica, con dirección a la turbina de alta presión. La presión de operación de la turbina es del orden de 70 bar; el resto del circuito secundario se asemeja a los sistemas que queman combustibles fósiles. El centro del NSS es la vasija del reactor y la región activa (núcleo) del reactor nuclear.

El combustible, óxido de uranio enriquecido entre el 2,5÷5%, se configura en forma de pastillas cilíndricas comprimidas, (por ejemplo de 9,4 mm de diámetro y 18 mm de longitud, que se colocan en el interior de unos tubos de Zircaloy (barras de combustible), que se sellan por ambos extremos, para proteger el combustible y contener los productos de las reacciones nucleares; los tubos se agrupan en pequeños haces o paquetes, con los adecuados dispositivos espaciadores y de cierre, que se reúnen para configurar la región activa o núcleo del reactor.

El cerramiento del reactor es un recipiente a presión, de acero de baja calidad, forrado con acero inoxidable para su protección contra la corrosión. El resto del reactor comprende los dispositivos de distribución de flujos, las barras de control, las estructuras soporte del núcleo (región activa), la pantalla térmica y el moderador.

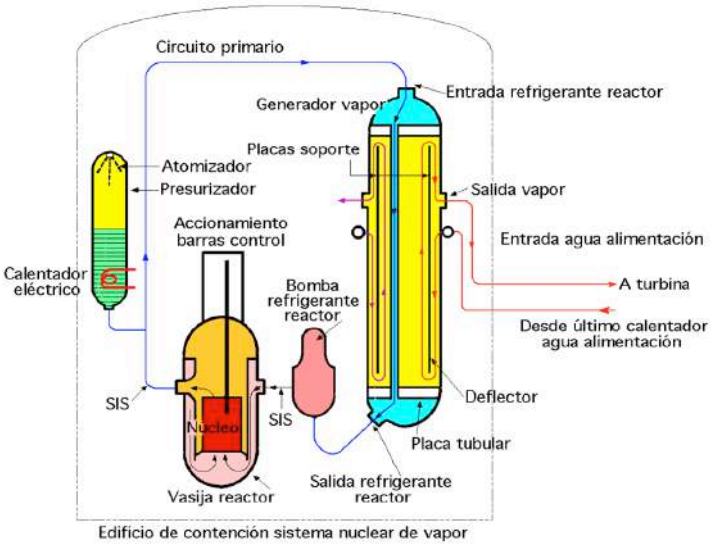


Fig I.17.- Esquema de un sistema nuclear de vapor. SIS (Sistema Inyección Seguridad)

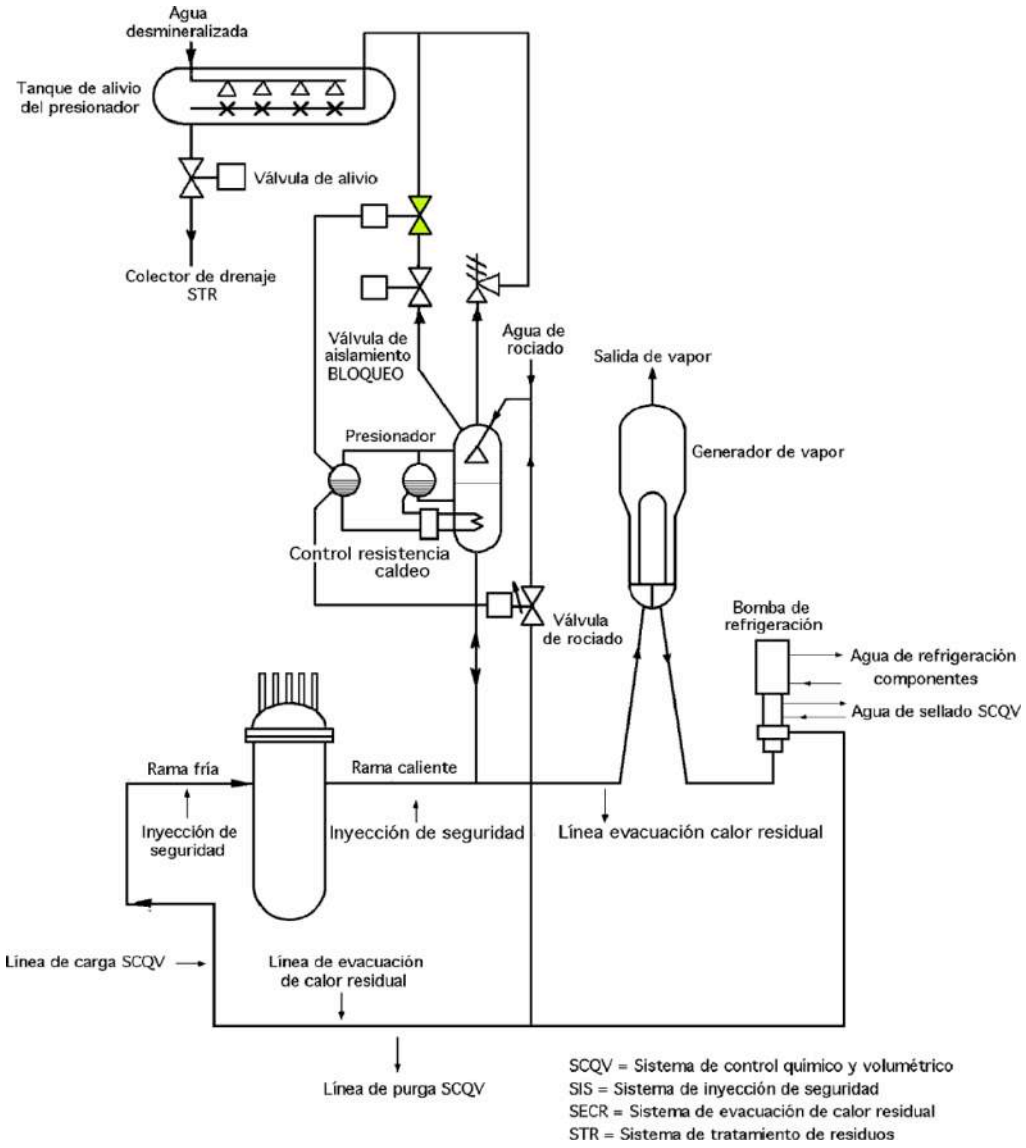


Fig I.18.- Esquema del flujo del sistema de refrigeración del reactor

En el caso del reactor PWR, el moderador es el agua que, desde el punto de vista del funcionamiento, tiene una doble misión:

- Reduce la velocidad de los neutrones, con lo que se logra una velocidad más idónea en las reacciones nucleares

- Actúa como refrigerante, para:

- *Mantener los materiales del núcleo dentro de límites aceptables de temperatura*
- *Realizar el transporte de energía térmica hacia los generadores de vapor*

Las varillas de control contienen un material que absorbe neutrones y se deslizan a voluntad hacia el interior o el exterior del núcleo, controlando la reacción nuclear y la generación de energía

Los *generadores de vapor correspondientes a los NSS* son de dos tipos y, para ambos, el recipiente a presión es un intercambiador de calor de gran tamaño, diseñado para generar vapor como componente del circuito secundario; pueden ser de { *- un paso, Fig I.21a* / *- recirculación, Fig I.21b*

El fluido del circuito primario entra en una cámara y pasa desde ahí por el interior de miles de tubos de pequeño diámetro, del orden de 0,625" (15,9 mm), construidos con Inconel. El generador de vapor es un gran recipiente a presión fabricado con acero al carbono.

Mediante diseños especiales que afectan a las placas tubulares, a las placas soporte o separadoras, a las protecciones y a los deflectores, se consigue una transferencia térmica efectiva, así como el evitar todo tipo de problemas derivados de las { *- dilataciones térmicas* / *- vibraciones inducidas por los diversos flujos*

El agua que sale de la parte alta de la carcasa procedente de los separadores, se mezcla con el agua de alimentación que procede del ciclo térmico regenerativo y se lleva a la parte inferior de la carcasa, por debajo del haz tubular del núcleo.

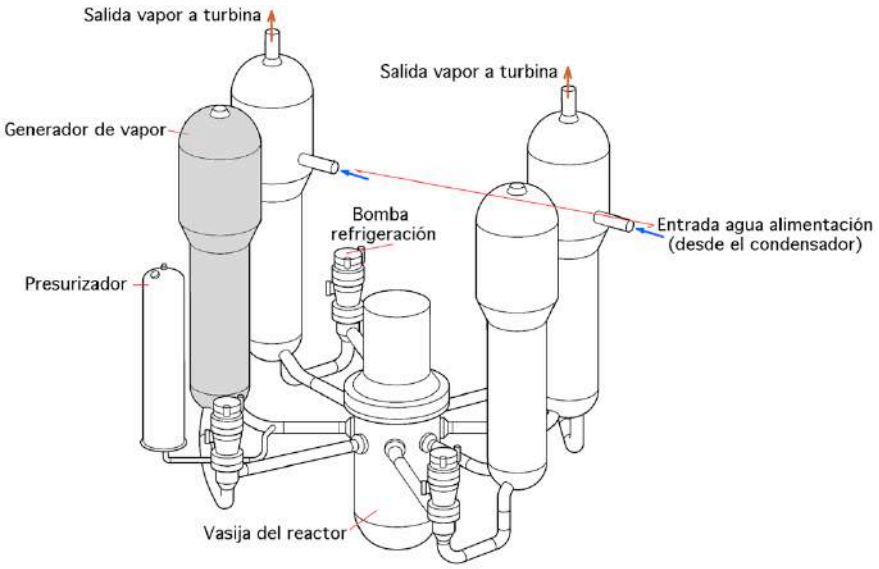
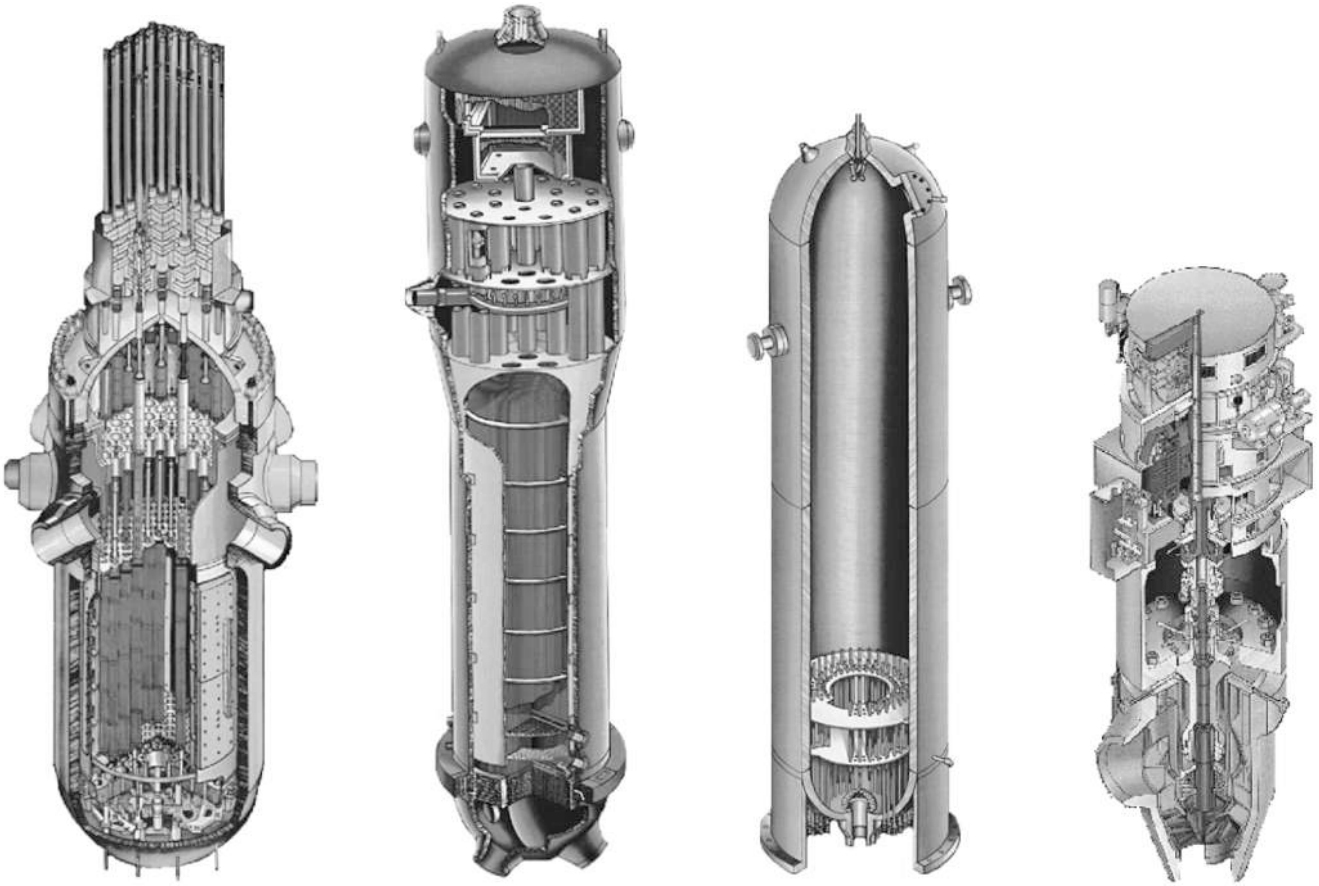


Fig I.19a.- Conjunto de componentes de un reactor de agua a presión (PWR) con generadores de vapor de recirculación



a) Vasija del reactor; b) Generador de vapor; c) Presurizador ; d) Bomba de refrigeración del núcleo

Fig I.19b.- Componentes de un reactor de agua a presión (PWR)

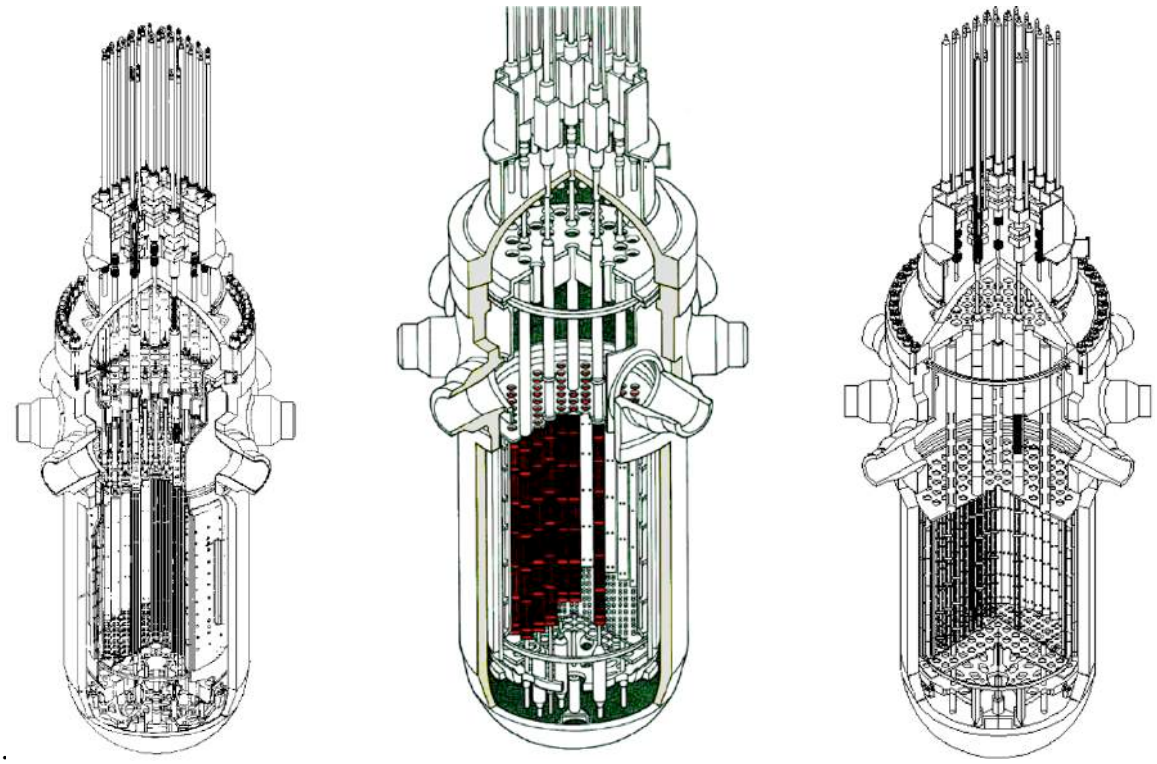


Fig I.20a.- Esquemas de la vasija del reactor PWR y partes internas

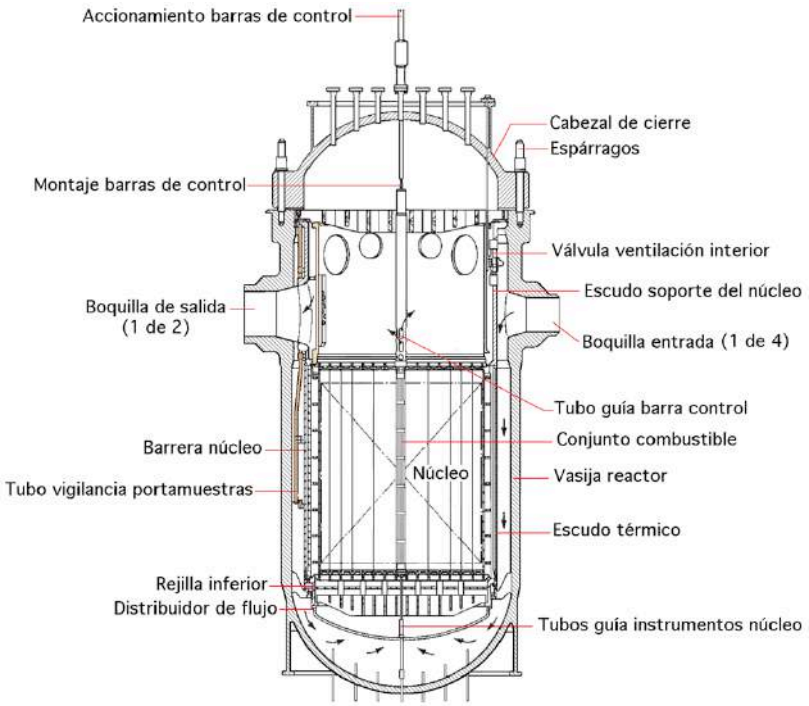


Fig I.20b.- Esquema indicativo de la vasija del reactor PWR y partes internas

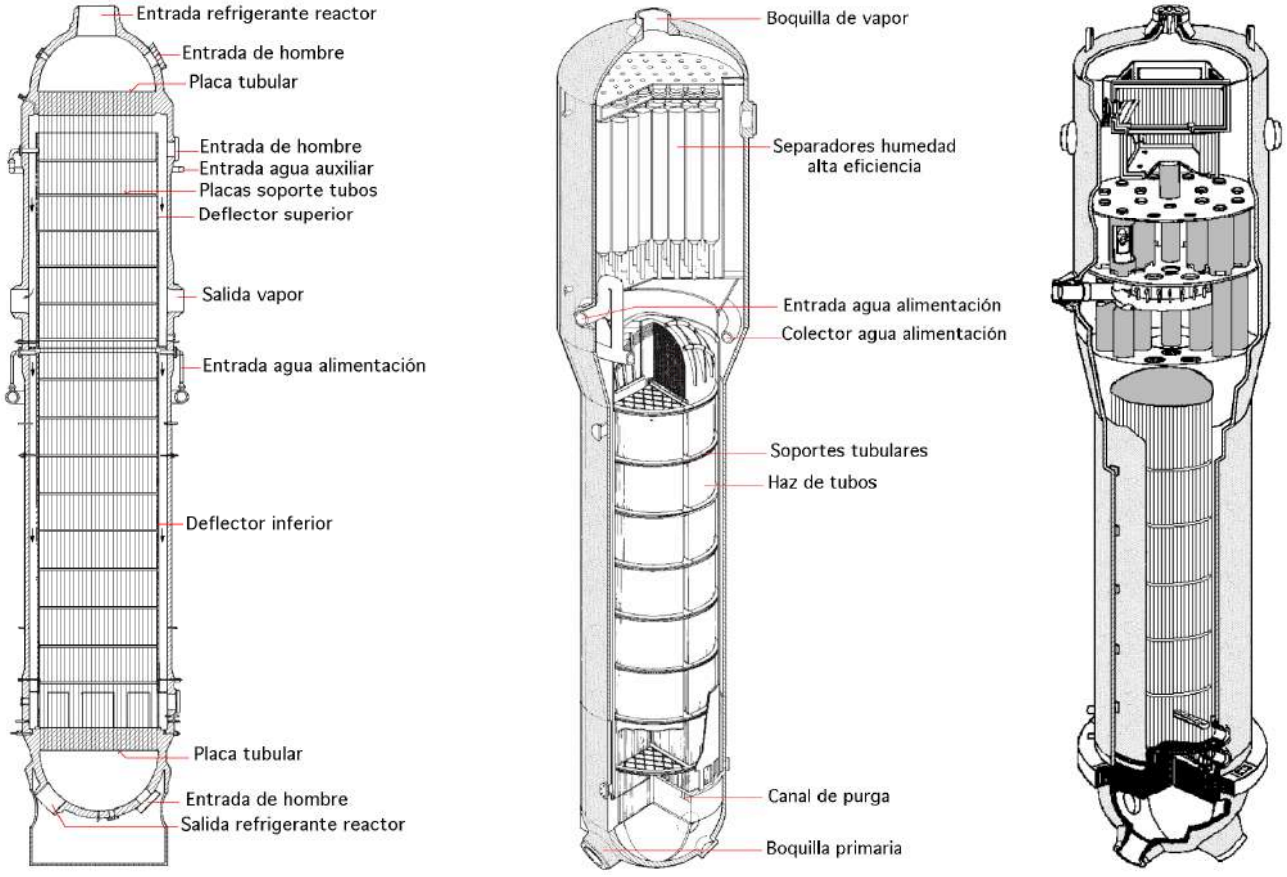


Fig I.21.- a) Generador de vapor de 1 paso; b.c) Generadores de vapor de recirculación

El *presurizador* es un recipiente cilíndrico a presión, Fig I.24, que contiene agua y vapor en equilibrio. Mediante unos sistemas de calentadores eléctricos y de atomizadores, se mantiene la presión en el recipiente presurizador y en el circuito primario, siempre dentro de unos límites prefijados.

En el *generador de vapor de un paso (OTSG)*, Fig I.21a, el agua del circuito secundario fluye desde la parte inferior hacia la superior, del lado de la carcasa que encierra el haz tubular, y se convierte totalmente en vapor sobrecalentado, de forma continua, pasando posteriormente a la turbina de AP.

En el *generador de vapor de recirculación (RSG)*, Fig I.21b, el agua fluye desde la parte inferior hacia la superior, del lado de la carcasa que contiene el haz tubular, y se convierte parcialmente en vapor; esta mezcla *vapor-agua* pasa a la parte alta de la carcasa, donde hay unos separadores *vapor-agua* que proporcionan a la salida del generador de vapor, un vapor saturado seco, que se envía a la turbina de AP.

Las *bombas de circulación* del circuito primario mantienen altos regímenes de flujo hacia el núcleo del reactor, para $\begin{cases} \text{- } \textit{controlar su temperatura} \\ \text{- } \textit{transferir el calor hacia los generadores de vapor} \end{cases}$

Los sistemas de apoyo pueden ser de:

- Carga y presurización del refrigerante del reactor

- Aplicación del agua de aporte

- Refrigeración del almacenamiento de combustible gastado

- Evacuación del calor producido por la desintegración de núclidos radiactivos, cuando el reactor se retira de servicio

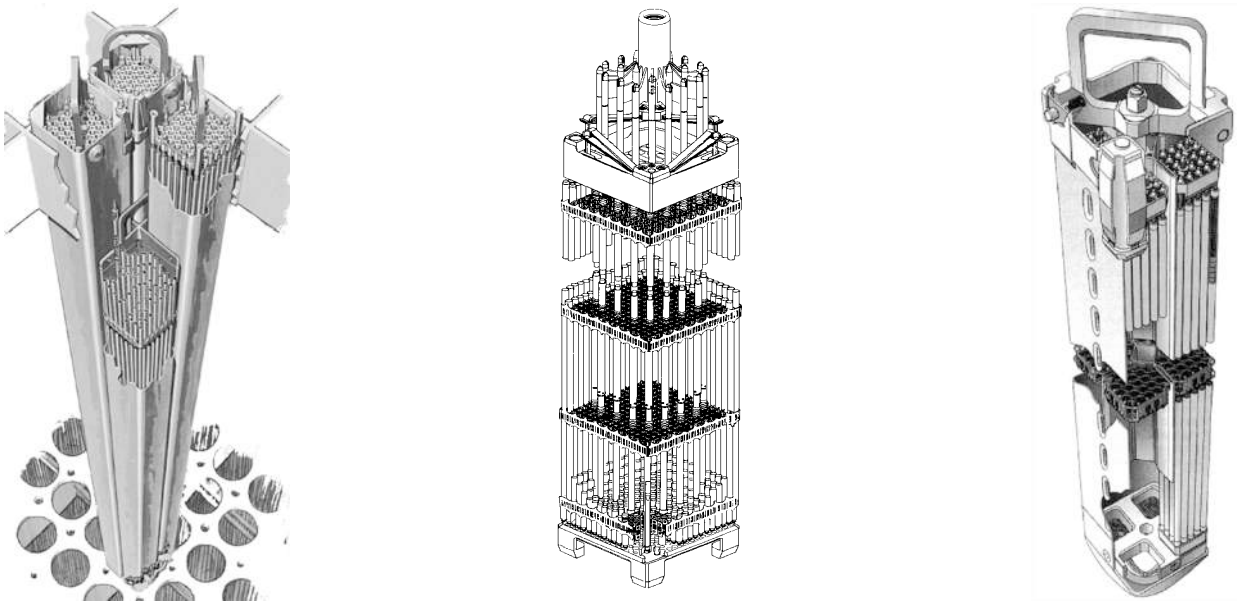


Fig I.22.- Módulos con barras de control y haz de barras de combustible

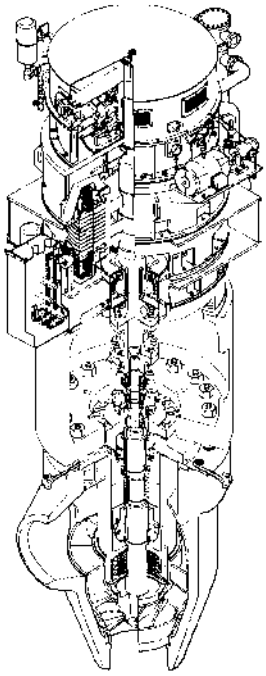


Fig I.23.- Bomba de refrigeración

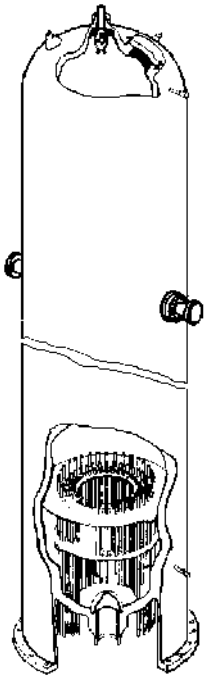


Fig I.24.- Presurizador

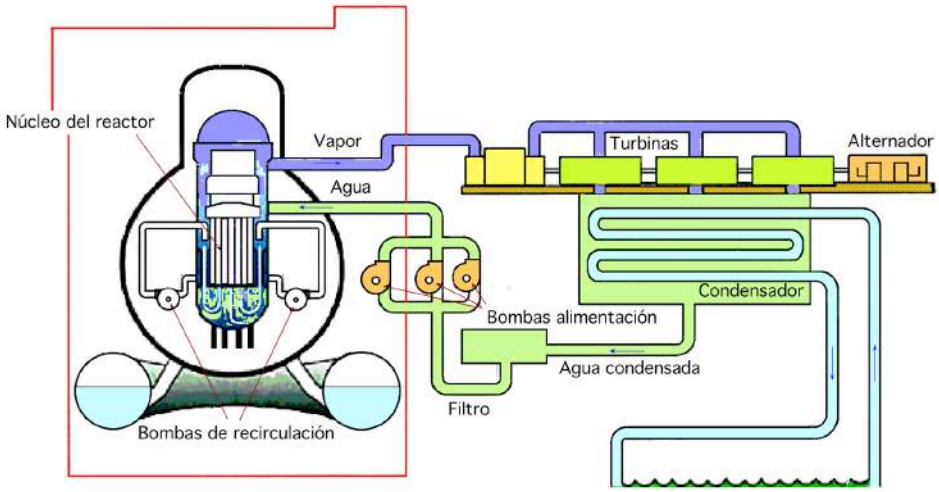


Fig I.25.- Esquema de un reactor de agua en ebullición (BWR)

Hay otros sistemas especializados que protegen al reactor, en el supuesto de que se produzca un fallo en el sistema refrigerante primario, cuya función es mantener la temperatura de los paquetes de barras de combustible dentro de límites seguros.

I.9.- CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS NUCLEARES DE VAPOR (NSS)

Existe una gran variedad de sistemas de reactores para obtener la energía térmica del combustible nuclear, que se destina a producir vapor en plantas generadoras de electricidad. Estos sistemas se identifican por el tipo de refrigerante y moderador que utilizan. Los principales sistemas de reactores empleados en plantas termoeléctricas para generación de vapor, son:

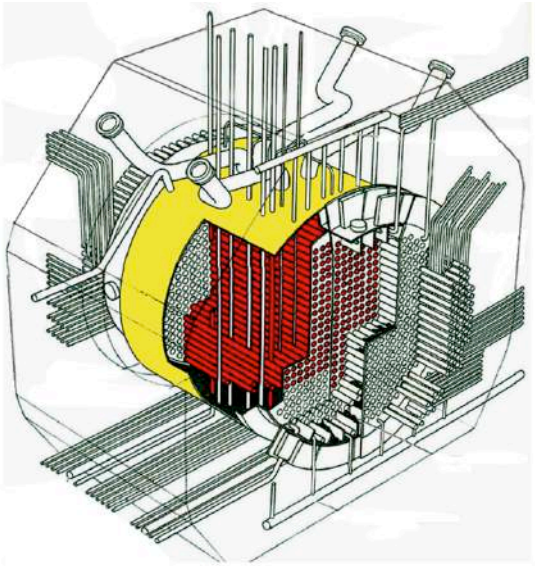


Fig I.26.- Esquema del núcleo de un reactor de agua pesada presurizada (CANDU)

- ***Reactor de agua presurizada (PWR)***.- Es el sistema ya indicado, Fig I.16,17, que utiliza a la vez, agua como refrigerante y como moderador, siendo el combustible óxido de uranio enriquecido.

- ***Reactor de agua en ebullición (BWR)***.- Se elimina el generador de vapor, y se produce el vapor directamente en el núcleo del reactor; la mezcla *vapor-agua* es, al mismo tiempo, refrigerante y moderador, siendo el combustible uranio enriquecido, Fig I.25.

-***Reactor de agua pesada presurizada (PHWR) CANDU***.- En el circuito primario se utiliza agua pesada (deuterio) como moderador y refrigerante. La configuración del reactor es muy singular, aunque el generador de vapor se asemeja al generador de vapor de los reactores de agua presurizada (PWR); el combustible es uranio natural (no enriquecido), Fig I.26 y 27.

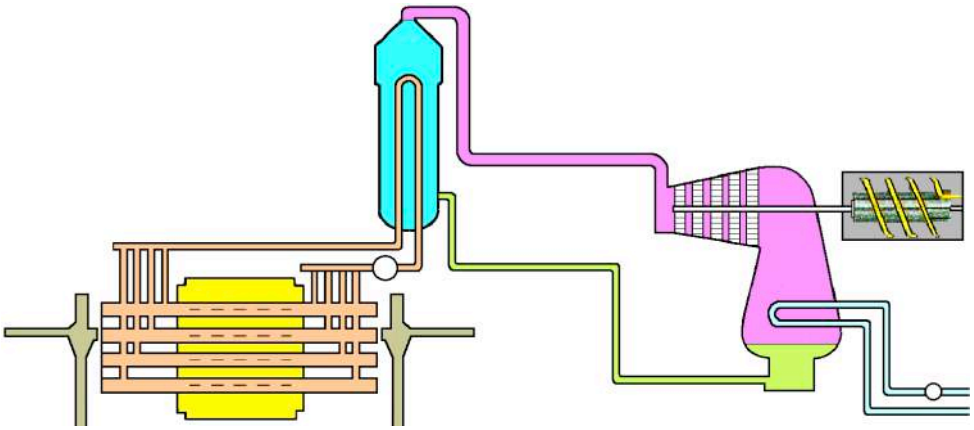


Fig I.27.- Esquema del reactor de agua pesada presurizada (CANDU)

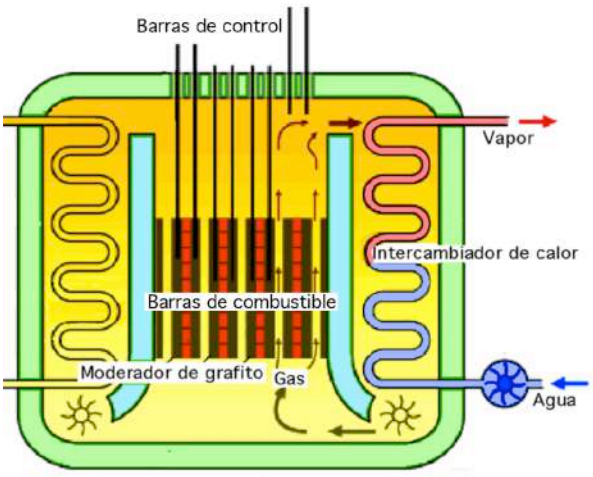


Fig I.28.- Esquema de reactor refrigerados por gas

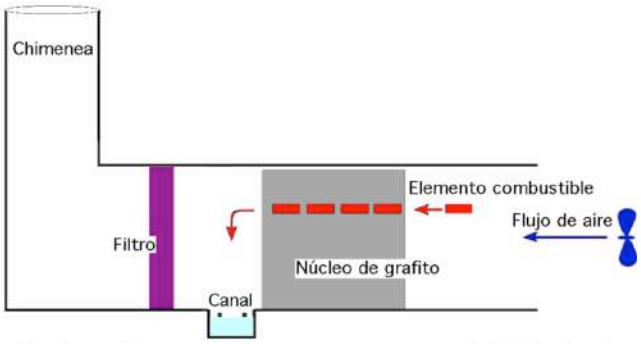


Fig I.29.- Esquema del reactor experimental de Windscale

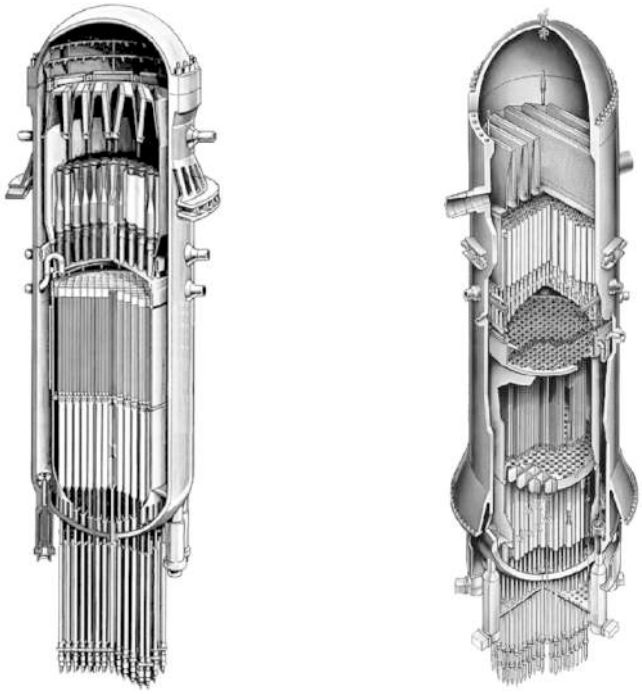


Fig I.30- Vasijas de presión del reactor BWR, mostrando el sistema de control de barras de combustible

- ***Reactor refrigerado por gas (GCR)***.- Se trata de un reactor moderado por grafito y refrigerado por helio o por dióxido de carbono, Fig I.28 y 29

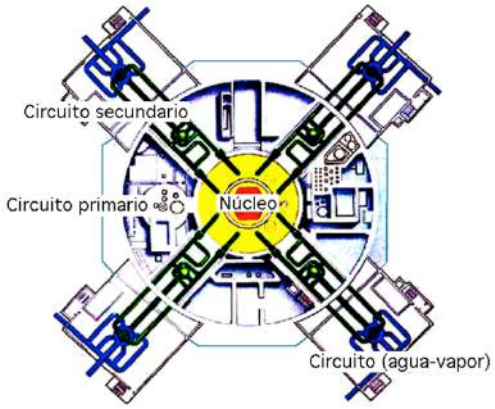


Fig I.31.- Esquema del reactor reproductor BR

- ***Reactor reproductor (BR)***.- Es un sistema avanzado de reactor ya comercializado, que útilza Na como refrigerante y que no tiene moderador. La peculiaridad del sistema radica en su diseño especial, para producir más material fisionable que el que consume el reactor, Fig I.31.

SISTEMAS DE SEGURIDAD.- La seguridad de las centrales nucleares de generación de vapor es prioritaria, tanto en su diseño como en su construcción y funcionamiento. El objetivo de la seguridad consiste en minimizar la probabilidad de una posible liberación de cualquier material radiactivo hacia el medio ambiente; para ello se utilizan:

a) Programas de control de calidad*, para el diseño, construcción (fabricación y montaje) y mantenimiento de instalaciones nucleares.*

b) Diseños con barreras múltiples*, para prevenir cualquier emisión de materiales radiactivos, como:*

- El que las barras de combustible estén selladas

- El sistema de refrigeración del circuito primario de la vasija del reactor y del edificio de contención que contiene en su interior la vasija del reactor

- El escudo o envoltura de contención del edificio, realizado con hormigón armado

c) Sistemas de seguridad tecnológica *para hacer frente a las consecuencias de una pérdida del refrigerante y para mantener la integridad de las barreras, como:*

- Los sistemas de emergencia para la retirada de servicio (parada) del reactor, con la rápida inserción de las barras de control y la aplicación de catalizadores solubles en el refrigerante primario, cuya utilización ayuda a detener las reacciones nucleares

- Los sistemas de emergencia para la refrigeración del núcleo, de alta y baja presión, con el fin de mantener la temperatura del núcleo del reactor dentro de límites aceptables y de evacuar el calor del combustible en el caso de pérdida total del refrigerante primario o de rotura de una tubería

- El sistema de evacuación de calor para el agua de refrigeración y para el edificio de contención

- Los sistemas de aspersión y filtrado, para recoger y eliminar trazas de radiactividad del edificio de contención

Como consecuencia de las altas densidades energéticas y de la enorme generación de calor producido por la desintegración de los núclidos radiactivos, la integridad del reactor depende de que la refrigeración de las barras de combustible sea continua.

I.10.- DISEÑO DEL SISTEMA DE VAPOR

El proceso de diseño de los sistemas básicos de generación de vapor, con combustible fósil y con combustible nuclear, requiere de una serie de evaluaciones particulares, ya que tienen muchos elementos comunes. Para ilustrar el desarrollo del proceso de diseño, vamos a elegir una pequeña caldera que quema gas natural, y de la que se especifican:

- El flujo de vapor 50,5 kg/seg
- Vapor sobrecalentado a 41,4 bar y 454ºC
- Agua de alimentación de alta pureza a 138ºC
- La combustión del gas natural produce un flujo de gases de combustión a 1980ºC

Para optimizar el rendimiento térmico del generador de vapor, es necesario enfriar estos gases de combustión lo más posible, mientras se genera el vapor. La temperatura mínima de salida de los gases de combustión se establece mediante factores técnicos y económicos, seleccionando una temperatura de salida de 154ºC para los humos que van hacia la chimenea de evacuación. Las curvas aproximadas de las temperaturas de vapor y humo se indican en la Fig I.32 y definen el proceso de transferencia térmica.

La superficie intercambiadora correspondiente al conjunto del hogar (6400 m^2), se considera constituida por el
- *banco de caldera*
- *sobrecalentador*
- *calentador de aire*

Desde el punto de vista del diseño, la caldera se puede considerar como un calentador de va-

por o como un enfriador de humos, siendo esto último lo que más se usa en el diseño.

Conocida la cantidad de combustible se efectúan los cálculos de combustión, que definen el:

- Gasto de aire necesario

- Peso de los distintos productos producidos en la combustión

configurándose la superficie intercambiadora de la forma más económica posible, con el fin de refrigerar los gases hasta la temperatura necesaria y suficiente para alcanzar el rendimiento térmico supuesto al generador de vapor.

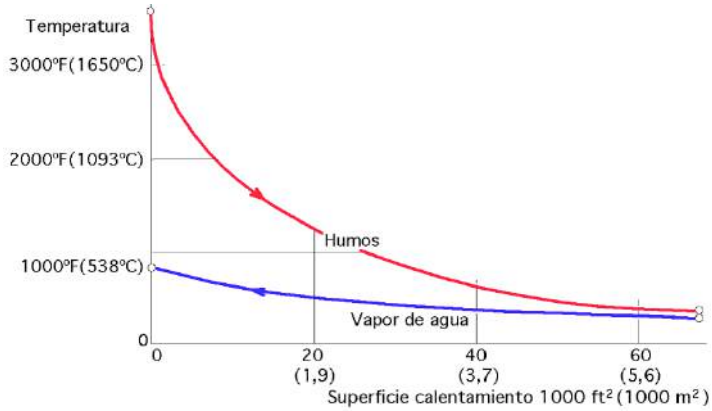


Fig I.32.- Curvas temperatura vapor y gases de combustión

Las superficies intercambiadoras del generador de vapor son $\begin{cases} \text{- el sobrecalentador} \\ \text{- la caldera o vaporizador} \end{cases}$

La Fig I.33 indica el proceso del calentamiento del fluido termodinámico agua-vapor, entre las temperaturas de entrada del agua, de 138ºC, y salida del vapor, 454ºC; la curva indica que el:

- 20% del calor absorbido se usa para llevar el agua hasta la temperatura de saturación, 254°C

- 60% de la energía térmica global se emplea en la vaporización para producir el vapor saturado a la presión requerida

- 20% restante se destina a sobrecalentar el vapor elevando su temperatura a 454°C

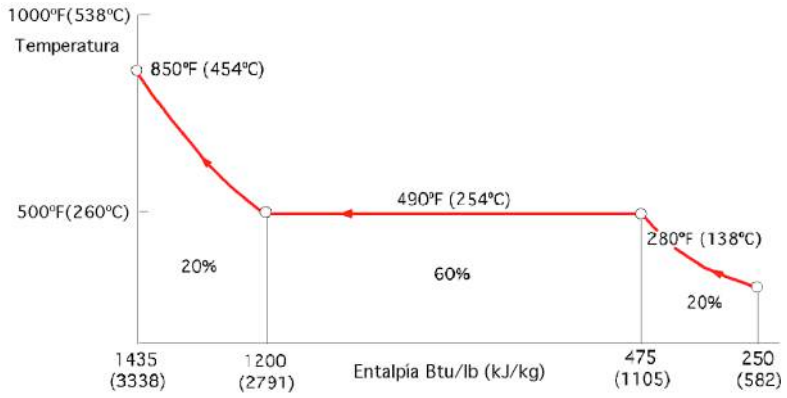


Fig I.33.- Perfil de temperaturas (agua + vapor)

El combustible y el proceso de combustión seleccionados determinan la geometría del hogar. En este ejemplo se utilizarían *quemadores circulares*, para mezclar rápidamente el combustible y el aire comburente, y así producir una llama estable y una combustión completa, minimizando la formación de NO_x; se construyen y disponen en una serie de tamaños estándar, para minimizar su coste; su número y tamaño se eligen de acuerdo con la experiencia, para proporcionar el aporte calorífico deseado y facilitar el nivel de control de todo el equipo, en el campo de cargas a considerar.

La *caja de aire* distribuye el aire comburente entre los quemadores y se diseña para proporcionar un flujo uniforme de aire comburente, incluso a bajas velocidades, con el fin de que los quemadores funcionen adecuadamente en todo el campo de cargas. A continuación se determina el volumen del hogar para que se pueda producir en el mismo una combustión completa.

A partir de las características de la llama desarrollada por el quemador seleccionado, se determina la separación entre quemadores y la de éstos al suelo, techo y paredes laterales del hogar; las separaciones tienen que evitar el impacto de la llama de cualquier quemador en las diversas superficies del hogar, puesto que se podría recalentar la pared tubular y provocar el fallo de los tubos afectados.

Una vez determinadas las dimensiones del hogar, el volumen se rodea mediante superficies de *paredes-membrana* refrigeradas por agua.

Con esta disposición se obtiene:

- *Una construcción estanca a gases*
- *Un cerramiento de acero que minimiza las pérdidas energéticas y reduce el mantenimiento del hogar*

Los tubos del techo y del suelo están ligeramente inclinados para favorecer el flujo de agua y para evitar que quede atrapado el vapor en su interior, ya que cualquier vapor que quedase atrapado podría provocar el recalentamiento del metal tubular.

La transferencia de calor desde la llama hacia las superficies que conforman el hogar se produce, fundamentalmente, por radiación térmica, por lo que los regímenes de aporte calorífico por unidad de área de estas superficies de hogar son muy altos e independientes de la temperatura de las paredes tubulares. El agua en ebullición proporciona un medio efectivo para refrigerar los tubos y para mantener la temperatura del metal tubular dentro de unos límites aceptables, mientras permanezcan las condiciones de vaporización.

La Fig I.34 muestra la influencia que tiene el hogar en la temperatura de los gases de combustión, que, entre los puntos A y B se reduce desde 1980ºC a 1316ºC, mientras la vaporización en las paredes de agua tiene lugar entre (1) y (2), por lo que se transfiere una enorme cantidad de calor a través de una pequeña superficie.

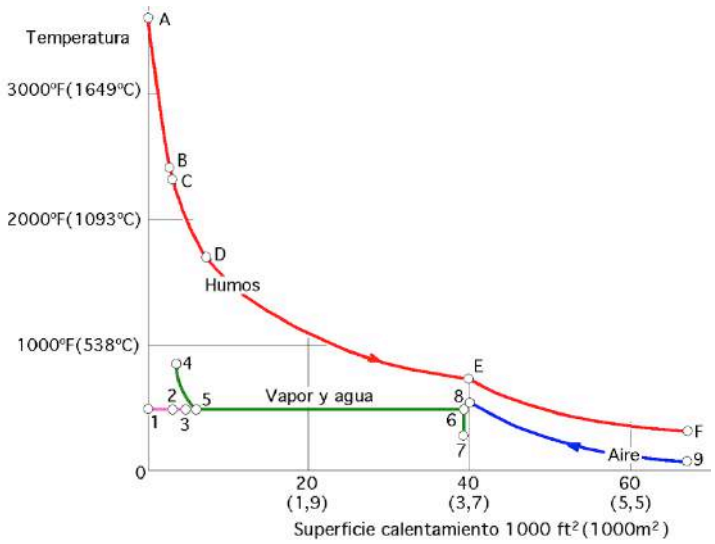


Fig I.34.- Esquema de temperaturas (gases de combustión y vapor)

Desde el hogar, los humos pasan a través de los tubos que configuran la *pantalla del hogar*, en donde la temperatura de los gases sufre un descenso de 28ºC, entre los puntos B y C, siendo lo más importante la protección parcial del *sobrecalentador* frente a la radiación térmica del hogar. Los tubos de la pantalla del hogar están conectados al *calderín* de vapor y contienen agua en proceso de vaporización.

A continuación los gases cruzan el *sobrecalentador* bajando la temperatura de éste desde 1288ºC a 954ºC entre los puntos C y D. El vapor saturado procedente del *calderín* recorre los tubos del *sobrecalentador*, elevando su temperatura desde la de saturación, 254ºC, hasta la de sobrecalentado, 454ºC, requerida a la salida, entre los puntos (5) y (4). La colocación del *sobrecalentador* y su configuración son fundamentales para mantener la temperatura del vapor en todo el campo de cargas. La transferencia de calor por radiación desde el hogar, se combina con la transferencia de calor por convección desde los gases de combustión que bañan la superficie intercambiadora del sobrecalentador.

Cuando los gases de combustión son sucios, como los procedentes de la combustión del carbón, el espaciado de los tubos del *sobrecalentador* se tiene que ajustar para evitar la acumulación de ceniza y facilitar la utilización del equipo de limpieza.

Tras el *sobrecalentador* se ha recuperado la mitad de la energía de los gases de combustión, mediante una pequeña superficie intercambiadora (inferior a la décima parte de la correspondiente al conjunto del hogar), lo que resulta posible por la gran diferencia de temperaturas que existe entre los gases de combustión y el vapor.

A partir de aquí, como la temperatura de los gases de combustión se ha reducido mucho, hay que prever superficies intercambiadoras mucho mayores, para que se pueda recuperar la energía térmica que todavía tienen los gases de combustión. El resto del vapor se genera al pasar los humos

a través del banco de caldera o haz vaporizador, que se compone de un gran número de tubos, que conectan el *calderín de vapor* (superior) con el *calderín de lodos* (inferior).

La temperatura del agua en vaporización es constante entre (5) y (6), mientras que la temperatura de los gases de combustión desciende a 556ºC, hasta alcanzar la temperatura de salida de 404ºC entre los puntos D y E.

Los tubos del banco de caldera están distanciados el mínimo posible, para incrementar el régimen de transferencia térmica. Si el flujo de gases de combustión está cargado de suciedad, el espaciado de los tubos del banco de caldera se selecciona para:

- *Límitar la erosión de los tubos del banco*
- *Reducir la degradación de la termotransferencia por suciedad*
- *Permitir la retirada de la ceniza con los sistemas de limpieza*

El espaciado entre los tubos del banco de caldera viene limitado por la caída de presión que se pueda admitir del lado de humos a través del banco tubular. En el banco tubular de caldera se pueden emplear tabiques deflectores, que obligan a los gases de combustión a tener una velocidad y dirección adecuadas, con vistas a incrementar el régimen de transferencia térmica y reducir el tamaño y coste del banco.

Para recuperar el 30% de la energía restante suministrada por los humos, el banco de caldera requiere una superficie que es 9 veces la que corresponde al hogar y al *sobrecalentador*, igual a 9 veces la superficie de alta temperatura; en este punto del proceso, la diferencia de temperaturas entre el vapor saturado y los gases de combustión es sólo de 150ºC, diferencia entre los puntos E y (6).

El tipo y disposición de las superficies intercambiadoras adicionales viene impuesto por limitaciones económicas y técnicas.

Se puede utilizar un *economizador* para calentar el agua de alimentación del ciclo, al mismo tiempo que se enfrían los humos. Si la temperatura mínima de salida de los gases de combustión fuese, teóricamente, igual a la temperatura de entrada del agua de alimentación, 138ºC, el *economizador* debería tener una superficie infinita para lograr la transferencia en tales condiciones; si la temperatura de los humos fuese sólo de 154ºC, la diferencia de temperaturas en ese punto del generador de vapor se reduce a 17ºC, que conduce también a un intercambiador relativamente grande.

En lugar de incorporar un *economizador* para recuperar la energía residual de los humos, se puede utilizar un *calentador de aire* para precalentar el aire comburente, lo que reduce el consumo de combustible en el generador de vapor; así se mejora la combustión de combustibles difíciles de quemar, como es el caso de una extensa gama de carbones.

La evaluación de estos parámetros permite seleccionar la solución más económica que cumpla con los requisitos técnicos especificados; en este caso se tomaría la decisión de usar un calentador de

aire y no un *economizador*.

Aire comburente.- El *calentador de aire* se diseña para tomar aire del medio ambiente a 27ºC (9) y elevar su temperatura a 300ºC (8), suministrándolo así a los quemadores. Al mismo tiempo que el aire se calienta, la temperatura de los gases de combustión cae desde 404ºC a 154ºC, tal como se indica en el tramo de E a F. Si se utilizase una temperatura de salida de humos menor de 154ºC, las superficies intercambiadoras serían antieconómicamente grandes.

Cuando se utilizan combustibles como aceites o carbones, se pueden producir componentes ácidos en el flujo de gases de combustión, como el SO_2, y si en los humos de salida del generador de vapor se utilizan temperaturas inferiores, se puede provocar su condensación sobre las superficies intercambiadoras con el consiguiente daño por corrosión.

Agua de alimentación.- Su campo de temperaturas se presenta en un intervalo comprendido entre 138ºC y la temperatura de saturación de 254ºC. Si no existe *economizador*, el agua de alimentación se suministra directamente al *calderín* de vapor, en el que se mezcla con el agua de circulación que fluye por los tubos del banco de caldera y del hogar una vez que se ha extraído de ella el vapor y se ha enviado éste al *sobrecalentador*. En unidades industriales, el flujo del agua de circulación es 25 veces el del agua de alimentación, por lo que cuando el agua de alimentación se mezcla en el *calderín* de vapor, alcanza muy rápidamente una temperatura que es casi la de saturación, sin que se produzca una apreciable disminución de la temperatura en el agua de circulación que fluye por los tubos de caldera, lo que justifica suficientemente el trazo, prácticamente vertical (7-6).

Las partes internas del *calderín* de vapor se diseñan especialmente para que el agua, ligeramente subenfriada, descienda por los tubos del banco de caldera, hacia el *calderín* inferior (*calderín* de lodos); este agua se distribuye entonces entre los restantes tubos del banco de caldera (tubos ascendentes) y los tubos del cerramiento del hogar; en todos estos tubos, el agua se convierte parcialmente en vapor (un 4% en peso); seguidamente, la mezcla *vapor-agua* retorna al *calderín* de vapor, en el que la mezcla pasa a través de separadores, enviándose el vapor al *sobrecalentador*, mientras que el agua residual se mezcla con el agua de alimentación y de nuevo se distribuye entre los tubos descendentes.

REFERENCIAS CAP. I.- INTRODUCCIÓN A LOS GENERADORES DE VAPOR

C. D. Shields.- BOILERS: TYPES, CHARACTERISTICS AND FUNCTIONS.- McGraw-Hill.- 1961

A. W. Jackson.- THE HOW AND WHY OF BOILER DESIGN.- Engineers Society of Western Pa.- 1967

A. R. Foster & R. L. Wright, Jr.- BASIC NUCLEAR ENGINEERING.- Allyn and Bacon, 1973

F. S. Ashner.- PLANNING FUNDAMENTALS OF THERMAL POWER PLANTS.- Wiley.- 1977

M. *Wiener.- THE LAST DEVELOPMENTS IN NATURAL CIRCULATION BOILER DESIGN.- Proceeding of the A.P.C.- 1977*

J. Kenneth, S. Richard, E. Faw.- FUNDAMENTALS OF NUCLEAR SCIENCE AND ENGINEERING.- Kansas State University Manhattan, Kansas, U.S.A.- Marcel Dekker, Inc. New York , Basel

B&W.- STEAM: ITS GENERATION AND USE , 40thEdition.- The Babcock & Wilcox Company.- Barberton, Ohio, USA.- 1992

M. M. El-Wakil.- POWER PLANT TECHNOLOGY.- McGraw-Hill.- 1984

Li, Kam W., A. Paul Priddey.- POWER PLANT SYSTEM DESIGN.- New York: Wiley. Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers. 1985

J. G. Collier , G. F. Hewitt.- INTRODUCTION TO NUCLEAR POWER.- Hemisphere.- 1987

W. *H. Axtman, R. N. Mosher, C. R. Bahn.- THE AMERICAN BOILER INDUSTRY - A CENTURY OF INNOVATION.- American Boiler Manufacturers Association.- 1988*

P. K. Nag, .- POWER PLANT ENGINEERING.- Tata McGraw Hill, Third Edition 2008.

Thomas. C.Elliott.- STANDARD HANDBOOK OF POWER PLANT ENGINEERING.- Tata McGraw Hill 1989

Ruekes, B.- PERSPECTIVES OF FOSSIL POWER TECHNOLOGY, VGB Power Tech 82(10):71-76 2002

L.E.J. Roberts, P.S. Liss, and P.A.H. Saunders.- POWER GENERATION AND THE ENVIRONMENT.- Published, Oxford [England] ; New York : Oxford University Press, 1990.

Decher, Reiner.- DIRECT ENERGY CONVERSION: FUNDAMENTALS OF ELECTRIC POWER PRODUCTION.- Oxford University Press. 1996

Elliot, Thomas C.- STANFORD HANDBOOK OF POWER PLANT ENGINEERING.- New York:

McGraw-Hill. 1997

Hiroshi Sekimoto.- NUCLEAR REACTOR THEORY.- COE-INES.- Tokyo Institute of Technology

A.K. Raja.- POWER PLANT ENGINEERING.- Publishing for one World, New gAe International Limited, publicares, 4835/24, Ansari Road, Daryaganj, New Delhi - 110002.- ISBN (10) : 81-224-2333-7 ISBN: 978-81-224-2333-4

Lausterer, G. K., H. Weber, E. Welfonder.- CONTROL OF POWER PLANTS AND POWER SYSTEMS. New York and London: Pergamon Press. 1993

Van Der Puije, Patrick.- ELECTRIC POWER GENERATION.- 2nd ed. Boca Rotan, Fla.: Chapman & Hall Publishers. 1997

Wildi, Theodore.- ELECTRICAL MACHINES, DRIVES, AND POWER SYSTEMS.- 4th ed. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall. 2000

Wood, Allen J., Bruce Wollenberg.- POWER GENERATION, OPERATION AND CONTROL.- New York: Wiley 1996

J. *R. Lamarsh and A. Baratta, INTRODUCTION TO NUCLEAR ENGINEERING.- 3rd ed., Prentice Hall Inc., New Jersey (2001).*

S. *Glasstone and A. Sesonske.- NUCLEAR REACTOR ENGINEERING.- 3rd. ed., Van Nostrand Reinhold Co., New York (1981).*

Michael W. Golay.- TYPES OF STEAM-ELECTRIC GENERATING PLANTS.- MIT OpenCourseWare http://ocw.mit.edu, 2010