XXX.- COMBUSTIÓN EN LECHO FLUIDO PRESURIZADO

pfernandezdiez.es

Introducción	*1149*
Proceso de combustión en lecho fluidificado presurizado (PFBC)	*1151*
Eficiencia del ciclo	*1151*
Emisiones reducidas y combustión mejorada	*1153*
Tamaño reducido de la caldera	*1154*
Construcción modular	*1155*
Ciclos para plantas de (PFBC)	*1155*
Ciclo turboalimentado	*1155*
Ciclo combinado	*1156*
Funcionamiento	*1158*
Ciclo combinado avanzado	*1159*
Diseño del ciclo combinado	*1160*
Procesos en el lecho fluidificado	*1160*
Fluidificación	*1160*
Transferencia calor	*1161*
Eficiencia combustión	*1164*
Emisiones	*1164*
Óxidos de nitrógeno y captura de azufre	*1164*
Ciclos de los fluidos	*1165*
Ciclo agua-vapor	*1165*
Ciclo aire-humos	*1166*
Pérdidas de energía	*1167*
Sistemas de (PFBC)	*1168*
Generador de vapor:	*1170*
Tipo de caldera	*1170*
Cerramiento de la caldera	*1172*
Bancos tubulares	*1174*
Agua de alimentación	*1175*
Distribuidor de aire	*1175*
Turbina de gas	*1176*
Equipos auxiliares	*1178*
Vasija del combustor	*1179*
Preparación y alimentación del combustible	*1179*
Alimentación del absorbente	*1180*
Reinyección en el lecho	*1181*
Limpieza de humos	*1181*
Filtros de bujías, filtros candela y filtros de tubos cerámicos	*1182*
Evacuación de la ceniza	*1184*
Funcionamiento de unidades de (PFBC)	*1184*
Control y puesta en servicio	*1185*
Operación normal y cambio de carga	*1186*
Retirada de servicio o parada y condiciones anormales	*1186*
Referencias	*1188*

Entre 1970/90, se prestó gran atención a la combustión en lecho fluido presurizado (PFBC), con el fin de reducir las emisiones del proceso de combustión, que tienen lugar en un determinado lecho a presión elevada, y se combina con una turbina de gas y otra de vapor, configurando un ciclo combinado.

Los procesos químicos de los lechos fluidos atmosféricos son prácticamente los mismos que los de la (PFBC). La presurización del proceso de combustión es lo más destacable, y permite:

- *Mayores reducciones en las emisiones de S*
- *Mejorar la eficiencia de la combustión*
- *Produce gases calientes de escape que se pueden aprovechar en una turbina de gas*

En una planta energética de lecho fluido atmosférico, el componente principal de la planta es el generador de vapor; el aire comburente se proporciona mediante ventiladores y la combustión proporciona el calor a un ciclo de vapor antes de expulsar los humos a la chimenea.

En una planta de lecho fluido presurizado, los ciclos de vapor y de gas actúan en conjunto. El carbón se quema en un lecho presurizado y los gases producidos se mantienen a alta temperatura para accionar la turbina de gas. Simultáneamente, una caldera absorbe calor del lecho, y el vapor producido acciona la turbina de vapor.

La idea de quemar carbón en un lecho fluidificado tuvo su primera aplicación en el proceso de gasificación de Fritz Winkler, (1920).

Hasta 1960, la combustión del carbón en lecho fluidificado no tuvo mayor atención y fué a partir de aquí cuando aumentó el interés de reducir las emisiones de S y N, producidas por las plantas que quemaban carbón pulverizado en suspensión. La combustión a menor temperatura en un lecho fluidificado y el empleo de un absorbente del S como material del lecho, permitían utilizar el carbón mediante un procedimiento más barato y eficiente que los convencionales de carbón pulverizado.

A comienzos de 1970, a la vez que se reducían las emisiones, se vió la posibilidad de mejorar la generación de vapor utilizando procesos en lechos fluidos en condiciones presurizadas, y a finales de la década citada, se comenzaron a desarrollar las calderas de combustión en lecho fluido presurizado (PFBC).

Los primeros diseños se realizaron con ciclos refrigerados por aire, pero la necesidad de nuevos materiales aptos para muy altas temperaturas, los hizo irrealizables.

En 1980 se ponen de manifiesto la erosión y corrosión de los bancos tubulares sumergidos y de los álabes de la turbina de gas, y la fiabilidad/durabilidad de componentes, como factores clave de

esta naciente tecnología. Se observa el comportamiento de combustibles y absorbentes en condiciones presurizadas y se progresa en la depuración de los gases calientes y los deseos de mejorar las características operativas, lo que condujo a la realización de ciclos avanzados que incorporaban la gasificación del carbón con turbina de gas en cabeza, dentro de una configuración de (PFBC), y eficiencias netas de plantas del orden del 45%

XXX.1.- PROCESO DE COMBUSTIÓN EN LECHO FLUIDIFICADO PRESURIZADO, PFBC

Al igual que en el caso de los lechos fluidos atmosféricos, existen dos tipos de diseño de lechos fluidos presurizados $\begin{cases} \text{- } burbujeante \\ \text{- } circulante \end{cases}$. Debido a las elevadas presiones y densidad del aire en el proceso de la combustión, en (PFBC) se pueden utilizar lechos más profundos y mayores velocidades de fluidificación.

Con el fin de poder accionar una turbina de gas y una turbina de vapor, los lechos fluidos presurizados burbujeantes que operan entre $\begin{cases} 174 \div 232\ psi \\ 1200 \div 1600\ kPa \end{cases}$ tienen una:

- *Profundidad de lecho doble de la de los lechos atmosféricos equivalentes*
- *Velocidad de fluidificación entre* $\frac{1}{3} \div \frac{1}{4}$ *de la utilizada normalmente en los lechos atmosféricos*

diferencias que proporcionan diversas *ventajas*, como:

- *Una mejor eficiencia del ciclo o menor consumo de calor*
- *Emisiones más reducidas y combustión mejorada*
- *Menor tamaño de a caldera*
- *Erosión más baja*
- *Construcción modular*

Eficiencia del ciclo.- La mayor ventaja del proceso de combustión en lecho fluidificado presurizado (PFBC) radica en que la eficiencia de la planta se mejora de forma muy significativa, combinando el ciclo de vapor (Rankine, Hirn), con el ciclo de gas (Brayton).

Como el proceso (PFBC) tiene lugar a presiones del orden de 174 psi (1200 kPa) e incluso mayores, los gases calientes presurizados pueden accionar una turbina de gas, mientras que el vapor generado en la caldera se destina al accionamiento de una turbina de vapor.

Una limitación de la potencia de la unidad radica en la capacidad de la turbina de gas que se destina para el suministro del aire comburente.

La *primera generación* de ciclos combinados con (PFBC), tenía eficiencias del 40% y un consumo específico de calor de 8.500 Btu/kWh, cifra que mejoraba la de 9.600 Btu/kWh de los lechos fluidificados atmosféricos.

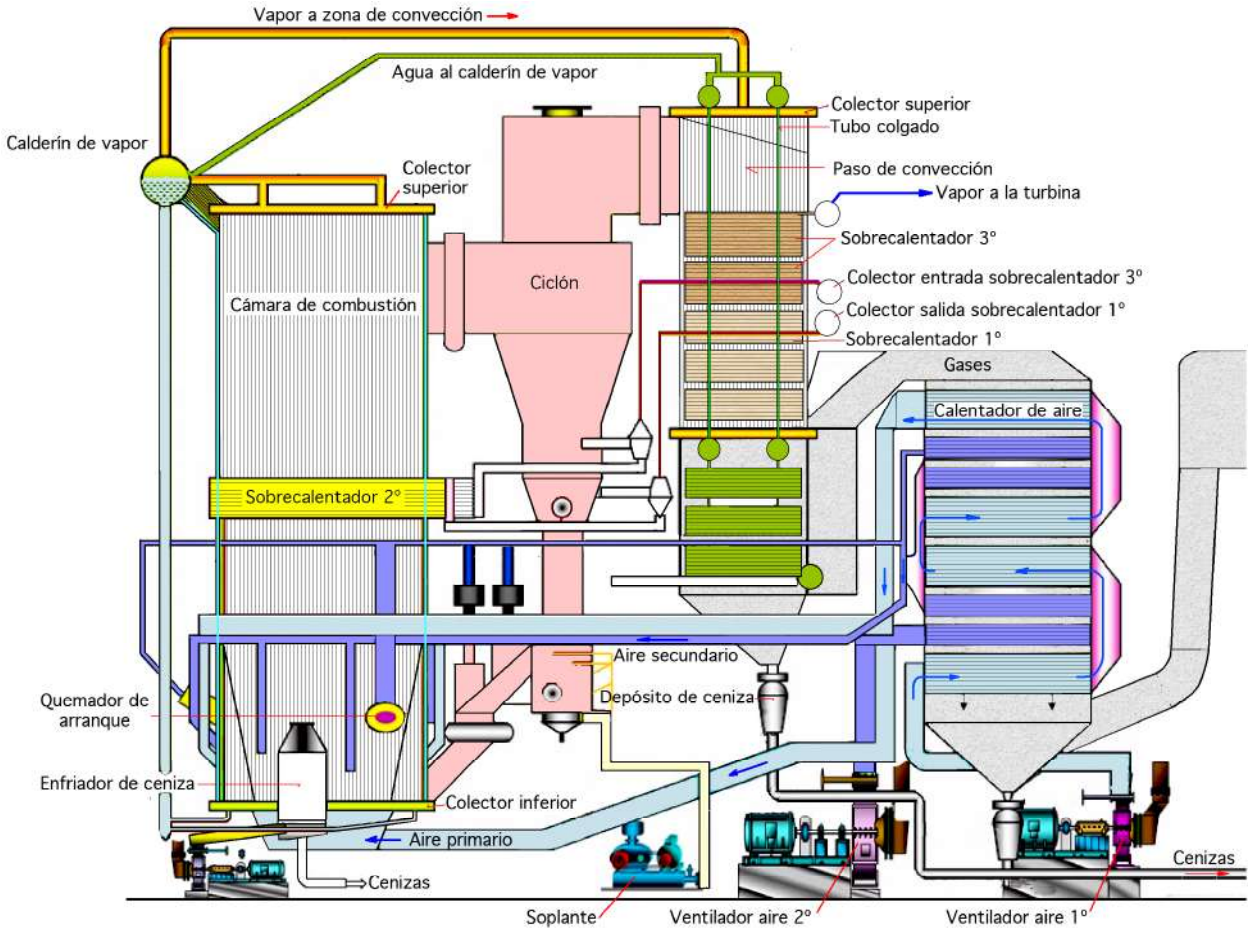


Fig XXX.1.- Proceso de combustión en lecho fluidificado presurizado (PFBC)

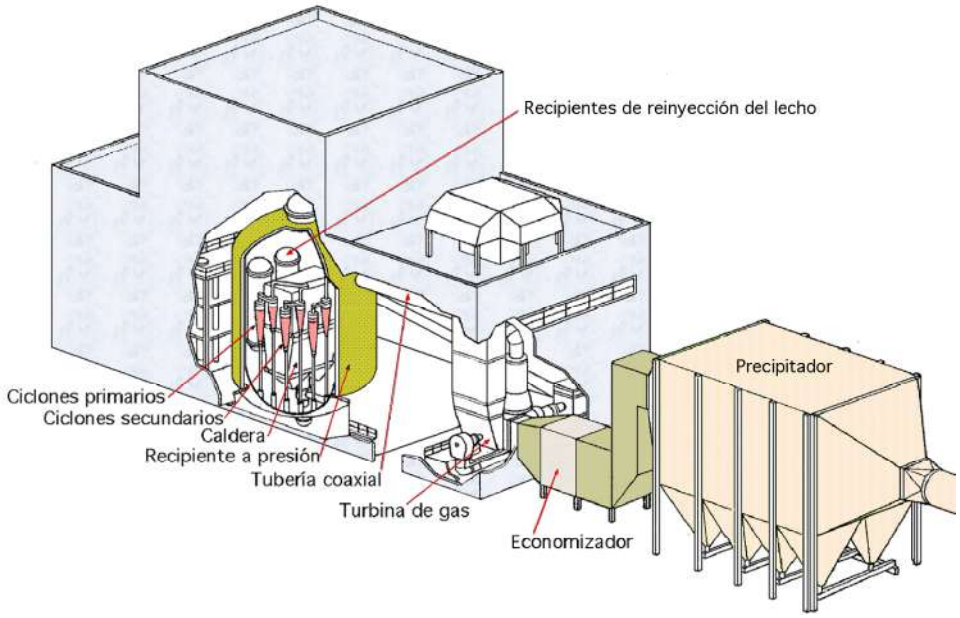


Fig XXX.2.- Esquema de una instalación (CLFP)

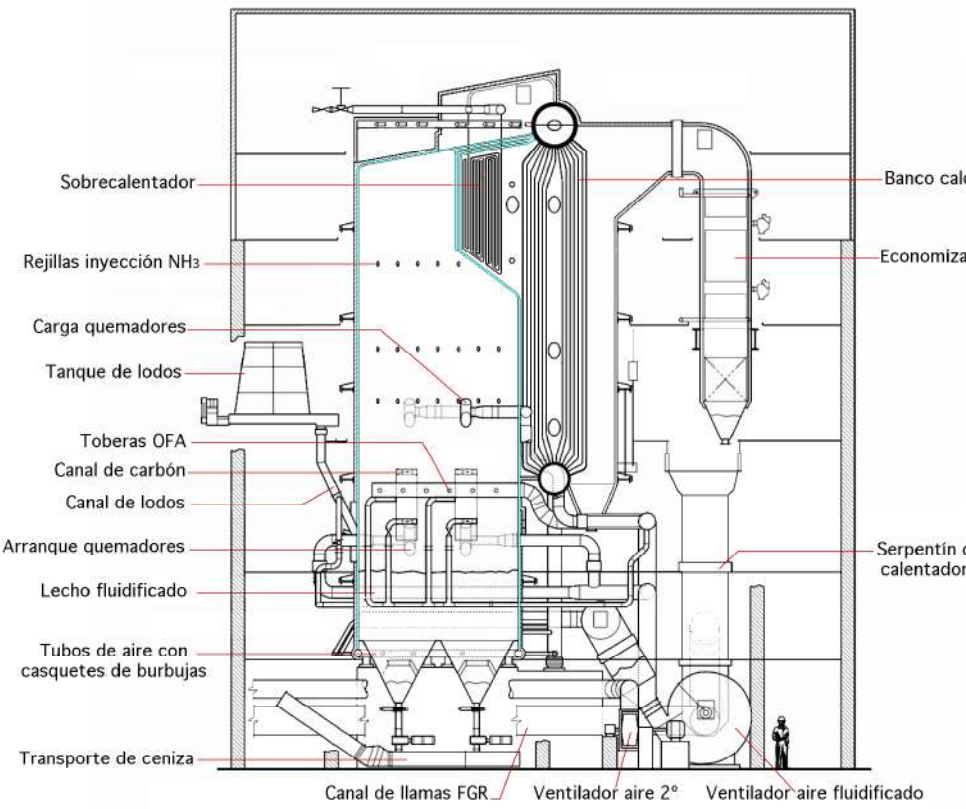


Fig XXX.3.- Unidad con lecho fluidificado burbujeante

La *segunda generación* de ciclos combinados tenía eficiencias superiores al 45%, y un consumo específico de calor inferior a 7.500 Btu/kWh.

Emisiones reducidas y combustión mejorada.- El aumento de la presión de operación correspondiente al proceso de combustión tiene diversas ventajas y facilita el funcionamiento del ciclo combinado. La mayor presión y densidad de los fluidos (aire y humos) permiten operar a una menor velocidad superficial de fluidificación, del orden de 3 ft/s (0,9 m/seg), con lo que se reduce el riesgo de erosión de los bancos de tubos sumergidos en el lecho; a su vez, una caída de presión en el proceso (PFBC) mayor facilita que los lechos sean de mayor profundidad.

Para un ***lecho fluidificado presurizado burbujeante*** a plena carga, la profundidad del lecho es del orden de $12 \div 15$ ft = $(3{,}6 \div 4{,}6$ m), según la presión de operación.

El efecto combinado de una $\begin{cases} \text{- } \textit{menor velocidad de fluidificación} \\ \text{- } \textit{mayor profundidad} \end{cases}$ da lugar a un tiempo de residencia de los gases en el lecho muchísimo más importante, reduciendo las emisiones de SO_x, y mejorando la eficiencia de la combustión.

Un lecho profundo permite que el tiempo de residencia en su seno llegue a ser del orden del 50% del tiempo total de residencia, lo que es mucho más efectivo que el $10 \div 15$% de los lechos fluidos atmosféricos burbujeantes, menos profundos.

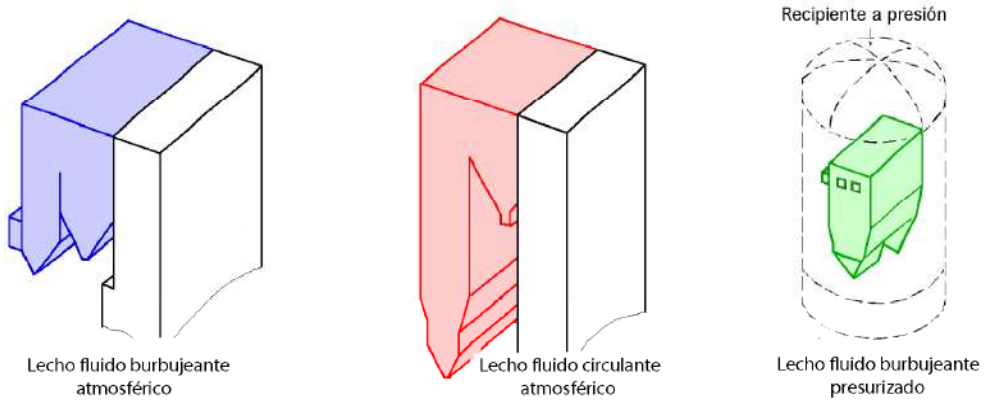
Tamaño reducido de la caldera.- El flujo másico de aire es:

$m = \rho\ V A$, *en la que:* $\begin{cases} m \text{ es la masa de aire} \\ \rho \text{ su densidad} \\ V \text{ su velocidad superficial} \\ A \text{ el área correspondiente a la sección del lecho} \end{cases}$

Como consecuencia de la alta densidad correspondiente a los flujos de aire y humos, para un mismo flujo másico de aire se precisa menor área de lecho fluidificado. Con un determinado flujo másico de aire, una unidad de combustión en lecho fluidificado presurizado burbujeante, operando a 174 psi (1200 kPa) y con una velocidad superficial de 3 ft/s (0,9 m/s), necesita:

- *El 28% del área de un lecho fluido atmosférico burbujeante*
- *El 56 % del área de un lecho fluido atmosférico circulante*

La menor velocidad superficial en el lecho reduce significativamente $\begin{cases} \text{la altura global del lecho} \\ \text{el espacio superior} \end{cases}$ que configuran el hogar, por cuanto la altura total de éste es el producto de la velocidad por el tiempo de residencia total que se desee; la influencia de estos factores se indica en la Fig XXX.4, junto con el perfil de la vasija de la cámara de combustión.



	LFB	*LFC*	*LFP*
Presión	*1 atm (100 kPa)*	*1 atm (100 kPa)*	*12 atm (1200 kPa)*
Velocidad	*10 ft/s (3 m/s)*	*20 ft/s (6 m/s)*	*3 ft/s (0,9 m/s)*
Tiempo de residencia	*6 seg*	*4,5 seg*	*6 seg*

Fig XXX.4.- Efecto de la presión del proceso sobre la reducción del tamaño de la caldera

El desgaste de los tubos sumergidos en el lecho depende de factores que influyen en la erosión y corrosión.

El efecto más significativo de la presurización en el desgaste de los tubos, es consecuencia de la reducida velocidad de los humos, del orden de 1/3 de las habituales en lechos fluidos atmosféricos. Las causas de desgaste de tubos sumergidos en el lecho, son comunes para los atmosféricos y para los presurizados. Los tubos de mayor temperatura, sobrecalentadores, tienden a formar una capa de

óxido resistente a la abrasión que, prácticamente, la impide en tales superficies. Sin embargo, las superficies vaporizadoras, de menor temperatura, quedan expuestas a la erosión.

Los parámetros que tienen influencias adversas en los tubos y soportes sumergidos en el lecho son:
- *La temperatura de los tubos*
- *El material tubular*
- *La geometría del banco o haz tubular*
- *La velocidad de los humos*
- *Las propiedades del material del lecho*
- *Las características del combustible*

Para el mantenimiento de los tubos expuestos a la erosión se usan diversas técnicas, como:

- *Revestimientos*
- *Aletas*
- *Otros tratamientos superficiales*

El tamaño y dureza de las partículas del lecho junto con las características del combustible, contribuyen también al desgaste del material sumergido:

- *Tamaños mayores de partículas y absorbentes más duros incrementan la erosión*
- *Algunos componentes del combustible pueden provocar la corrosión de los metales y las protecciones*

Construcción modular.- La capacidad del compresor de la turbina de gas se fija con arreglo a las necesidades de la caldera y de los componentes principales, de modo que la unidad (PFBC) tiende por sí misma a un alto grado de estandarización. Como el tamaño de la caldera se reduce mucho con la presurización del proceso de combustión, y está encerrada en la vasija del combustor, resulta factible un alto grado de modularidad.

Una vez seleccionada la turbina de gas, se definen
- *el flujo de aire*
- *la presión*
- *el tamaño de la caldera*

Las diferencias existentes entre distintas instalaciones son debidas a los diversos requisitos para la manipulación de combustibles y absorbentes y a las particulares características del ciclo de vapor. La construcción por módulos depende de la ubicación que vaya a tener la planta; si ésta se sitúa a orillas de un curso de agua navegable, son posibles módulos mucho mayores.

XXX.2.- CICLOS PARA PLANTAS DE (PFBC)

La configuración básica de ciclos propuestos para plantas de combustión en lecho fluido presurizado (PFBC), se reducen a las tres siguientes ciclos:
- *Turboalimentado*
- *Combinado*
- *Combinado avanzado*

CICLO TURBOALIMENTADO.- Se desarrolló como un paso intermedio hacia el ciclo com-

binado, Fig XXX.5. Las altas temperaturas de los humos de los ciclos combinados, superiores a $\begin{cases} 1580^{\circ}F \\ 860^{\circ}C \end{cases}$, impedían utilizar métodos convencionales con humos tan calientes, por cuanto el estado de la depuración de gases a alta temperatura no estaba suficientemente desarrollado.

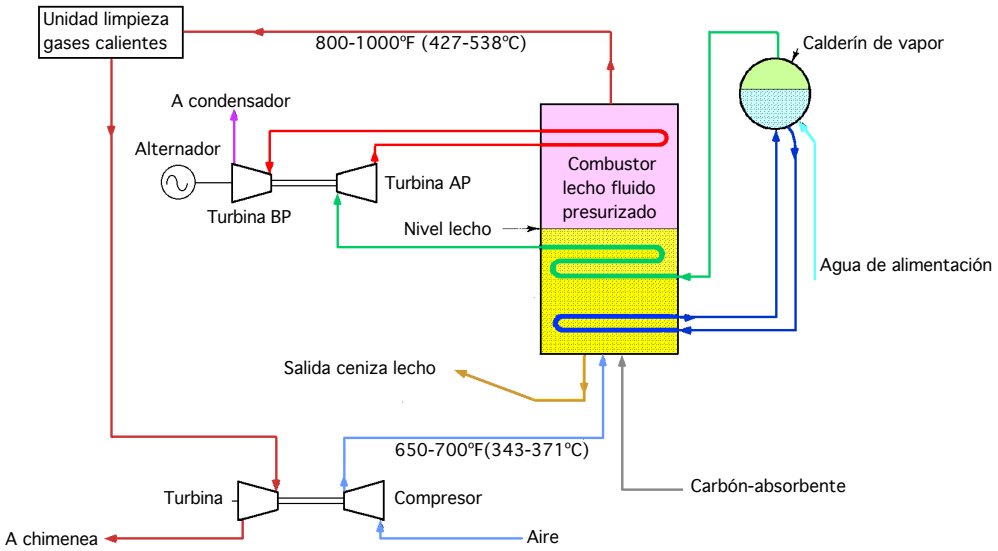


Fig XXX.5.- Ciclo de CLFP turboalimentado

Para reducir la temperatura de los humos a la salida de la caldera y facilitar su depuración, se colocaban superficies termointercambiadoras por encima de la cota del lecho; el lado de humos de la planta se diseñó para mantener las condiciones en la turbina de gas, soportando el ciclo de vapor toda la producción eléctrica con tecnologías convencionales, en perjuicio de su rendimiento.

CICLO COMBINADO.- En el ciclo combinado de *primera generación* de la Fig XXX.6, a diferencia de lo que ocurre en el ciclo turboalimentado, no existe ninguna superficie termointercambiadora convectiva para enfriar los humos calientes presurizados que, cuando salen de la caldera, se limpian y envían directamente a la turbina de gas, a una presión de $\begin{cases} 174 \div 232\ psi \\ 1{,}2 \div 1{,}6\ MPa \end{cases}$ y temperatura 1500ºF (843ºC), habiéndose llegado a proponer presiones de 290 psi (2 MPa).

El reparto de potencia útil entre los ciclos de vapor y de gas es con el alternador conectado a la turbina de $\begin{cases} -\ vapor\ genera\ el\ 80\%\ de\ la\ producción\ eléctrica \\ -\ gas\ genera\ el\ 20\%\ restante \end{cases}$

Los lechos fluidificados atmosféricos (FBC) utilizan un absorbente como piedra caliza o dolomía parra la captura del S liberado en la combustión del carbón. Un chorro de aire mantiene en suspensión la mezcla de absorbente y carbón durante la combustión, convirtiendo la mezcla en una suspensión de partículas al rojo vivo que fluyen como un líquido.

- *Estos sistemas funcionan a presiones elevadas*

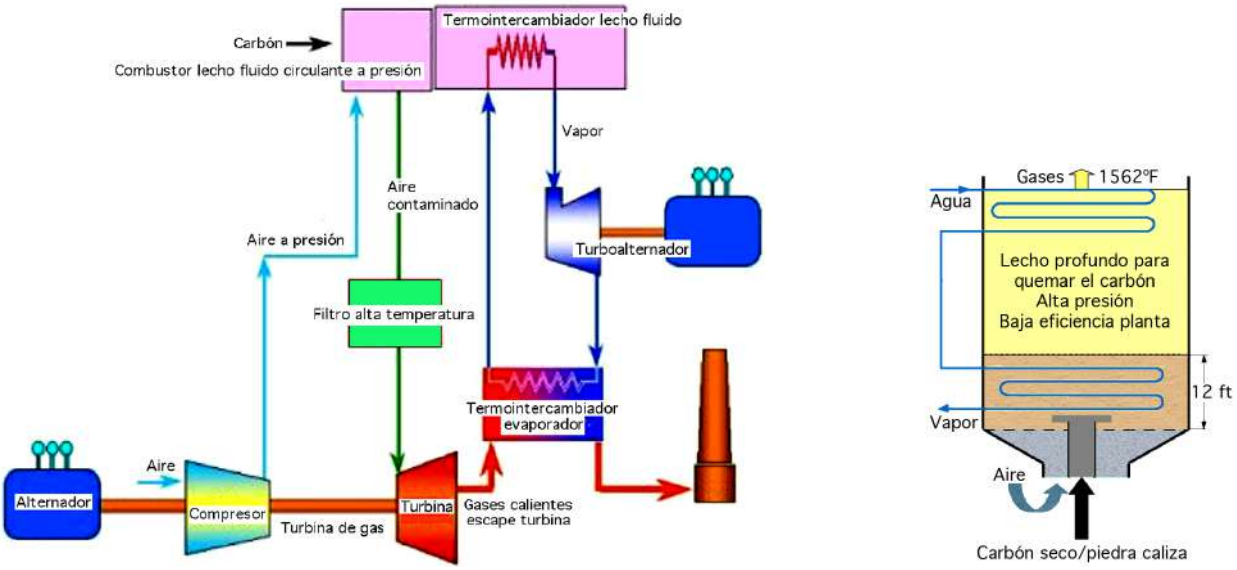


Fig XXX.6.- 1ª generación (PFBC).- Ciclo combinado combustión en lecho fluidificado circulante presurizado

- Producen humos que se envían a la turbina de gas a 1562°F (850°C), eliminando la formación de NO_x térmico y optimizando la relación $\frac{Ca}{S}$

- La profundidad del lecho es necesaria para una combustión completa (bajo CO)

- Una caída de presión elevada a través del lecho implica un aumento de la potencia del ventilador, y disminuye la eficiencia de la planta por debajo del 30%

El vapor generado en el lecho fluidificado se envía a la turbina de vapor, dando lugar a un ciclo combinado eficiente.

La velocidad del lecho es del orden de 6,5 ÷9,8 ft/seg y el índice del potencial de erosión de (10 x base)

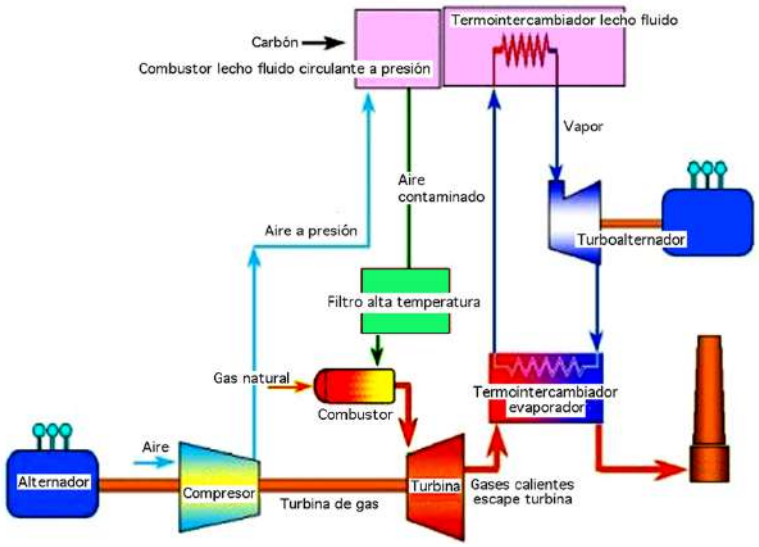


Fig XXX.7.- Generación intermedia. Ciclo combinado con combustión en (PCFB)

El sistema de *generación intermedia*, Fig XXX.7, incrementa la temperatura de los gases que se lleva a la turbina quemando en un combustor gas natural (mayor coste), utilizando como comburente el aire contaminado procedente de la (PFB), lo que proporciona una temperatura mayor a la entrada de la turbina de gas y, en consecuencia, una mayor eficiencia del ciclo combinado.

El sistema de *segunda generación* A(PFBC), Fig XXX.8 incorpora un carbonizador a presión (gasificador) que se alimenta sólo con carbón y produce char y gases de combustión. El (PFBC) quema el char para producir vapor y calienta el aire para la turbina de gas. El gas combustible de los gasificadores se quema en el combustor de la turbina de gas.

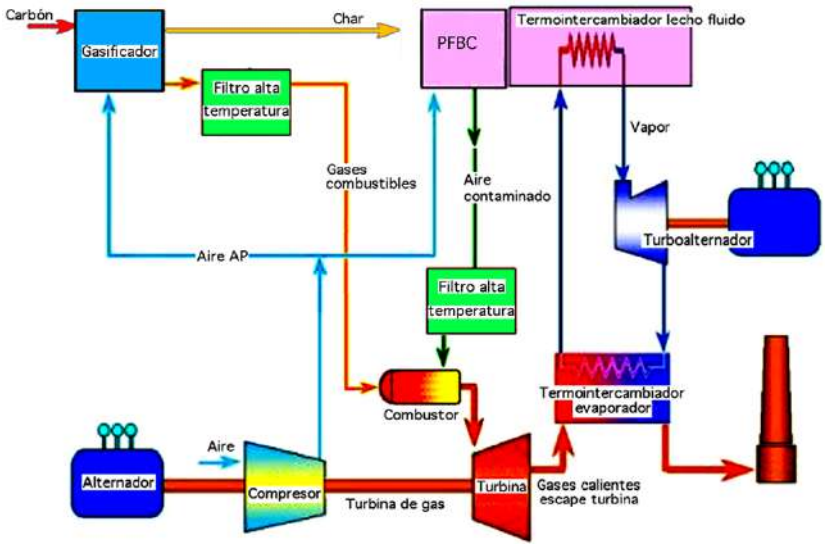


Fig XXX.8.- 2ª Generación A(PFBC).- Ciclo combinado con combustión en (PCFB)

El ciclo de vapor es semejante al del sistema intermedio.

La potencia de la turbina de gas es suficiente para asumir simultáneamente el accionamiento del:

- Compresor, como fuente de suministro de aire comburente presurizado y calentado, que lo envía a la caldera de lecho fluidificado en la que se verifica la combustión

- Alternador, como generador de energía eléctrica, dispuesto en paralelo con el que accione la turbina de vapor

Funcionamiento.- El proceso se inicia cuando se inyectan el carbón troceado y el absorbente (dolomía o caliza), por medio de un flujo uniforme de aire, a través de la parte baja del hogar de la caldera; dentro de ésta, cuando la velocidad del aire alcanza un cierto nivel, las partículas sólidas adquieren un movimiento aleatorio y parece que flotan o que son fluidas.

Durante este proceso, el carbón se quema y el absorbente captura los compuestos de S desprendidos. El absorbente, cargado de S, forma un producto residual sólido y seco, desechable; una

gran parte de este residuo, en forma de ceniza del lecho fluidificado, se evacúa a través de la parte inferior de la caldera. Las partículas más pequeñas, ceniza volante en polvo, se arrastran por los humos calientes producidos en la combustión, hacia la parte superior de la caldera y, a continuación, los humos pasan a través de unos colectores de polvo o depuradores, que separan los sólidos del resto de humos.

Los gases de la combustión, relativamente limpios, mueven una turbina de gas que acciona un compresor y un alternador. El primero se utiliza para el suministro de $aire_{comburente}$ presurizado, destinado al lecho fluidificado y el segundo genera energía eléctrica.

Los humos que salen de la turbina de gas se utilizan de nuevo para calentar el agua del ciclo *agua- vapor*, que se conduce a los bancos tubulares de los termointercambiadores sumergidos en el lecho denso absorbiendo el calor del proceso de combustión, dentro de la vasija, y vaporizando el agua en el interior de los mismos. El vapor se lleva a una turbina, que acciona un alternador para producir energía eléctrica, y una vez condensado vuelve a reiniciar su ciclo.

Los humos residuales se liberan a la atmósfera por la chimenea, con las limitaciones medioambientales correspondientes.

CICLO COMBINADO AVANZADO.- El lecho fluidificado de una unidad con (PFBC) suele operar a unos 1580ºF (860ºC), con el fin de $\begin{cases} \text{- prevenir la escorificación} \\ \text{- minimizar la formación del } NO_x \text{ térmico} \\ \text{- maximizar las reacciones de captura del } S \\ \text{- evitar la aparición de álcalis en el flujo de humos} \end{cases}$ siendo la temperatura de los humos a la entrada de la turbina de gas de 1525ºF (830ºC), bastante inferior a la de las turbinas de gas convencionales que operan con temperaturas de 2000ºF (1093ºC).

El carbón es el combustible principal de una unidad con caldera de (PFBC); se quema parcialmente en un gasificador y el char residual realimenta el lecho fluido.

La aplicación de este sistema implica disponer de un equipo avanzado de limpieza de gases calientes, para separar todas las partículas sólidas del flujo gaseoso antes de enviarlo a la turbina de gas, lo mismo las que proceden del lecho fluidificado que las de la gasificación parcial.

Para lograr unidades con potencias útiles superiores y mayores temperaturas de entrada en la turbina de gas, se podrían utilizar ciclos de vapor supercríticos a 4.000 psi (300 bar) con sobrecalentamiento y recalentamiento a 1100ºF (595ºC).

Los métodos avanzados de reducción de emisiones pueden lograr niveles inferiores a 0,1 lb/10^6 Btu para los NO_2 y capturas de S superiores al 98%, aunque estas tecnologías no se han demostrado con suficientes realizaciones prácticas.

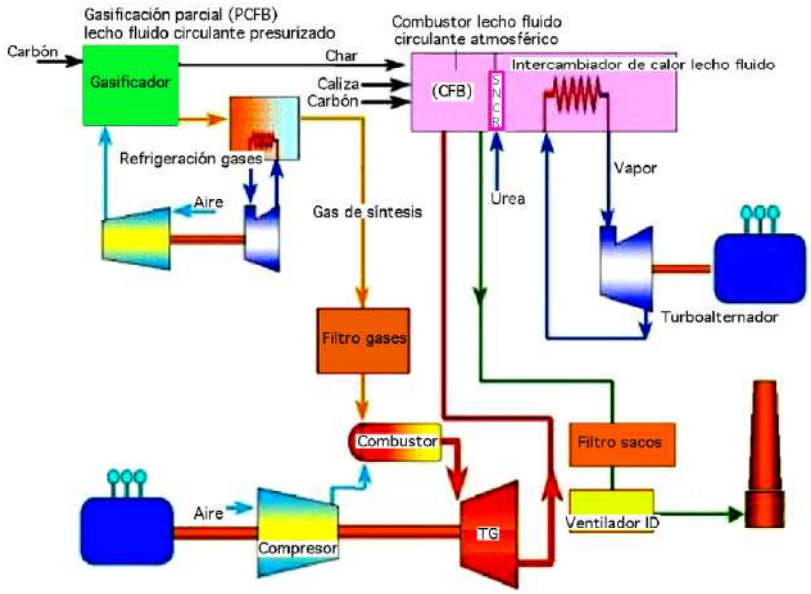


Fig XXX.9.- Sistema GFBCC de ciclo combinado, gasificación parcial y combustión en (PCFB)

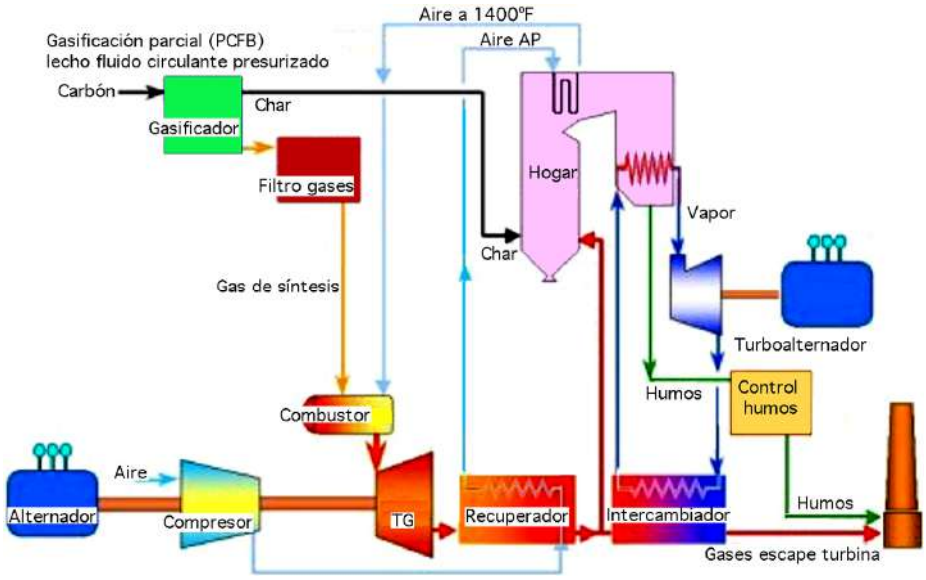


Fig XXX.10.- Sistema de ciclo combinado, de combustión en (PCFB) de alto rendimiento (CHIPPS)

XXX.3.- DISEÑO DEL CICLO COMBINADO

PROCESOS EN EL LECHO FLUIDIFICADO.- Los lechos fluidificados presurizados funcionan, básicamente, de la misma forma que los lechos fluidificados atmosféricos, aunque su elevada presión afecta a la
- *fluidificación*
- *transferencia de calor*
- *eficiencia de la combustión*

Fluidificación.- Siempre es importante para evitar un excesivo arrastre de partículas, especialmente en un lecho burbujeante, mientras mantiene las partículas en suspensión con una mezcla

adecuada a fin de retener las partículas más pesadas hacia el fondo del lecho.

Una buena fluidificación se logra con velocidades límite comprendidas entre la velocidad que:

- Inicia la fluidificación

- Comienza a sacar partículas del lecho y las arrastra al exterior (velocidad terminal)

La fluidificación depende de $\begin{cases} \text{- el tamaño y forma de las partículas} \\ \text{- la temperatura del proceso} \\ \text{- la presión de operación} \end{cases}$

Se ha comprobado que, si en el lado de humos se aumenta la presión de operación, las velocidades límite disminuyen; para tamaños de unas $\begin{cases} \text{1.500 micras, la bajada es del 30\%} \\ \text{200 micras, la reducción es despreciable} \end{cases}$

La temperatura del lecho fluidificado tiene un efecto similar al de la presión, aunque es mucho menos significativa.

Transferencia de calor.- Al igual que en los lechos fluidificados atmosféricos burbujeantes, en los lechos fluidificados presurizados burbujeantes se consideran tres zonas de transferencia de calor, que son la: $\begin{cases} \text{- interior al lecho} \\ \text{- de desprendimiento} \\ \text{- superior al lecho} \end{cases}$

La predicción de la transferencia de calor en cada una de las zonas, tiene gran importancia para la determinación de las características funcionales de operación a carga parcial.

La transferencia de calor hacia los tubos sumergidos (zona interior al lecho) se realiza por convección y radiación, lo mismo desde el gas que desde las partículas.

La fracción convectiva es la más relevante y el coeficiente de convección se calcula con la ecuación:

$$h_c = (13{,}5\, k_g\, Ar^{0,12}\, D_p^{-0,5}) + \frac{0{,}46\, k_g\, Ar^{0,15}\, e^{-0,7}}{D_p} \quad \frac{W}{m^2\,°K}$$

en la que: $\begin{cases} k_g = \text{conductividad térmica promedia de los humos, } W/m°K \\ D_p = \text{diámetro medio de las partículas, } m \\ e = \text{paso promedio en el interior del banco tubular} \\ Ar = \text{número de Arquímedes} = g\ D_p^3\ \rho_g\ \dfrac{\rho_p - \rho_g}{\eta_g^2} \\ \rho_g\ ,\ \rho_p = \text{densidad media de los humos y partículas, en la zona pelicular, } kg/m^3 \\ \eta_g = \text{viscosidad media de los humos en la zona pelicular} \end{cases}$

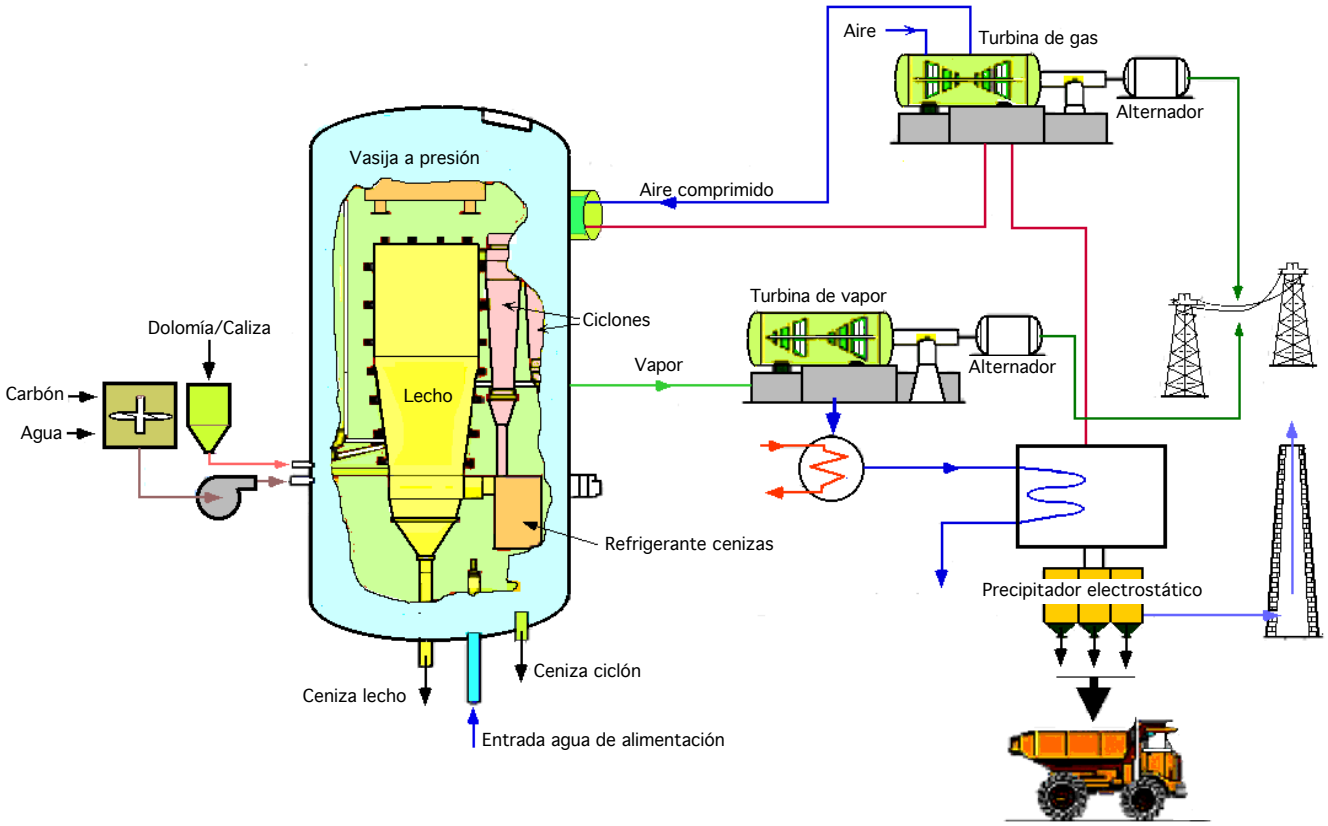


Fig XXX.11.- Esquema de flujos del ciclo combinado TIDD, de 70 MWe, que quema carbón bituminoso Ohio, con 2÷4% de S

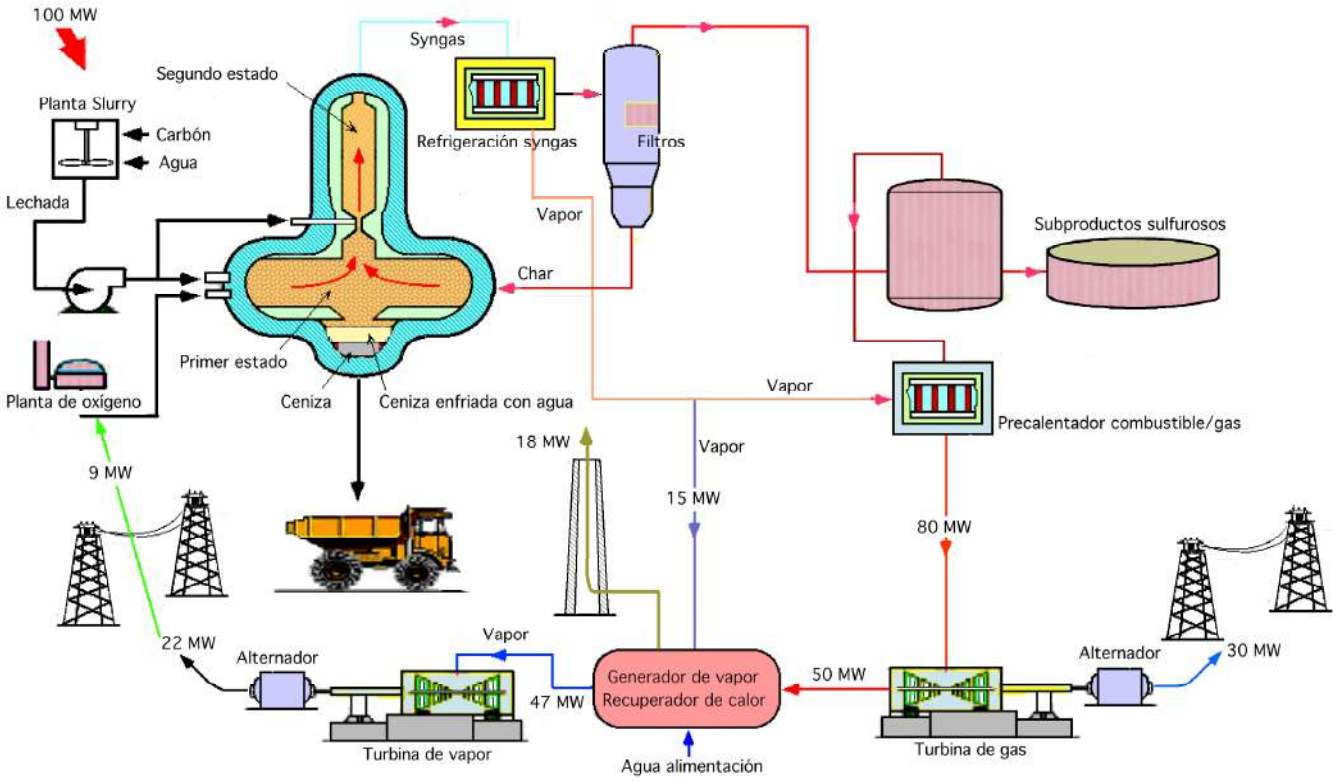


Fig XXX.12.- Planta energética que quema sólo carbón (IGCC) de 100 MW de aporte, generación y pérdidas

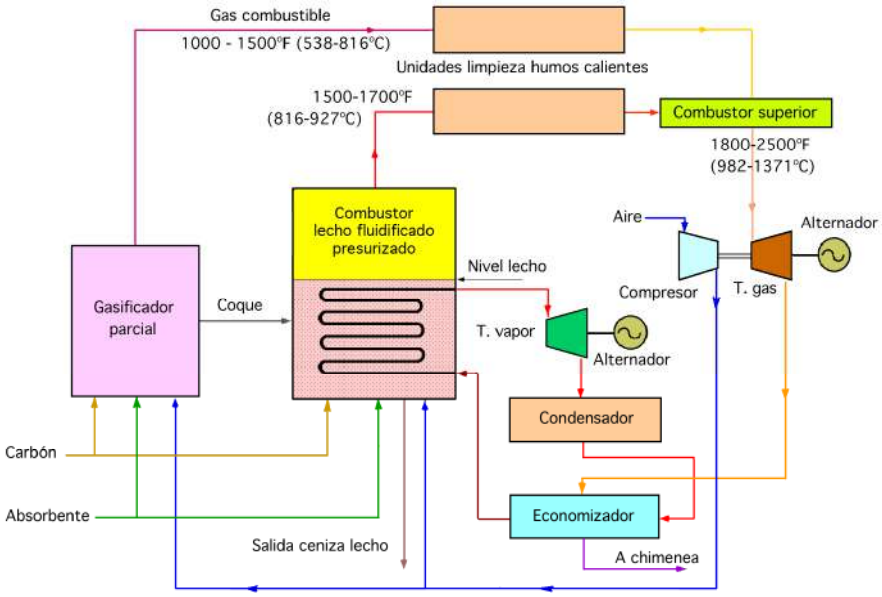


Fig XXX.13.- Ciclo avanzado de CLFP

Cuando en los humos aumenta la temperatura y/o la presión, el coeficiente de convección aumenta; hay que tener en cuenta que el efecto de la presión es mucho mayor que el de la temperatura; por ejemplo, para una temperatura dada del lecho, si la presión sube desde $\begin{cases} 85 \div 230\ psi \\ 590 \div 1600\ kPa \end{cases}$, el coeficiente de convección aumenta un 28%.

El coeficiente de radiación es un 75% del coeficiente de convección, y depende mucho de las temperaturas del lecho y del metal tubular; para un intervalo de temperaturas del lecho de 400ºF (222ºC), el coeficiente de radiación varía un 50%.

El coeficiente de transferencia de calor en la zona de desprendimiento está comprendido entre el correspondiente al interior total del lecho y el de la zona superior al mismo.

El coeficiente de la zona interior es unas 4 veces el correspondiente a la zona superior.

Aunque la zona de desprendimiento no es muy extensa, hay que tenerla en cuenta para alcanzar una predicción exacta de la absorción de calor, cuando la carga de la unidad se reduce.

La transferencia de calor en la zona superior, (zona de régimen libre en una caldera de lecho burbujeante), se determina igual que en las calderas convencionales que queman carbón pulverizado; sin embargo, la mezcla *sólidos-humos*, en la zona de régimen libre, es más alta en sólidos que la correspondiente a las calderas convencionales que queman carbón pulverizado con alto contenido en ceniza. La mezcla *sólidos-humos* influye en la emisividad radiativa y en la transferencia convectiva.

En un ciclo combinado de (PFBC) existe una transferencia de calor baja en la zona superior al lecho, como consecuencia de la alta temperatura de los humos que van a la turbina de gas; a veces,

esta zona de régimen libre se calorifuga internamente para minimizar la transferencia de calor en la zona superior.

Eficiencia de la combustión.- Depende de: $\begin{cases} - \text{ el aire}_{exceso} \\ - \text{ la velocidad de fluidificacin} \\ - \text{ la altura del lecho} \\ - \text{ la temperatura absoluta del lecho} \end{cases}$

Una correlación entre los parámetros precedentes es:

$$1 - \eta_{comb} = \frac{t_{g(lecho)}^{1,69}}{K(1 + aire_{exceso})^{-3}} \left(\frac{1300 - T_{lecho}}{T_{lecho}} \right)^2$$

siendo: $\begin{cases} \eta_{comb} \text{ la eficiencia de la combustión} \\ K \text{ un parámetro función de las características del combustible, que varía entre } \begin{cases} 12 \text{ (altos volátiles)} \\ 27 \text{ (bajos volátiles)} \end{cases} \\ t_{g(lecho)} \text{ el tiempo de residencia de los gases en el lecho, en segundos} \\ T_{lecho} \text{ la temperatura absoluta del lecho, } ^oK \end{cases}$

observándose que un incremento del tiempo de residencia, mejora la eficiencia de la combustión.

Un aumento de la presión del proceso $\begin{cases} - \text{ reduce la velocidad de fluidificación} \\ - \text{ aumenta en el lecho } \begin{cases} - \text{ la altura de diseño permisible} \\ - \text{ el tiempo de residencia} \end{cases} \end{cases}$, de lo que se deduce, en comparación con los lechos fluidificados burbujeantes atmosféricos, que la eficiencia de la combustión se mejora cuando se emplean unidades de (PFBC).

XXX.4.- EMISIONES

Óxidos de nitrógeno.- Los parámetros principales que afectan a la emisión de NO_x en la combustión en lechos fluidificados, son el: $\begin{cases} - \text{ nitrógeno contenido en el combustible} \\ - \text{ nivel de aire}_{exceso} \text{ comburente} \end{cases}$

La influencia de estos parámetros en la producción del NO_x se correlaciona teniendo en cuenta: $\begin{cases} - \text{ la temperatura de los lechos fluidificados} \\ - \text{ un aire}_{exceso} \text{ equivalente a un 3\% de oxígeno} \end{cases}$

mediante las ecuaciones: $\begin{cases} NO_x = 20{,}5\, N_2\, (O_2 + 0{,}5) \text{ en (ppmv)} \\ NO_x = 0{,}028\, N_2\, (O_2 + 0{,}5) \text{ en } (lb / 10^6\, Btu) \end{cases}$

en las que: $\begin{cases} N_2 \text{ es el contenido en nitrógeno del carbón seco, tal como se quema} \\ O_2 \text{ es el contenido en oxígeno del gas seco, \% moles} \end{cases}$

A consecuencia de las bajas temperaturas de combustión, típicas en un lecho fluidificado, la producción de NO_x de origen térmico es mínima. La presión del proceso de combustión tiene una influencia despreciable en las emisiones de los NO_x.

Captura de azufre.- Depende de: $\begin{cases} \text{- la relación molar } (Ca/S) \\ \text{- el tiempo de residencia del gas en el lecho} \\ \text{- el tamaño de las partículas} \\ \text{- la temperatura del lecho} \\ \text{- la reactividad del absorbente} \end{cases}$, parámetros que se correlacionan por la siguiente ecuación que permite determinar la captura R_S de S en %:

$$R_S = 100\,\{1 - exp\,(C_{molar(Ca/S)}\ A_{react.absorb.}\ \sqrt{\frac{t_g}{d_{absorb.}}}\ e^{-(n_{activ.}/T_{lecho})})\}$$

en la que:

$C_{molar\,(Ca/S)}$ *es la relación molar,* Ca/S

t_g *es el tiempo de residencia de los gases en el lecho, segundos*

d_{absorb} *es un parámetro que caracteriza el tamaño de la partícula, igual al diámetro de la superficie promedia de absorbente, en mm*

n_{activ} *es una constante relativa a la energía de activación para reacciones de captura de S*

T_{lecho} *es la temperatura absoluta del lecho,* ^oK

$A_{react.absorb.}$ *es el índice de reactividad del absorbente,* $\sqrt{mm/seg}$

El parámetro clave para $\begin{cases} \text{- una determinada temperatura del lecho} \\ \text{- un absorbente dado} \end{cases}$, es el tiempo de residencia de los humos en el lecho.

Si la presión del proceso de combustión sube, la $\begin{cases} \text{- velocidad de los humos decrece} \\ \text{- altura del lecho a utilizar en el diseño aumenta} \end{cases}$, lo que da lugar a un tiempo de residencia de los gases en el lecho de una unidad (PFBC), equivalente a 6 veces el disponible en unidades de combustión en lecho fluido atmosférico, con la consiguiente mejora en la captura del S.

XXX.5.- CICLOS DE LOS FLUIDOS

Ciclo agua-vapor.- La Fig XXX.14 representa una instalación de generación de vapor, con caldera de circulación forzada, en una unidad de (PFBC). En el circuito *agua-vapor*, el agua procedente del sistema de condensado se calienta en los calentadores regenerativos de agua del ciclo y se impulsa hacia:

- El economizador mediante las bombas de alimentación de la caldera, ó

- La entrada de la caldera si se utiliza un generador de vapor recuperador de calor aguas abajo de la turbina de gas

Desde el economizador, el agua subenfriada entra en la caldera, pasa por las paredes de cerramiento del lecho y de la zona superior, y entra en la unidad vaporizadora, que se encuentra dentro

del lecho, donde tiene lugar la vaporización. El fluido que sale del vaporizador se dirige al separador de *vapor-agua*; por debajo del 40% de la carga nominal de la unidad es una mezcla saturada de dos fases, y con cargas iguales o superiores al 40% tiene un ligero grado de sobrecalentamiento. A cargas por debajo del 40%, el agua procedente del separador se recicla con una bomba auxiliar a través de la superficie vaporizadora; para cargas por encima del 40% el reciclado se interrumpe porque no se precisa recirculación.

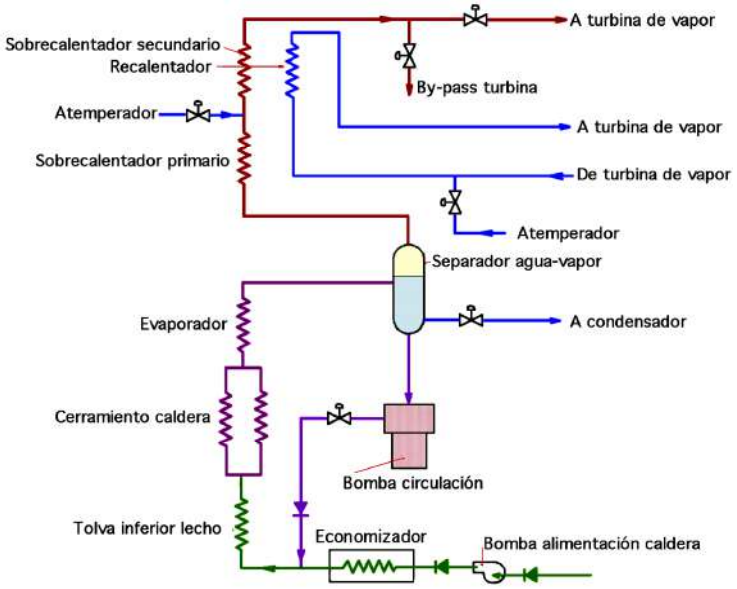


Fig XXX.14.- Esquema de un sistema de circulación forzada para el circuito agua-vapor

El vapor procedente del separador entra en el sobrecalentador primario; aguas abajo del mismo se utiliza un atemperador atomizador, para controlar la temperatura del vapor sobrecalentado que sale del sobrecalentador secundario hacia la turbina de vapor de la planta. La presión del vapor sobrecalentado principal se controla mediante las válvulas de admisión de la turbina de vapor.

Cuando en el ciclo de vapor se requiere un recalentamiento intermedio, la superficie correspondiente se coloca inmersa en el lecho, de modo que se produzca la absorción de calor con la mínima caída de presión. Como el flujo del vapor recalentado no se establece hasta que la turbina está girando, la superficie del recalentador se coloca en la parte alta del lecho, con el fin de evitar temperaturas del metal tubular excesivas y minimizar los efectos de un lecho hundido. La temperatura del vapor recalentado se regula mediante un atemperador dispuesto a la entrada del mismo.

Durante la puesta en servicio de la unidad y en el caso de un disparo de la turbina de vapor, un bypass se hace cargo del vapor producido por la caldera que no pasa por la turbina, dirigiéndolo hacia el condensador del ciclo; el sistema controla la caída de presión y temperatura de la caldera durante el disparo y conserva la mayor cantidad posible de agua tratada.

Ciclo aire-humos.- En el ciclo de *aire-humos*, o ciclo de aire (Brayton), el aire ambiente llega

a la turbina de gas, pasa a través del compresor de BP, se refrigera en un intercambiador intermedio, se presuriza en la parte de AP hasta alcanzar la presión de diseño, $\begin{cases} 170 \div 230\ psi \\ 1200 \div 1600\ kPa \end{cases}$ y se calienta hasta unos 600ºF (316ºC); el aire comprimido circula por un anillo exterior, formado por dos tuberías coaxiales, hacia el combustor.

Desde la parte superior del recipiente del combustor, el aire baja a través de los enfriadores de ceniza, para recuperar calor antes de que el aire llegue al sistema de distribución; desde aquí el aire entra en el lecho fluidificado en el que tiene lugar la combustión.

Los humos que proceden del lecho pasan por la zona superior del combustor, salen hacia el equipo de limpieza de gases calientes (ciclones, etc.) y, desde aquí, los gases calientes limpios fluyen a lo largo de la tubería coaxial por el tubo interior hacia la turbina de gas.

Los gases calientes limpios presurizados se expansionan en la turbina de gas de AP, y después en la de BP, facilitando el accionamiento de los compresores, de AP y BP, y de un alternador que toma el 20% de la potencia global de la turbina de gas, para la generación de energía eléctrica.

A la salida de la turbina de gas, el flujo de humos se canaliza hacia el economizador o hacia una unidad recuperadora de calor para refrigerarlos aún más.

Si la limpieza de los humos se realiza mediante ciclones, se pasan por un precipitador electrostático o por unos filtro de sacos, antes de descargarlos a la chimenea.

XXX.6.- PÉRDIDAS DE ENERGÍA

Como consecuencia de los diversos componentes y de las altas temperaturas de salida de los gases de la caldera, la eficiencia de ésta ya no es un indicativo del rendimiento del sistema de combustión en lecho fluidificado presurizado (PFBC).

Para interpretar el balance energético y de masa, hay que tener en cuenta todos los componentes del recipiente del combustor y de la turbina de gas, que intervienen en el proceso. El balance energético es de particular interés, porque los procesos de calcinación y sulfatación afectan a la energía del lecho.

El balance de energía del lecho considera sólidos entrantes, combustible y absorbente, calores de reacción, de calcinación y sulfatación, y pérdidas por $C_{inquemado}$.

La entrada de sólidos, al igual que las reacciones de calcinación y sulfatación, aplican calor al lecho, por lo que las pérdidas se atribuyen al $C_{inquemado}$; si se asume que la pérdida por $C_{inquemado}$ es el 1%, la eficiencia del lecho es superior al 99%.

Si el recipiente del combustor se considera como frontera termodinámica, las pérdidas incluyen las de: $\begin{cases} \text{- la ceniza del lecho} \\ \text{- las cenizas de las unidades de limpieza del gas caliente} \\ \text{- el } C_{inquemado} \\ \text{- la radiación de la superficie exterior de la vasija del combustor} \end{cases}$

Considerando estas pérdidas, la eficiencia es superior al 98%.

Para el sistema completo de la unidad de (PFBC), hay que considerar las pérdidas en:

- *La chimenea*

- *Los enfriadores externos para fluidos inactivos*

que son del orden de $80 \div 85\%$.

Teniendo en cuenta que el 20% de la generación eléctrica global de la planta se produce en la turbina de gas, la eficiencia del $80 \div 85\%$ no desmerece de la de las calderas convencionales, que se sitúan entre el $85 \div 89\%$.

XXX.7.- SISTEMAS DE (PFBC)

En la Fig XXX.15 se presenta el esquema representativo de un sistema de combustión en lecho fluidificado presurizado (PFBC), que corresponde a la instalación de reequipamiento, de la Central Térmica de demostración de Tidd, Ohio, USA.

El sistema (PFBC) comprende una serie de componentes, de los que muchos de ellos están contenidos parcial o totalmente en un recipiente presurizado:

- *La turbina de gas*
- *La caldera y sus sistemas auxiliares asociados*
- *Los equipos depuradores de gases calientes*
- *El sistema de regulación de carga de la unidad*
- *Los sistemas de preparación y alimentación de* $\begin{cases} \text{- combustible} \\ \text{- absorbente} \end{cases}$
- *Los sistemas de evacuación de ceniza*

La potencia del compresor accionado por la turbina de gas define el flujo de aire (caudal, presión y temperatura), a partir del cual se determina la cantidad de combustible que se puede quemar, con un determinado $aire_{exceso}$ que suele ser del orden del 20%.

El combustible se quema en un proceso de lecho fluidificado a presión; cuando se opera a plena carga, las superficies termointercambiadoras ubicadas en el lecho están totalmente sumergidas. En la configuración del ciclo combinado, la temperatura de los gases enviado a la turbina de gas se mantiene muy próxima a la del lecho, mientras que la extracción de calor desde éste controla la temperatura del mismo.

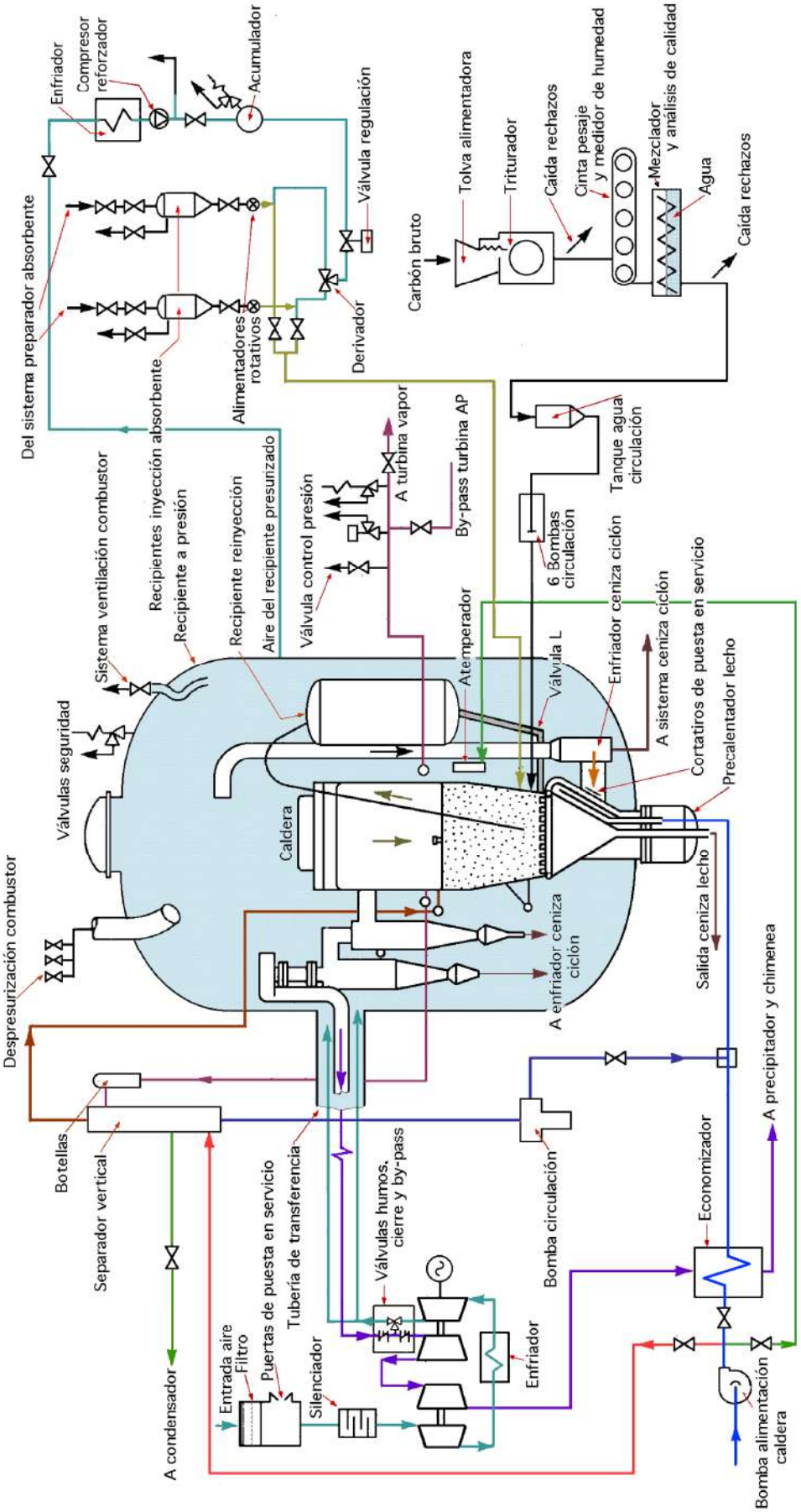


Fig XXX.15.- Esquema de un sistema de CLFP (Proyecto TIDD)

Para calderas turboalimentadas, las superficies convectivas se sitúan en la zona superior del lecho, para reducir la temperatura de los humos entre $\begin{cases} 800 \div 1000 °F \\ 427 \div 537 °C \end{cases}$, antes de que entren en la turbina de gas.

La caldera es el componente central del sistema de (PFBC), ya que tiene que operar con los ciclos de gas y de vapor, en todo el intervalo de cargas.

- Cuando la combustión se reduce, el calor absorbido en el ciclo de vapor disminuye, y el nivel del lecho se debe mantener tan alto como sea posible, para maximizar el tiempo de residencia de los gases en el lecho, y minimizar la generación de gases

- En el ciclo combinado, la temperatura de los humos ha de mantenerse siempre lo más alta posible

Las restricciones indicadas se cumplen sólo con una cuidadosa ubicación de los tubos en el lecho, operación compleja por cuanto hay que conseguir al mismo tiempo la $\begin{cases} \textit{refrigeración del lecho} \\ \textit{buena mezcla de materiales} \\ \textit{mínima erosión} \end{cases}$

XXX.8.- GENERADOR DE VAPOR

Tipo de caldera.- Una caldera (PFBC) debe:

- Generar vapor en las condiciones deseadas

- Facilitar el control suficiente para la coordinación entre la turbina de vapor y la red eléctrica

- Proveer condiciones de gas a la salida congruentes con la potencia requerida en la turbina de gas

- Mantener y controlar el proceso de combustión en el lecho fluido en todo el rango de cargas.

- Diseñarse para hacer frente a las condiciones anormales que siguen a disparos de equipos o a pérdidas de energía para servicios auxiliares

El método de circulación del fluido *vapor-agua* para una caldera (PFBC) hay que elegirlo con cuidado:

- La circulación natural y la asistida para calderas con calderín tienen ciertas ventajas para regímenes de cargas bajas

- La circulación para calderas de un paso (circulación forzada para caldera sin calderín) es mejor para cargas altas

Lo ideal es que una caldera (PFBC) incorpore algunos aspectos de cada uno de los tres métodos de circulación, Fig XXX.16.

a) El diseño de circulación forzada (un paso) tiene la ventaja de que una misma superficie termointercambiadora, puede operar como vaporizador o como sobrecalentador, lo que compensa las necesidades del proceso durante una bajada de carga.

La superficie termointercambiadora se puede colocar de forma que su inmersión se reduzca al

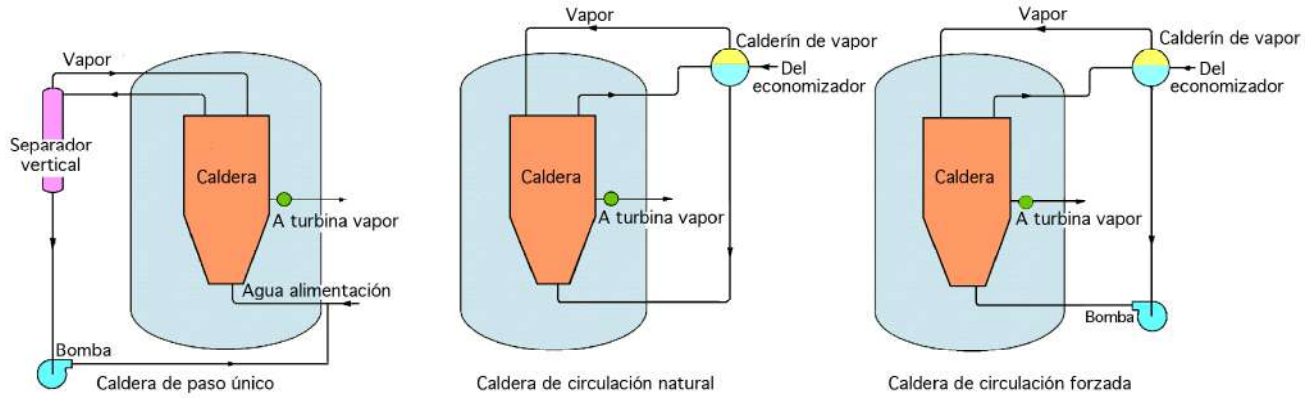


Fig XXX.16.- Sistemas de circulación de calderas de CLFP

bajar la carga, ya que el nivel del lecho disminuye también al bajar carga. Su conversión en sobrecalentador incrementa la temperatura del metal tubular y, por tanto, se evacúa menos calor de los humos, antes de que éstos lleguen a la turbina de gas; como los tubos no están dentro del lecho, donde la transferencia de calor es muy elevada, las temperatura del metal no resultan excesivas; operando sólo con las bombas de alimentación imprescindibles, se pueden conseguir mejoras en la eficiencia, mantenimiento, fiabilidad y coste.

b) Como las calderas (PFBC) son más compactas que las convencionales, es difícil conseguir una cota del calderín que sea suficiente para facilitar la altura de bombeo necesaria, con vistas a una circulación natural. Los haces de tubos verticales, necesarios para obtener una velocidad másica elevada, son difíciles de colocar dentro de la altura del lecho, para que estén sumergidos a las diversas cargas.

c) Si se utilizan haces tubulares horizontales, estos circuitos se diseñan para ser asistidos por bombeo, lo que reduce la cota requerida por el calderín.

En una configuración de ciclo combinado, cuando la altura del lecho se reduce y parte de la superficie tubular queda expuesta por encima del nivel del lecho, la superficie termointercambiadora refrigerada por agua inmersa en el lecho disminuye la temperatura de los gases

En una caldera con circulación natural o forzada, la disminución de la temperatura de los gases es mayor que cuando la superficie pertenece a un diseño con circulación de un paso.

El diseño de caldera de un paso, $\begin{cases} \textit{- con un separador de vapor vertical, y} \\ \textit{- bomba de circulación que opera a cargas bajas} \end{cases}$, funciona como una caldera con calderín, a cargas inferiores al 40%, en la que el fluido que sale del vaporizador sumergido es una mezcla *agua-vapor*.

El separador de vapor vertical separa el agua del vapor, fluyendo éste hacia los sobrecalentadores primario y secundario, mientras que el agua separada se recicla para pasar a través de las superficies del cerramiento y del vaporizador, sumergidas en el lecho.

Cuando a la salida del vaporizador aumenta la carga, se puede alcanzar un pequeño grado de sobrecalentamiento; el separador vertical se puede by-pasar y retirar de servicio la bomba de circulación; en esta situación la caldera opera en la modalidad de un paso. Este diseño es adecuado para ciclos de vapor subcríticos y supercríticos; en estos últimos, la presión de funcionamiento se eleva por encima de la crítica utilizando las válvulas de admisión de la turbina.

Cerramiento de la caldera.- Los cerramientos de las calderas convencionales que queman carbón pulverizado, se diseñan para una presión diferencial de $\begin{cases} 30"\div 40"wg \\ 7\div 10\ kPa \end{cases}$

La presión diferencial a través de la pared del cerramiento de una caldera de *lecho fluidificado atmosférico (FBC)* es de 50"wg (13 kPa).

La presión diferencial a través de la pared de cerramiento de una caldera de *lecho fluido presurizado (PFBC)* a plena carga, es de 7 psi (50 kPa) o más, lo que requiere vigas de atado menos espaciadas; como el cierre es compacto, la flecha de las vigas de atado se reduce mucho lo que facilita el poder utilizar métodos convencionales para soportar las paredes.

Se pueden presentar presiones diferenciales más elevadas, cuando se rompe un tubo o cuando se produce la rápida despresurización del recipiente del combustor; afectan al diseño de las vigas de atado y de soporte; si la presión excede del valor correspondiente a la de diseño se precisa una válvula de seguridad de protección del cerramiento.

El cerramiento tiene tres zonas, Fig XXX.17: $\begin{cases} \text{- la parte inferior de la caldera} \\ \text{- el lecho} \\ \text{- la parte superior de seguridad (zona de régimen libre)} \end{cases}$

Al contrario de lo que ocurre en las calderas convencionales, el cerramiento de las calderas (PFBC) no está aislado exteriormente, ya que la temperatura del aire interior de la vasija, para altas cargas, es similar a la del cerramiento. La zona superior se aísla y reviste interiormente, para mantener la temperatura de los gases a la salida de la caldera.

a) La *zona inferior de la caldera* incluye el sistema de:

- Distribución de aire

- Recogida de la ceniza del lecho, que se refrigera con el aire comburente y se evacúa al exterior de la vasija del combustor; está construido con paredes membrana, configurando una tolva en forma de pirámide invertida, que se llena con la ceniza del lecho durante la operación

b) El *cerramiento del lecho* $\begin{cases} \text{- en el que se produce la combustión, y} \\ \text{- la transferencia térmica al ciclo de vapor} \end{cases}$ contiene el lecho fluidificado y las superficies termointercambiadores inmersas en el mismo; para facilitar el proceso, las paredes membrana son divergentes, aumentando la sección recta para el paso de los humos, conforme

aumenta el nivel del lecho fluidificado, lo que permite niveles del lecho algo más altos para cargas bajas, mejorándose el flujo de materia.

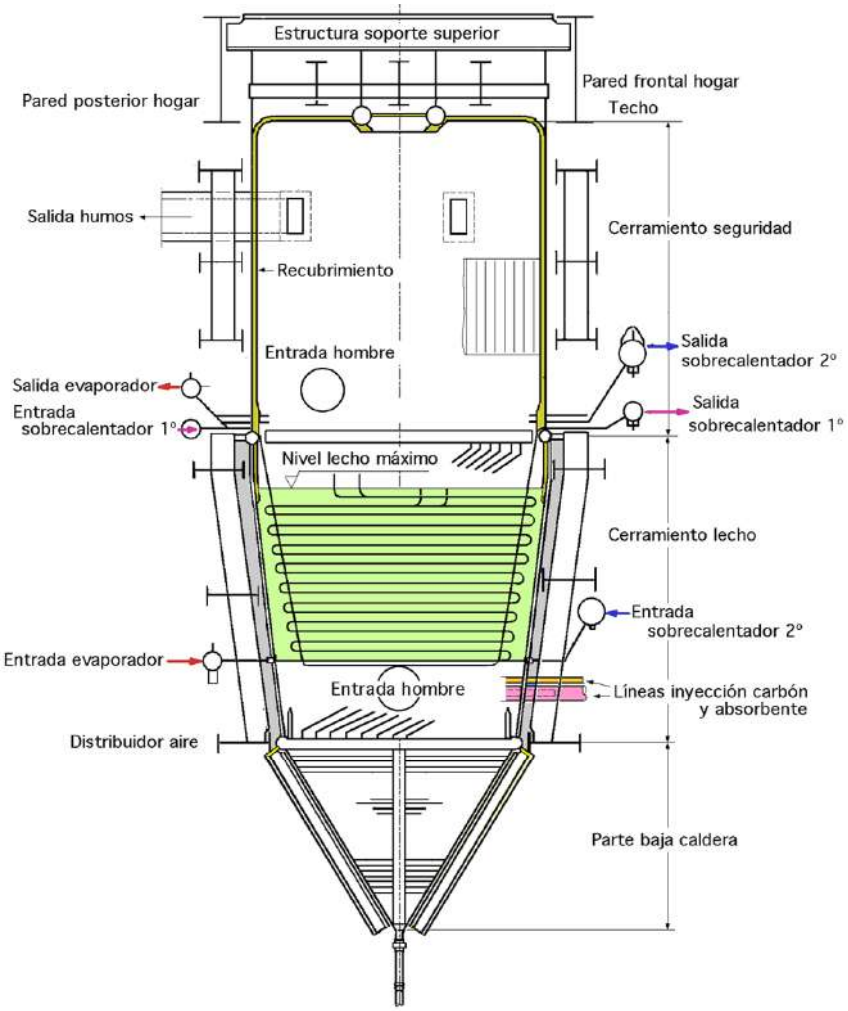


Fig XXX.17.- Caldera para el proyecto TIDD

El cerramiento del lecho en su parte más baja, tiene los tubos dispuestos en espiral, con lo que hay menos circuitos y mayores flujos por tubo, para así mantener los elevados valores de transferencia de calor en el lecho, sin necesidad de refractario o aislamiento interno. Aunque en la zona que contiene el haz tubular no se usa aislamiento interno, la parte más baja cuenta con una pequeña sección aislada interiormente que minimiza los requisitos de precalentamiento del lecho durante la puesta en servicio.

Los circuitos *vapor-agua* del cerramiento más bajo con tubos en espiral, descargan en un colector intermedio:

- Desde el que se distribuye el flujo a las paredes del cerramiento de la zona superior

- Que recibe las cargas de los tubos soporte del sobrecalentador primario y las transfiere a las paredes del cerramiento

El cerramiento de la zona superior está construido con paredes membrana, con tubos verticales o en espiral. Está aislado y revestido interiormente, para minimizar la absorción de calor en la zona superior al lecho, a fin de mantener la temperatura de los humos lo más próxima posible a la del lecho, en condiciones de plena carga.

Su altura se determina de acuerdo con el tiempo de residencia que se desee y con las consideraciones y necesidades de mantenimiento de los bancos tubulares, para los que hay que prever el espacio suficiente en la zona superior, para su mantenimiento.

El diseño del sistema de vigas de atado que soporta estas paredes es convencional, utilizando perfiles horizontales.

Bancos tubulares.- El banco vaporizador, los sobrecalentadores $\begin{cases} \text{- } primario \\ \text{- } secundario \end{cases}$ y el recalentador, construidos con tubos sumergidos en el lecho, se soportan por el cerramiento del lecho. Un atemperador atomizador de agua se coloca en la tubería que une las superficies de los sobrecalentadores $\begin{cases} \text{- } primario \\ \text{- } secundario \end{cases}$ y en la que va al recalentador.

La disposición de las tuberías y sus soportes se fijan de modo que se cumplimente el espaciado y la densidad deseadas, con el fin de lograr una buena mezcla en el lecho y la mínima erosión posible.

El banco tubular se diseña para:

- *Resistir las solicitaciones dinámicas del material del lecho*
- *Absorber el calor en cada nivel del mismo*
- *Facilitar una temperatura en el gas de salida compatible con la turbina de gas a esa carga*

Está constituido por varias placas de tubos, de forma que cada una se compone de dos o más circuitos de tubos dispuestos en serpentín; se soporta por un tubo en U que suele pertenecer al sobrecalentador primario, independientemente de que el banco sea vaporizador o sobrecalentador. Este diseño permite soportar los paneles a través de la pared del cerramiento, (por el primario), justo por encima del nivel del lecho que corresponde a plena carga.

Los bancos no se soportan desde la zona superior por $\begin{cases} la\ complicación\ que\ representa\ el\ mantenimiento \\ la\ reducción\ de\ la\ temperatura\ de\ los\ humos \\ el\ aumento\ de\ la\ caída\ de\ presión \end{cases}$

debiéndose proyectar para que $\begin{cases} \text{- } el\ mantenimiento \\ \text{- } las\ reparaciones \\ \text{- } las\ sustituciones\ precisas \end{cases}$ se puedan hacer con el menor número de cortes en los tubos.

Agua de alimentación.- Cuando se produce $\begin{cases} \textit{- el disparo de la turbina de gas} \\ \textit{- la pérdida del agua de alimentación} \end{cases}$, se concentra una gran masa de material en el lecho a alta temperatura, conformando un lecho hundido que rodea los bancos tubulares. Para evitar el fallo de los tubos de baja aleación, diseñados para bajas temperaturas, el calor procedente de ese material del lecho se evacúa, para lo cual se prevé un bypass en el sistema de circulación de un paso.

La capacidad de almacenamiento del tanque de agua de alimentación se utiliza como reserva, para las necesidades transitorias de agua de alimentación.

En las calderas convencionales con circulación forzada, la evacuación de calor del agua y de las partes a presión, está limitada por la convección obtenida a partir del aire de refrigeración del hogar.

En las unidades (PFBC) en las condiciones transitorias que siguen a un disparo, el enfriamiento del agua a través de refrigeradores exteriores se utiliza para proteger el metal de los tubos, durante un período de tiempo razonable.

El agua se aporta al ciclo para:

- Reponer las pérdidas de vapor y agua expansionadas a la atmósfera

- Hacer frente a la contracción de las masas de agua y vapor durante el enfriamiento

y se tiene que mantener hasta que la temperatura del lecho sea segura para el metal de los tubos.

Distribuidor de aire.- Existen dos criterios para el diseño de la distribución de aire en lechos fluidificados, configurando:

a) El fondo de la caldera mediante un suelo tubular refrigerado por agua, bajo el cual se instala la caja de aire comburente, desde la que se alimentan las toberas de aire (casquetes de burbujeo) que traspasan el suelo y sobresalen del mismo

b) Un fondo abierto, en cuyo espacio se instalan unos conductos aspersores, que distribuyen el aire a las toberas fluidificadoras

El diseño (a) soporta mejor los cambios severos de temperatura impuestos por el precalentador de puesta en servicio, siendo el más barato, ya que los conductos aspersores del diseño (b) se hacen con acero inoxidable.

Ambos diseños prevén la posibilidad de enfriar la ceniza del lecho cuando sale de la caldera; ésto implica que para la conducción de la ceniza del lecho, las penetraciones en la pared del recipiente del combustor ya no estarán sometidas a altas temperaturas y, por tanto, se podrán diseñar más sencillas.

XXX.9.- TURBINA DE GAS

El compresor accionado por la turbina de gas sustituye al ventilador y al calentador de aire de las plantas convencionales, para realizar el suministro del aire presurizado destinado a la combustión y a la fluidificación del lecho.

La turbina de gas se acciona con los gases de escape de la caldera, calientes y presurizados, y atiende al suministro de aire comburente a la misma y a la producción de electricidad, por lo que hay que compatibilizar una serie de condicionantes.

Una turbina de gas ideal adoptada para una unidad (PFBC) en todo el campo de cargas, debe asumir la temperatura relativamente baja de los gases de entrada, unos 1500ºF (843ºC), asociada al proceso del lecho fluidificado (en el supuesto de que no exista otro proceso), y no se tiene que ver afectada significativamente con los cambios de las condiciones ambientales; a su vez debe facilitar un flujo volumétrico que permita:

- *Mantener la* $\begin{cases} \text{- velocidad de fluidificación casi constante} \\ \text{- tasa de aire}_{exceso} \\ \text{- velocidad en el equipo de limpieza de gas, trascendental en los ciclones} \end{cases}$

- *Compatibilizar objetivos contrapuestos como un* $\begin{cases} \text{- bajo flujo de aire a la caldera} \\ \text{- alto flujo de aire a la turbina en el caso de baja carga} \end{cases}$

- *Tolerar alguna carga de partículas en los humos sin que se produzcan daños relevantes*

Las turbinas de gas disponibles actualmente son de uno o dos ejes:

- *Las de eje único facilitan la misma velocidad al compresor y al alternador acoplados*

- *Las de dos ejes pueden operar con un eje a velocidad constante y el otro a velocidad variable; el de velocidad constante, configurado por los escalones de AP de la turbina de gas, se acopla al alternador y, a veces, a una sección del compresor; el correspondiente al resto de los escalones de la turbina de gas, que acciona todo o parte del compresor, es susceptible de operar a velocidad variable*

Cuando el compresor es de dos etapas, una de AP que opera a velocidad constante y otra de BP a velocidad variable, se intercala un refrigerador intermedio para controlar la temperatura del aire que sale del compresor de BP y mejorar la eficiencia del compresor de AP.

Las turbinas de gas que se diseñan para potencias de hasta 350 MW, se han modificado para su adecuación al proceso (PFBC), Fig XXX.18.

En las turbinas de dos ejes alineados, en el de velocidad variable se acopla la turbina de gas de BP con el compresor de aire de BP.

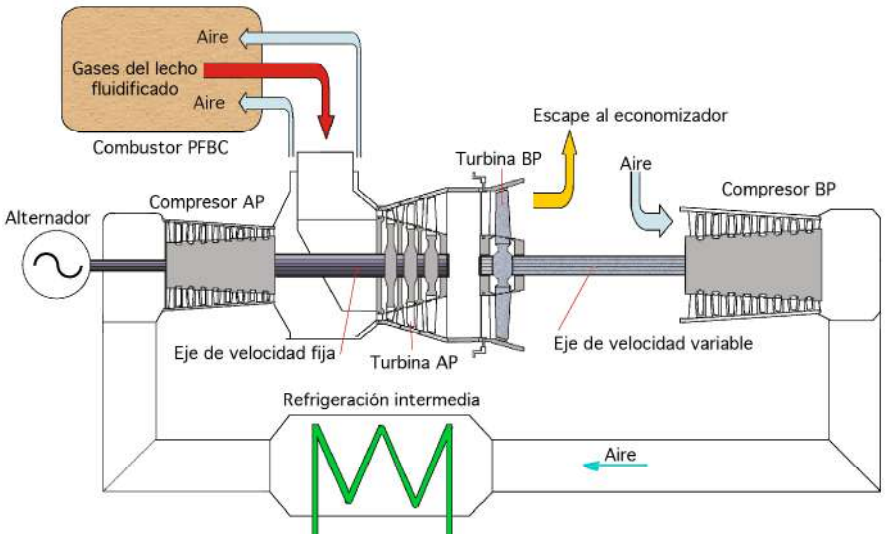


Fig XXX.18.- Turbina de gas para unidades de CLFP

En el eje de velocidad constante, la turbina de gas de AP acciona, a la vez, el compresor de aire de AP y el alternador de generación de electricidad.

Entre las secciones correspondientes al compresor de BP y al compresor de AP, en el lado del aire, se dispone un refrigerador de aire.

El diseño de la turbina de gas se hace más resistente, para minimizar el efecto de la pequeña cantidad de partículas finas que arrastran los gases cuando pasan a través de la turbina.

El diseño con dos ejes tiene ventajas operativas, como:

- Cuando la carga de la unidad se reduce, si el eje que gira a velocidad variable es el de la turbina de gas de BP, se puede acomodar a la temperatura de los humos y al flujo de aire reducidos, mientras que la velocidad de la turbina de gas de AP que acciona el alternador, se mantiene constante

- El refrigerador intermedio situado entre las etapas de compresión de BP y AP, controla la temperatura del aire que se dirige a la vasija del combustor, posibilitando la utilización de materiales convencionales

- El alternador se puede utilizar como motor de arranque para la puesta en servicio de la turbina de gas, que es la que facilita el aire para $\begin{cases} \text{- encender el precalentador de aire} \\ \text{- la ignición del carbón} \end{cases}$

Una vez iniciado el proceso de la combustión, la temperatura de los gases que entran en la turbina de gas crece, y la potencia de accionamiento requerida por el alternador disminuye; si la carga continúa subiendo, la turbina llega a automantenerse, con generación cero de energía útil y, rebasado este punto, el alternador se comporta como generador eléctrico y comienza a generar energía, con potencia creciente hasta la plena carga.

XXX.10.- EQUIPOS AUXILIARES

Una unidad de combustión en lecho fluido presurizado (PFBC) requiere de varios sistemas auxiliares, siendo los más significativos el de:

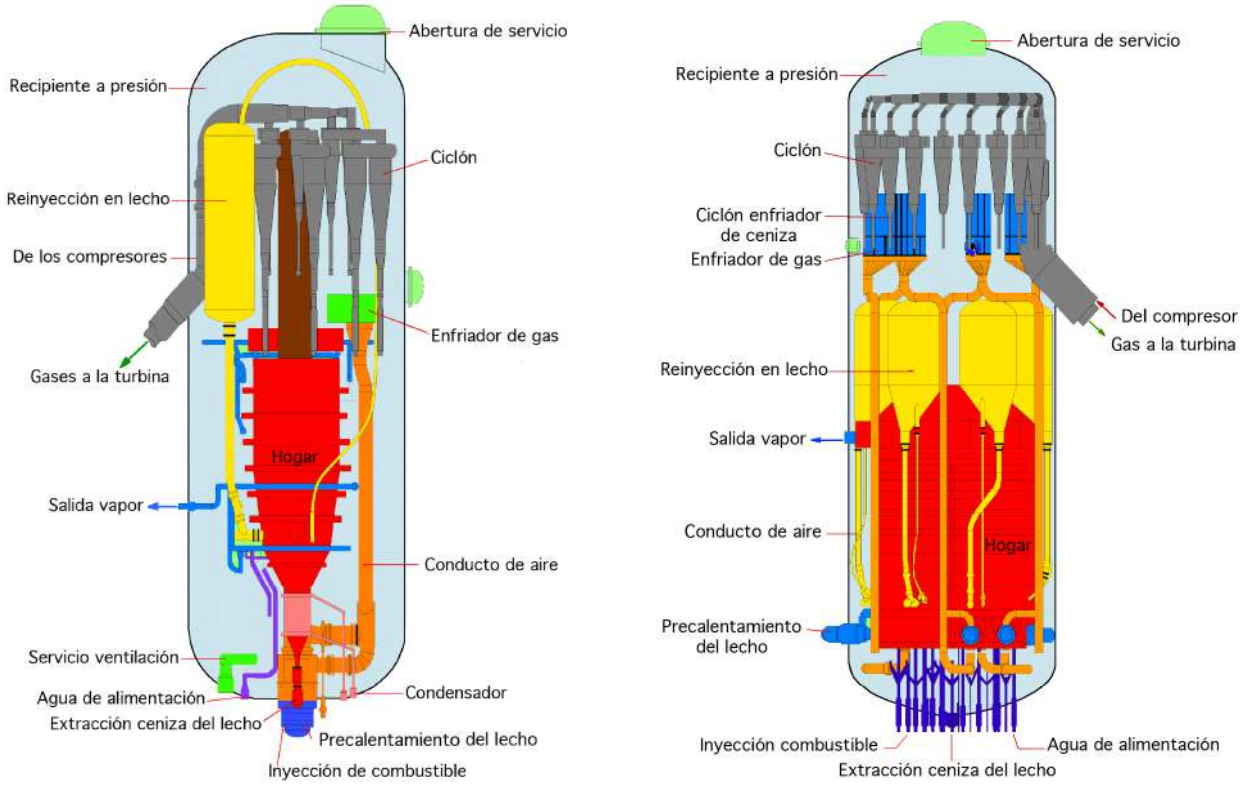
- *la vasija del combustor*
- *la preparación y alimentación del combustible*
- *la alimentación del absorbente*
- *la evacuación de ceniza*
- *el reciclado del material del lecho para control de cargas*
- *la limpieza de los gases calientes*
- *el economizador*
- *el resto del equipo de la planta*

Los componentes principales en una planta de (PFBC) son la

- *turbina de gas*
- *turbina de vapor*
- *caldera o generador de vapor*

.

El resto de los sistemas de la planta forman parte o soportan los componentes principales, de modo que su diseño se debe hacer con mucho cuidado, ya que las pérdidas energéticas en cualquiera de los demás equipos de la planta, distintos de los principales, pueden influir significativamente en la eficiencia global de la instalación y originar un mantenimiento más importante.



a) P 200 (altura 111 ft (33,8 m), diámetro 37,7 ft (11,5 m)) *b) P 800 (altura 164 ft (50 m), diámetro 50,8 ft (15,5 m)*

Presión del condensador 0,29 psi, vapor a 2030, 5 psi

Fig XXX.19.- Combustores PFBC

Vasija del combustor.- Para que el proceso de combustión tenga lugar a presión, el lecho fluidificado debe estar en el interior de una vasija presurizada, junto con algunos de los equipos del sistema, que de estar ubicados en el interior de la vasija, se pueden diseñar para presiones diferenciales menores entre el lado de aire y el lado de los gases; las pérdidas de calor de estos equipos se recuperarían por el aire comburente que les rodea.

Cada componente individual se puede encerrar en su propia vasija presurizada, o reunir la totalidad de los componentes principales en un único contenedor.

En la unidad PFBC de la planta Tidd, Ohio, USA, la vasija del combustor es un recipiente cilíndrico vertical de 44 ft (13,4 m) de diámetro y 68 ft (20,7 m) de altura, dentro de la cual van dispuestos la caldera, el sistema de reinyección, los ciclones y los enfriadores de ceniza de los ciclones. El recipiente, construido con chapa de acero al C de 2,875" (73 mm) de espesor, tiene un peso de 1340 ton (1215 Tm), incluyendo la mayoría de sus partes internas.

Preparación y alimentación del combustible.- El sistema de preparación y alimentación de combustible debe transportar el carbón desde el parque de almacenamiento hasta la caldera y superar la alta presión del proceso.

Los métodos más comunes de inyección son el: $\begin{cases} \textit{neumático} \\ \textit{de mezcla agua-carbón (hidráulico, lechada, slurry)} \end{cases}$

a) Los *métodos neumáticos* precisan de algún medio para inertizar el combustible y de una fuente de suministro de aire presurizado para el transporte correspondiente, siendo la erosión un problema.

b) Las *mezclas agua-carbón* son inertes y fluidas; si una de estas mezclas, con un contenido en humedad inferior al 30% en peso, se puede bombear, la humedad influye poco en la eficiencia, ya que 1/3 de la energía utilizada para su vaporización se puede recuperar en la turbina de gas.

Las mezclas *agua-carbón* $\begin{cases} \textit{- se queman con mayor uniformidad} \\ \textit{- producen temperaturas más homogéneas en el lecho} \\ \textit{- requieren menos puntos de alimentación al lecho} \end{cases}$, en comparación con los requerimientos de los métodos neumáticos.

El diseño de un sistema óptimo depende de la ceniza y del S que tenga el carbón:

- En combustibles con bajo contenido en ceniza, las mezclas agua-carbón resultan siempre ventajosas

- En combustibles con elevado contenido en ceniza, la utilización del método de mezclas implica mayores cantidades de agua en las mezclas agua-carbón, lo que afecta negativamente a la eficiencia, siendo más atractivo el método neumático

En la planta experimental Tidd se utiliza una mezcla *agua-carbón* con un 25% de agua en peso, denominada pasta de *agua-carbón* (CWP); el carbón se recibe con un tamaño máximo de 0,75"

(19,1 mm) y mediante una trituradora se reduce a tamaños más o menos finos, para formar una pasta susceptible de ser bombeada; a la salida de la trituradora, el carbón y el agua se ponen en contacto de forma controlada, para formar la mezcla CWP que se almacena en una tolva en constante agitación, hasta que se bombea hacia la caldera mediante bombas de pistones, de inyección de combustible, similares a las utilizadas en las industrias del cemento y hormigón.

Cada bomba alimenta su propia tobera y en las proximidades de la boquilla se inyecta aire comprimido para fraccionar el flujo de pasta (CWP), conforme va entrado en el lecho para su combustión.

Alimentación del absorbente.- Como los absorbentes no son combustibles, el mayor desafío que presenta el diseño de un sistema de alimentación de absorbente es atravesar la presión del proceso de combustión.

Normalmente se utilizan sistemas neumáticos de alimentación, pero cuando los carbones tienen poca ceniza y bajo contenido de S, para alcanzar la desulfuración se precisan cantidades muy pequeñas de absorbente que se mezcla con el combustible, integrándose en la CWP con el fin de simplificar al máximo los sistemas alimentadores. En la alimentación neumática, el absorbente se tritura hasta un tamaño máximo de 0,125" (3,18 mm), se seca y lleva a un sistema de tolvas esclusa, mediante transporte neumático de fase $\begin{cases} \text{- lenta, ó} \\ \text{- diluida} \end{cases}$

a) Los sistemas de fase densa necesitan presiones de aire de transporte muy superiores a la presión de operación del proceso y flujos de aire con caudal reducido por lo que a velocidades más pequeñas se minimizan los problemas de erosión.

b) Los sistemas de fase diluida requieren presiones mucho más bajas, respecto a las de operación del lecho y emplean flujos de aire significativos; pueden ser de dos tipos de alimentación $\begin{cases} \text{- intermitente} \\ \text{- continua} \end{cases}$

- Los sistemas de alimentación intermitente, tienen las tolvas de esclusa secuenciadas de forma que, mientras una se va llenando de absorbente, la otra, llena, se presuriza y el material que alimenta la caldera se procesa, a través de un sistema de tuberías de transporte; el cambio secuencial de una a otra de las tolvas implica una breve interrupción en el suministro de absorbente al lecho.

- Los sistemas de alimentación continua, tienen una tolva principal que se mantiene a la presión del proceso, y otra tolva más pequeña acoplada directamente encima de la tolva principal, que se llena, presuriza, descarga en la tolva principal, despresuriza y se vuelve a llenar, repitiendo el ciclo operativo, no existiendo interrupciones en el flujo del absorbente, hacia el lecho fluidificado presurizado, por lo que se prefiere este sistema de alimentación que, a su vez, tiene un mantenimiento más simple.

El aire para los sistemas de transporte del absorbente se toma de la vasija del combustor y se presuriza mediante un compresor.

Reinyección en el lecho.- La carga de la unidad se controla modificando el nivel del lecho, mediante un sistema de reinyección de partículas que transporta neumáticamente el material procedente de la caldera, (durante los períodos de reducción de la carga) y lo almacena en tolvas ubicadas en el interior de la vasija del combustor.

Cuando se desea incrementar la carga, el sistema vuelve a reinyectar ese material en la caldera, a través de una válvula tipo L, entre la tolva y la entrada al lecho.

Limpieza de humos.- En las plantas de (PFBC), los humos calientes que salen de la caldera cargados de ceniza en polvo, se limpian antes de ser introducidos en la turbina de gas.

Son varios los métodos existentes que se encuentran en fase experimental para la depuración de estos humos calientes, pero la separación de partículas sólidas en suspensión se ha conseguido, con bastante éxito, mediante ciclones de alta eficiencia que limpian los humos lo suficiente para ser utilizados en la turbina de gas; sin embargo, para cumplir las exigencias en cuanto a emisiones, hay que limpiarlos aún más mediante un precipitador electrostático o filtros de sacos.

En la primera generación de plantas de (PFBC) se empleaban ciclones para la limpieza de humos, pero no dieron el resultado adecuado en los diseños avanzados de este tipo de plantas.

Si queda algo de ceniza en polvo en los humos, estará expuesta a temperaturas superiores a la de su fusión, con lo que se plantean problemas graves en la turbina de gas.

Si en las plantas de (PFBC) de primera generación se consiguiese desarrollar un método fiable para limpiar y depurar los humos calientes de forma eficiente, no sólo se podría eliminar el precipitador electrostático o el filtro de sacos, sino que se facilitaría el camino para utilizar mayores temperaturas de entrada en la turbina de gas (plantas avanzadas de (PFBC), Fig XXX.15).

La limpieza y depuración de humos calientes constituye una tecnología clave para el desarrollo de plantas avanzadas de (PFBC).

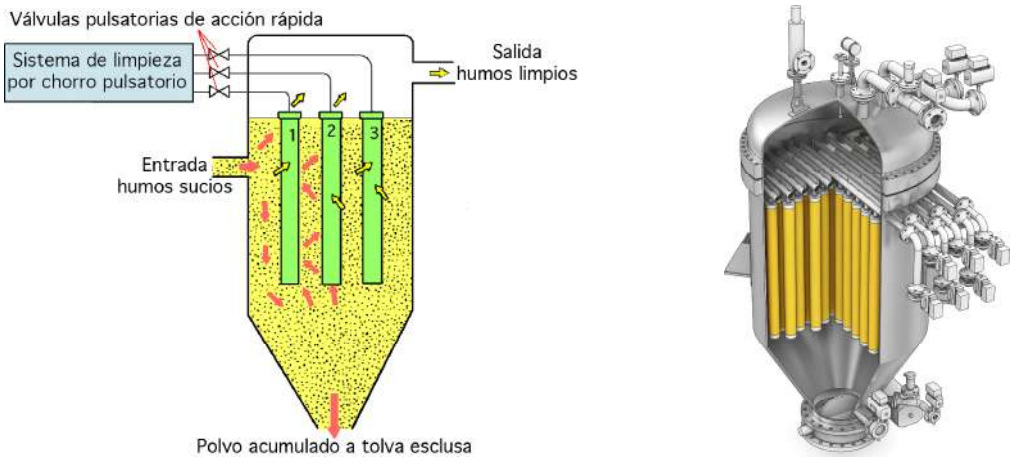


Fig XXX.19.- Filtro de bujías para la depuración de gases a altas temperaturas

Filtros de bujías.- Con ellos se han realizado multitud de ensayos y en una gran parte se han producido fallos asociados a la ciclicidad térmica y a las tensiones inducidas en el interior de las bujías durante la fase de retropulsación de limpieza; en la Fig XXX.19 se presenta un filtro de bujías con el recipiente a presión, descarga de sólidos, tuberías, filtros y otros elementos.

Filtros candela.- Cada filtro candela se compone de millones de fibras de cerámica densamente compactadas y embaladas en un espacio anular de 2“ entre dos tubos huecos concéntricos cerrados en un extremo (CCFC). Las candelas se instalan verticalmente y están agrupadas en el interior de un recipiente a presión, circulando los gases horizontalmente a través del filtro.

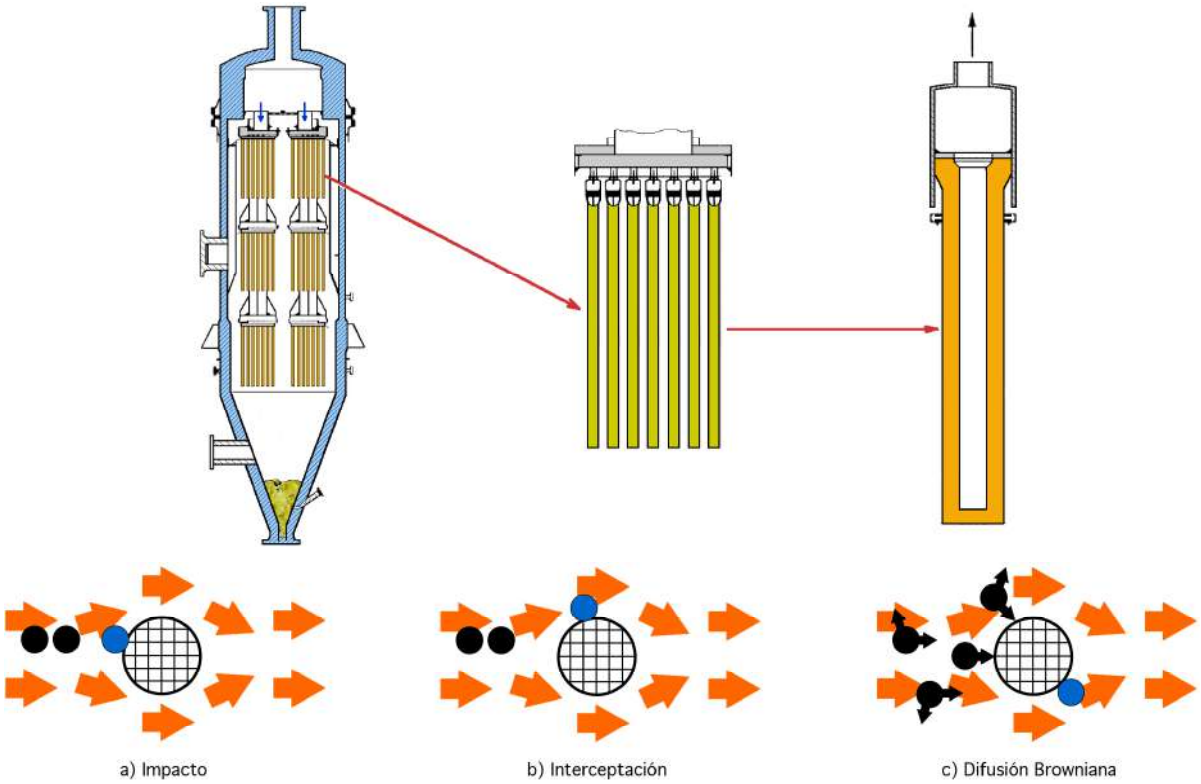


Fig XXX.20.- Diseño sistema filtro candela Westinghouse y sistema de eliminación de partículas

El gas sucio cargado de partículas entra en el recipiente a presión y fluye exteriormente alrededor de las candelas y a través de la pared del filtro hacia el interior, dejando el polvo arrastrado en el exterior de la candela. Las partículas se recogen en las fibras cerámicas por diversos medios, y se aglutinan y drenan hacia abajo a través de un lecho filtrante, extrayéndose mediante tolvas de bloqueo; los filtros candela eliminan las:

- Partículas mayores de $\begin{cases} 3 \text{ micras por impacto} \\ 1{,}2 \text{ micras por interceptación} \end{cases}$

- Submicrónicas por difusión browniana que provoca que éstas choquen finalmente con alguna fibra, requiriéndose para ello bajas velocidades de difusión

Filtros de tubos cerámicos.- El de B&W es parecido al diseño del filtro de bujías cerámicas, con la diferencia de que los humos limpios circulan por el exterior de los tubos, en lugar de hacerlo por su interior, Fig XXX.22; ésto implica que las tensiones térmicas inducidas en los tubos, por la retropulsación de limpieza, se producen en el sentido más favorable de la compresión.

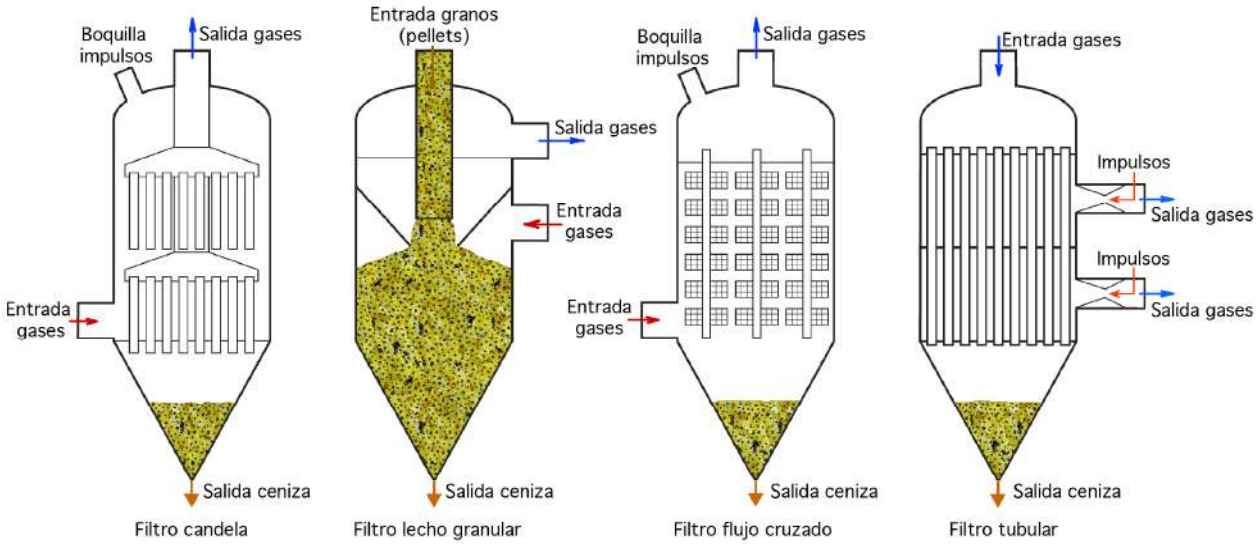


Fig XXX.21.- Disposiciones de filtros cerámicos

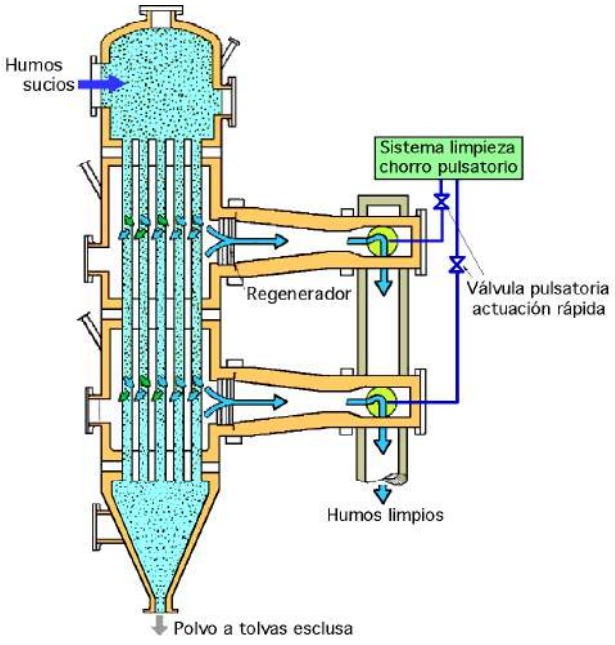


Fig XXX.22.- Filtro de tubos cerámicos de B&W para la depuración de gases a alta temperatura

El material cerámico debe ser lo suficientemente poroso para permitir la penetración de los gases durante la captura de partículas finas, permitiendo la eliminación de sólidos y la recuperación de la caída de presión; también debe ser resistente al ataque químico a alta temperatura del medio ambiente reductor y tener la suficiente ductilidad para resistir a los choques térmicos y mecánicos

impuestas durante el funcionamiento.

Evacuación de la ceniza.- En las instalaciones (PFBC) se utilizan dos sistemas de evacuación de ceniza, según que ésta proceda del $\begin{cases} \text{- } \textit{sistema de limpieza de gases} \\ \text{- } \textit{lecho} \end{cases}$

a) La procedente del sistema de limpieza de gases se evacúa y transporta desde la vasija del combustor hacia un silo atmosférico; para superar la dificultad que supone manipular esta ceniza a temperaturas de 1580ºF (860ºC), y al mismo tiempo reducir su presión hasta la atmosférica, la ceniza se enfría y despresuriza hasta unos niveles aceptables para su manipulación, antes de salir de la vasija del combustor, y el posterior transporte hasta el silo atmosférico de almacenamiento.

b) La procedente del lecho se recoge y enfría en la parte inferior de la caldera y, para mantener el nivel adecuado del lecho, se evacúa a un ritmo en consonancia con el régimen de alimentación de combustible; esta ceniza se puede:

- Llevar a la presión atmosférica y manipular mediante cintas transportadoras

- Transportar mediante un sistema neumático de fase densa hasta el silo de almacenamiento

XXX.11.- FUNCIONAMIENTO DE UNIDADES DE (PFBC)

Control.- Debido a la relación existente entre la caldera de (PFBC) y la turbina de gas, el control de un ciclo combinado con este tipo de planta es más complicado que el de una planta convencional que quema carbón. El control debe regular el proceso del lecho fluidificado y mantener, al mismo tiempo, la compatibilidad operativa entre la turbina de vapor y la turbina de gas.

El proceso se controla variando el nivel del lecho, de forma que cuando éste sube, la carga aumenta y si el nivel del lecho baja, la carga se reduce.

La introducción de más material al lecho reduce su temperatura. A bajas cargas, hay suficiente $aire_{exceso}$ para que se pueda soportar un incremento en la combustión.

Si la temperatura del lecho es prácticamente constante y el nivel del lecho sube, habrá más superficie de transferencia de calor sumergida en el mismo, por lo que:

- Un aumento del régimen de transferencia de calor exige un flujo añadido de agua de alimentación, aumentando la producción de vapor

- Con este incremento en los flujos de agua y vapor, la temperatura del lecho tendería a disminuir, pero se corrige la combustión, convenientemente, para mantener el nuevo régimen

Cuando el flujo de vapor aumenta, la potencia en la turbina de vapor aumenta, y también se incrementa la potencia en la turbina de gas; ésto es así porque:

- La superficie termointercambiadora que hay por encima del nivel del lecho disminuye y, por tanto, aumenta la temperatura de los gases que salen de la caldera, lo que implica un aumento de la potencia en la turbina de gas

- Este incremento de potencia en la turbina de gas hace que esta turbina (que facilita un flujo de aire constante) aumente la presión del aire, aumentando el flujo másico de éste hacia el lecho fluidificado

- Al incrementarse la potencia hacia el compresor, se produce también un aumento en la potencia requerida por la turbina de AP, directamente acoplada al alternador

El resultado de todo ello es una $\begin{cases} \text{- reducción en la potencia del motor hasta el 25\% de la nominal, ó} \\ \text{- producción de electricidad entre el 25÷100\% de la nominal} \end{cases}$, continuando el proceso, hasta que se alcanzan las condiciones correspondientes a plena carga, determinada por el máximo flujo de aire que se puede obtener con la turbina de gas y con el mínimo de $aire_{exceso}$ permitido.

Puesta en servicio.- Para iniciar la puesta en servicio de una unidad (PFBC), un lecho delgado se fluidifica y calienta con un precalentador de aire, quemando aceite en una gran cantidad de $aire_{exceso}$; durante el proceso, una porción del aire se desvía temporalmente a través del precalentador de aire. Los gases calientes se dirigen hacia el lecho que se está poniendo en servicio, a través del sistema de distribución de aire. Cuando el material del lecho alcanza la temperatura de ignición del carbón, la lechada *carbón-agua* (CWP) se inyecta y el precalentador de aire se retira de servicio. Para establecer el flujo de aire requerido durante la puesta en servicio, la turbina de gas se acciona por el alternador.

A medida que la cantidad de gases aumenta, la energía puesta a disposición de la turbina de gas también se incrementa y, en consecuencia, la potencia eléctrica tomada de la red por el alternador, para accionar la turbina de gas, disminuye. Así se llega a una situación en la que la turbina de gas se automantiene y pasa a accionar el alternador, iniciándose la generación de electricidad.

En el caso de calderas de un paso, el separador vertical de *agua-vapor* y la bomba de recirculación se utilizan hasta un 40% de la carga, aproximadamente; por encima de este 40%, la caldera pasa a operar como una de paso único y la bomba de recirculación se retira de servicio.

El flujo del agua de alimentación se establece entre el $5 \div 10\%$ del correspondiente a plena carga. Una vez que el agua ha entrado en la caldera, la bomba de recirculación la impulsa por las superficies de cerramiento y del evaporador, para mantener un flujo mínimo de refrigeración.

Cuando la vaporización alcanza el 40% de la nominal, las purgas del separador vertical se envían al condensador, como agua sobrante. Durante el tiempo en que está funcionando la bomba de recirculación, el flujo de agua de alimentación mantiene el nivel de agua en el separador; si la bomba se retira de servicio, el flujo del agua de alimentación controlará la temperatura del vapor.

El nivel de agua se tiene que mantener por encima de un mínimo que permita la puesta en servicio de la bomba de recirculación, si fuese necesario. Hasta llegar a disponer del caudal, temperatura y presión de vapor para efectuar la puesta en servicio de la turbina de vapor, el aumento de presión se controla por un sistema bypass y una vez alcanzada la velocidad nominal en la turbina de vapor, las válvulas de admisión de ésta controlarán la presión.

Operación normal y cambio de carga.- El transitorio correspondiente al cambio de carga se realiza modificando el nivel del lecho y se hace con un gradiente del orden del 2% por minuto, aunque se puede llegar a gradientes del 4%.

La acción de subir o bajar el nivel del lecho fluidificado se concreta en disponer de más o menos superficie sumergida en el mismo; los valores menores de transferencia convectiva de calor se corresponden con las superficies que están por encima del lecho, lo que reduce el calor hacia el ciclo de vapor y disminuye además la temperatura de los gases que se dirigen a la turbina de gas.

Los valores de la combustión se ajustan para mantener una temperatura del lecho constante, igual a 1480ºF (860ºC), con un determinado $aire_{exceso}$.

El flujo de agua de alimentación se regula para:

- Proteger las superficies de transferencia de calor

- Absorber la adecuada cantidad de calor del lecho

- Controlar la temperatura del vapor a través del atomizador atemperador

La presión del vapor se regula mediante las válvulas de admisión de la turbina de vapor.

Retirada de servicio o parada.- Para efectuar la parada de la unidad, o proceder a su retirada de servicio, hay que reducir el lecho a su mínimo nivel, interrumpiendo el suministro de combustible y permitiendo que la turbina de gas baje libremente su potencia. De esta forma se consigue refrigerar todo el material residual del lecho fluidificado, para detener finalmente el proceso de combustión.

En el momento adecuado, se cierran las válvulas interceptadoras/bipaso de humos y se dispara o desacopla la turbina de gas.

Operaciones anormales.- En el caso de un *disparo de la turbina de gas,* hay que incomunicar el combustor respecto a la turbina de gas, mediante una válvula interceptadora/bipaso a la entrada de la turbina. La pérdida del flujo de aire provocará el hundimiento del lecho caliente, por lo que hay que mantener un flujo de agua de alimentación suficiente, que proteja las superficies sumergidas en el lecho caliente. También se diseñan dispositivos para despresurizar la vasija del combustor, impidiendo la generación de gases combustibles, a fin de enfriar y evacuar el material del lecho, con vistas a dejarlo preparado para una posterior puesta en servicio.

Un *disparo de la turbina de vapor* provoca el bipaso del flujo de vapor hacia el condensador, a la vez que el resto de vapor se expansiona a la atmósfera, por medio de una válvula de seguridad que se encarga de regular la presión del vapor; así se reduce el aporte de calor rápidamente y la unidad se para de forma normal.

Si los servicios de la planta se quedan sin energía eléctrica, se produce una situación que se trata de forma análoga a la de un *disparo de la turbina de gas*. Si las bombas de agua de alimentación no están accionadas por turbinas de vapor, se precisa de un sistema especial de realimentación, con el que se pueda suministrar el flujo de agua necesario para proteger las superficies termointercambiadoras, en condiciones aceptables.

REFERENCIAS CAP XXX.- COMBUSTIÓN EN LECHO FLUIDO PRESURIZADO

IEA Clean Coal Centre | Pressurized fluidized bed combustion (PFBC).- http://www.iea-coal.org.uk/site/ieacoal/clean-coal-technologies-pages/clean-coal-technologies-pressurized-fluidized-bed-combustion-pfbc

W.F. Podolski.- PRESSURIZED FLUIDIZED BED COMBUSTIÓN TECHNOLOGY.- Noyes Data, Park Ridge, New Jersey, 1989

D. Geldart.- GAS FLUIDIFICATION TECHNOLOGY.- Wiley, New York, 1986

H.R. Hoy.- PART-LOAD OPERATION OF PRESSURIZED FLUIDIZED BED COMBUSTORS: A REVIEW.- 9th International Fluidized Bed Combustion Conference, Boston, 1987

J. Stringer, EPRI.- CURRENT INFORMATION ON METAL WASTAGE IN FLUIDIZED BED COMBUSTORS.- 9th International Fluidized Bed Combustion Conference, Boston, 1987

F.L. Kinsinger, D.K. MacDonald.- COMBINED CYCLE USING PFBC.- American Power Conference, Chicago, 1988

D.K. McDonald, P.S. Weitzel.- THE PFBC BOILER FOR AEP's TIDD PLANT; DESIGN FOR PERFORMANCE AND OPERATION.- EPRI Seminar on Fluidized Bed Combustion Technology for Utility Applications, Palo Alto, California, 1988

R.K. Clark.- COMPARATIVE PERFORMANCE OF THE GRIMETHORPE PFBC COMBUSTOR WHEN FED UIT DRY COAL AND COAL WATER MIXTURES.- 10th International Fluidized Bed Conference, San Francisco, 1989

D. Boersma.- NO_x EMISSIONS FROM PRESSURIZED FLUIDIZED BED COMBUSTIÓN.- 10th International Fluidized Bed Conference, San Francisco, 1989

F.L. Kinsinger.- PRESSURIZED FLUIDIZED BED COMBUSTION. UTILITY BOILER IN A PRESSURE VESSEL.- National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors, Vol. 45, N°. 8, April 1989

A.J. Minchener.- NO_x STUDIES ON THE PFBC FACILITY AT THE BRITISH COAL RESEARCH ESTABLISHMENT.- 10th International Fluidized Bed Conference, San Francisco, 1989

M. Mudd.- STATUS OF AEP's TIDD PFBC DEMOSTRATION PLANT.- 10th International Fluidized Bed Conference, San Francisco, 1989

P.S. Weitzel.- THE USE OF ADVANCED CERAMICS FOR HOT GAS CLEAN UP.- AIChE Annual Meeting, Chicago, 1990

B&W.- STEAM : ITS GENERATION AND USE.- 40th Edition, chapter 29.- The Babcock and Wilcox Company, Barberton, Ohio, USA, 1992

Basu P., Fraser S.A.-CIRCULATING FLUIDIZED BED BOILERS.- Butterworth-Heinemann, Boston, 349 pp.(1991).

Caputo A.C., Pelagagge P.M.- RDF PRODUCTION PLANTS: I DESIGN AND COSTS.- Applied Thermal Engineering, 22, 423-437 (2002a).

Caputo A.C., Pelagagge P.M.- RDF PRODUCTION PLANTS: II ECONOMICS AND PROFITABILITY.- Applied Thermal Engineering, 22, 439-448 (2002b).

Nielsen H.P., Frandsen F.J., Dam-Johansen K., Baxter L.L.- THE IMPLICATIONS OF CHLORINE-ASSOCIATED CORROSION ON THE OPERATION OF BIOMASS-FIRED BOILERS.- Prog. Energy and Combustion Sci, 26, 283-298 (2000).

Piao G., Aono S., Mori S., Deguchi S., Fujima Y., Kondoh M., Yamaguchi M.- COMBUSITON OF REFUSE DERIVED FUEL IN A FLUIDIZED BED.- Waste Management, 18509-572(1998).

Tagashira K., Torii I., Myouyou K., Takeda K., Mizuko T., Tokushita Y.- COMBUSTION CHARACTERISTICS AND DIOXINE BEHAVIOR OF WASTE FIRED CFB.- Chemical Engineering Science, 34, 5599-5607 (1999).

Shun D.- DEVELOPMENT OF CIRCULATING-FLUIDIZED-BED COAL COMBUSTION TECHNOLOGY FOR COGENERATION.- Korea Institute of Energy Research Kier-973403, Ministry of Trade Industry and Energy, 331 pp. (1997).

Shun D.- DEVELOPMENT OF CIRCULATING FLUIDIZED BED COMBUSTION AND EMISSION CONTROL TECHNOLOGY.- Korea Institute of Energy Research KE-A03707, Ministry of Energy and Resources, 144pp. (2000).

Gary J. Stiegel.- GASIFICATION.-Versatile Solutions DOE's Gasification Program Overview Version O.- October 2007, Gasification Technology Manager National Energy Technology Laboratory, US Department of Energy

L. M. Bartone, Jr.- INDUSTRIAL SIZE GASIFICATION FOR SYNGAS, SUBSTITUTE NATURAL GAS AND POWER PRODUCTION.-DOE/NETL-401/040607/FR-53769211.- Office of Systems Analysis and Planning Support.- Worley Parsons Group Inc.- National Energy Technology Laboratory.- April 2007 www.netl.doe.gov

J. Stringer, R. McCarron, A. M. Beltran, A. J. Minchener, J. S. Anderson, R. A. Mountford.- RESULTS FROM THE TURBINE MATERIALS TESTING PROGRAM ON THE IEA GRIMETHORPE EXPERIMENTAL PFBC FACILITY pp. 772-793 in Proc. Eighth Intl. Conf. on Fluidized-Bed Combustion, Vol. II, DOE/METC-85/6021, July 1985.

TIDD PFBC DEMONSTRATION PROJECT.- Clean Coal Technology Demonstration Program Project Performance Summary, Ohio Power Company, Report N°. DOE/FE-0398, June 1999.

J. M. Wheeldon, R. A. Brown, R. R. McKinsey, S. G. Dawes.- AN EVALUATION OF THE UNITED KINGDOM CLEAN COAL POWER GENERATION GROUP'S AIR-BLOWN GASIFICATION CYCLE.- pp. 279-287 in Proc. Pittsburgh Coal Conference (1996).

K. Omata, L. Anderson.- KARITA 360 MW PFBC AN IMMINENT PROSPECT.- Modern Power Systems, 17 (4) 33-38 (1997).

S. Kaneko, M. Kinoshita, Y. Hyakutake.- COMMERCIAL OPERATION OF THE FIRST PFBC PLANT WITH HIGH-TEMPERATURE CERAMIC FILTER.- presented at Power-Gen Intl.'98, December 9-11, 1998, Orlando, Florida.

S. J. Provol.- AHLSTROM PYROFLOW PRESSURIZED CIRCULATING FLUIDIZED BED TECHNOLOGY: TECHNICAL DEVELOPMENT STATUS AND PREPARATION FOR COMMERCIAL DEMONSTRATION.- pp. 335-343 in Proc. 1991 Intl. Conf. on Fluidized-Bed Combustion, E. J. Anthony, Ed., ASME (1991).

G. Dehn, H. Meier, H. Möllenhoff, H. Rehwinkel, G. von Wedel.- 15 MWTH PFBC OPERATING EXPERIENCE WITH THE DEUTSCHE BABCOCK PILOT PLANT AND OUTLOOK ON FUTURE DEVELOPMENT.- pp. 345-362 in Proc. 1991 Intl. Conf. on Fluidized-Bed Combustion, E. J. Anthony, Ed., ASME (1991).

M. Shimizu, K. Horiuchi.- CURRENT OPERATING STATUS OF OSAKI POWER PLANT.- pp. 274-282 in Proc. Conference: Fourth Advanced Clean Coal Technology International Symposium, Tokyo, Japan, January 2001.

M. Kubota.- STATUS OF OPERATION OF PFBC COMBINED CYCLE POWER GENERATION PLANT.- pp. 252-256 in Proc. Conference: Fourth Advanced Clean Coal Technology International Symposium, Tokyo, Japan, January 2001.

P. Almqvist, A. Dahl, and B. Nordmark.- COMMISSIONING OF THE PFBC PLANT IN VÄRTAN, STOCKHOLM.- pp. 795-800 in Proc. 1991 Intl. Conf. on Fluidized-Bed Combustion, E. J. Anthony, Ed., ASME (1991).

J. Anderson, S. A. Jansson.- COMMISSIONING EXPERIENCE FROM THREE PFBC PLANTS.- pp. 787-794 in Proc. 1991 Intl. Conf. on Fluidized-Bed Combustion, E. J. Anthony, Ed., ASME (1991).

A. Dahl.- OPERATION EXPERIENCE OF THE PFBC PLANT AT VÄRTAN, STOCKHOLM.- pp. 931-935 in Proc. 12th Int. Conf. on Fluidized-Bed Combustion, ASME (1993).

M. Marrocco, J. E. Hollback, H. K. Stogran.- TIDD PFBC DEMONSTRATION PLANT START-UP.- pp. 801-804 in Proc. 1991 Intl. Conf. on Fluidized-Bed Combustion, E. J. Anthony, Ed., ASME (1991).