XVII.- CALDERAS DE LECHO FLUIDIFICADO

pfernandezdiez.es

Tecnología de la combustión en lecho fluidificado	*607*
Antecedentes	*609*
Comparación con otros métodos de combustión	*611*
Ventajas de la combustión en lecho fluidificado	*613*
Emisiones reducidas de SO_2 y NO_x	*614*
Ceniza del combustible	*614*
Combustibles de bajo poder calorífico y preparación del combustible	*614*
Calderas de lecho fluidificado a presión atmosférica:	*615*
Calderas de lecho fluidificado burbujeante (BFB)	*615*
Calderas de lecho fluidificado circulante, (CFB)	*618*
Emisiones	*618*
Dióxido de azufre, SO_2	*619*
Óxidos de nitrógeno NO_x	*619*
Combustión estratificada	*620*
CO e hidrocarburos	*621*
Partículas	*621*
Diseño del hogar de una caldera de lecho fluidificado	*621*
Requisitos de combustión	*622*
Caracterización y medida de partículas	*624*
Caída de presión en el lecho	*625*
Lecho burbujeante	*625*
Lecho circulante	*626*
Transferencia de calor	*627*
Lecho burbujeante	*628*
Desde lecho denso a bancos de tubos y a paredes	*628*
Desde la zona de desprendimiento a tubos y a paredes	*630*
En la parte superior del hogar	*630*
Lecho circulante	*630*
Desde el lecho denso	*631*
Desde la zona de desprendimiento y la parte superior del hogar	*631*
Balances de calor y de materia	*632*
Balance de materia en lechos fluidificados circulantes y en lechos burbujeantes	*632*
Balance térmico	*635*
Configuración de calderas de lecho fluidificado	*637*
Placa distribuidora y casquetes de burbujeo	*637*
Sistema de aire secundario	*638*
Cerramiento de la caldera	*638*
Sistema de alimentación del combustible	*638*
Sistemas de alimentación inferior y superior	*639*
Sistema de alimentación del absorbente y de evacuación de la ceniza del lecho	*640*
Sopladores	*641*
Diseño de calderas de lecho fluidificado	*641*
Remodelación con lechos burbujeante	*641*
Calderas de lecho fluidificado circulante	*642*
Puesta en servicio de las calderas de lecho fluidificado	*647*
Control de la temperatura del lecho burbujeante y circulante	*651*
Control de la densidad del lecho	*652*
Control del aire secundario	*654*
Referencias	*656*

XVII.1.- TECNOLOGÍA DE LA COMBUSTIÓN EN LECHO FLUIDIFICADO

La tecnología de la combustión en lecho fluidificado (FBC) presenta diversas ventajas para la generación de vapor, en la $\begin{cases} \text{- combustión de combustibles } \begin{cases} \text{sólidos} \\ \text{residuales} \end{cases} \\ \text{- recuperación de energía de otros procesos} \end{cases}$

El proceso consiste en una mezcla de partículas sólidas suspendidas en un flujo gaseoso ascendente, que en conjunto presenta propiedades fluidas.

La combustión tiene lugar en el lecho con $\begin{cases} \text{- altas transferencias caloríficas al hogar de la unidad} \\ \text{- bajas temperaturas de combustión} \end{cases}$

Las ventajas del proceso radican en $\begin{cases} \text{- la flexibilidad del combustible a utilizar} \\ \text{- las reducidas emisiones que se producen} \end{cases}$

Para visualizar el proceso de fluidificación, en la Fig XVII.1a se presenta un recipiente que tiene, en su parte inferior, una cámara de suministro de aire coronada por una placa distribuidora que asegura el flujo de aire a través del lecho. La cámara superior, por encima del nivel del lecho, está llena de arena o de un material granular de forma que:

- Se hace circular un pequeño flujo de aire a través de la placa distribuidora hacia la arena estática que tiene encima, pasando por los huecos de la misma. A bajas velocidades del flujo de aire, la fuerza que se ejerce sobre las partículas de arena no es grande, por lo que éstas permanecen estáticas, lo que caracteriza el lecho fijo o colapsado, representado en la Fig XVII.1b

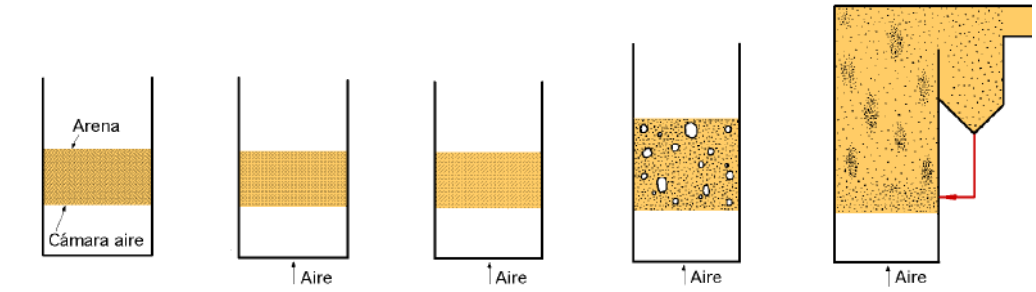
- Al aumentar el flujo de aire, el fluido ejerce una fuerza mayor sobre las partículas de arena reduciendo la fuerza de contacto entre las mismas, llegándose a un equilibrio entre las fuerzas de arrastre y gravedad, momento en el que las partículas quedan en suspensión dentro del flujo ascendente de aire

- El instante en el que el lecho comienza a comportarse como un fluido caracteriza la condición mínima de fluidificación que, una vez superada, Fig XVII.1c, presenta un incremento del volumen del lecho, respecto al del lecho no fluidificado

- Si el flujo de aire sigue aumentando, el lecho se hace menos uniforme y se forman burbujas de aire, por lo que el lecho comienza a ser algo turbulento (etapa de lecho burbujeante), Fig XVII.1d. En esta situación, el volumen ocupado por la mezcla (sólidos + aire) se incrementa de forma importante, observándose un nivel de lecho perceptible y una transición entre el lecho y su espacio superior perfectamente diáfana

- Al incrementar aún más el flujo de aire, las burbujas se hacen más grandes y se empiezan a combinar entre sí, configurando grandes huecos en el seno del lecho, al tiempo que los sólidos presentes están en contacto como grupos altamente concentrados, (lecho fluidificado turbulento)

- Si a la salida del recinto los sólidos se capturan y devuelven al lecho, se dice que circulan a lo largo de un bucle; esta etapa se identifica como lecho fluidificado circulante, Fig XVII.1



a) Placa distribuidora *b) Lecho estático* *c) Fluidificación mínima* *d) Lecho burbujeante* *e) Lecho circulante*

Fig XVII.1.- Condiciones típicas de lecho fluidificado

En el *lecho fluidificado circulante,* al contrario que en el lecho burbujeante, no hay una clara transición entre el lecho denso del fondo del recipiente y la zona diluida superior, decreciendo gradualmente la concentración de sólidos entre estas dos regiones.

El peso de los sólidos recirculados desde la salida del recinto hacia la zona del lecho es del orden de cientos de veces el peso del aire que fluye por el sistema, siendo la cantidad de sólidos en el recipiente proporcional a la cantidad de arena recirculada desde el separador de partículas, por lo que la presión diferencial $\begin{cases} \text{- } \textit{aumenta hasta alcanzar el valor necesario para mantener los sólidos en el recipiente} \\ \text{- } \textit{varía entre la parte superior e inferior del recipiente con el flujo de aire, Fig XVI.2} \end{cases}$

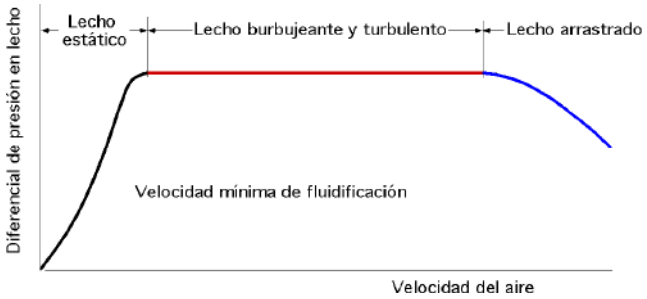


Fig XVII.2.- Influencia de la velocidad del aire sobre la caída de presión a través del lecho

a) Para flujos de aire bajos, la presión diferencial depende sólo de la masa de arena existente en el lecho, y aumenta con el flujo de aire hasta alcanzar la velocidad de fluidificación mínima, en que la arena está en suspensión dentro del flujo de aire, (lecho estático)

b) Para flujos de aire mayores la presión diferencial es constante, hasta que su velocidad se hace lo suficientemente alta como para arrastrar la arena fuera del recipiente, (lecho burbujeante y turbulento)

c) Para flujos de aire mucho mayores, la presión diferencial decrece conforme el sistema pierde masa, (lecho arrastrado)

De las condiciones de fluidificación descritas, para la producción de vapor en plantas termoeléctricas, sólo se utilizan los lechos burbujeantes y los lechos circulantes.

Antecedentes.- Una de las aplicaciones más antiguas del lecho fluidificado utilizaba el carbón

como materia prima granular. El proceso de gasificación del carbón en lecho fluidificado de Fritz Winkler (1920), se utilizó comercialmente para producir gas a partir del carbón que se utilizaba como combustible, o como materia prima para procesos químicos; en la actualidad para producir gas de síntesis, la industria ha encontrado otras alternativas al proceso Winkler, más fáciles y baratas, a partir de gas natural o fuelóleos. Otros trabajos de investigación (1930/40) pusieron de relieve las ventajas del lecho fluidificado y del pirolizador catalítico de fluidos (reactor *sólidos-gas*) para la obtención de gasolinas y otros productos petrolíferos.

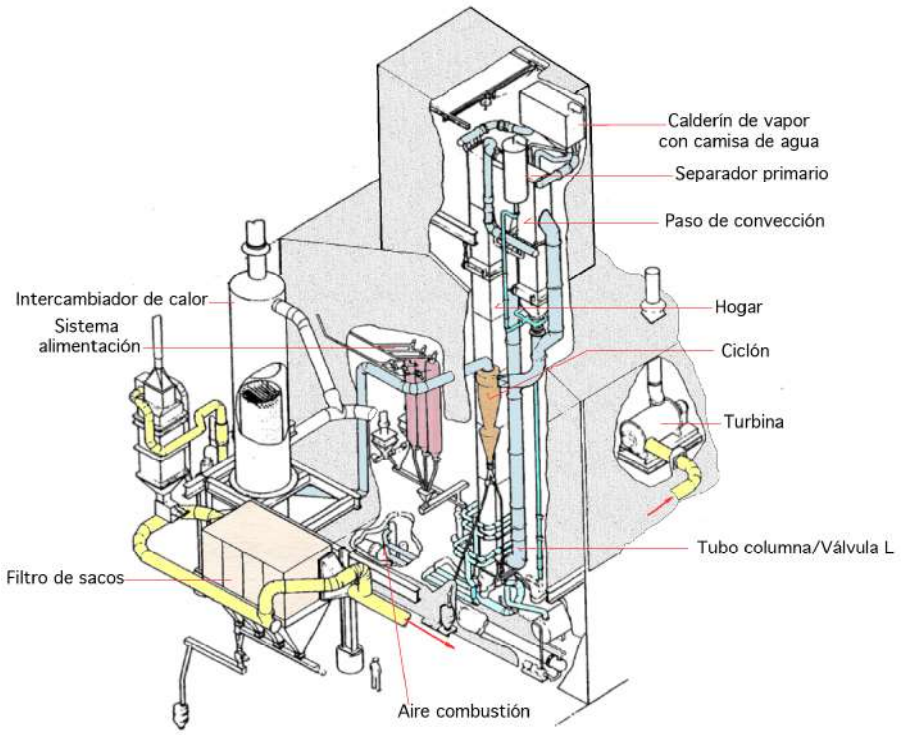


Fig XVII.3.- Planta de ensayo de 2,5 MWt para combustión en lecho fluidificado

En la década de 1960, para reducir las emisiones de SO_2 y de NO_x en las plantas termoeléctricas, se empezó a considerar que los procesos de combustión en lecho fluidificado ofrecían la posibilidad de reducirlas y fue aquí cuando comenzó el desarrollo de la caldera de lecho fluidificado quemando carbón.

En la década de 1970 se realizan estudios para evaluar, en las grandes unidades generadoras de vapor de las plantas termoeléctricas, la aplicación de la combustión en lecho fluidificado a presión atmosférica, (lecho fluido atmosférico).

En 1977 se construye y pone en funcionamiento una unidad de lecho burbujeante de 6 x 6 ft (1,8 x 1,8 m), cuyos resultados han contribuido al avance de la tecnología de calderas de lechos fluidificados burbujeantes atmosféricos. Entre las últimas aplicaciones de lechos burbujeantes alimentados con carbón, se encuentran algunos reequipamientos de remodelación y modernización de antiguas calderas de vapor, que están todavía en explotación.

A finales de la década de 1980, utilizando los conocimientos que se tenían sobre lechos burbujeantes y técnicas de Studsvick, el mercado de calderas de lecho fluido quemando carbón se decantó por los *lechos circulantes*.

Comparación con otros métodos de combustión.- Las cámaras de combustión de lecho fluidificado se utilizan para quemar cualquier tipo de combustible sólido.

En un hogar convencional que quema *carbón pulverizado*, el proceso de combustión consiste en la oxidación de las partículas de combustible (el 70% pasan por el tamiz de 200 mesh), suspendidas en los flujos de aire y gases que existen en el hogar.

El volumen de gases que rodea los quemadores es la zona más caliente del hogar, con temperaturas del orden de $\begin{cases} 3000 \div 3500^\circ F \\ 1650 \div 1927^\circ C \end{cases}$, siendo el tiempo de residencia de las partículas en el hogar el mismo que el de los gases.

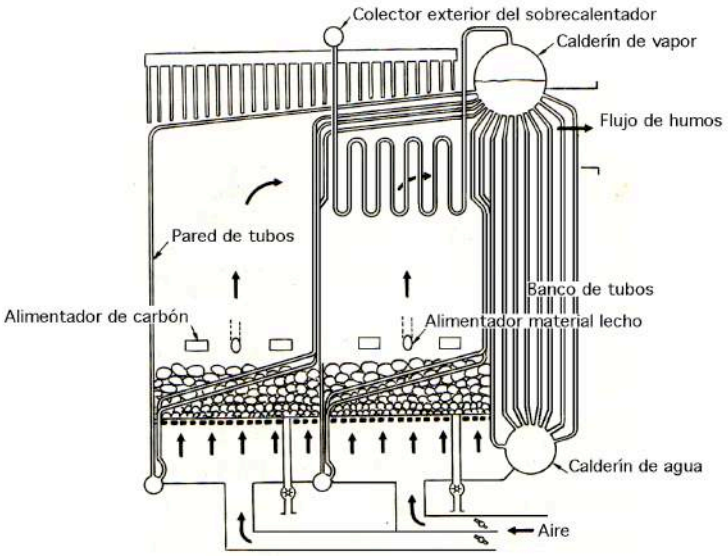


Fig XVII.4.- Caldera de lecho fluidificado

En los *hogares mecánicos* se queman partículas de combustible mucho mayores que las utilizadas en las calderas de carbón pulverizado, siendo el tamaño normal de los carbones bituminosos del orden de 1"÷ 1,25"= (25,4÷ 31,8 mm). La mayor parte del combustible se quema sobre algún tipo de parrilla móvil, con aire y gases pasando a través del lecho de combustible; la temperatura supera los 3000ºF (1650ºC) y el tiempo de residencia queda determinado por la velocidad correspondiente a la parrilla móvil del hogar.

El tamaño del combustible para la *combustión en lechos fluidificados* se sitúa entre el del carbón pulverizado y el del hogar mecánico; para un lecho fluido, el carbón se trocea a un tamaño menor de 0,25" (6,4 mm), pudiéndose utilizar según las propiedades del carbón, otros tamaños como $\begin{cases} > 1{,}25" \ (31{,}8\ mm) \\ < 0{,}125" \ (3{,}18\ mm) \end{cases}$

El carbón se alimenta por la parte baja del hogar.

La densidad del lecho burbujeante es de 45 lb/ft^3 (721 kg/m^3)

La densidad del lecho circulante es de 35 lb/ft^3 (561 kg/m^3)

Los sólidos, en el flujo ascensional de aire y gases, se mantienen a una temperatura de $\begin{cases} 1500 \div 1600^\circ F \\ 816 \div 871^\circ C \end{cases}$

Cuando el combustible se introduce en el lecho se calienta rápidamente y, superada su temperatura de ignición, se enciende y pasa a formar parte de la masa incandescente del hogar.

Los flujos de aire y combustible hacia el lecho denso, en régimen permanente, se controlan de forma que en la combustión se libere la cantidad de calor deseada hacia el hogar, quemándose el combustible en un $aire_{exceso}$ del orden del 20%.

Como consecuencia de $\begin{cases} \text{- } el\ gran\ tiempo\ de\ residencia\ del\ combustible \\ \text{- } la\ alta\ temperatura\ del\ proceso\ de\ transferencia\ de\ masa \end{cases}$, el combustible se puede quemar eficientemente en el hogar de lecho fluidificado, a una temperatura considerablemente inferior a la de los procesos convencionales. Las partículas de combustible se quedan en el lecho denso, hasta que son arrastradas por los gases o se eliminan con los sólidos purgados.

El tamaño de las partículas, conforme arden, se reduce hasta alcanzar uno determinado, en el que se igualan su velocidad y la de los gases, produciéndose a partir de este instante el arrastre de partículas, por lo que el tiempo de residencia dependerá del tamaño inicial de la partícula de combustible y del régimen de reducción de su tamaño por combustión y fricción.

En los *lechos fluidificados burbujeantes*, la combustión tiene lugar en el lecho, debido a la menor velocidad de los gases y al mayor tamaño del combustible alimentado. El tiempo de residencia de las partículas finas del combustible arrastradas por los gases fuera del lecho, aumenta por medio de la captación y reciclado de las partículas hacia el hogar.

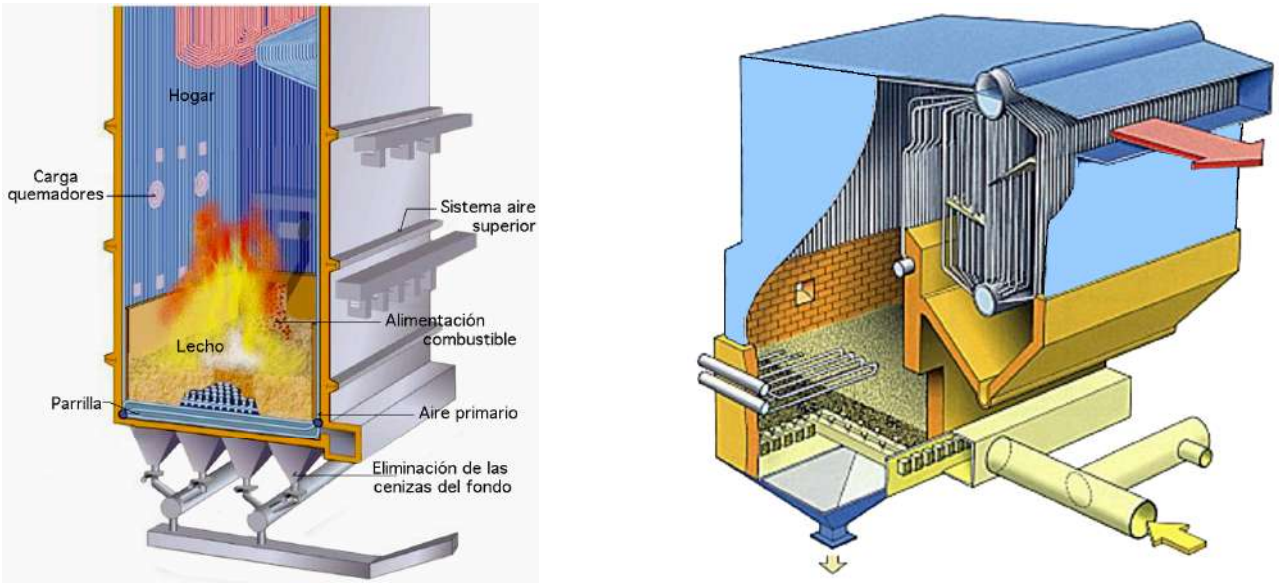


Fig XVII.5.- a) Caldera de lecho fluidificado burbujeante; b) Caldera de lecho fluidificado circulante

En los *lechos circulantes* las partículas que abandonan el lecho es mucho mayor en comparación con los burbujeantes, (ya que para los lechos circulantes se trata de un lecho flotante), lo que justifica el que las partículas se recuperen mediante un colector de polvo y se recirculen hacia el ho-

gar. El tiempo de residencia de las partículas depende de la recuperación del colector y del reciclado de sólidos, y excede mucho del tiempo de residencia de los gases. La concentración de combustible en el lecho denso es baja; por ejemplo:

- Para un combustible como la madera es difícil encontrar en el lecho una cantidad de C medible

- Cuando se quema carbón bituminoso el contenido de C en el lecho es inferior al 1%

- Cuando se utiliza un absorbente para la captura del S, la porción del lecho restante está constituida por ceniza, cal y sulfato clásico

- Cuando no se emplean absorbentes, está formada por arena u otro material

La eficiencia de conversión del C es $\begin{cases} \text{- madera y combustibles de alta reactividad} \approx 100\% \\ \text{- carbones bituminosos} > 98\% \\ \text{- carbones menos reactivos y de escombreras, ligeramente inferior} \end{cases}$

XVII.2.- VENTAJAS DE LA COMBUSTIÓN EN LECHO FLUIDIFICADO

El motivo principal para el desarrollo de las cámaras de combustión de lecho fluidificado, fue la exigencia de tener que reducir las emisiones de SO_2 y NO_x; la utilización de la tecnología de combustión en lecho fluido permite quemar carbones con altos contenidos en S y obtener bajos niveles de emisión de SO_2, sin necesidad de añadir equipamiento para la posterior eliminación del S contenido en los gases.

Conforme esta tecnología se perfecciona, el proceso permitirá quemar carbones de baja calidad que, actualmente, son imposibles de quemar por otros métodos. En los lechos fluidos se aplican las reglas de la combustión, por lo que para cada diseño hay que tener en cuenta la composición química y el poder calorífico del combustible.

Las calderas de lecho fluidificado se diseñan para que en el lecho se tenga una temperatura de operación del orden de $\begin{cases} 1500 \div 1600^{\circ}F \\ 816 \div 871^{\circ}C \end{cases}$, lo que implica una serie de ventajas funcionales.

Características de diseño: $\begin{cases} \text{uno o dos calderines} \\ \text{opción para reducir las emisiones de } NO_x \text{ y } SO_2 \\ \text{queman madera húmeda y otros combustibles de } P_{calorífica} \approx (2800 \div 3500\ Btu/lb) \\ \text{reducen el volumen de lodos mientras producen vapor} \end{cases}$

Capacidad de nuevas unidades: $\begin{cases} \text{apoyadas por abajo: hasta } \begin{cases} 225.000\ lb/h \\ 28,4\ kg/s \end{cases} \\ \text{soportadas por arriba: de } \begin{cases} 225.000 \div 700.000\ lb/h \\ 28,4 \div 88,2\ kg/s \end{cases} \end{cases}$

Capacidad readaptaciones: Hasta 1.000.000 lb/h (126 kg/s)

Presión de vapor: 2400 psig (16,5 MPa)

Temperatura de salida del sobrecalentador: hasta 950°F (510°C)

Combustibles: Capaces de quemar una amplia variedad de combustibles convencionales y residuos combustibles con alta humedad, como:
- *Residuos de madera y cortezas*
- *Lodos de* {*reciclado de la fabricación de papel*; *depuradora*}
- *Combustibles derivados de llantas de neumáticos*
- *Petróleo, gas natural y carbón*
- *Biomasa*
- *Residuos de caña de azúcar y residuos agrícolas*

Emisiones reducidas de SO_2 y NO_x.- Debido a la baja temperatura de operación en las calderas de lecho fluido, es posible utilizar un absorbente (caliza o dolomía), para eliminar el SO_2 presente en los gases de combustión, que cuando se añade al lecho produce una reacción en el hogar entre la cal CaO resultante y el SO_2 presente en los gases, reduciendo las emisiones de SO_2 en más de un 90%, según sea
- *el contenido en S del combustible*
- *la cantidad de absorbente que se añada al proceso*

El N_2 y el O_2 reaccionan a altas temperaturas, por encima de 2700ºF (1482ºC), para formar NO_x; si la temperatura es menor de este valor, la formación de NO_x decrece muy rápidamente de forma que con temperaturas en el lecho comprendidas entre $\begin{cases} 1500 \div 1600°F \\ 816 \div 871°C \end{cases}$, la cantidad de NO_x formado es mucho menor que la de otras unidades convencionales similares que funcionan a temperaturas más elevadas.

En algunos lechos burbujeantes y en la totalidad de los lechos circulantes, se consiguen reducciones en la formación de NO_x mayores, mediante una estratificación del $aire_{comburente}$. Si sobre los gases se emplean técnicas de depuración de postcombustión, se pueden alcanzar emisiones de NO_x todavía menores.

Ceniza del combustible.- Las bajas temperaturas de combustión permiten quemar combustibles con un elevado factor de ensuciamiento con cenizas de bajo punto de fusión; como la combustión se realiza a una temperatura muy inferior a la del punto de fusión de la ceniza del combustible, muchos de los problemas de funcionamiento de las calderas convencionales asociados a los combustibles, se minimizan considerablemente con el empleo de lechos fluidificados.

No obstante, hay que tomar precauciones frente a la concentración de metales alcalinos en el lecho, ya que podrían provocar incrustaciones, especialmente en el sobrecalentador, lo que sugiere elegir una temperatura de operación para el hogar del lecho fluidificado de 1500ºF (816ºC), para aquellos combustibles que tengan cenizas con alto contenido en metales alcalinos.

Combustibles de bajo poder calorífico.- El proceso de combustión en lecho fluidificado sirve parra quemar combustibles que tengan poderes caloríficos bajos, debido al:

- Rápido calentamiento de las partículas del combustible debido a la gran masa de material caliente que configura el lecho fluidificado

- Gran tiempo de residencia del combustible en el lecho

circunstancias que compensan los efectos derivados de la menor temperatura de combustión, en comparación con los procesos convencionales. Cuando se queman combustibles con un alto grado de humedad, es necesario tener en cuenta el peso que adquieren los gases por el vapor de agua que llevan, situación que hay que prever en el diseño de los pasos de convección y otros componentes de la unidad.

Preparación del combustible.- Para carbones con elevado contenido en ceniza, la caldera de lecho fluidificado tiene muchas ventajas en comparación con los sistemas convencionales de combustión de carbón pulverizado.

Los combustibles con mucha ceniza *cuando se queman en hogares de carbón pulverizado* precisan pulverizadores de mayor potencia. Cuando los combustibles con mucha ceniza se utilizan en un *hogar de lecho fluidificado*, se trocean en tamaños < 0,25" (6,4 mm).

Una caldera de lecho fluidificado se diseña para quemar una amplia gama de combustibles, más de los que corresponden a los otros métodos alternativos de combustión; no obstante, una vez diseñada la caldera de lecho fluidificado para una determinada gama de combustibles, se pueden admitir algunas desviaciones en los valores de diseño para que la unidad funcione correctamente; la caldera de lecho fluidificado circulante es más flexible que la burbujeante.

XVII.3.- CALDERAS DE LECHO FLUIDIFICADO A PRESIÓN ATMOSFÉRICA

Calderas de lecho fluidificado burbujeante (BFB).- Las Figs XVII.6.7 presentan los componentes principales de una caldera de lecho fluidificado burbujeante y la Fig XVII.12 muestra la distribución de densidades del material en la que el tramo de caída vertical de la densidad indica la parte alta del lecho. La superficie de transferencia de calor de haz tubular se coloca en el lecho, para lograr el balance energético y la temperatura de operación que se desee alcanzar.

Para combustibles de bajo poder calorífico, esta superficie se reduce a un mínimo e, incluso, puede que no exista. En cualquier caso, la temperatura del lecho es uniforme y siempre se mantiene dentro de un margen de ± 25ºF (14ºC), como consecuencia de la mezcla de gases y sólidos que tiene lugar.

La caldera de lecho fluidificado burbujeante que quema carbón incluye un sistema de recirculación que separa los sólidos de los gases que salen del economizador y los recircula hacia el lecho; esta operación maximiza la eficiencia de la combustión y la captura de S.

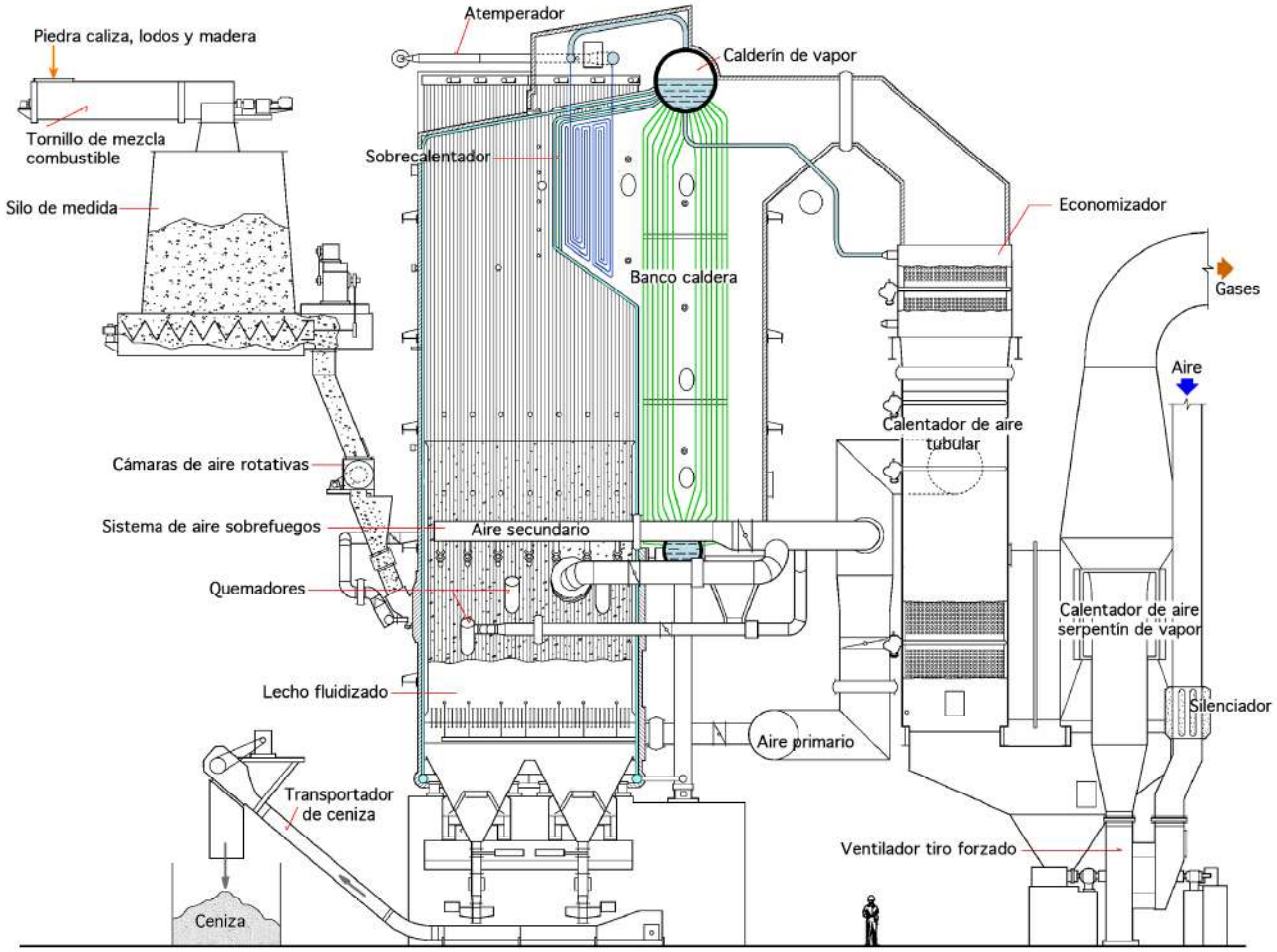


Fig XVI .6.- Caldera Towerpak (BFB) soportada por abajo

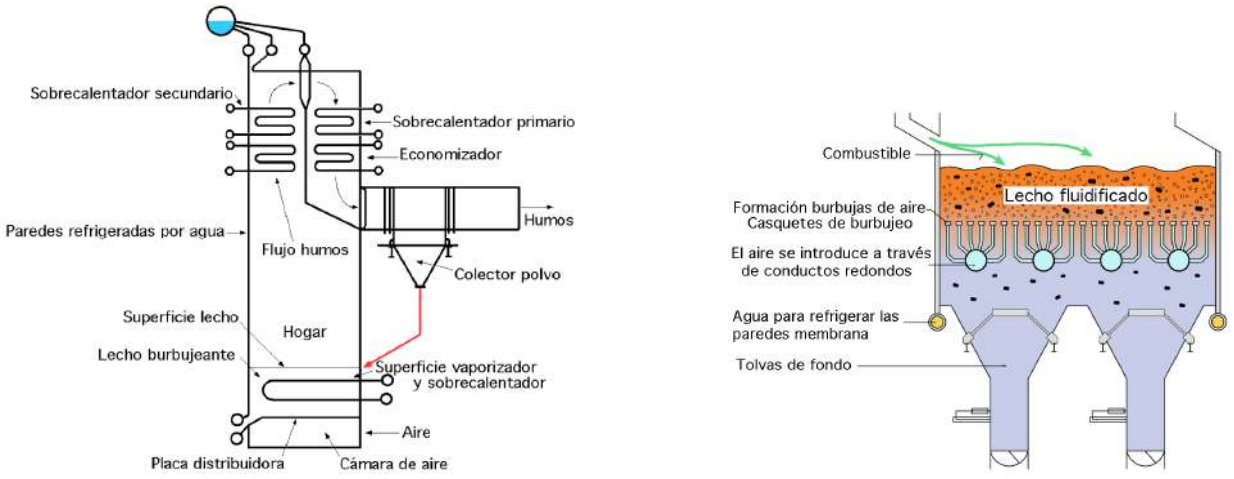


Fig XVII.7.- Esquema de caldera con lecho fluidificado burbujeante y detalle del sistema de distribución de aire

La recirculación de sólidos se limita al 25% del peso de gases, y para combustibles muy reactivos se suele suprimir.

Los lechos fluidificados burbujeantes que queman carbón, operan con una velocidad superfi-

cial de gases, a plena carga, comprendida entre $8 \div 10$ ft/s ($2{,}4 \div 5$ m/s).

El tamaño máximo de material del lecho corresponde al que pasa por el tamiz de 600 micras.

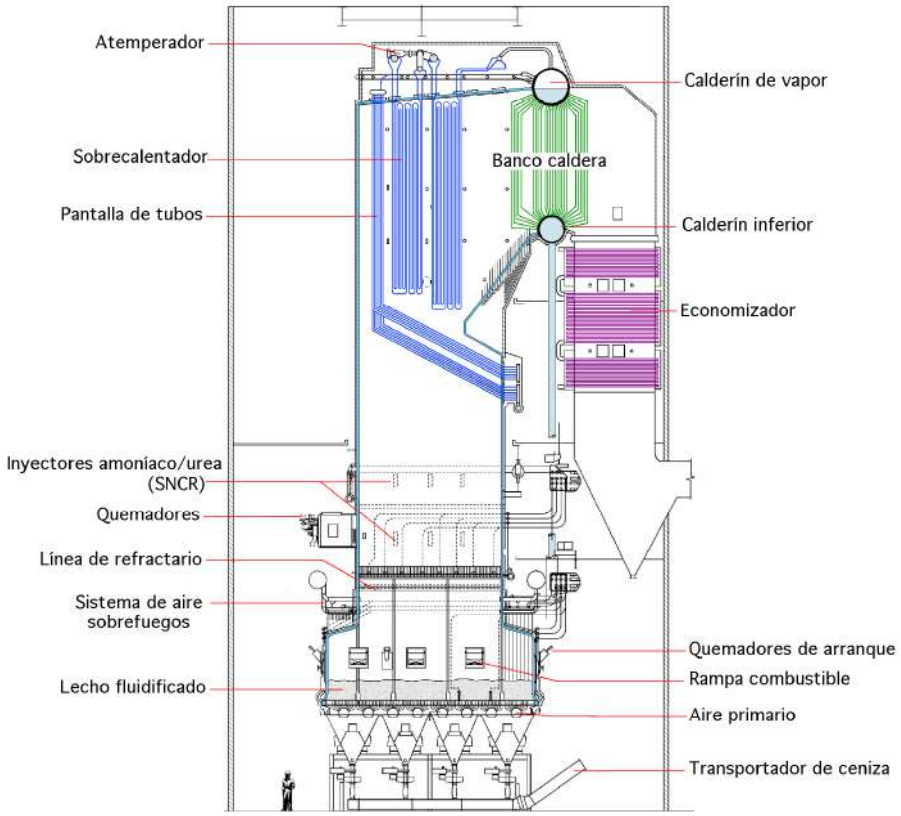


Fig XVII.8.- Vista lateral de un proceso de recuperación (PR) de una caldera reconvertida con un sistema de combustión BFB

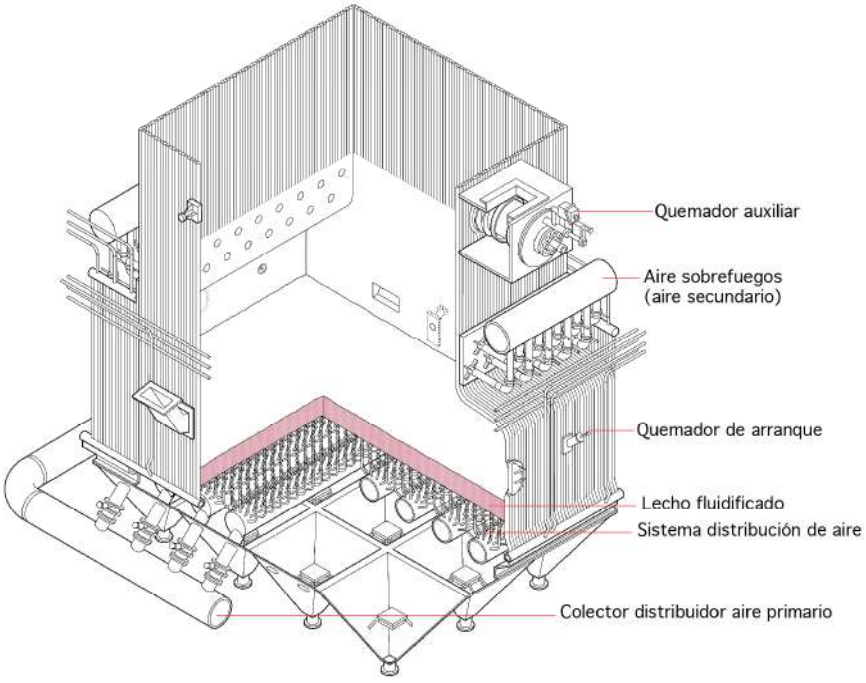


Fig XVII.9.- Parte inferior del hogar de una caldera BFB

Calderas de lecho fluidificado circulante, (CFB).- La Fig XVII.10 representa los componentes principales de una caldera de lecho fluidificado circulante y la Fig XVII.14 el perfil de la distribución de densidades del material en el hogar de la caldera. El lecho denso de este tipo de caldera no tiene ningún banco tubular de superficie termointercambiadora.

La absorción de calor se realiza por $\begin{cases} - \textit{ las paredes del hogar} \\ - \textit{ la superficie interior de los muros y paredes divisorias} \end{cases}$, lo que es posible debido a la gran cantidad de sólidos que recirculan por el interior y exterior del hogar. El calor transferido a las paredes del hogar es suficiente para facilitar la absorción calorífica necesaria para mantener la temperatura de referencia del lecho de $\begin{cases} 1500 \div 1600°F \\ 816 \div 871°C \end{cases}$, con una velocidad superficial de gases a plena carga de 20 ft/s (6,1 m/s), y un tamaño de sólidos promedio en el hogar inferior entre $150 \div 200$ micras, con un máximo de 590 micras.

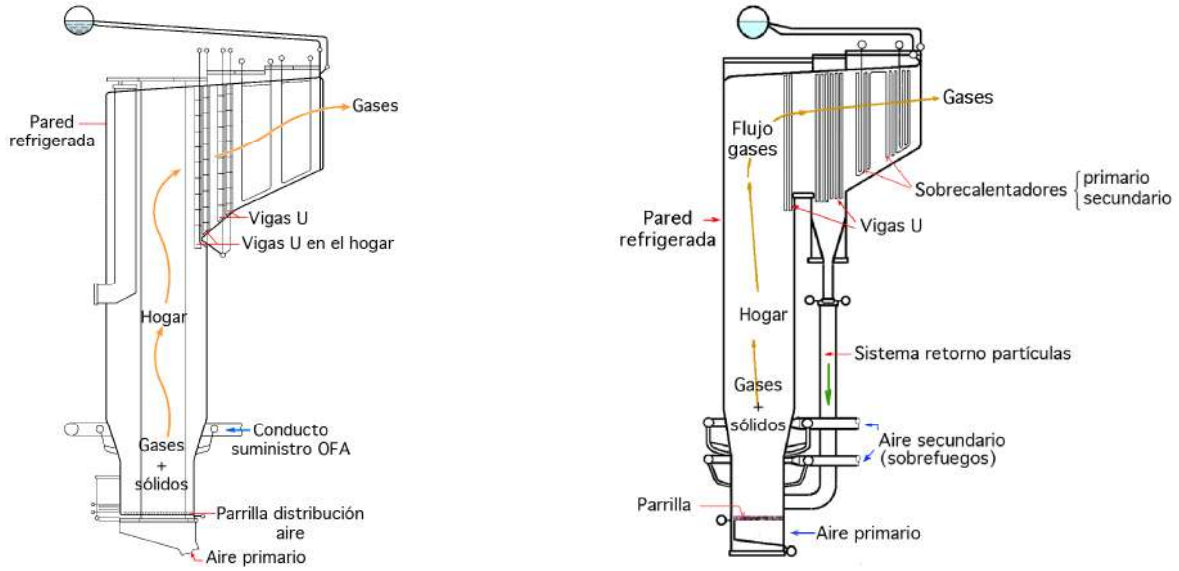


Fig XVII.10.- Esquemas de calderas con lecho fluidificado circulante (CFB)

XVII.4.- EMISIONES

Las emisiones contaminantes procedentes de las calderas y de los procesos de combustión de elevada potencia, varían en cada país, aunque los componentes y productos que son objeto de control y regulación, suelen ser los mismos

Los principales productos de referencia son: $\begin{cases} - \textit{ dióxido de azufre } SO_2 \\ - \textit{ óxidos de nitrógeno } NO_x \\ - \textit{ monóxido de carbono } CO \\ - \textit{ hidrocarburos y partículas en suspensión} \end{cases}$

Las calderas de lecho fluidificado se diseñan para quemar combustibles sólidos, al tiempo que controlan muchas de las emisiones contaminantes.

Dióxido de azufre, SO_2.- Cuando se queman combustibles que contienen S, la mayor parte de éste se oxida y pasa a SO_2 formando parte de los gases de combustión *(Ver cap XXXV)*. Cuando se añade caliza al lecho, tiene lugar un proceso endotérmico (calcinación) para formar la cal CaO:

$$CaCO_3\,(sól) + 766\,(Btu/lb)\ de\ CaCO_3 \Rightarrow CaO(sól) + CO_2\,(gas)$$

la cual una vez formada reacciona con el SO_2 de los gases y con el O_2, según un proceso exotérmico, formando sulfato cálcico $CaSO_4$, según la reacción:

$$SO_2 + \frac{1}{2}\,O_2 + CaO(sól) \Rightarrow CaSO_4\,(sól) + 6733\,Btu/lb\,(de\ S)$$

Para las temperaturas de operación de un lecho fluidificado el sulfato cálcico $CaSO_4$ es químicamente estable, se elimina en forma sólida, y se puede vender.

Las primeras instalaciones de combustión en lecho fluidificado se realizaron en calderas de proceso directo (de un paso), en las que el carbón y la caliza:
- *alimentaban la cámara de combustión*
- *reaccionaban en la misma*
- *salían del sistema a continuación*

La eficiencia de la combustión y de la captura de S quedaban por debajo de los valores esperados en el diseño. Para mejorar la instalación, una parte de los sólidos que salían del hogar (ceniza, $CaSO_4$, C y cal) se separaba de los gases mediante un colector de polvo situado entre el economizador y el calentador de aire, y se recirculaba inyectándolos en el hogar para facilitar otras reacciones. La Fig XVII.11 representa el efecto de la recirculación de sólidos sobre la captura de S en un lecho fluidificado burbujeante, limitando los valores del recirculado a un máximo de 2,5 veces el de combustible, como resultado de consideraciones de tipo práctico relativas al tamaño y disposición de los equipos.

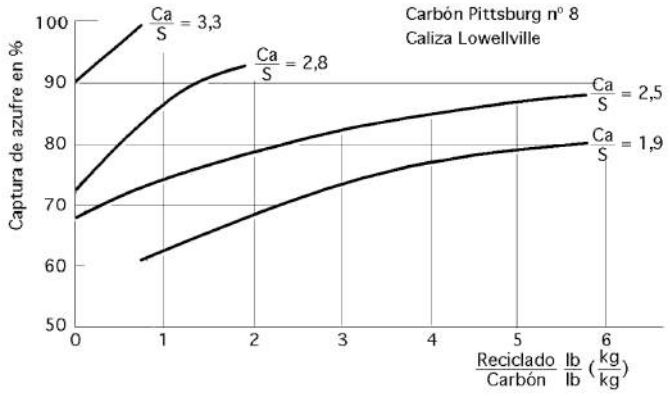


Fig XVII.11.- Relación entre la captura de S y la tasa de reciclado

En el lecho fluidificado circulante, aguas abajo del hogar, se coloca un *colector-separador* primario, diseñado especialmente para la recirculación de todos los sólidos capturados, por lo que la captura de S y la eficiencia de la combustión se mejoran, con relación a los lechos fluidificados burbujeantes.

Algunos diseños incluyen un segundo *colector-separador* situado aguas debajo de la zona de convección, debido al incremento de la concentración de partículas finas en el hogar.

Todas estas mejoras son consecuencia de los mayores tiempos de contacto *sólido-gases* y de la

mayor superficie de las partículas finas, que están en contacto con los gases.

En el lecho fluidificado circulante es normal una reducción del 90% de SO_2 para una relación molar $2 < \frac{Ca}{S} < 2{,}5$, según sea el contenido en S del combustible y la reactividad de la caliza.

En el lecho fluidificado burbujeante se precisan relaciones $\frac{Ca}{S}$ ligeramente superiores a 2,5.

- Para eliminar un determinado nivel de SO_2 hay que utilizar una relación $\frac{Ca}{S}$ tanto mayor cuanto menor sea el contenido de S en el combustible

- Para conseguir reducciones de S superiores al 90% se requieren cantidades de caliza que aumentan muy rápidamente, por lo que el factor económico puede hacer derivar hacia otros métodos alternativos de eliminación de S, como los lavadores de gases para calderas convencionales que queman carbón pulverizado

Óxidos de nitrógeno NO_x.- Tienen dos orígenes según proceda del $\begin{cases} \text{- combustible} \\ \text{- aire comburente} \end{cases}$

Normalmente, a los óxidos de nitrógeno en los gases se les considera como NO_x siendo el subíndice representativo de varios compuestos *(Ver cap XXXIV).*

- El óxido que procede del combustible se denomina $NO_{x\ del\ combustible}$

- El óxido que procede de la oxidación del nitrógeno del $aire_{comburente}$ es el $NO_{x\ térmico}$, puesto que es el resultado de un proceso a alta temperatura, superior a 2700°F (1482°C)

Como el lecho fluidificado opera a baja temperatura, el $NO_{x\ térmico}$ es mínimo en el total de los NO_x formados.

En un proceso de *combustión estratificada,* una caldera de lecho fluidificado puede suprimir o minimizar el $NO_{x\ del\ combustible}$, disminuyendo la dosificación de $aire_{comburente}$ a través de la placa distribuidora, por lo que parte de los compuestos de N_2 del combustible se descomponen en nitrógeno molecular, en lugar de contribuir a la formación de los NO_x. Este tipo de proceso se usa también en otros métodos de combustión, para lograr el mismo fin.

La *combustión estratificada* se usa en :

- Lechos fluidificados burbujeantes que no tengan superficies termointercambiadoras sumergidas en el lecho

- Todos los lechos fluidificados circulantes

Este tipo de combustión no se emplea con haces tubulares sumergidos en el lecho, porque con combustión subestequiométrica los gases tienen muchos componentes reductores, que suelen provocar rápidas pérdidas de metal en los tubos del hogar. En la combustión estratificada, las paredes del hogar se protegen en toda la altura de la zona reductora del hogar, con una delgada capa de refractario.

En las calderas de lecho fluidificado la combinación de $\begin{cases} \text{- las bajas temperaturas de operación} \\ \text{- la combustión estratificada} \end{cases}$ permite operar con emisiones de NO_x particularmente bajas; un valor normal de éstas, para lechos fluidificados de unidades que queman carbones, está entre $100 \div 200$ ppm de volumen seco.

CO e hidrocarburos.- Cuando se diseña una caldera, es necesario conseguir la máxima eficiencia en la combustión, minimizando el $C_{inquemado}$ y las cantidades de CO y de hidrocarburos presentes en los gases de combustión, lo que se consigue mediante:

- La correcta elección del número de puntos de alimentación del combustible

- El diseño apropiado del sistema de aire

- El tiempo de residencia en el hogar que garantice la mezcla de combustible y aire y una combustión completa

En calderas de lecho fluidificado que queman carbones, las concentraciones normales son:

- Para el CO en los gases, inferiores a 200 ppm de volumen seco

- Para los hidrocarburos, inferiores a 20 ppm de volumen seco

Partículas.- La ceniza del combustible sólido se libera durante el proceso de combustión:

- Parte de ella queda en el lecho fluidificado y, posteriormente, se descarga mediante el sistema de eliminación de material del lecho o por un sistema de purga; su tamaño es mayor que el correspondiente al tamiz de 140 mesh (105 micras) siendo de fácil manipulación y transporte en el el sistema de evacuación

- El resto de la ceniza sale de la caldera con los gases, en forma de partículas sólidas en suspensión; su tamaño es inferior al del tamiz 325 mesh (44 micras), y su separación de los gases y posterior recuperación exige colectores-separadores de alta eficiencia

Con carácter general, en las calderas de lecho fluidificado a presión atmosférica, se usan filtros de sacos que son menos sensibles a las propiedades de las cenizas (tamaño, concentración, resistividad, etc.) que los depuradores electrostáticos convencionales. *(Ver cap XXXIII).*

XVII.5.- DISEÑO DEL HOGAR DE UNA CALDERA DE LECHO FLUIDIFICADO

Los factores que afectan al diseño del hogar de una caldera de lecho fluidificado, los especifican el propietario y el diseñador, y se deducen de datos empíricos. La información inicial para el diseño de una caldera con hogar de lecho fluidificado, se puede agrupar en:

Especificaciones del propietario:

- Potencia de la unidad y flujo de vapor

- Tipo de combustible, contenido en ceniza y humedad, tamaño, reactividad, análisis, características abrasivas, ensuciamiento, aglutinación, etc

- Tipo de caliza, reactividad, tamaño y características de abrasión

- Requisitos para la captura de S

- Tipo de absorbente, tamaño, reactividad y análisis

- Límites de emisión de NO_x

- Mínima carga de la unidad

Especificaciones del diseñador:

- Tipo de sistema de alimentación en el lecho, por encima o por debajo del mismo

- Número y ubicación de los puntos de alimentación de combustible

- Eficiencia de la combustión.

- Número y ubicación de los puntos de inyección del absorbente

- $Aire_{primario}$, $aire_{secundario}$ y ubicación de las toberas sobre el lecho

- Temperatura y velocidad de operación del lecho

- Tamaño de las partículas en el lecho

- Cantidad de sólidos que salen $\begin{cases} \text{- por el drenaje del lecho} \\ \text{- con los humos hacia el colector final de partículas} \end{cases}$

- Cantidad, temperatura y ubicación de los sólidos recirculados hacia el hogar, desde el colector de partículas y desde los clasificadores de drenaje del lecho.

- Influencia del material del lecho

Requisitos de combustión.- Para que un *lecho fluidificado* funcione adecuadamente con un carbón bituminoso, es preciso alimentarlo de forma continua con una cantidad suficiente de partículas, con una determinada distribución de tamaños, para mantener un proceso estable.

- Si las partículas son demasiado gruesas el lecho pierde fluidificación y se comporta como un lecho fijo

- Si las partículas son demasiado finas, se pueden proyectar fuera del hogar, por lo que no se puede mantener un adecuado número de ellas en el lecho fluidificado

Un *lecho burbujeante* debe recibir, suspender, mezclar y quemar las partículas del combustible, de forma que:

- Si $\begin{cases} \text{- la densidad del lecho es muy pequeña} \\ \text{- el lecho es demasiado delgado} \end{cases}$ *se puede producir una acumulación de partículas de combustible en una zona puntual del mismo, en la que el combustible y la ceniza se juntan configurando masas escorificadas, lo que provoca altas temperaturas*

- Si el lecho se alimenta con muchas partículas grandes, se pierde la fluidificación con un resultado parecido al anterior

Si el *número de partículas* se distribuye a lo largo de toda la altura del hogar, en su parte inferior se necesita un lecho denso que soporte y mezcle el combustible durante la combustión para

evitar los problemas indicados. Cuando se quema carbón, la mayor parte de la ceniza se libera en forma de partículas muy finas, que pueden ser proyectadas por los gases de combustión hacia el exterior del lecho.

- En los lechos burbujeantes este material no contribuye a mantener el número adecuado de partículas del lecho

- En los lechos circulantes este material se captura y recircula hacia el hogar, como parte de la masa circulante; no obstante, los finos no aportan una contribución significativa para configurar el lecho denso

Como consecuencia de las grandes diferencias que se pueden presentar en la ceniza del combustible, no se puede confiar sólo a la ceniza la formación de un lecho estable, y de ahí la necesidad de añadir al lecho un segundo material inerte como la *arena*, con una adecuada y precisa distribución de tamaños.

Cuando se pretende capturar S, para que tenga lugar la retención del SO_2 en el lecho fluidificado, la arena se sustituye por la caliza; el tamaño ideal del absorbente conque se alimenta la caldera debe ser el necesario y suficiente para formar un lecho estable.

Durante los procesos de $\begin{cases} \text{- } calentamiento \\ \text{- } calcinación \\ \text{- } sulfatación \end{cases}$, el tamaño del absorbente (que entra a formar parte del material del lecho) varía, así como sus propiedades físicas y químicas, por lo que en muchos casos no se puede predecir con fiabilidad su tamaño.

Las calizas muy blandas se degradan con rapidez, por lo que durante la operación inicial de un lecho fluidificado hay que:

- Comprobar sus características
- Realizar los tanteos necesarios para establecer su tamaño adecuado y régimen de aporte

Para combustibles con poca ceniza (madera), la arena se utiliza para adecuar el contenido del lecho; dado que la arena no se degrada tan rápidamente como la caliza, su aporte es menor y el tamaño del material del lecho se puede predecir mejor.

Cuando se usan carbones residuales con cantidades importantes de ceniza exenta de materia orgánica, se requieren consideraciones especiales, ya que esta ceniza mineral se compone de rocas que se han arrancado en el proceso de extracción, y no se fractura en partículas finas, formando un porcentaje importante del material del lecho, por lo que el tamaño del combustible alimentado se debe elegir cuidadosamente, de modo que la ceniza complemente el material del lecho, en lugar de crear problemas a la fluidificación.

Existen calderas de lecho fluidificado, en las que $\begin{cases} \text{- } el\ tamaño \\ \text{- } la\ consistencia \end{cases}$ de la ceniza son suficientes para la formación de un lecho estable, sin la necesidad de tener que aportar otro material al mismo.

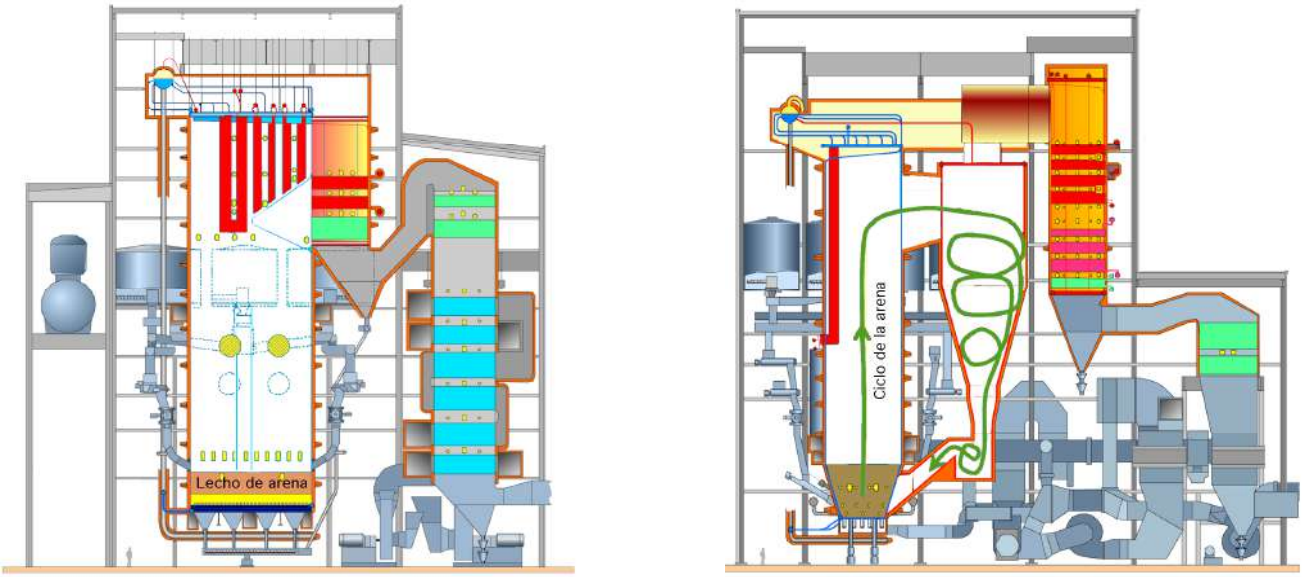


Fig XVII.12.- a) Caldera de lecho fluidificado burbujeante (BFBB), con la arena en la parte inferior del hogar
b) Caldera de lecho fluidificado burbujeante (CFBB), con la arena circulando alrededor del hogar-ciclón

XVII.6.- CARACTERIZACIÓN Y MEDIDA DE PARTÍCULAS

En los hogares de calderas de lecho fluidificado, el movimiento de las partículas viene afectado por: $\begin{cases} \text{- } \textit{Las fuerzas gravitatorias} \\ \text{- } \textit{Los impactos de las partículas} \begin{cases} \text{- } \textit{entre sí} \\ \text{- } \textit{con las paredes de la caldera} \end{cases} \end{cases}$

Las características más importantes de una partícula son: $\begin{cases} \text{- } \textit{tamaño} \\ \text{- } \textit{densidad} \\ \text{- } \textit{geometría} \end{cases}$

La *forma de la partícula* puede ser desde esférica hasta plana, y determina cómo reacciona frente a las fuerzas presentes en el hogar. La partícula ideal sería una esfera homogénea, y la mezcla ideal estaría constituida por un conjunto de esferas homogéneas de igual diámetro. En la práctica, las mezclas que se presentan son conjuntos de partículas con diferentes tamaños, densidades y formas.

En los lechos fluidificados los cálculos de transferencia de calor y pérdidas de presión, presuponen que las mezclas de partículas se caracterizan por $\begin{cases} \textit{un diámetro y densidad promedio de partícula} \\ \textit{una densidad aparente de la mezcla} \end{cases}$

Para calcular el diámetro medio de las partículas, éstas se suponen esféricas; para tener en cuenta que las partículas reales no son esféricas, se introduce un factor de corrección del diámetro medio calculado. Las mezclas contienen cantidades importantes de otras configuraciones de partículas, como las escamas o perfiles cilíndricos, que son siempre difíciles de caracterizar.

La determinación del *diámetro medio de una mezcla*, la proporciona el cribado de la muestra representativa de la misma, mediante una serie de tamices en columna con mallas cada vez más fi-

nas; también hay que comprobar el peso de las cantidades de mezcla cribada que han quedado retenidas en cada uno de los tamices de la columna

En lechos fluidificados se usan dos diámetros característicos, el: $\begin{cases} - \textit{ gravimétrico} \\ - \textit{ Sauter} \end{cases}$

El *diámetro Sauter* para una mezcla de partículas, se calcula a partir de la relación del lote de partículas $\begin{cases} 15 \div 29\ Btu/ft^2\,h\,^oF \\ (85 \div 341\ W/m^2\,^oK) \end{cases}$ y se utiliza para predecir el comportamiento hidrodinámico de mezclas, calculándose a partir de las fracciones gravimétricas de las mezclas de partículas, por la ecuación:

$$D_{Sauter} = \frac{X_1 + X_2 + \cdots + X_N}{\frac{X_1}{D_1} + \frac{X_2}{D_2} + \cdots + \frac{X_N}{D_N}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N} \frac{X_i}{D_i}}\ (micras)$$

siendo: $\begin{cases} D_i \text{ el diámetro promedio del corte i, en micras} \\ X_i \text{ la fracción en peso del corte i, adimensional} \end{cases}$

El *diámetro gravimétrico* medio se calcula a partir de la fracción en peso de cada tamaño de la mezcla de partículas, mediante la expresión:

$$D_{grav}\,(micras) = D_1X_1 + D_2X_2 + \cdots\cdots + D_NX_N = \sum_{i=1}^{N} D_iX_i$$

Cuando todas las partículas tienen igual diámetro, los diámetros gravimétrico y Sauter, coinciden.

Para mezclas de partículas con un margen de diámetros estrecho, ambos diámetros son similares al diámetro Sauter correspondiente a las partículas de menor tamaño.

Para mezclas de partículas con un margen de diámetros amplio, el diámetro medio Sauter es mucho menor que el diámetro medio gravimétrico.

XVII.7.- CAÍDA DE PRESIÓN EN EL LECHO

***Lecho burbujeante*.-** Para un lecho denso, la caída de presión es de especial interés; para el resto de la caldera, las caídas de presión se calculan mediante las ecuaciones que se aplican en el diseño de calderas convencionales.

La Fig XVII.13 muestra el perfil de distribución de densidades en el hogar e identifica las zonas utilizadas para establecer la caída de presión y la transferencia de calor.

La caída de presión Δp en el lecho denso se calcula por la ecuación:

$$\Delta p_{lecho\ burbujeante} = C\,(1 - e)\,(\rho_{part} - \rho_g)\,L$$

en la que:
- C es una constante de conversión de unidades
- e es la fracción de huecos del lecho, y depende de
  - el tamaño y densidad de las partículas
  - la velocidad y viscosidad del gas en el lecho
- L es la altura del lecho
- ρ_{part} es la densidad de las partículas
- ρ_g es la densidad del gas en condiciones del lecho

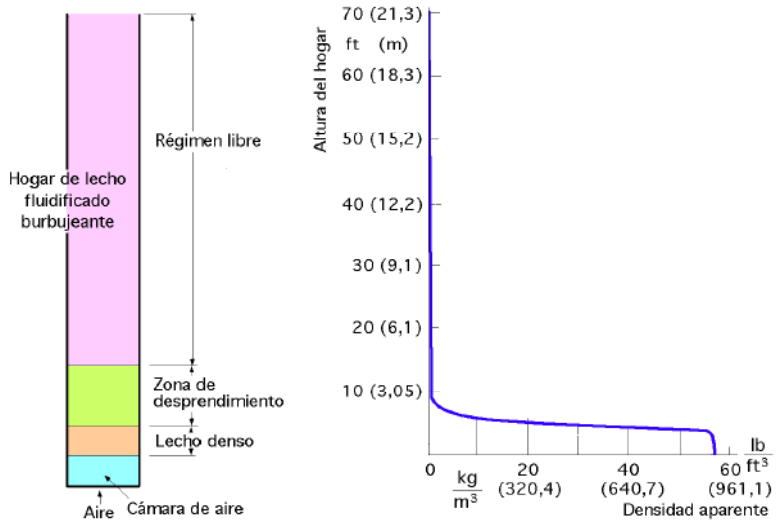


Fig XVII.13.- Distribución de densidades en un hogar de caldera con lecho fluidificado burbujeante a presión atmosférica

Lecho circulante.- El perfil de la distribución de densidades del hogar de una caldera de lecho circulante es más complejo que el de un lecho burbujeante. Es norma establecer un lecho denso, burbujeante o turbulento, en la parte baja del hogar, lo que se consigue graduando la admisión de aire hacia el hogar, suministrándole entre el 50÷70% del flujo de aire total a través de la placa distribuidora, reduciendo la velocidad del gas en la zona primaria y facilitando el mantenimiento de un lecho que tenga tasas relativamente bajas de recirculación de sólidos. El flujo ascensional de sólidos se reduce al aumentar la altura del hogar, lo que conduce a una disminución de la densidad local en el hogar, Fig XVII.14.

La caída de presión Δp en un hogar de lecho fluidificado circulante, se obtiene por la expresión:

$$\Delta p_{lecho\ circulante} = C\ \rho_b\ L$$, en la que:
- C es una constante de conversión de unidades
- ρ_b es la densidad aparente media
- L es la altura del hogar

Para la utilización de Δp se ha desarrollado un perfil de distribución de densidades, Fig XVII.14, en el que la curva representativa (deducida a partir de datos empíricos) es función de muchas variables, siendo las más importantes:

Δ_{part} *es el tamaño medio de partículas, encima del lecho denso*

Δ_B *es el tamaño medio de partículas, en el lecho denso*

V *es la velocidad del gas*

T *es la temperatura del hogar*

W_s *es el flujo exterior de sólidos,* lb/ft^2h (kg/m^2s)

ρ_s *es la densidad de las partículas*

Φ *es un factor de forma de las partículas*

D_{equiv} *es el diámetro equivalente del hogar*

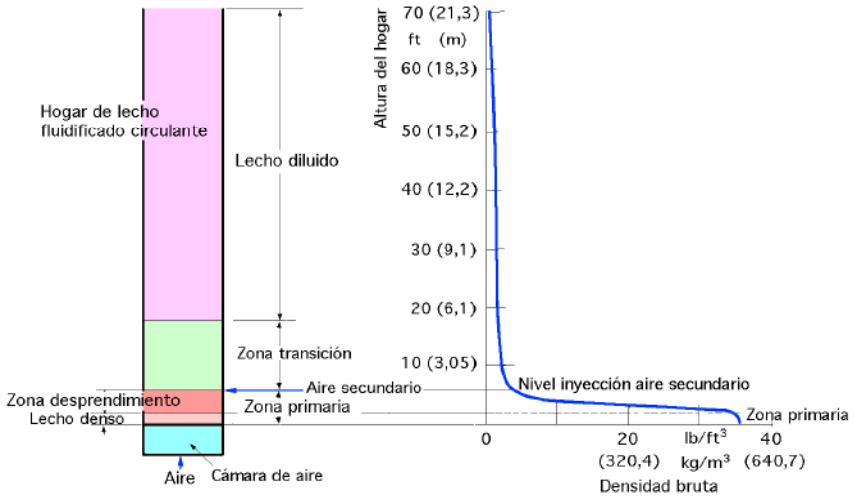


Fig XVII.14.- Distribución de densidades en el hogar de la caldera con lecho fluidificado circulante a presión atmosférica IR-CFB

En el hogar, la densidad aparente de la mezcla varía mucho con la altura, por lo que el hogar se suele dividir en zonas, calculándose para cada una de ellas una densidad basada en datos experimentales; estas zonas son de: $\begin{cases} - \textit{ lecho denso} \\ - \textit{ desprendimiento} \\ - \textit{ transición} \\ - \textit{ régimen libre} \end{cases}$; la caída de presión se aplica a cada una de las zonas y la suma de los cálculos parciales, proporciona la caída total de presión en el hogar.

XVII.8.- TRANSFERENCIA DE CALOR

En los *hogares convencionales*, los gases arrastran consigo una parte de la ceniza del combustible, por el interior y por el exterior del hogar, del orden de menos de 1 kg de sólidos inertes por cada 100 kg de gases. La transferencia de calor desde los gases hacia las paredes del hogar se realiza por radiación.

En un *hogar de lecho fluidificado circulante*, la cantidad de sólidos en los gases puede superar los 5 kg por 100 kg de gas, por lo que debido a este alto contenido, en el diseño se deben considerar otros mecanismos adicionales de transferencia de calor.

La transferencia de calor desde el lecho a $\begin{cases} \text{- los tubos de un haz inmerso en un lecho burbujeante} \\ \text{- las paredes de un lecho circulante} \end{cases}$, comprende la $\begin{cases} \text{- convección desde los sólidos y gases} \\ \text{- radiación desde los gases} \end{cases}$

En un hogar de caldera convencional, la radiación de los gases es la más importante por su nivel de temperatura, mientras que la convección desde sólidos es poco relevante.

La influencia de una alta concentración de sólidos en los gases es muy significativa; para temperaturas iguales, los coeficientes de transferencia de calor en las calderas de lecho fluidificado son considerablemente superiores a los de las calderas convencionales.

No obstante, como las temperaturas del lecho están comprendidas entre $\begin{cases} 1500 \div 1600^{\circ}F \\ 816 \div 871^{\circ}C \end{cases}$, el flujo de calor total resulta similar en ambos sistemas; el coeficiente medio de transferencia de calor para caldera de lecho fluidificado circulante (CFB) es de $\begin{cases} 15 \div 29\ Btu/ft^2\,h^{\circ}F \\ (85 \div 341\ W/m^2\,^{\circ}K) \end{cases}$

a) LECHO BURBUJEANTE.- A efectos de transferencia de calor, una caldera de lecho burbujeante se divide en tres zonas, Fig XVII.7: $\begin{cases} \text{- lecho burbujeante o lecho denso} \\ \text{- zona de desprendimiento} \\ \text{- zona superior o de régimen libre} \end{cases}$

Desde lecho denso a los bancos de tubos.- La ecuación del coeficiente global de transferencia de calor para un tubo cualquiera, viene dada por la expresión:

$$U_o = \frac{1}{\frac{1}{h_c + h_r} + R_m + R_t}, \text{ siendo } \begin{cases} \text{el coeficiente global de transmisión de calor } U_0 \text{ en } Btu/ft^2\,h^{\circ}F, (W/m^2\,^{\circ}K) \\ \text{el coeficiente de convección } h_c \text{ y el de radiación } h_r \text{, para banco tubular} \\ \text{la resistencia de } \begin{cases} \text{la pared metálica del tubo } R_m \\ \text{película del tubo } R_t \end{cases} \end{cases}$$

El coeficiente de convección h_c para tubos sueltos, se determina como sigue:

- Para lechos con partículas inferiores a 800 micras, $D_p < 800$ micras

$$h_c = h_{c_{tubo\ simple}}\, F_{tub} = 900\,(1 - e)\,\frac{k_{gases}}{d_{tubo}}\,\left(\frac{G\,d_{tubo}\,\rho_s}{\rho_g \mu_g}\,\frac{\eta_g^2}{D_p^3\,\rho_{part}^2\,g}\right)^{0,326} F_{tub}$$

- Para lechos con partículas superiores a 800 micras, $D_p > 800$ micras

$$h_c = \frac{k\,(1 - e)}{D_p}\,\{C_1 + (C_2\,\frac{3600\,D_p\,\rho_g\,c_p\,v}{k})\}$$

en las que:

F_{tub} *es un factor adimensional de la disposición tubular (sólo al tresbolillo)*

$h_{c(tubo\ simple)}$ *es el coeficiente de transferencia térmica del tubo simple, $Btu/ft^2h^{\circ}F$, $(W/m^2{}^{\circ}K)$*

e es el porcentaje de huecos del lecho

k_{gases} *es la conductividad térmica de los gases, Btu/fth°F (W/m°K)*

d_{tubo} *es el diámetro exterior del tubo, ft (m)*

G es el flujo másico del gas, lb/ft²s (kg/m²s)

ρ_{part} *es la densidad de las partículas, lb/ft³ (kg/m³)*

η_g *es la viscosidad de los gases, lb/fts (kg/ms)*

ρ_g *es la densidad de los gases, lb/ft³ (kg/m³)*

D_p *es el diámetro medio de las partículas, ft (m)*

C_1 *y* C_2 *son constantes experimentales, adimensional*

c_p *es el calor específico de los gases, Btu/lb°F (J/g°K)*

v es la velocidad nominal de los gases del lecho, ft/s (m/s)

Para convertir los coeficientes de transferencia de calor relativos a tubos sueltos, en otros aplicables a bancos tubulares, se usa la ecuación:

$$F_{tub} = \sqrt[4]{1 - \left(\frac{D_o}{\varepsilon_x}\ \frac{2D_o + \varepsilon_y}{D_o + \varepsilon_y}\right)}\ ,\ \text{en la que :}\ \begin{cases} D_0 \text{ es el diámetro exterior del tubo, (") (mm)} \\ \varepsilon_x \text{ es el espaciado entre tubos normal al flujo, (") (mm)} \\ \varepsilon_y \text{ es el espaciado entre tubos paralelo al flujo, (") (mm)} \end{cases}$$

El coeficiente de transferencia de calor por radiación es:

$$h_r = \sigma\ \varepsilon\ \frac{T_{gas}^4 - T_{pared}^4}{T_{gas} - T_{pared}}\ ,\ \text{en la que:}\ \begin{cases} \varepsilon \text{ es la emisividad global media} \\ \sigma = 0{,}1713.10^{-8}\ Btu/ft^2 h°R^4 = (5{,}678.10^{-8}\ W/m^2\ °K^4) \\ T_{gas} \text{ es la temperatura de los gases en el lecho} \\ T_{pared} \text{ la de la pared, °R (°K)} \end{cases}$$

La emisividad global media en hogares burbujeantes es del orden de 0,8 y depende de la emisividad y tamaño de las partículas.

El coeficiente global de transmisión de calor para un haz tubular sumergido es $\begin{cases} 49 \div 60\ Btu/ft^2 h°F \\ 227 \div 341\ W/m^2\ °K \end{cases}$

Desde lecho denso a paredes.- El coeficiente de transferencia térmica por convección, se evalúa mediante la ecuación de Mickley, que incluye una constante experimental C_3:

$$h_{c_{pared}} = C_3\ \left(\frac{3600\ \rho_{part}\ (1 - e)\ V}{D_p^3}\right)^{-0{,}263}$$

Si las paredes en la zona del lecho burbujeante están cubiertas con refractario, en la ecuación que facilita el valor del coeficiente global U_0 habrá que añadir la resistencia debida al refractario, que también afecta al cálculo del coeficiente de radiación h_r.

El refractario apenas influye en el valor del parámetro $h_{c_{pared}}$.

Desde la zona de desprendimiento a tubos.- En períodos de funcionamiento con un bajo nivel de lecho, es posible que una parte de los tubos superiores del banco tubular no queden sumergidos, quedando al descubierto. Cuando esa porción tubular se encuentra al descubierto en la parte baja de la zona de barboteo, el cálculo de la transferencia de calor se realiza en una parte especial del lecho.

El contenido de partículas en el flujo de gases es mucho menor que en el lecho y decrece exponencialmente con la altura, por lo que la transferencia de calor a la fracción de tubos no sumergidos decrece muy rápidamente; una ecuación propuesta es:

$$\frac{h_{c_{exterior\ tubo\ expuesto}}}{h_{m_{exterior\ tubo\ sumergido}}} = exp\ \{-\ (\frac{10 + H_L}{25,8})^{22}\ \}\ ,\ \textit{siendo } H_L \textit{ la altura de los tubos expuestos (no sumergidos)}$$

Desde la zona de desprendimiento a paredes.- Para paredes verticales en la zona de desprendimiento, el coeficiente de convección se evalúa en la forma:

$h_{c_{pared}} = C_4\ \{1 - C_5\ (1 - e)\} + h_{cg}$, siendo: C_4 *y* C_5 *constantes experimentales*

$$h_{cg} = 0,023\ \frac{k_{gas}}{D_{equiv.caldera}}\ (\frac{3600\ c_{p(gas)}\ \mu_g}{k_{gas}})^{0,3}\ (\frac{D_{equiv.caldera}\ G}{\eta_g e})^{0,8}$$

en la que:
- k_{gas} *la conductividad térmica de los gases, Btu/ft°Fh*
- $D_{equiv.\ caldera}$ *es el diámetro equivalente de la caldera, ft*
- $c_{p(gas)}$ *es el calor específico de los gases, Btu/lb°F*
- η_g *es la viscosidad de los gases, lb/ft.s y G el gasto másico de gases,* $lb/ft^2 s$

La porosidad "*e*" se refiere al lecho denso y no a la zona de desprendimiento (zona de barboteo). La altura de esta zona se dimensiona para conseguir un aumento del tiempo de residencia de por lo menos 1 segundo.

En la parte superior del hogar.- Esta parte de la unidad se estudia de igual forma que en las calderas convencionales. La diferencia radica en la emisividad de la mezcla *sólidos +gases*, ya que el contenido de sólidos en los gases es mucho más elevado que en el caso de las calderas convencionales, quemando carbón de altas cenizas, por lo que se pueden alterar las propiedades radiativas.

b) LECHO CIRCULANTE.- Las calderas de lecho fluidificado circulante no incorporan superficies de bancos tubulares sumergidos, por lo que la absorción de calor se realiza por las paredes del cerramiento y los tabiques divisores internos del hogar, pudiéndose citar las paredes { *divisoras* / *de aletas*

La transferencia de calor en estos hogares se determina dividiéndole en dos regiones:

- La que comprende el lecho denso del hogar

- El resto del hogar

Desde el lecho denso.- La transferencia de calor es similar a la del lecho denso a paredes de caldera de lecho burbujeante, aunque hay diferencias, ya que aquí el régimen es turbulento, en lugar del característico barboteo propio del burbujeante.

Desde la zona de desprendimiento y la parte superior del hogar.- La zona que está encima del lecho denso, (por debajo del nivel de inyección del $aire_{secundario}$ para producir el lecho circulante), se denomina zona de desprendimiento.

La parte superior del hogar incluye las zonas de $\begin{cases} \text{- } transición \\ \text{- } régimen\ libre \end{cases}$, en las que la transferencia de calor de lecho a paredes se estima considerando tres procesos en paralelo: $\begin{cases} conducción\ de\ partículas \\ convección\ de\ gases \\ radiación \end{cases}$

a) En la *conducción de partículas,* el calor se transfiere de éstas a las paredes por conducción. La pérdida de energía correspondiente se repone mediante intercambios de materia y energía con el núcleo central del flujo ascendente de sólidos y gases de combustión.

b) La *convección de los gases* es la forma de transferencia de calor predominante en las zonas de superficies termointercambiadoras que no están en contacto con las partículas, y tiene poca influencia cuando el contenido de sólidos es muy elevado. En las partes superiores del hogar, donde la concentración de sólidos es relativamente baja, la convección de los gases es pequeña si se compara con la radiación. Para evaluar los coeficientes de transferencia térmica de las partículas por convección, se han propuesto ecuaciones que incluyen parámetros que tienen influencia predominante sobre el tamaño de las partículas y sobre la densidad aparente de la mezcla.

c) La *radiación* tiene lugar de forma similar a la que se presenta en los hogares convencionales; en la parte del hogar que está por encima del lecho denso, la emisividad ε global es función de las propiedades radiativas de $\begin{cases} los\ gases \\ los\ sólidos \\ el\ tipo\ de\ superficie\ de\ absorción\ térmica \end{cases}$; un valor aproximado es $\varepsilon = 0{,}5$

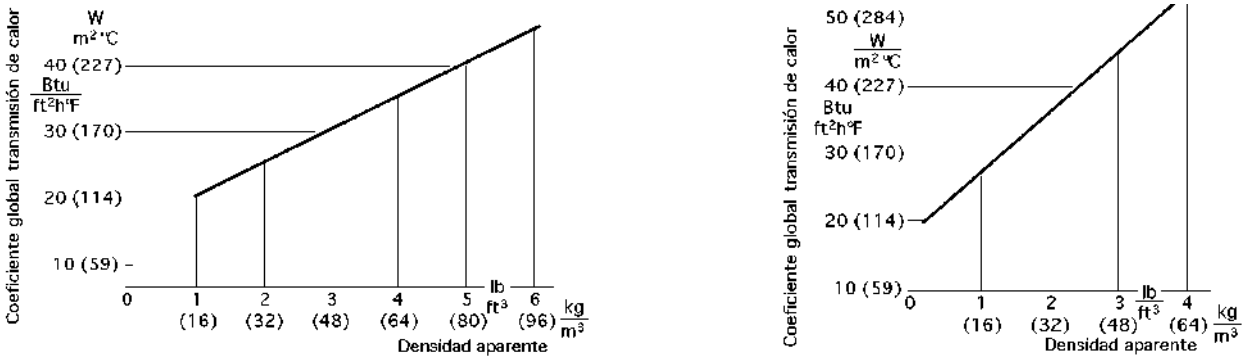
Cuando existe una elevada recirculación de sólidos, el *hogar de lecho fluidificado circulante* opera en condiciones isotermas a plena carga desde la parte inferior a la superior; la transferencia global de calor se determina mediante la curva de distribución de densidades y de un tamaño medio de partículas.

Si la recirculación de sólidos se reduce y se opera a bajas cargas, el hogar es cada vez menos isotermo, por lo que se necesitan procedimientos complicados para el cálculo de la absorción de calor

por el hogar; uno de ellos consiste en dividir el hogar, verticalmente, en un gran número de zonas pequeñas, de forma que en cada una de ellas se puedan considerar constantes las variaciones de temperatura y densidad; la ecuación utilizada para la transferencia de calor es:

$$U_0 = \frac{1}{\frac{1}{h_c + h_r} + R_{ref} + R_m + R_{ft}} \text{ , con } \begin{cases} h_c = h_{c_{partícula}} + h_{cg} = C_6 \ \rho_{gas}^m \ D_{part}^n + h_{cg} \\ h_r = \sigma \ \varepsilon \ \dfrac{T_g^4 - T_{pared}^4}{T_g - T_{pared}} \end{cases}$$

$$\text{siendo: } h_{cg} = 0{,}023 \ \frac{k_{gas}}{D_{equiv.\ caldera}} \left(\frac{3600\, c_{p(gas)} \ \mu_g}{k_{gas}} \right)^{0{,}3} \left(\frac{D_{equiv.\ caldera} \ G}{\eta_g \ e} \right)^{0{,}8}$$



a) Granos de arena de 250 micras *b) Granos de arena de 170 micras*

Fig XVII.15.- Coeficiente de transmisión de calor en función de la densidad en lecho fluidificado circulante de diversos granos de arena y temperatura 1562°F (850°C)

Los coeficientes de transmisión de calor en función de la densidad en lecho fluidificante circulante representados en la Fig XVII.15 se han obtenido a partir de datos experimentales y de laboratorio para un amplio rango de densidades y dos tamaños de partículas.

XVII.9.- BALANCES DE CALOR Y DE MATERIA

Los balances de calor y de materia que intervienen en el diseño de una caldera se realizan para fijar los caudales, composición y temperatura de todos los flujos que entran y salen del sistema; para ello, la caldera se subdivide en zonas y mediante un proceso iterativo de los balances de calor y de materia, en cada una de ellas, se consigue llegar a la solución final. El calor sensible de los sólidos es un factor importante en las calderas de lecho fluidificado, y es el que manifiesta la diferencia más notable en los balances de calor y de materia entre una caldera de lecho fluidificado y otra convencional.

BALANCE DE MATERIA.- Cuando se utiliza caliza como absorbente tienen lugar unas reacciones que afectan al balance de sólidos: $\begin{cases} CaCO_3 \ \Rightarrow \ CaO + CO_2 \\ MgCO_3 \ \Rightarrow \ MgO + CO_2 \\ CaO + SO_2 + \frac{1}{2} O_2 \ \Rightarrow \ CaSO_4 \end{cases}$

Durante la calcinación hay una pequeña pérdida de sólidos, consecuencia de la formación endotérmica del CO_2 a partir del $CaCO_3$ y, posteriormente, se presenta una ganancia similar en la sulfatación exotérmica del $CaSO_4$

Parámetros que caracterizan el funcionamiento de la caldera: $\begin{cases} \text{- } la\ cantidad\ de\ S\ que\ ha\ reaccionado \\ \text{- } la\ relación\ \frac{Ca}{S}\ escogida \\ \text{- } el\ análisis\ elemental\ de\ la\ caliza \end{cases}$

Balance de materia en lecho fluidificado circulante.- Un ejemplo del balance de materia en una caldera de *lecho fluidificado circulante* a presión atmosférica, se indica en la Fig XVII.16. Hay que tener en cuenta que dentro de la caldera se produce una cantidad importante de sólidos en recirculación.

Desde el punto de vista del balance global de materia, los sólidos que entran en el hogar pueden salir como material $\begin{cases} \text{- } relativamente\ grueso\ a\ través\ del\ drenaje\ del\ lecho \\ \text{- } fino\ que\ se\ evacúa\ tras\ su\ paso\ por\ el\ área\ de\ convección \end{cases}$

Las partículas finas que salen del lecho y se recirculan, abandonan el sistema tras recorrer el área de convección de la unidad, a través de un *separador colector* de polvo o de un *multiciclón*.

En lo que sigue, se supondrá que en la caldera entra un absorbente que experimenta reacciones complejas de calcinación y sulfatación y que el combustible se quema por completo formando sólo cenizas. Estos flujos no se deben confundir con el de absorbente no utilizado y con el de combustible que alimenta la caldera.

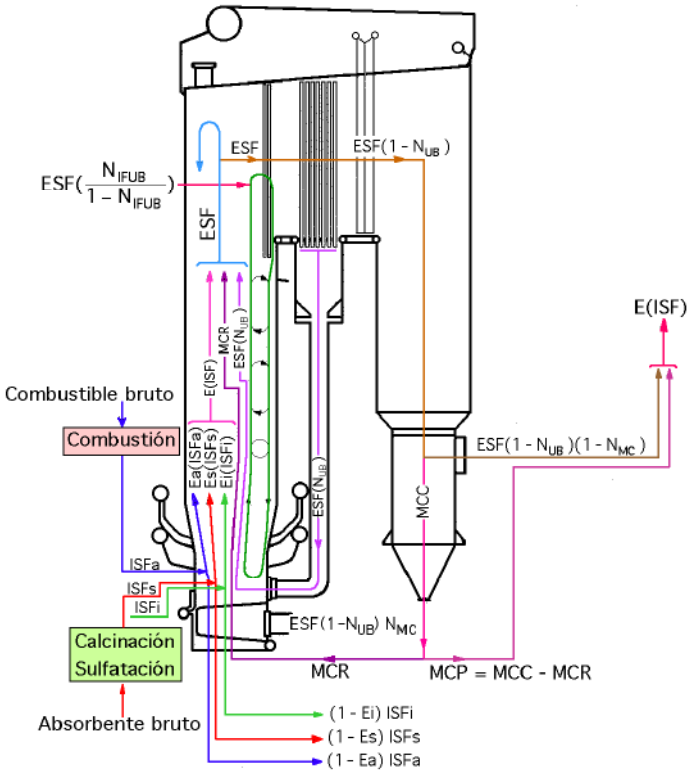


Fig XVII.16.- Esquema para el balance de materia en caldera de lecho fluidificado circulante

La definición de los parámetros representados en la Fig XVII.16 y las expresiones que se utilizan en los balances de materia se recogen en la Tabla XVII.1; la *fracción* E_a depende de la *ceniza del combustible*, la E_s del *absorbente* y la E_i de *la materia inerte* que haya en el sistema, valores que se determinan siempre de forma experimental.

Los valores de N_{UB}, N_{MC} y E, tanto para los componentes entrantes como para el total de sólidos, están relacionados entre sí, por el siguiente balance de materia:

$$ESF(1 - N_{UB}) (1 - N_{MC}) + MCP = E(ISF)$$

Los pasos para establecer un balance de materia en un *lecho fluidificado circulante*, son:

ISF se define con las entradas de combustible y caliza; la entrada de caliza es proporcional a la de combustible y se calcula para que efectúe la retención deseada de S

E se define con datos experimentales

ESF se adopta por consideraciones de diseño del hogar

N_{MC} *y* N_{UB} *se fijan por la experiencia*

$BDF = (1 - E) ISF$

$LVF = (ESF) N_{UB}$

$CPSF = ESF (1 - N_{UB})$

$BHC = ESF (1 - N_{UB}) (1 - N_{MC})$

$MCC = ESF (1 - N_{UB}) N_{MC}$

$MCP = E (ISF) - BHC = MCC - MCR$

$MCR = ESF (1 - N_{UB}) - E (ISF) = CPSF - E (ISF)$

Se observa que la pérdida correspondiente al filtro de sacos (BHC) se considera despreciable.

Con los valores de E, N_{MC} y N_{UB} adecuados, el máximo flujo de sólidos en el paso de convección (CPSF) no es superior a la mayor carga de sólidos en el paso de convección.

Casi siempre se puede diseñar una caldera (CFB) con purga (MPC) nula del multiciclón.

Tabla XVII.1.- Parámetros del balance de materia

Flujo de entrada de sólidos (ISF), lb/h (kg/s)	
ISF	*ISFa + ISFs + ISFi*
ISFa	*ceniza del combustible y carbono no quemado (inquemado)*
ISFs	*absorbente de postcalcinación y postsulfatación*
ISFi	*material inerte del lecho* SiO_2 *y* H_2O
Fracciones que salen de la caldera, adimensionales	
Ea	*Ceniza*
Es	*Absorbente* $\quad E = \dfrac{Ea\,(ISFa) + Es\,(ISFs) + Ei\,(ISFi)}{ISF}$
Ei	*material inerte*

Otros parámetros	
BDF	*flujo de drenaje del lecho, lb/h (kg/s)*
BHC	*flujo capturado en filtro de sacos, lb/h (kg/s)*
CPSF	*flujo de sólidos en paso de convección, lb/h (kg/s)*
ESF	*flujo externo de sólidos, lb/h (kg/s)*
LVF	*flujo en válvula L, lb/h (kg/s)*
MCC	*flujo capturado en multiciclón, lb/h (kg/s)*
MCP	*flujo de purga en multiciclón, lb/h (kg/s)*
MCR	*reciclado de multiciclón, lb/h (kg/s)*
MCRc	*capacidad del sistema multiciclón, lb/h (kg/s)*
NIFUG	*eficiencia del reciclado en U en el hogar*
N_{MC}	*eficiencia del separador-colector de partículas calientes*
N_{UB}	*flujo específico de materia exterior (ESF/A) referido a la sección (A) de la parte superior hogar, (kg/m²seg)*

Balance de materia en el lecho burbujeante.- Para estas calderas se tiene que:

ISF igual que en lecho circulante, y E se selecciona sobre datos empíricos

$$BDF = (1 - E)\ ISF$$

La capacidad del sistema multiciclón (MCRC) se define por datos empíricos y siempre proporcionalmente al combustible.

N_{MC} *se fija experimentalmente teniendo en cuenta la utilización deseada del absorbente y la conversión de C*

$$CPSF = E\ (ISF) + MCRC$$

$$MCC = (CPSF)\ N_{MC}$$

$$BHC = CPSF\ (1 - N_{MC})$$

$$MPC = MCC - MCR$$

$$MCR = MCRC$$

Si: $MCP < 0$, *se hace* $MCP = 0$ *y* $MCR = MCC$

$$BHC = E\ (ISF)$$

$$MCR = \frac{E\ (ISF)\ NMC}{1\ -\ NMC}$$

$$CPSF = \frac{E\ (ISF)}{1\ -\ NMC}$$

BALANCE TÉRMICO.- En la zona de máxima liberación de calor de los *hogares de carbón pulverizado*, de los combustores ciclón y de hogares mecánicos, se transfiere poco calor desde los gases, por lo que éstos alcanzan una elevada temperatura antes de que se refrigeren por la superficie de cerramiento del hogar.

Sin embargo, en la *combustión en lecho fluidificado*, el calor se transfiere desde la zona de máxima liberación de calor con un régimen mucho mayor, por lo que la temperatura máxima de los gases se limita a un nivel inferior al anterior.

En la combustión en *lecho fluidificado burbujeante*, el proceso de extracción de calor se realiza

por una superficie termointercambiadora de refrigeración, sumergida en el lecho activo de sólidos calientes y del combustible en fase de combustión.

En la combustión en *lecho fluidificado circulante*, los sólidos que existen en gran cantidad extraen el calor desde la zona de combustión activa y lo transfieren a la superficie termointercambiadora de la unidad, pasando por el hogar.

La posibilidad de modificar la cantidad de calor extraído desde el proceso de combustión, para alcanzar el nivel de temperatura deseado, hace muy flexible el diseño de cualquier caldera de lecho fluidificado.

El *exceso de calor* debido al proceso de combustión (diferencia entre el calor entrante en el lecho con el combustible y aire y el saliente) y la *radiación* correspondiente al resto del hogar, son absorbidos por $\begin{cases} \textit{los tubos sumergidos en el lecho} \\ \textit{las superficies termointercambiadoras del cerramiento del lecho} \end{cases}$

La misma temperatura del lecho se puede lograr de dos formas, si el poder calorífico del combustible $\begin{cases} \text{- } \textit{disminuye, se precisa menos superficie sumergida} \\ \text{- } \textit{aumenta, se necesita más superficie sumergida} \end{cases}$

Con un poder calorífico extremadamente bajo no se utiliza superficie sumergida y esa zona del cerramiento se recubre con refractario (para minimizar la extracción de calor en el lecho) caso que se presenta cuando se queman lodos transportados por tuberías con alta humedad.

En el diseño de lechos fluidificados circulantes, hay que tener en cuenta todas las superficies de transferencia térmica del hogar, al realizar cualquier balance de calor. La cantidad de materia que circula entre el hogar y el separador colector primario, (la cual regresa al hogar por recirculación), determina la densidad media de los sólidos en el hogar.

El coeficiente de transferencia de calor en el hogar es proporcional a la densidad aparente de la mezcla *sólidos+gases*; sin embargo, en las calderas de lechos fluidificados circulantes, la absorción calorífica del hogar depende de su superficie total y de la circulación externa.

La capacidad calorífica del hogar depende también del combustible que se queme; como una fracción del combustible se quema por encima del lecho, hay que tenerlo en cuenta en el cálculo de la temperatura de los gases.

La distribución real de la combustión que $\begin{cases} \text{- } \textit{es interior al lecho} \\ \text{- } \textit{tiene lugar por encima del lecho} \end{cases}$, depende de las propiedades del combustible (tipo, volatilidad, tamaño) y del sistema de alimentación.

Como consecuencia de la gran cantidad de sólidos recirculados en un hogar de lecho fluidificado circulante, la particular configuración de la extracción de calor no tiene influencia en la distribu-

ción de temperaturas, lo que justifica el hecho de que los hogares de lecho fluidificado circulante sean más tolerantes, frente a los cambios de combustible, que los burbujeantes.

El balance de calor de las superficies de convección de la unidad se calcula de forma similar a como se hace en las calderas convencionales, incluyendo los efectos derivados de la presencia de sólidos en los gases, pues este tipo de gases puede tener una influencia sustancial en el balance de calor del paso de convección.

XVII.10.- CONFIGURACIÓN DE CALDERAS DE LECHO FLUIDIFICADO

Placa distribuidora y casquetes de burbujeo.- La placa distribuidora va siempre situada en el fondo del hogar al que separa de la caja de aire que está bajo la placa; está dotada de un casquete de burbujeo con el fin de facilitar una distribución uniforme del $aire_{comburente}$ en toda la sección transversal del hogar, para cualquier rango de cargas de la caldera, Fig XVII.17.

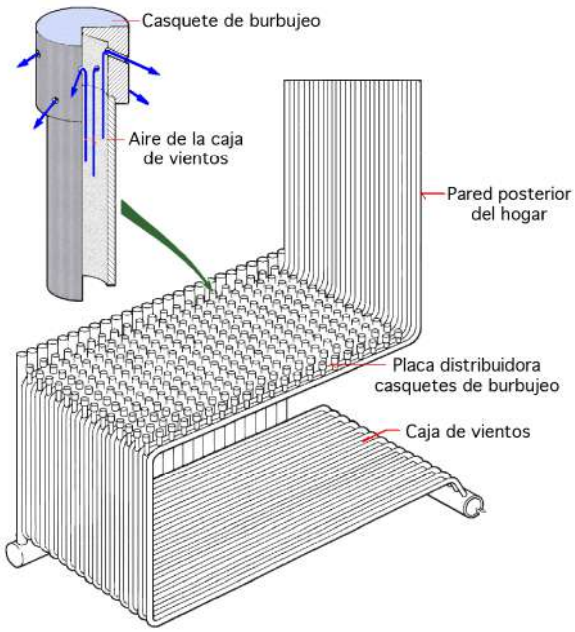


Fig XVII.17.- Placa distribuidora y casquetes de burbujeo

En esta situación la placa distribuidora tiene una caída de presión a través de los casquetes de burbujeo de: $\begin{cases} 16" \text{ (406 mm) de columna de agua a plena carga} \\ 4" \text{ (102 mm) de columna de agua a mínima carga} \end{cases}$

En una caldera de lecho fluidificado circulante a plena carga, por la placa distribuidora fluye un porcentaje de aire de combustión entre el $50 \div 70\%$.

La placa distribuidora de una caldera de lecho fluidificado burbujeante se diseña, si no se utiliza combustión estratificada, para un $85 \div 100\%$ del $aire_{comburente}$. La placa distribuidora debe ser totalmente estanca al aire, si se exceptúan los pasos a su través de los casquetes de burbujeo, y debe

soportar el $\begin{cases} \text{- } peso\ de\ un\ posible\ desplome\ del\ lecho \\ \text{- } abombamiento\ debido\ a\ la\ caída\ de\ presión\ del\ aire\ a\ su\ través \end{cases}$ durante la operación.

Los casquetes de burbujeo dividen el aire en pequeños flujos, y así se establece una buena distribución del comburente, impidiendo la formación de grandes burbujas en el lecho, minimizando la erosión y evitando un cribado de sólidos del lecho hacia la caja de aire.

La mayoría de las placas distribuidoras utilizadas en las calderas de lecho fluidificado, se construyen como paredes membrana.

Sistema de aire$_{secundario}$.- El $aire_{secundario}$ que se aporta por encima del lecho denso, forma parte del sistema de control de emisiones y completa la combustión. Las calderas de combustión en lecho fluidificado circulante y algunas de lecho fluidificado burbujeante, cuando no tienen haces tubulares sumergidos, para controlar las emisiones de NO_x utilizan un proceso de combustión estratificada.

A veces, el $aire_{secundario}$ se usa en las calderas de lecho burbujeante para mejorar la turbulencia y la combustión, cuando $\begin{cases} \text{- } el\ combustible\ se\ alimenta\ por\ encima\ del\ lecho \\ \text{- } cuando\ hay\ un\ exceso\ de\ finos\ en\ el\ combustible \end{cases}$

El $aire_{comburente}$ que no entra por los casquetes de burbujeo como $aire_{secundario}$, se inyecta en los gases de combustión aguas abajo de la ignición inicial del carbón, para completar la combustión.

El $aire_{secundario}$ debe facilitar una $\begin{cases} \text{- } adecuada\ penetración \\ \text{- } buena\ mezcla\ con\ los\ gases\ de\ combustión \end{cases}$ para alcanzar la combustión completa y minimizar el CO que se emita a la atmósfera.

La penetración del $aire_{secundario}$ depende de $\begin{cases} \text{- } el\ calibre\ de\ las\ toberas \\ \text{- } la\ velocidad\ del\ aire \\ \text{- } la\ densidad\ de\ los\ gases\ y\ del\ aire \end{cases}$

En los *lechos fluidificados circulantes* hay que tener en cuenta la densidad de los sólidos en el punto de inyección del $aire_{secundario}$.

Cerramiento de la caldera.- El correspondiente al hogar y al área de convección suele ser convencional, estando construido por paredes de tubos membrana refrigerados por agua, soldados entre sí, configurando un cierre estanco a gases.

El cerramiento de la caldera se utiliza también para soportar el techo, la caja del $aire_{secundario}$, el sobrecalentador y otros componentes, ya que las calderas de lecho fluidificado están suspendidas, por lo que son unidades que se expansionan hacia abajo.

SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DEL COMBUSTIBLE.- Tiene un impacto mayor que

cualquier otro sistema auxiliar en la evolución de las calderas de lecho fluidificado, existiendo tres grandes grupos: *alimentación inferior, superior e interior*

a) Sistema de alimentación inferior.- Se utiliza en calderas de lecho burbujeante que queman carbón bituminoso; es un equipo de transporte neumático, que desplaza el carbón desde el lugar de almacenamiento hasta el lecho. Si se quema carbón bituminoso y combustibles menos reactivos, el combustible se distribuye por toda la superficie del lecho con la mayor uniformidad posible; los tubos de los puntos de alimentación de carbón distan 4 ft (1,2 m) entre centros y se colocan por todo el lecho.

Un sistema de alimentación inferior consigue una eficacia entre $2\% \div 4\%$ en la combustión de carbones bituminosos.

El combustible considera que:
- *se debe trocear a menos de 0,25" (6,4 mm)*
- *se debe secar hasta menos del 6% de humedad*
- *la erosión de tuberías puede ser relevante*
- *el equipo de presurización tiene un mantenimiento importante*
- *el coste de explotación supera el de sistemas de alimentación superior*

b) Sistema de alimentación superior.- Se utiliza en calderas de lecho fluidificado burbujeante que quema combustibles reactivos y carbones bituminosos. Los alimentadores están por encima del nivel del lecho, en donde la presión de los gases del hogar es ligeramente inferior a la presión atmosférica; esta ubicación simplifica la alimentación, puesto que el flujo de carbón no está presurizado; utiliza el mismo equipo de alimentación de combustible que el alimentador superior de los hogares mecánicos, siendo más sencillo que el de alimentación inferior, por lo que tiene algunas limitaciones:

- El carbón se trocea hasta un tamaño máximo de 1,25" (31,8 mm)

- Los finos presentes (menores que 30 mesh) se limitan con el fin de que la combustión no se complete en la zona libre que está inmediatamente sobre el lecho

- La cantidad total de finos en el combustible debe ser relativamente importante

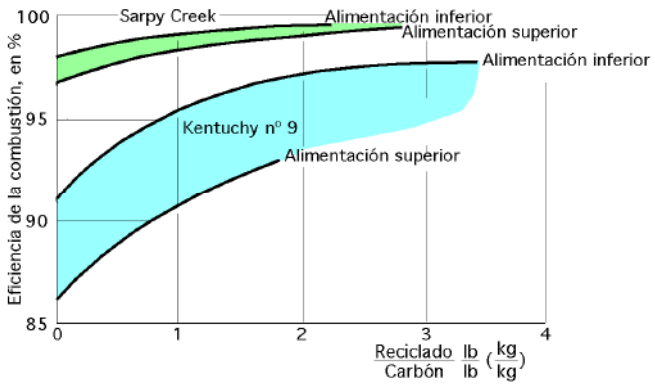


Fig XVII.18.- Comparación entre alimentadores de carbón inferior y superior al lecho

En la Fig XVII.18, se compara la eficiencia de la combustión con un sistema de alimentación inferior y superior del carbón, con dos tipos de combustible, el $\begin{cases} \text{- } \textit{Sharpy Creek subbituminoso} \\ \text{- } \textit{Kentucky 9 bituminoso} \end{cases}$; se observa que el primer carbón es mucho más reactivo que el segundo, es decir, la alimentación inferior produce una combustión más eficiente, que aumenta recirculando hacia el hogar los sólidos capturados en un multiciclón.

Un lecho fluido circulante con una velocidad mayor de fluidificación, presenta un proceso de mezcla de combustible de mejores características que las de uno burbujeante, por lo que en el primero se requiere un menor número de puntos de alimentación.

Sistema de alimentación del absorbente.- Para capturar el SO_2 en la caldera de lecho fluidificado, se añade caliza o dolomía, por la parte inferior del hogar.

El diseño del sistema de alimentación del absorbente debe tener en cuenta:

- El punto de inyección de este material en el hogar

- La presión del hogar en dicho punto

- El procedimiento a utilizar para la inyección

Cuando se trata de lechos con alimentación inferior, el absorbente se mezcla e inyecta con el combustible, ya que por su finura no se puede alimentar adecuadamente con un alimentador independiente.

Sistema de evacuación de la ceniza del lecho.- Cuando en una caldera de lecho fluidificado se quema un combustible con una cierta cantidad de ceniza, ésta se libera del carbón dentro del hogar de la caldera al tiempo que se alimentan el absorbente y los materiales inertes, por lo que hay que proveer los medios necesarios para la evacuación de sólidos del sistema.

En una caldera de lecho fluidificado, hay dos ubicaciones desde las que se evacuan los sólidos:

- La constituida por el drenaje del lecho

- La que corresponde al filtro de sacos o al colector-precipitador electrostático

Cuando se trata de combustibles con ceniza con gran cantidad de álcalis, es imprescindible drenar el material del lecho de la caldera, para evitar una concentración alcalina en el lecho; si la concentración de álcalis sobrepasa el $5 \div 6\%$ del peso del lecho, la probabilidad de que se formen aglomerados de escorias aumenta de forma notable.

Otro caso se presenta cuando el combustible tiene elevados contenidos de:

- Materia rocosa (pizarra)

- Ceniza de tamaño superior a 0,5" (12,7 mm)

ya que existe una cierta tendencia a que ese material incombustible se acumule en el lecho, lo que implicaría una pérdida de fluidificación; para evitar esta situación, el material acumulado se remueve hacia el drenaje del lecho, para su evacuación.

Sopladores.- En las calderas de lecho fluidificado, el combustible se quema a una temperatura inferior a la de ablandamiento de su ceniza, por lo que la ceniza volante que circula con los gases no alcanza el estado plástico en ningún caso, formando un polvo seco que es fácil de retirar de las superficies termointercambiadoras de la unidad.

En superficies termointercambiadoras adecuadamente espaciadas y con un diseño que tiene en cuenta la formación de ceniza volante, la unidad funciona satisfactoriamente alcanzando los valores deseados de $\begin{cases} \text{- } temperatura\ en\ el\ sobrecalentador \\ \text{- } eficiencia\ en\ la\ combustión\ y\ en\ la\ caldera \end{cases}$

Si los combustibles tienen altos contenidos de Na o K en sus cenizas, especialmente en los sistemas de alimentación superior de combustible, existe una alta probabilidad de ensuciamiento en la zona del paso de convección, por lo que requieren equipos de sopladores.

XVII.11.- DISEÑO DE CALDERAS DE LECHO FLUIDIFICADO

Hasta 1990 la mayoría de las aplicaciones de *lecho fluidificado burbujeante* consistían en instalaciones con una capacidad de generación de vapor inferior a 200.000 lb/h (25,2 kg/s); desde entonces, las unidades nuevas son de mayor capacidad, queman carbón y pertenecen al tipo de caldera de *lecho fluidificado circulante*; en unidades antiguas de gran potencia se han modernizado sus generadores de vapor con lechos burbujeantes, ya que éstos son más compatibles para estos cambios, que los circulantes.

En algunas aplicaciones los lechos burbujeantes se han empleado para cumplimentar las exigencias de reducir las emisiones de SO_2, mientras que en otras, el cambio del proceso de combustión por lechos fluidificados se motivó por problemas operativos derivados del combustible.

Remodelación con lechos burbujeantes.- En 1986, las *parrillas móviles* de una unidad de la planta termoeléctrica *R. M. Heskett de 80 MW, de la Montana Dakota Utilities, USA,* se sustituyeron por un *lecho fluidificado burbujeante*, Fig XVII.19; esta caldera, diseñada para producir $\begin{cases} 650.000\ lb/h \\ 81,9\ kg/s \end{cases}$ de vapor a $\begin{cases} 1300\ psig\ (89,6\ bar) \\ 950^{o}F\ (510^{o}C) \end{cases}$, quemaba lignito.

El alto contenido en Na de las cenizas del combustible provocaba severas escorificaciones y ensuciamiento en la superficie de la caldera y del sobrecalentador, por lo que en estas condiciones la potencia se reducía, durante prolongados períodos, a 50 MW.

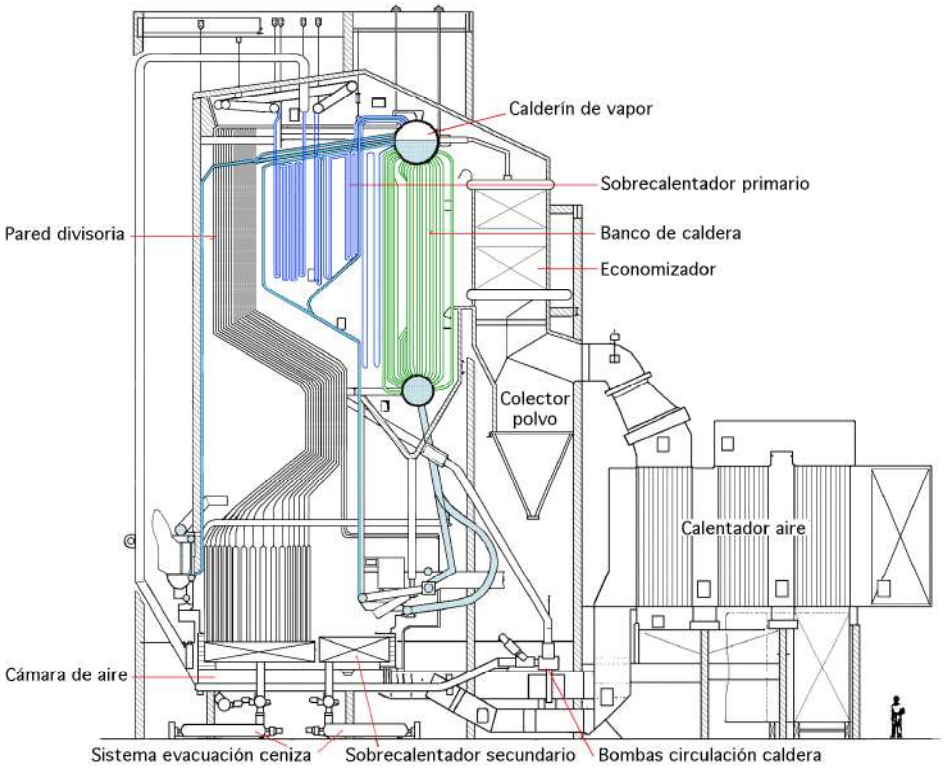


Fig XVII.19.- Unidad remodelada con lecho fluidificado burbujeante de 80 MW, de R.M.Heskett

Para minorar la temperatura de operación del hogar y evitar la escorificación y el ensuciamiento, y poder alcanzar de nuevo la potencia nominal, se hicieron las siguientes transformaciones:

- Instalación de un lecho fluidificado burbujeante de dimensiones $\begin{cases} 40 \times 26\ ft \\ 12{,}2 \times 7{,}9\ m \end{cases}$ *y se ubicó debajo de la caldera con muy pocas modificaciones de las partes a presión*

- La placa distribuidora y las paredes de cerramiento estaban refrigeradas por agua

- Las superficies de la caldera y del sobrecalentador estaban sumergidas para limitar la temperatura del lecho a 1.500°F (816°C)

- La profundidad del lecho era de 54" (1,372 m) y la velocidad superficial de 12 ft/s (3,7 m/s), en condiciones de lecho expandido

- No existe recirculación de polvo porque el lignito utilizado es muy reactivo, y como tiene poco S y muchos álcalis, se usa arena como material de lecho

Calderas de lecho fluidificado circulante.- Su diseño se basa en colocar un sistema de refrigeración por agua, facilitando la instalación de un cerramiento estanco a gases, para operar con presión positiva en el hogar. El diseño no tiene conductos de humo revestidos con refractario de alta temperatura en las proximidades del separador-colector primario de partículas; este tipo de construcción es posible utilizando un separador-colector primario de sólidos, (perfil de vigas en U), que se incorpora fácilmente dentro del cerramiento de la caldera.

La Fig XVII.20 muestra una caldera de lecho fluidificado circulante diseñada para quemar

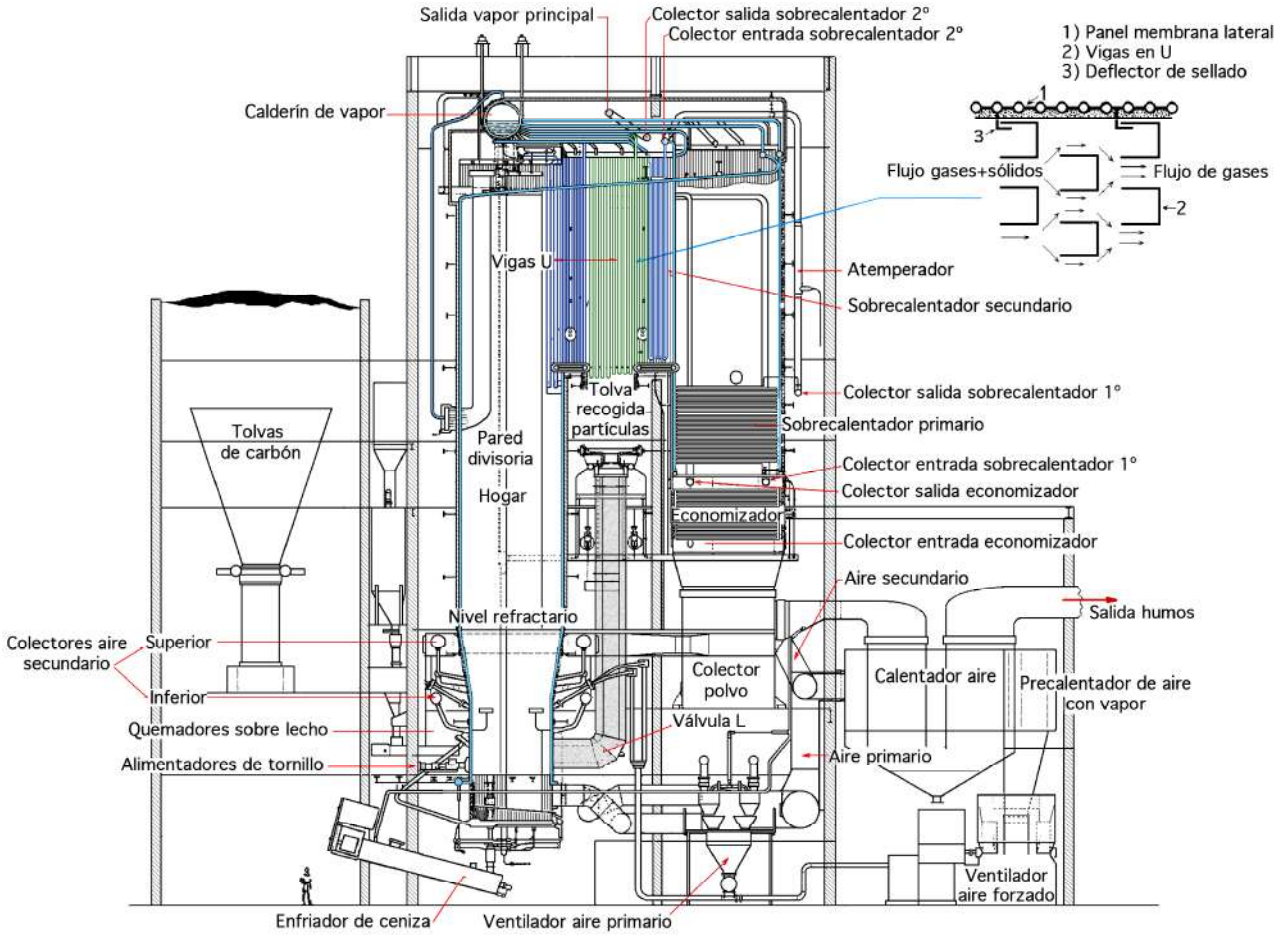


Fig XVII.20.- Vista de una caldera de lecho fluidificado circulante

carbón bituminoso bajo en volátiles, con capacidad de $\begin{cases} 465.000\ lb/h \\ (58{,}6\ kg/s) \end{cases}$ de vapor a $\begin{cases} 1550\ psig\ (107\ bar) \\ 955°F\ (513°C) \end{cases}$

El hogar de $\begin{cases} profundidad = 30\ ft\ (9{,}1\ m) \\ altura = 85\ ft\ (25{,}9\ m) \end{cases}$, dispone de paredes:

- *Divisoras refrigeradas por agua, dispuestas en toda la altura del hogar*
- *Aleteadas refrigeradas por vapor, ubicadas en la parte alta del hogar*

El *combustible* y el *absorbente* se introducen en el lecho a través de la parte interior de la pared frontal del hogar. La *ceniza* y el *absorbente consumido* se evacúan mediante tuberías de drenaje ubicadas en el fondo del hogar

Los sólidos que no se separan en el colector de perfiles vigas en U se reciclan en el multiciclón y se devuelven a la parte inferior del hogar.

El $aire_{primario}$ entra en el hogar a través de la placa distribuidora y el $aire_{secundario}$ se inyecta a unas cotas que se encuentran a 6 y 12 ft = (1,8 y 3,7 m) sobre la placa.

La totalidad del hogar en su parte inferior, hasta una cota de 22 ft (6,7 m) por encima de la

placa distribuidora, está recubierto con una fina capa de refractario de alta conductividad, sujeta a los tubos de agua mediante espárragos soldados. En la parte inferior del hogar se usa refractario para proteger los tubos de la corrosión y erosión; en el resto del cerramiento del hogar los tubos van desnudos.

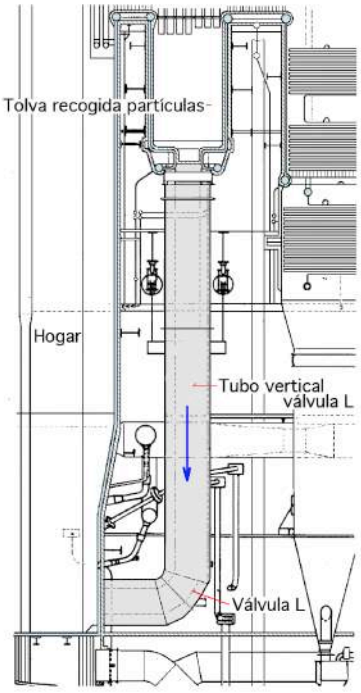


Fig XVII.21.- Recirculación de partículas en una caldera de lecho fluidificado circulante

Un diseño moderno de caldera de lecho fluidificado circulante emplea un separador de impacto, que reúne y recircula los sólidos hacia el hogar; consta de perfiles acanalados en forma de U, que se cuelgan del techo de la caldera. Las partículas sólidas que impactan en los perfiles en U se separan del resto de gases y se envían por el interior de los perfiles al fondo donde se descargan en la tolva de recogida de partículas, Fig XVII.21.

Diseños recientes incorporan separadores-colectores de perfiles en U con dos escalones, mediante los cuales se consigue una mejora en la eficiencia de separación de partículas sólidas.

- En el primer escalón, ubicado transversalmente en la parte superior a la salida del hogar, los sólidos recirculan directamente hacia la parte baja del hogar

- Para el segundo escalón, ubicado aguas abajo del hogar en el sentido de la circulación de gases, se monta una tolva de almacenamiento de partículas; el material separado por este escalón de perfiles en U se recicla a la parte baja del hogar mediante una válvula en L que controla el flujo, Fig XVII.20 y 21

Los sólidos separados y recogidos en la tolva de almacenamiento circulan por una tubería vertical y constituyen una fuente de sólidos para el hogar. El flujo de sólidos se provoca mediante la inyección de una pequeña cantidad de aire en la válvula L, de forma que se pueden recircular cientos ó miles de kg/h de partículas, con flujos de aire del orden de $4{,}7.10^{-3}$ m^3/s.

Los componentes de las calderas KCIL y SIU IR-CFB, son:

- *Hogar de la caldera*
- *Separadores de sólidos, vigas U*
- *Sistema de drenaje del lecho y refrigeradores de la ceniza*
- *Sistema de alimentación del combustible por gravedad asistido por aire*
- *Inyectores de aire refrigerados por agua*
- *Superficies de convección para la recuperación del calor*
- *Calentador tubular de aire horizontal (sólo en KCIL)*

- *Ventiladores (1°) y (2°) de inyección de aire y ventiladores de inducción*

- *Quemadores y lanzas sobre el lecho (sólo en SIU)*

- *Precipitador electrostático y depurador de filtros*

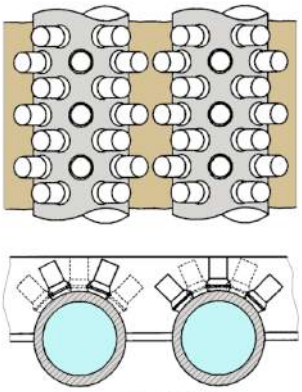


Fig XVII.22
Tubos membrana con protuberancias

El carbón pulverizado procedente del silo de carbón se introduce arrastrado por los alimentadores de cadena a través de la pared delantera para el KCIL, y un alimentador gravimétrico a través de la pared lateral para el SIU. La caldera KCIL se diseña con dos puntos de alimentación del combustible, (la SIU tiene un solo punto de alimentación) y 4 puntos de reinyección secundaria de sólidos, (la SIU tiene un solo punto de reinyección de sólidos) que están localizados en la parte posterior de la pared de la caldera en la zona primaria. La caldera KCIL tiene dos drenajes del lecho del hogar y dos refrigeradores de ceniza en el fondo del lecho fluido, mientras que la caldera SIU lleva sólo uno.

La caldera IR-CFB emplea un:

- *Sistema de separación de partículas de dos etapas que facilita la reducción del alto contenido de partículas sólidas*

- *Perfil uniforme de la temperatura del hogar*

Los beneficios de esta tecnología incluyen una eficiencia de la combustión superior, bajas emisiones, bajo mantenimiento, baja caída de presión, etc, lo que mejora el rendimiento global de la planta.

El sistema de separación de partículas en dos etapas en la caldera IR-CFB de las Fig XVII.25 y 27 consta de un $\begin{cases} \text{- } \textit{separador de impacto con vigas en U} \\ \text{- } \textit{multiciclón colector secundario de polvo (MDC)} \end{cases}$, que trabajan juntos proporcionando una eficiencia de recolección de partículas de más del 99,8%.

Las vigas en U conforman una estructura escalonada de canales de acero inoxidable en la sección de salida del hogar, capturan casi todos los sólidos suspendidos en los gases de combustión que salen del hogar y recirculan internamente estos sólidos a la zona inferior del hogar.

El MDC con ciclones de diámetro pequeño (<10 in., 250 mm), captura las partículas más finas que pasan a través del separador de partículas vigas en U y devuelve este material a la parte inferior del hogar en forma controlada. La capacidad de regular el sistema de reciclaje secundario proporciona una forma de control de la temperatura del horno, con la consiguiente mejora del rendimiento de la caldera.

El sistema de recogida de partículas en dos etapas IR-CFB proporciona un rendimiento mejorado, y un diseño de caldera simplificado y rentable.

Tabla XVII.2.- Condiciones de diseño y datos del combustible para los sistemas KCIL y SIU

	KCIL		SIU	
	Diseño	*Funcionamiento*	*Diseño*	*Funcionamiento*
Flujo de vapor, kg/hr (klb/hr)	*105000 (231)*	*103000 (227)*	*46000 (101.5)*	*46000 (101.5)*
Presión del vapor, MPa (psig)	*6,4 (913)*	*6,2 (884)*	*4,7 (675)*	*4,4 (640)*
Temperatura del vapor, °C (°F)	*485 (905)*	*483 (901)*	*399 (750)*	*399 (750)*
FW Temperatura, °C (°F)	*180 (356)*	*180 (356)*	*109 (228)*	*109 (228)*
Control temperatura vapor, % MCR	*60-100*	*60-100*	*50-100*	*40-100*
Tem. flujo gases calentador aire, °C (°F)	*140 (284)*	*130-140 (266-284)*		
Tem. flujo gases economizador, °C (°F)			*149 (300)*	*155 (311)*
Flujo carbón, kg/hr (klb/hr)	*25760 (56,7)*	*21760 (47,9)*	*5400 (11,9)*	*5400 (11,9)*
Temperatura lecho hogar, °C (°F)	*860 (1580)*	*865-880 (1589-1616)*	*865 (1589)*	*870 (1598)*
Temperatura hogar superior, °C (°F)	*878 (1612)*	*865-880 (1589-1616)*	*875 (1607)*	*880 (1616)*
Presión hogar inferior, mmwc (in. wc)	*610 (24)*	*600-680 (23,6-26,8)*	*610 (24)*	*610 (24)*
Presión hogar superior, mmwc (in. wc)	*340 (13,4)*	*300-380 (12-15)*	*254 (10)*	*260 (10,2)*
Rendimiento de la caldera, %	*87,9*	*88,8*	*86,6*	*86,6*
Exceso de aire, %	*20*	*16-20*	*20*	*19*
Relación Ca/S			*2,3*	*2,3*
ANÁLISIS APROXIMADO, % por wt				
Ceniza	*45*	*37,4*	*8,5*	*12,23*
Humedad	*10,4*	*9,4*	*11,3*	*7,45*
Azufre	*0,4*	*0,22*	*3,1*	*2,71*
Materia volátil	*18*	*25,7*	*34*	*33,64*
Carbono fijo	*24*	*27,28*	*46,2*	*46,68*
ANALISIS LIMITES, % por wt				
Carbono	*32*	*40*	*65,13*	*64,75*
Hidrógeno	*2,1*	*3,2*	*4,5*	*4,52*
Oxígeno	*9,82*	*8,83*	*5,96*	*7,06*
Azufre	*0,4*	*0,22*	*3,1*	*2,71*
Nitrogeno	*0,68*	*0,91*	*1,51*	*1,28*
Humedad	*10*	*9,4*	*11,3*	*7,45*
Ceniza	*45*	*37,4*	*8,5*	*12,23*
Potencia calorífica, Kcal/kg (Btu/lb)	*3500 (6300)*	*3910 (7038)*	*6492 (11.686)*	*6505 (11709)*
Tamaño carbón, mm (in.)	*6,4 x 0 (0,25 x 0)*	*6,4 x 0 (0,25 x 0)*	*12,7 x 0 (0,5 x 0)*	*20 x 0 (0,75 x 0)*
Tamaño medio, mm (in.)	*0,75 (0,03)*	*1,2 (0,05)*	*3 (1/8)*	*9 (3/8)*
Tamaño piedra caliza, micrones (mesh)			*1180 x 0 (16-)*	*1180 x 0 (16-)*
EMISIONES				
NO_x ppm (lb/10^6 Btu)	*100 (0,16)*	*< 75 (< 0,12)*	*< 170 (< 0,28)*	*90-100 (0,15-0,16)*
SO_2, w/o caliza, mg/Nm^3 (lb/10^6 Btu)	*< 1600 (< 1,27)*	*< 800 (< 0,63)*		
SO_2, % eliminado			*90*	*90*
CO, ppm (lb/10^6 Btu)			*200 (0,2)*	*150-200 (0,15-0,2)*

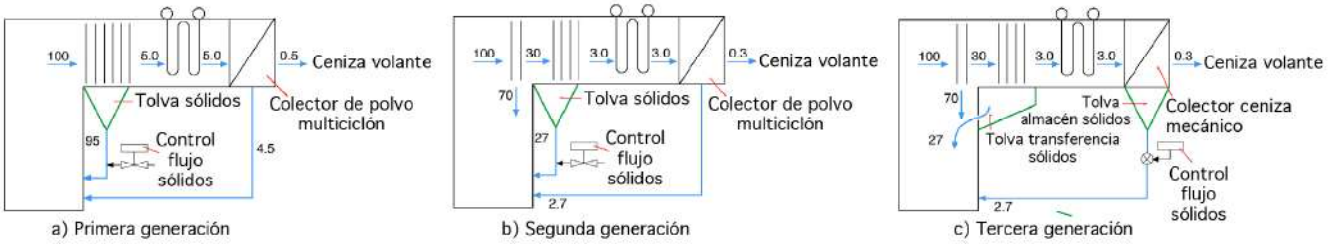


Fig XVII.23.- Evolución del diseño de B&W CFB, sistema de separación de sólidos y porcentajes de sólidos típicos

En el sistema de separación de partículas de dos etapas B&W, la totalidad del separador de partículas del haz de vigas en U está situado a la salida del hogar; en la Fig XVII.23, se presenta la evolución de este sistema

En el IR-CFB los gases a la salida del hogar tienen menor velocidad que en el diseño ciclón

CFB, lo que implica menos volumen de edificio, eliminando válvulas y sopladores de alta presión.

Uno de los objetivos de los fabricantes de calderas CFB ha sido la disminución del espesor de refractario, de forma que la pequeña cantidad de éste que se utiliza se aplica a áreas seleccionadas de la superficie de la estructura refrigerada por agua, en una delgada capa de:

- *Sólo 5/8 pulg (16 mm) de espesor en el hogar inferior*
- *Nunca más de 2 pulg (52 mm) de espesor sobre el tubo en otro lugar*

lo que requiere sólo del 10 al 25% del refractario correspondiente a un ciclón CFB, reduciéndose significativamente el mantenimiento del refractario.

Puesta en servicio de las calderas de lecho fluidificado.- Se ponen en servicio estableciendo un primer flujo de aire a través de la unidad, calentando el material del lecho hasta una temperatura que esté por encima de la temperatura de autoencendido del combustible que se va a usar, para asegurar que su combustión se inicie de forma segura, nada más entrar en el hogar.

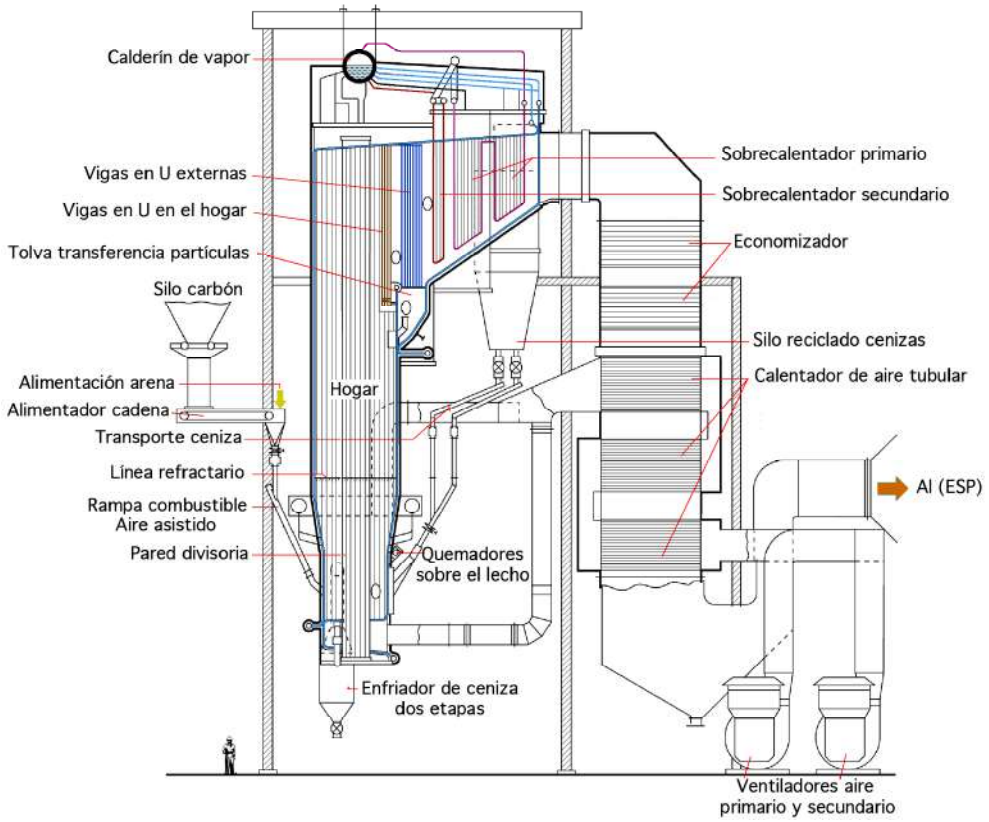
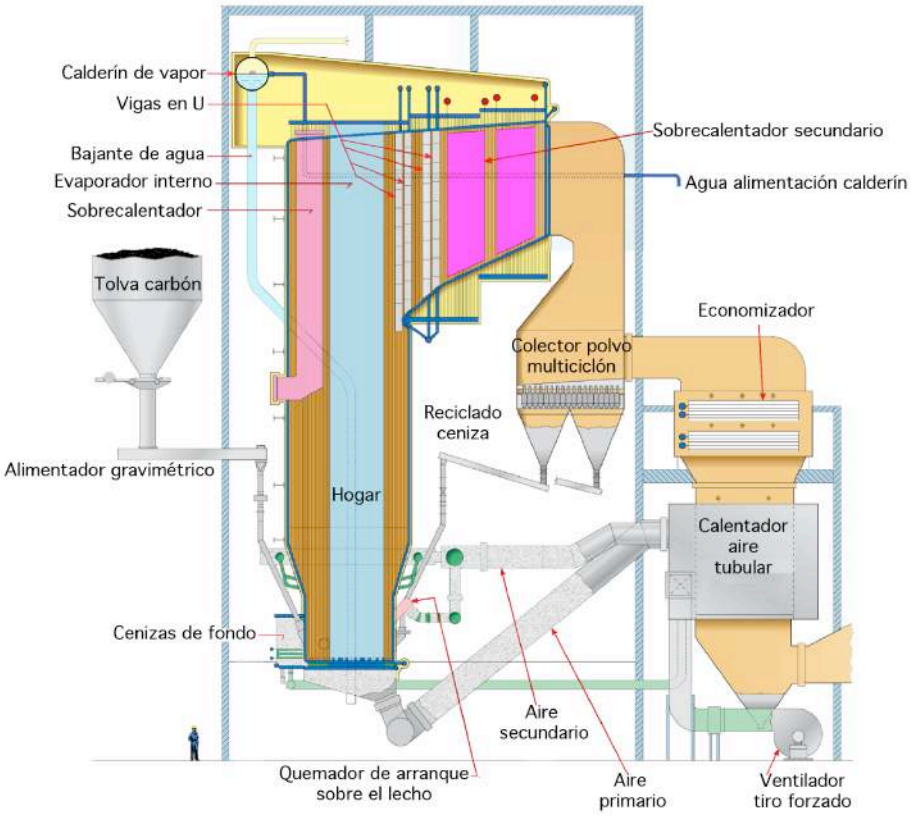


Fig XVII.24.- Vista de la caldera Kanoria IR-CFB

El calor necesario para elevar la temperatura del material del lecho hasta el nivel deseado, se facilita mediante un quemador situado $\begin{cases} \text{- } en\ el\ conducto\ de\ suministro\ de\ aire\ primario \\ \text{- } sobre\ el\ lecho \end{cases}$; como alternativa se puede emplear una combinación de ambas disposiciones de quemadores.



Capacidad { *Subcrítica: Para 2.200.000 lb/h (277 kg/s) o mayor según se requiera*
Supercrítica: Desde 2.200.000 lb/h (277 kg/s) a más de 4,5.10^6 lb/h (567 kg/s)

Presión de vapor { *Subcrítica: Para 2600 psig (17,9 MPa) diseño*
Supercrítica: Generalmente 3500 psi (24,1 MPa) con un 5% de sobrepresión

Temperatura del vapor: Subcrítica: 1050°F (566°C) ; Supercrítica: 1100°F (595°C)

Fig XVII.25.- Caldera de lecho fluidificado circulante con recirculación interna, tecnología IR-CFB de B&W

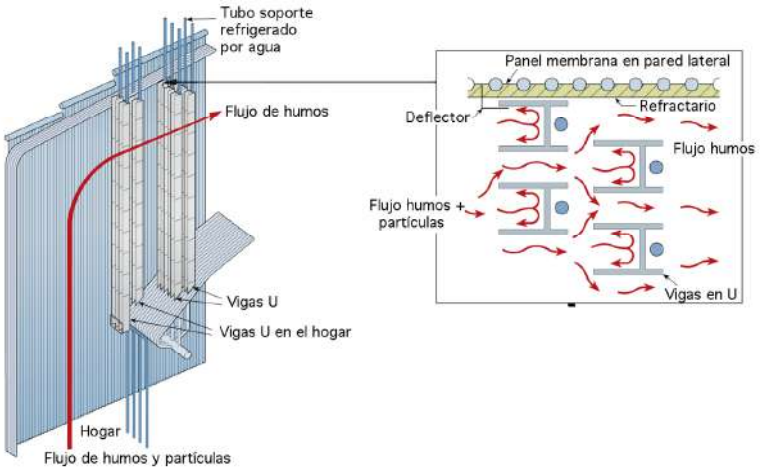


Fig XVII.26.- Vigas en U del sistema de separación de partículas en dos etapas en la caldera IR-CFB de B&W

El quemador ubicado sobre el lecho se utiliza en lechos fluidificados { *- circulantes* / *- burbujeantes* } que no tengan superficies sumergidas en el lecho.

Cualquiera que sea el sistema de quemador empleado, éste tiene que contar con equipos de

seguridad de la llama que deben incluir $\begin{cases} \text{- } detectores\ de\ llama\ independientes \\ \text{- } circuitos\ de\ control \end{cases}$, que permitan realizar, en cualquier emergencia y por razones de seguridad, el disparo o parada de los quemadores.

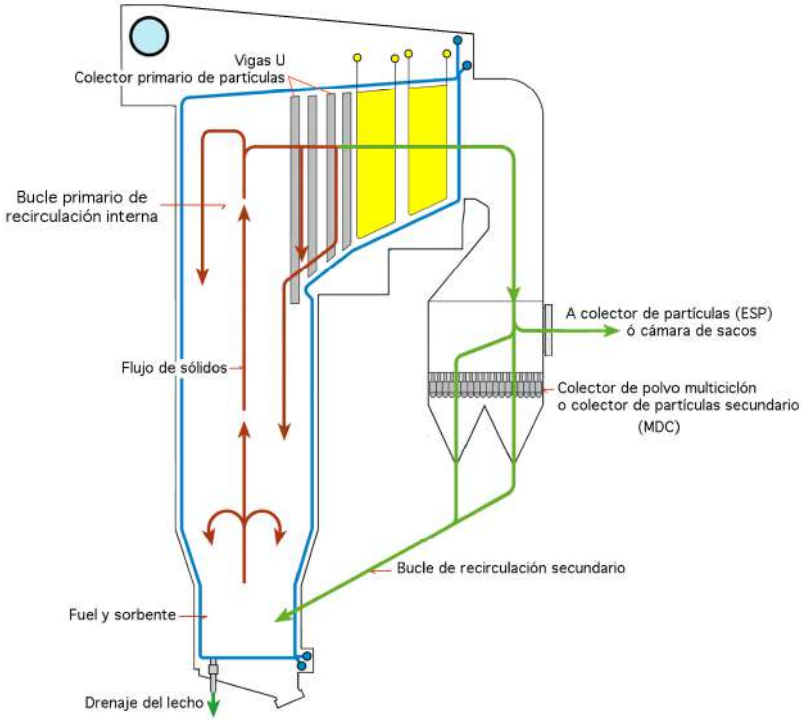


Fig XVII.27.- Sistema de separación de partículas en dos etapas en la caldera (IR-CFB) de B&W

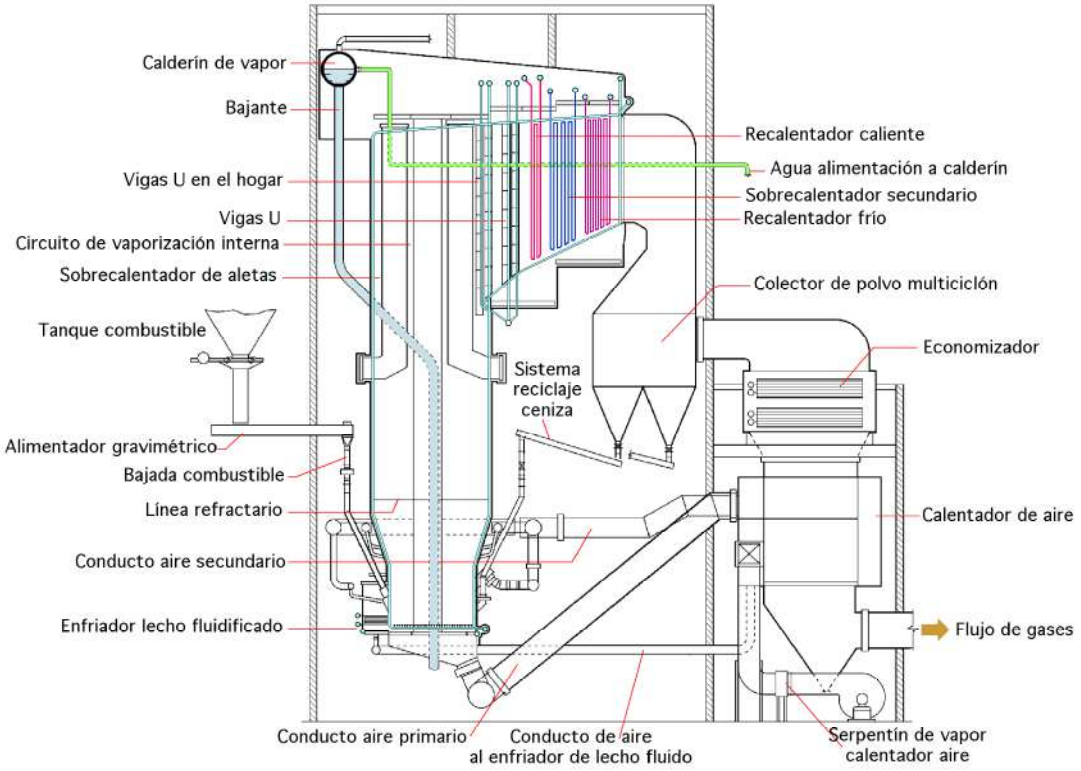


Fig XVII.28.- Sistema de recirculación interna de lecho fluidizado circulante en una caldera (IR-CFB) de 150 MW

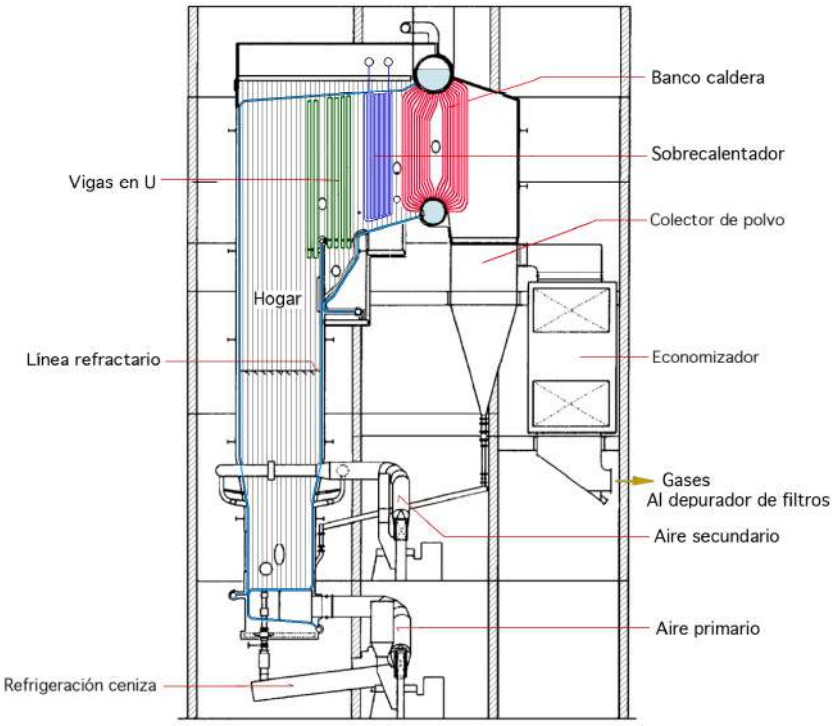


Fig XVII.29.- Caldera CFB, Universidad de Illinois

Los combustibles habituales tienen temperaturas de encendido muy diferentes; en la Tabla XVII.3 se indican algunos combustibles y las temperaturas de lecho mínimas a alcanzar, antes de que se alimente el combustible.

Tabla XVII.3.- Combustibles y temperatura mínima de lecho

Combustibles	*Temperatura mínima de lecho*	
	ºF	*(ºC)*
Carbón bituminoso	*900 a 950*	*(482 a 510)*
Lignito	*900*	*482*
Antracita	*1.000 a 1.050*	*(538 a 566)*
Madera húmeda	*1.200 a 1.250*	*(649 a 677)*
Fuelóleos	*1400*	*760*
Gas natural	*1400*	*760*

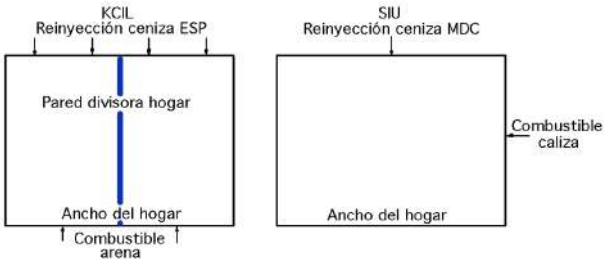


Fig XVII.30.- Vista inferior del hogar en los sistemas { *(ESP), inyección de combustible+arena*; *(MDC), inyección de combustible+caliza*

La temperatura real del lecho para un combustible particular se determina mediante ensayos; una vez establecida para el lecho una temperatura mínima segura, sólo se precisa medir la temperatura de este lecho, para que el control la mantenga por encima del mínimo cuando se esté alimen-

tando combustible; a medida que el combustible se introduce en el lecho, se enciende liberando su energía, con lo que la temperatura del lecho subirá por encima del valor mínimo de referencia.

El tipo de quemador ubicado sobre el lecho se utiliza para lechos fluidificados circulantes y para lechos fluidificados burbujeantes que no tengan superficies sumergidas en el lecho.

Cualquiera que sea el sistema de quemador empleado, éste tiene que contar con equipos de seguridad de la llama, que deben incluir detectores de llama independientes y circuitos de control que permitan realizar, en cualquier emergencia y por razones de seguridad, el disparo o parada de los quemadores.

Cuanto más aumenta el flujo de combustible, tanto más elevadas serán las temperaturas que se alcancen en el lecho fluidificado, proceso que continúa hasta que se llega a la carga de caldera deseada.

Control del sistema.- Las características funcionales de control y de operación, son válidas para unidades de lecho fluidificado y unidades convencionales.

Las diferencias de las calderas de lecho fluidificado respecto de las convencionales radican en:

- La necesidad de vigilar y controlar el transporte de una gran cantidad de sólidos en cualquier caldera de lecho fluidificado

- La necesidad de controlar la relación entre los flujos de $aire_{primario}$ *y* $aire_{secundario}$ *con el fin de alcanzar las mínimas emisiones y pérdidas por* $C_{inquemado}$

Como es posible el control de $\begin{cases} \text{- sólidos} \\ \text{- flujos de aire} \end{cases}$, los únicos parámetros que quedan por regular en un lecho fluidificado son la $\begin{cases} \text{- temperatura del lecho} \\ \text{- densidad de partículas} \end{cases}$ que le configuran.

XVII.13.- CONTROL DE LA TEMPERATURA DEL LECHO

Lecho burbujeante.- La temperatura del lecho fluidificado se controla actuando sobre el proceso de extracción de calor. Como la superficie de absorción de calor se sitúa en el interior del lecho y la recirculación de sólidos tiene una influencia mínima en la temperatura del mismo, su balance calorífico establece su temperatura de operación. A medida que el flujo de combustible se modifica, para poder alcanzar la temperatura de operación en el lecho es necesario modificar el balance calorífico del mismo, que se puede alterar de modo que:

a) La temperatura del lecho se controla si se reduce el flujo de combustible lo cual se consigue:

- Reduciendo la profundidad del lecho y la densidad del sistema

- Disminuyendo la velocidad de los gases a través del lecho

ya que al disminuir la profundidad de la superficie sumergida del lecho, la transferencia de calor es menor,

mientras que la temperatura del lecho se mantiene en el valor deseado.

b) La temperatura del lecho se controla también actuando sobre el $\begin{cases} - \ aire_{exceso} \\ - \ calentamiento\ del\ aire_{comburente} \end{cases}$

- Si se incrementa el $aire_{exceso}$ *que fluye a través del lecho, aumenta la cantidad de calor necesaria parra calentar el nuevo caudal de aire y, por tanto, la temperatura del lecho disminuye*

- Si la temperatura de calentamiento del $aire_{comburente}$ *disminuye, también disminuye la temperatura del lecho*

Lecho circulante.- En las calderas de lecho fluidificado circulante, la densidad de los sólidos se distribuye con más uniformidad a lo alto del hogar que en las de lecho burbujeante, lo que junto con la gran cantidad de sólidos que recirculan, da lugar a unas temperaturas de gases y sólidos en el hogar muy uniformes. Cuando se modifican la carga o el combustible, es posible aumentar o disminuir la temperatura del hogar, regulando la densidad de sólidos en el hogar. En algunos diseños la temperatura del hogar se modula mediante una superficie termointercambiadora exterior. También se puede modificar la temperatura del lecho variando el $aire_{exceso}$ y la temperatura de calentamiento del $aire_{comburente}$.

Hay que tener en cuenta que el coeficiente global de transmisión de calor en estos lechos depende de la densidad de los sólidos existentes en el mismo; modificando la densidad del hogar se puede variar la transferencia de calor desde los gases hacia la superficie de refrigeración del hogar, controlando así la temperatura del lecho.

XVII.14.- CONTROL DE LA DENSIDAD DEL LECHO

La posibilidad de mantener la densidad que el lecho requiere, depende de las propiedades de:

- Los sólidos que le configuran

- Las características funcionales de los sistemas separadores-colectores y de reciclado

Como el hogar está formado por el material del lecho, el absorbente, el material inerte y la ceniza del combustible, cada uno de estos componentes se debe controlar adecuadamente.

El control necesita que la cantidad de sólidos en el hogar sea igual o exceda de la que se requiere parra soportar una combustión estable, al tiempo que regule la correspondiente temperatura del lecho.

Si con los gases sale una gran cantidad de sólidos de la caldera, la:

- Proporción de sólidos en el hogar decrece

- Estabilidad de la combustión puede ser inaceptable

- Temperatura del hogar puede subir

Esto se corrige modificando la distribución de tamaños de las partículas de los sólidos alimen-

tados a la caldera, o aportando algún tipo de control de la densidad del lecho.

Lecho burbujeante.- Su densidad depende de:

- El balance de sólidos alimentados
- La purga del drenaje del lecho
- Los sólidos elutriados
- Las pérdidas que se producen a través de los separadores-colectores finales de la unidad

La cantidad de material fino que sale de la caldera con los gases depende del tamaño de las partículas y de su velocidad de fluidificación.

Cuando los sólidos se recirculan desde el colector de polvo de la unidad, el flujo de sólidos en la zona que hay por encima del techo se incrementa notablemente, por lo que la densidad del lecho (que se compone de partículas no arrastradas) no se altera. Desde un punto de vista práctico, el flujo mínimo de alimentación de sólidos debe aportar el material suficiente para reponer las partículas sobredimensionadas que se hayan extraído del lecho.

Cuando se tiene una entrada de sólidos por encima del valor mínimo, la cantidad de partículas drenadas del lecho se debe ajustar para mantener la densidad deseada en el mismo, lo que se controla manteniendo la caída de presión correspondiente a la densidad requerida.

Lecho circulante.- La cantidad de sólidos que sale del hogar con los gases y la densidad del lecho son dos parámetros relacionados entre sí.

a) Los sólidos que salen del hogar con los gases se capturan en un separador y se devuelven al hogar, con el fin de mantener la densidad en el lecho, cuya magnitud se determina por el balance de sólidos de entrada y de salida, similar al de un lecho burbujeante.

b) En un lecho fluidificado circulante, la densidad es la suma de los sólidos:

- En el hogar
- Que se encuentran en la tolva de almacenamiento de partículas
- Que hay en las tuberías verticales de las válvulas L

Como la cantidad de sólidos que circula a través de las válvulas L es mucho mayor que la de entrada de sólidos, la densidad entre hogar y almacenamiento puede variar en un $10 \div 20\%$ por minuto, lo que facilita una rápida respuesta, por el control, a los cambios de $\begin{cases} \textit{- el flujo de combustible} \\ \textit{- carga en la caldera} \end{cases}$

La división entre el lecho denso y la parte superior del hogar depende de la:

- Distribución del tamaño de las partículas que existan en el hogar
- Velocidad de los gases correspondientes a la primera zona y a la parte superior del hogar

Con el fin de aportar la densidad suficiente en la parte superior del hogar y de satisfacer los requisitos de transferencia de calor, la densidad total del sistema se controla mediante la purga del lecho, que debe ser suficiente para prevenir la acumulación de material basto en el lecho denso.

Si la purga del lecho requerida por la eliminación del material basto, es mayor que la que se precisa para el control de la densidad total, se produce una reducción importante en la densidad del hogar superior, por lo que hay que tomar medidas para llevar de nuevo el sistema a un balance que sea correcto.

La distribución del tamaño de sólidos en el hogar se corrige:

- *Modificando la distribución del tamaño de partículas en los sólidos de entrada*
- *Clasificando y reciclando una parte del flujo de purga del lecho*

Al igual que para los lechos burbujeantes, la caída de presión en el hogar del lecho fluidificado circulante es un indicativo para el control.

XVII.15.- CONTROL DEL AIRE SECUNDARIO

En una primera fase, el reparto del $aire_{comburente}$ entre $\begin{cases} aire_{primario} \\ aire_{secundario} \end{cases}$, se realiza con vistas a la optimización de la combustión completa y de las emisiones de CO y NO_x. La Fig XVII.31 muestra unas curvas del flujo de aire, en función de la carga, en una caldera que quema carbón bituminoso.

Como consecuencia de las variaciones en la cantidad de combustible relativas a los cambios de carga, el reparto final del $aire_{comburente}$, entre $aire_{primario}$ y $aire_{secundario}$ dependerá del funcionamiento de la unidad y del sistema de control que actuará para afinar la combustión óptima y la distribución de la densidad del hogar.

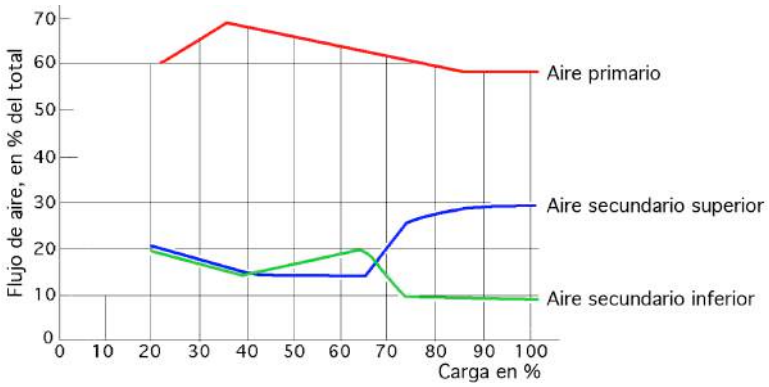
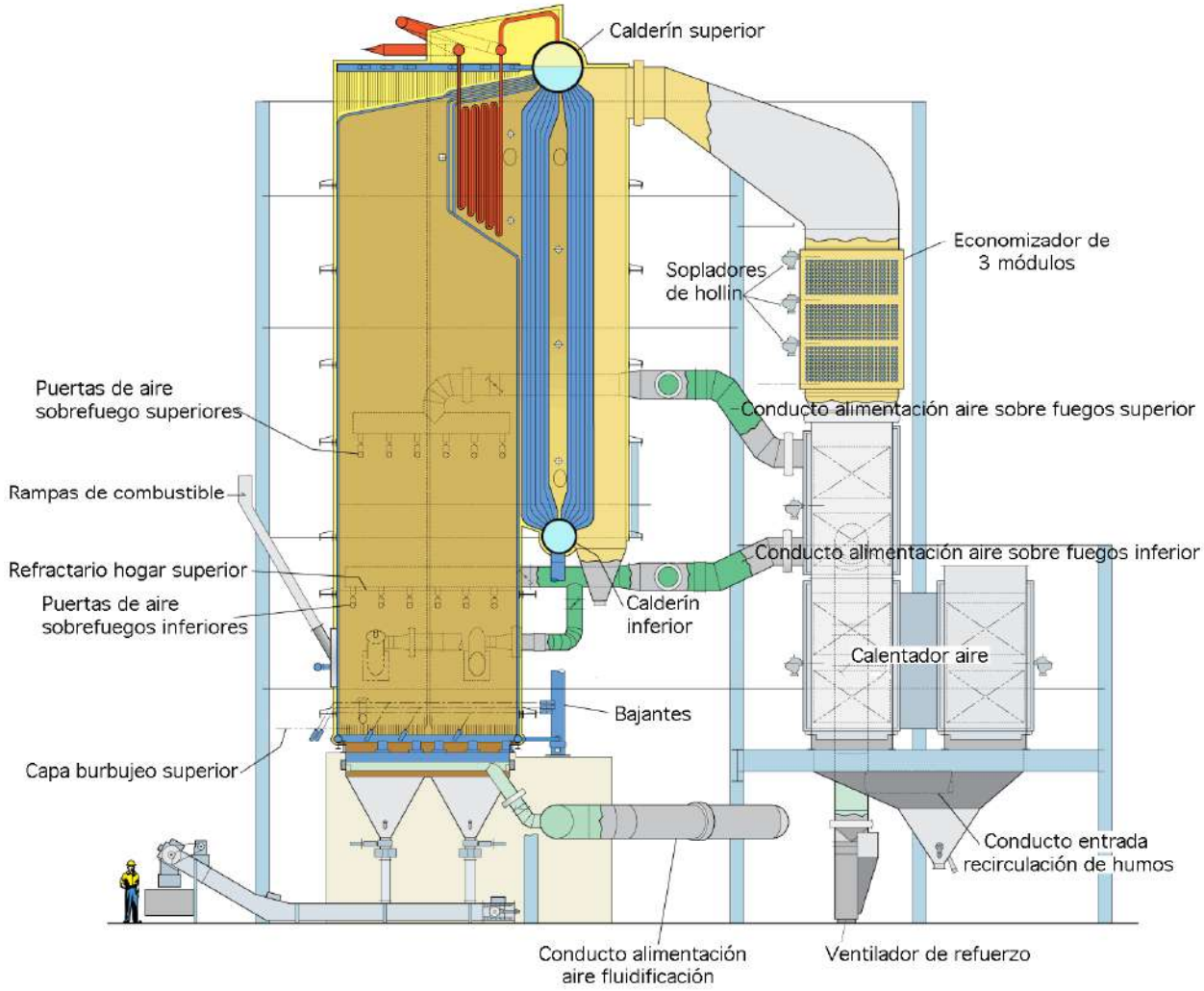


Fig XVII.31.- Distribución del flujo de aire en una caldera que quema carbón bituminoso



Reduce las emisiones de NO_2 y SO_2 y quema combustibles con poder calorífico entre $\begin{cases} 2800\ Btu/lb \\ 3500\ Btu/lb \end{cases}$ *sin apoyo de otros combustibles*

Fig XVII.32.- Caldera de lecho fluidificado burbujeante Towerpak (BFB) soportada por abajo

REFERENCIAS CAP XVII.- CALDERAS DE LECHO FLUIDIFICADO

Mickley H.S., Trilling C.A.- INDUSTRIAL ENGINEERING CHEMISTRY. Vol. 41, nº 6 (1949)

Gelperin N.I., Ainshtein V.A., Korotyanskaya L.A.- INTERNATIONAL CHEMICAL ENGINEERING, Vol. 9, nº1, pp.137-142 (1969)

Babu S.P., Shah B., Talwalkar A.- AIChE SYMPOSIUM, Series nº 176, Vol. 176, pp. 176-186.- (1978)

Staub F.W., Canada G.S.- FLUIDIZATION, pp. 339-344, Cambridge University Press (1978)

Gliksman L.R., Deker N.A.- PROCEEDINGS OF THE 6th INTERNATIONAL FLUIDIZED BED COMBUSTION CONFERENCE, pp. 1152-1158, Atlanta, Georgia, USA (1980)

Tang J.T.- AIChE SPRING NATIONAL MEETING, March 27-31, Houston, Texas, USA, (1983)

Kobro H., Brereton C.- CIRCULATING FLUIDIZED BED TECHNOLOGY, Proceeding of the First International Conference on Circulating Fluidized Beds, pp. 263-272, Halifax, Nova Scotia, Canada (1985)

B&W.- STEAM: ITS GENERATION AND USE, 40th Edition, Chapter 16, The Babcock Wilcox Company, Barberton, Ohio, USA, (1992)

Saario, A. Oksanen, A., y Ylitalo, M.- COMBINATION OF GENETIC ALGORITHM AND COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS IN COMBUSTION PROCESS EMISSION MINIMISATION.- Combustion Theory and Modelling. Vol. 10, pp. 1037-1047, 2006.

Saario, A. Oksanen, A., y Ylitalo, M.- NITRIC OXIDE EMISSION MODELING IN BUBBLING FLUIDIZED BED FURNACE FOR BIOMASS.- Clean Air, vol. 7, pp. 105-126, 2006

Guangxi Yue, Junfu Lu, Hai Zhang, Hairui Yang, Jiansheng Zhang, Qing Liu, Zheng Li.- DESIGN THEORY OF CIRCULATING FLUIDIZED BED BOILERS.- Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China, Philippe JAUD, EDF France Paris 78401, France.-

Guangxi Yue, Junfu Lu.- HOT TEST OF MATERIAL BALANCE IN A 75T/H CFB BOILER WITH WATER COOLED SQUARE SEPARATOR.- Journal of Tsinghua University, 1998, 38(5): 7-10

Werdermann A.- HEAT TRANSFER IN LARGE SCALE CIRCULATING FLUIDIZED BED COMBUSTORS OF DIFFERENT SIZES.- In: Amos A Avidan eds. Proceedings of the Fourth International Conference on CFB. New York: ASME: 1993

Montat D, Arhaliass A, Schmitt G.- HEAT TRANSFER MEASUREMENT AND ANALYSIS IN A 125MW CIRCULATING FLUIDIZED BED BOILER.- Rubow L N, Commonwealth G eds. Proceedings of the 12th International Conference on FBC. New York: ASME Press, 1995: 1207-1214

Maryamchik M., Wietzke D.L.- B&W IR-CFB BOILER OPERATING EXPERIENCE UPDATE AND DESIGN.- Babcock & Wilcox, Barberton, Ohio, U.S.A. Presented to: POWER-GEN INTERNATIONAL 99.- November 30-December 2, 1999.- New Orleans, Louisiana, U.S.A.