# XXVI.- DISEÑO DE CALDERAS INDUSTRIALES

pfernandezdiez.es


| | |
|---|---|
| *Introducción* | *975* |
| *Equipo generador de vapor* | *977* |
| *Banco de caldera* | *977* |
| *Flujo de vapor* | *979* |
| *Vapor para procesos y calentamientos* | *979* |
| *Servicio combinado de calor y energía* | *980* |
| *Procesos de cogeneración* | *980* |
| *Para un sistema energético basado en turbina de gas* | *980* |
| *Para un sistema energético basado en turbina de vapor* | *981* |
| *Generación de energía* | *981* |
| *Potencia de los servicios auxiliares* | *982* |
| *Agua de alimentación de la caldera* | *982* |
| *Control medioambiental* | *983* |
| *Tipos de calderas para aplicaciones industriales* | *984* |
| *Caldera energética Stirling de uno y dos calderines (SPB)* | *984* |
| *Caldera Towerpack de uno y dos calderines* | *988* |
| *Caldera (PFI)* | *990* |
| *Caldera (PFT)* | *991* |
| *Caldera (FM)* | *992* |
| *Calderas de alta capacidad (HCFM)* | *993* |
| *Caldera (PFM)* | *994* |
| *Calderas de lecho fluidificado* | *994* |
| *Calderas de lecho fluidificado circulante (CFB)* | *995* |
| *Calderas de lecho fluidificado burbujeante (BFB)* | *996* |
| *Caldera para mejorar la extracción de petróleo (EOR)* | *999* |
| *Referencias* | *1001* |

Las calderas industriales tienen, en general, características de diseño distintas de las calderas energéticas; se construyen en un amplio campo de $\begin{cases} tamaños \\ presiones \\ temperaturas \end{cases}$, desde las de vapor saturado a $\begin{cases} 2\ psig\ (1{,}2\ bar) \\ 218°F\ (103°C) \end{cases}$ que se utilizan para caldeos de todo tipo, hasta las de $\begin{cases} 1800\ psig\ (125\ bar) \\ 1000°F\ (538°C) \end{cases}$ para plantas generadoras de electricidad.

Las calderas industriales suministran vapor para más de una aplicación; en determinadas circunstancias la demanda de vapor puede ser cíclica o fluctuante, de modo que el funcionamiento de la unidad generadora de vapor y su equipo de control, se pueden complicar.

En las calderas industriales, el flujo de la mezcla *agua-vapor* suele ser en circulación natural, con excepción de las viejas unidades remodeladas con lechos fluidificados burbujeantes y las grandes calderas con gran capacidad de generación de vapor.

Las grandes calderas para generación de electricidad, se diseñan para quemar carbón pulverizado o troceado, aceite, gas o una combinación de aceite o gas con un combustible sólido determinado.

Las calderas industriales se diseñan para los combustibles anteriores y también para quemar en hogares mecánicos, carbón groseramente troceado. Muchos procesos industriales generan subproductos que pueden servir como combustibles, contribuyendo significativamente al rendimiento operativo de la planta, y reduciendo el coste del producto, como:

*- Gases derivados de la industria del acero, como el gas de horno alto y el gas de batería de coque*

*- Productos clásicos de la industria del petróleo, como CO, gas de refinería y coque de petróleo*

*- Productos de la agricultura como el bagazo de los molinos de azúcar, cáscaras de cacahuete, posos de café, etc*

*- Residuos de la industria de la pulpa y papeleras, como madera, cortezas, productos químicos de proceso, sedimentos, etc*

*- Residuos sólidos municipales, basuras*

Los parámetros que especifican las calderas industriales son:

*- Presión de vapor*

*- Temperatura e intervalo de control*

*- Flujo de vapor: punta, mínimo, curva de carga*

*- Temperatura y calidad del agua de alimentación*

*- Capacidad de reserva y número de unidades*

- *Combustibles y sus propiedades*
- *Características de las cenizas*
- *Preferencias en métodos de combustión*
- *Límites de emisiones medioambientales $SO_2$, $NO_x$, partículas sólidas, otras*
- *Espacio del emplazamiento y limitaciones en accesos*
- *Auxiliares, requisitos de operadores y base de evaluación*

## XXVI.1.- EQUIPO GENERADOR DE VAPOR

Una de las características constructivas que distingue a la mayoría de las calderas industriales, es la gran superficie del ***banco de caldera*** de agua saturada (superficie vaporizadora), dispuesta entre el calderín de vapor (superior) y el calderín inferior, Fig XXVI.1 y 4.

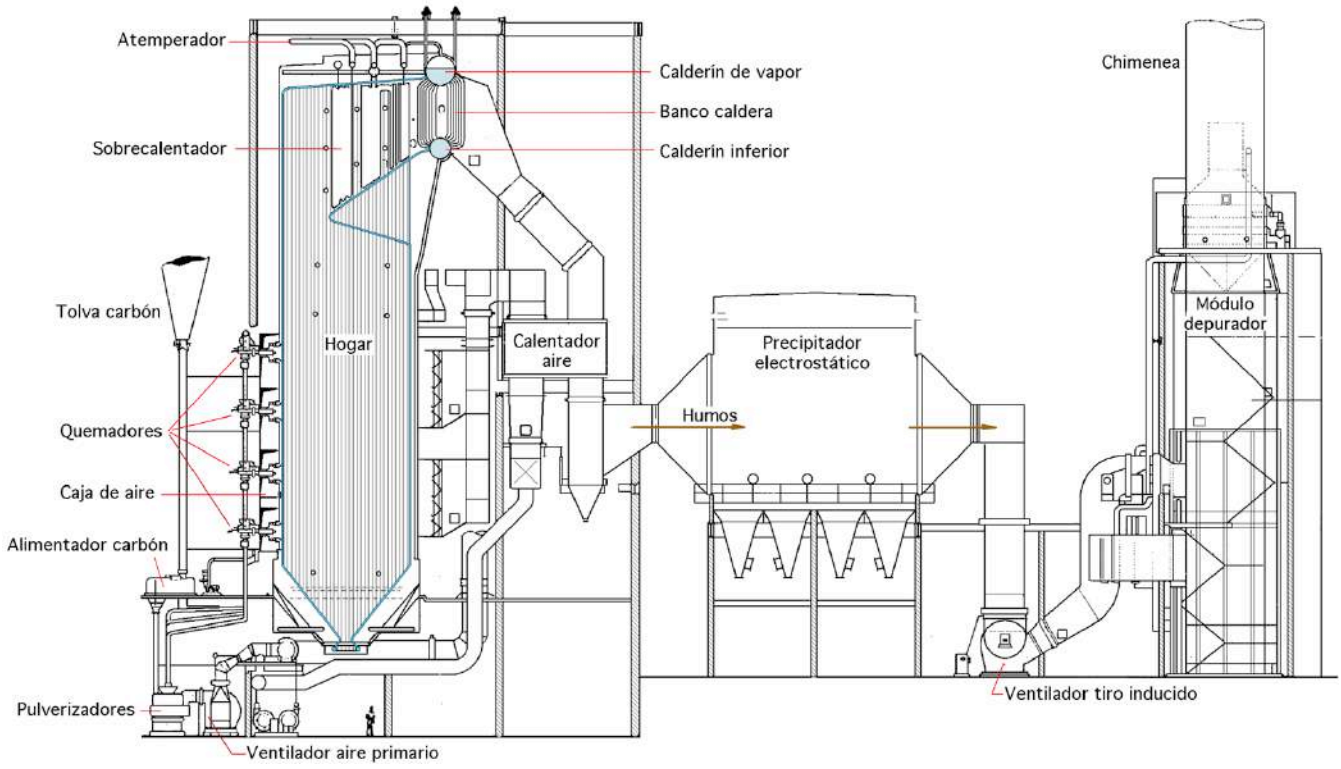



*Fig XXVI.1a.- Sistema de caldera energética Stirling para carbón pulverizado de dos calderines, con equipo de control medioambiental*

El objetivo del banco tubular de la caldera radica en calentar el agua de alimentación que entra en la caldera hasta la temperatura de saturación y, a continuación, vaporizarla al mismo tiempo que enfría los humos hasta una temperatura de salida económicamente razonable.

En las calderas de baja presión, en el interior del recinto del hogar no existe la suficiente superficie de caldeo para que se pueda absorber la energía necesaria para llevar a cabo el calentamiento y la vaporización, por lo que se dispone otro banco de caldera, en el seno del flujo de humos,

aguas abajo del hogar y del sobrecalentador (si existe), que se encarga de ofrecer la superficie termointercambiadora que se precise.

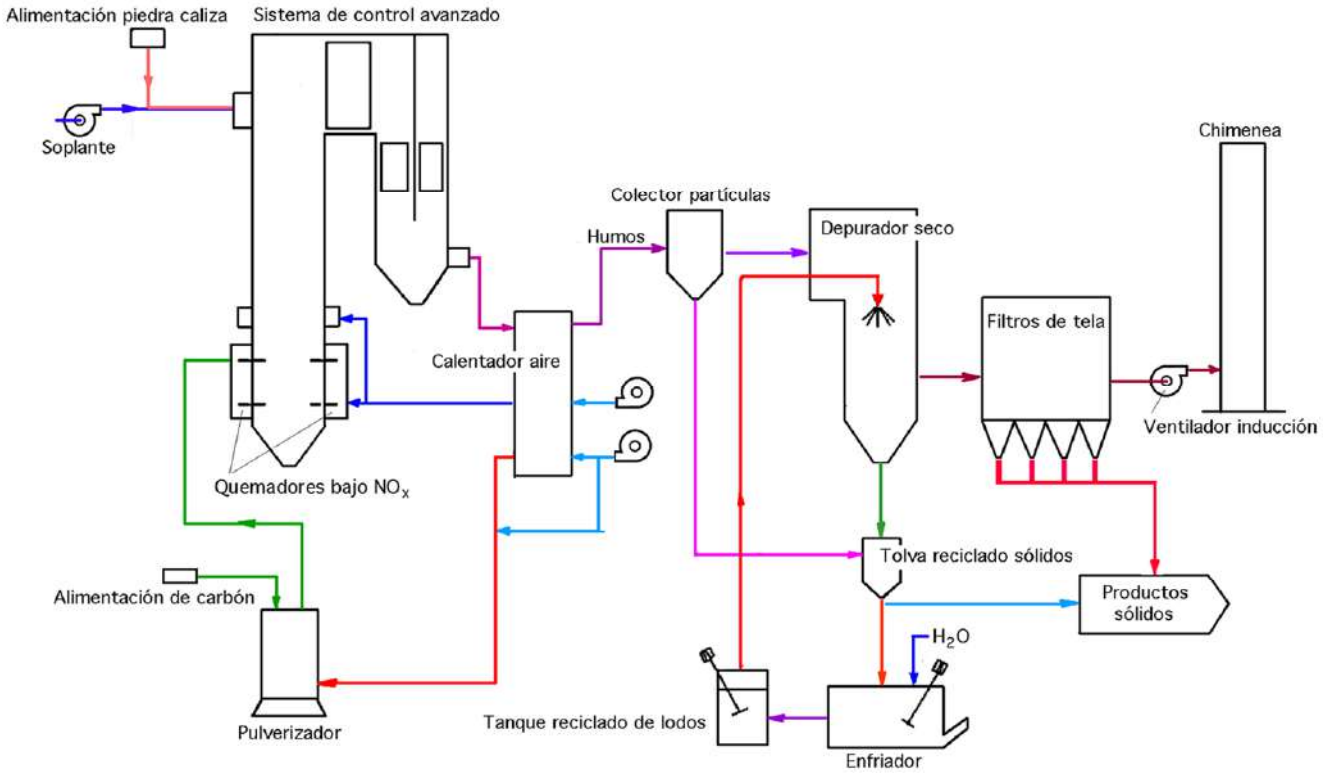



*Fig XXVI.1b.- Esquema de instalación energética para carbón pulverizado con equipos de control medioambiental*

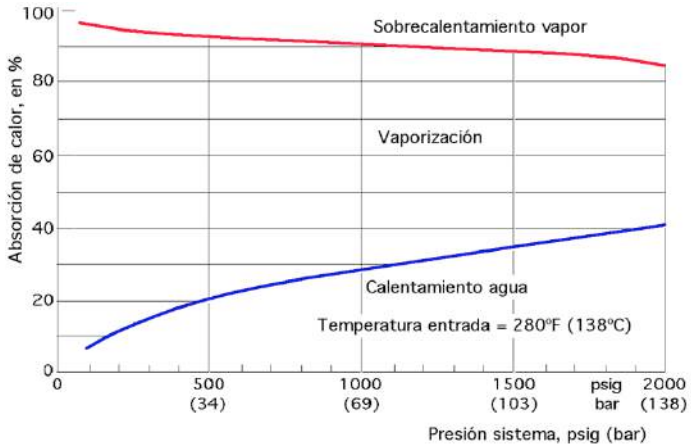



*Fig XXVI.2.- Efecto de la presión del sistema sobre la vaporización, en caldera industrial con sobrecalentamiento constante de 100°F (56°C)*

Cuando la presión en el generador de vapor aumenta, Fig XXVI.2, la absorción de calor requerida para la vaporización del agua disminuye, al tiempo que aumenta la absorción de calor por parte del sobrecalentador.

En algunas unidades industriales modernas de muy alta presión, se instala un módulo de cal-

dera más pequeño, independiente del calderín de vapor, que efectúa la misma función que el banco de caldera, pero a menos coste, Fig XXVI. 5.

Se puede utilizar también un economizador o un calentador de aire, aguas abajo del banco de caldera, para reducir aún más la temperatura de los humos a la salida de la unidad.

***FLUJO DE VAPOR.-*** Para asegurar el cumplimiento de la demanda de vapor, que implica el aporte de los flujos de calor necesarios en todos los puntos de utilización, hay que seleccionar un equipo generador de vapor con la suficiente capacidad, operatividad y flexibilidad.

La demanda de vapor puede ser: { *- estacionaria, como en la mayor parte de los sistemas de calentamiento* ; *- transitoria, fluctuando amplia y rápidamente* }

Los requisitos del vapor para las diversas condiciones de funcionamiento se tienen que establecer con exactitud, a fin de asegurar que el sistema de caldera seleccionado, pueda cumplir con todas las condiciones de la demanda, es decir: { *- Flujo* { *- punta* ; *- máximo continuo* ; *- mínimo* } ; *- Régimen de cambio de flujo* }

La carga punta determina la capacidad máxima del equipo generador de vapor y de todos los equipos auxiliares asociados; para cargas altamente fluctuantes, se establecen puntas de 15 minutos, que es el tiempo máximo que se pueden soportar. En la mayoría de los casos, las puntas de corta duración se cubren con el almacenamiento de calor, inercia térmica asociada al equipo generador de vapor.

***Vapor para procesos y calentamientos.-*** La presión de vapor saturado para procesos de calentamiento es aquella para la que la correspondiente temperatura de condensación del vapor es ligeramente superior a la temperatura requerida en los materiales o productos a calentar; la utilización de vapor sobrecalentado no tiene sentido para este tipo de servicio y, frecuentemente, es indeseable por interferir en el control de la temperatura.

Por ejemplo, la recuperación o desvulcanización del caucho es un proceso de calentamiento con vapor en el que el caucho se calienta en una solución ácida a 400ºF (204ºC), con un vapor saturado en fase de condensación a { *250 psig (18,2 bar)* ; *407ºF (208ºC)* } en la camisa del desvulcanizador.

Es raro distribuir vapor mediante tuberías largas con presiones inferiores a 150 psig (11,4 bar), debido al coste de las tuberías.

Los requisitos del vapor dentro del recinto de la caldera en { *- sopladores* ; *- bombas de alimentación* ; *- otros auxiliares* }, aconsejan hacer funcionar las calderas a una presión mínima de 125 psig (9,6 bar), existiendo muy pocas

plantas de vapor que operen por debajo de esta presión.

La presión requerida a la salida de un equipo generador de vapor para procesos de calentamiemiento, se sitúa entre $\begin{cases} 125 \div 250 \text{ psig} \\ 9{,}6 \div 18{,}2 \text{ bar} \end{cases}$ y no se requiere vapor sobrecalentado; para este tipo de servicio los fabricantes de calderas han fijado la presión 250 psig (18,2 bar) en calderas de tubos de pequeño diámetro.

En calderas estacionarias y domésticas, la presión de operación se mantiene prácticamente constante en todo el campo de cargas, de modo que en estas condiciones se satisfagan todos los requisitos de presión y flujo de los diversos equipos que utilicen el vapor; el diseño de los aparatos para el control automático de la combustión se hace conforme a este supuesto operativo.

***Servicio combinado de calor y energía.-*** Muchas operaciones de fabricación precisan energías mecánica, eléctrica y vapor para calentamiento, como las que se presentan en las industria papelera y textil, en las de producción de productos químicos y en las de procesado del caucho. Para estas situaciones hay que realizar estudios de costes y beneficios, relativos a una planta en la que:

*- La energía eléctrica se compra al exterior y el vapor se genera en la misma para cumplimentar los requisitos de calentamiento*

*- Energía y el vapor se generan por un mismo sistema*

La valoración de cada una de estas alternativas exige un conocimiento exacto de:

*- Las necesidades de vapor y de energía eléctrica*

*- La posibilidad de correlacionar estos requisitos*

*- Los estudios económicos*

Cuando sólo se produce electricidad, un 60% del calor suministrado por el combustible se pierde en el sistema de condensación, por lo que es posible que resulte más económico comprar energía eléctrica a una fuente proveedora exterior, cuando esté a precios razonables, excepto cuando exista calor residual disponible a bajo coste en la misma planta, así como subproductos combustibles, bagazo, gas de horno alto, aserrín o madera triturada, gases calientes, etc

Para la ***cogeneración*** se usan dos procedimientos:

*- Cuando en un lugar hay gas natural barato y disponible, para la generación de electricidad se puede utilizar una turbina de gas, empleando el calor residual del escape de dicha turbina para:*

*- Producir vapor en un generador de vapor recuperador de calor (HRSG), Fig XXVI.3*

*- Una caldera recuperadora de calor*

***Para un sistema energético basado en turbina de gas:***

*- Si la demanda de vapor excede a la demanda de energía, se suministran quemadores auxiliares con el HRSG*

*- Si la demanda eléctrica excede a la demanda de vapor, el exceso de energía se puede comprar en el exterior*

***Para un sistema energético basado en turbina de vapor:***

*- Si la demanda de vapor sobrepasa a la de energía eléctrica, el vapor de escape de la turbina se complementa con fuego auxiliar en la caldera y posteriormente se pasa a un sistema reductor de presión y de recalentamiento*

*- Si la demanda de energía eléctrica es más alta que la del vapor, se puede utilizar un sistema de condensación con extracción de vapor, o comprar en el exterior la diferencia de energía eléctrica*

Si los requisitos de vapor y de energía son estacionarios, la cogeneración puede resultar ventajosa, incluyendo en ésta los costes de capital, operación y mantenimiento.

Si el servicio es discontinuo, el factor de carga es bajo o las solicitudes correspondientes de vapor y de energía eléctrica son notablemente diferentes, resultando más barato el suministro de electricidad desde la red local y el suministro del vapor en la propia planta.

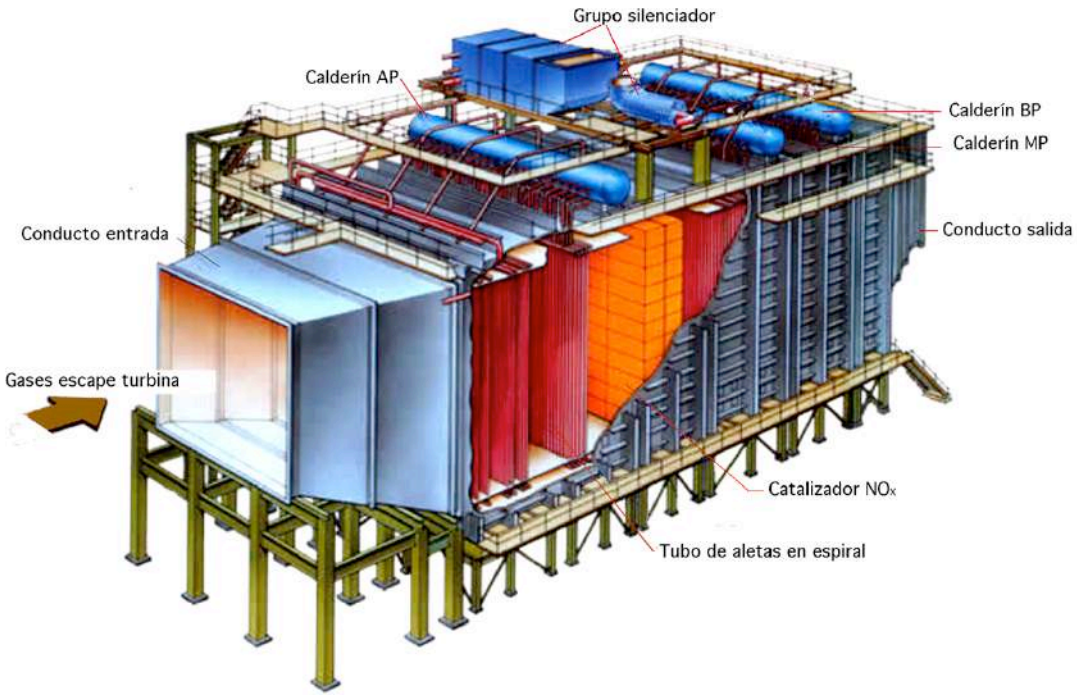



*Fig XXVI.3.- Recuperador de calor (HRSG) para generación de vapor*

***Generación de energía.-*** En aquellos lugares en los que hay disponibilidad de gas natural a un precio competitivo, las turbinas de gas simples, en especial las modernas unidades modulares, tienen tendencia a dominar en la generación de energía eléctrica. Cuando se dispone de un combustible residual o de carbón de bajo coste, el sistema compuesto por un generador de vapor y turbina de vapor puede llegar a configurar el sistema más económico para un suministro local de energía eléctrica, en el que:

*- La selección de la presión y temperatura de estos sistemas, depende de la evaluación económica*

*- El control de la temperatura del vapor se suministra cuando la potencia eléctrica de la unidad supera los 25 MW; es muy importante cuando se puedan provocar grandes oscilaciones en la producción energética, debido a las variaciones en el flujo de combustible y en su calidad*

***Potencia de los servicios auxiliares.-*** En todas las plantas se precisa energía eléctrica para el accionamiento de diversos auxiliares del sistema, como son las bombas de alimentación de agua del ciclo, los ventiladores de aire y humos del generador de vapor y los molinos del combustible, al tiempo que se necesita energía complementaria para el calentamiento del agua del ciclo.

En las instalaciones de calentamiento para procesos industriales, es norma accionar los auxiliares por vapor, para lo que hay que contar con el suficiente vapor de escape para el calentamiento del agua del ciclo térmico de vapor y para el accionamiento de otros pequeños auxiliares.

Existen circunstancias en las que la demanda de vapor de escape es tan grande, que todos los auxiliares podrían estar accionados con vapor y, por tanto, se podría evitar la energía eléctrica.

A veces se prevén accionamientos de equipos auxiliares con motores eléctricos y con turbinas de vapor, lo que es particularmente apropiado para la puesta en servicio desde el estado frío de la planta.

***Agua de alimentación de la caldera.-*** Al aumentar la presión y temperatura de las unidades, conforme progresan los diseños, se tiene que incrementar también la calidad del agua del sistema, estando relacionada la vida de la caldera con la misma; la necesidad de una adecuada calidad del agua se suele subestimar con demasiada frecuencia, siendo el resultado las costosas retiradas de servicio para sustituir las partes a presión afectadas. Una calidad superior en el agua conduce siempre a un vapor de mayor calidad, lo cual es necesario para una adecuada protección de los sobrecalentadores y turbinas.

La utilización de un condensador vertical de agua como atomizador constituyó un paso fundamental para utilizar agua de alta calidad, evitando la contaminación que se producía en el vapor cuando se usaba el agua de alimentación del ciclo para atemperar el vapor mediante la atomización.

En la Fig XXVI.4 se representa una instalación simple de este tipo de condensador.

La máxima concentración de sólidos permisible en el agua de la caldera, en relación con la presión de vapor a la salida de la unidad generadora, se indica en la Tabla XXVI.1.

*Tabla XXVI.1.- Límites del contenido de sólidos en el agua de caldera, (ppm), para calderas con calderín*

| *Pres. salida gener. vapor (psi)* | *0-300* | *301-450* | *451-600* | *601-750* | *751-900* | *901-1000* | *1001-1500* | *1501-2000* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Sólidos totales (ppm)* | *3500* | *3000* | *2500* | *2000* | *1500* | *1250* | *1000* | *750* |
| *Alcalinidad (total)* | *700* | *600* | *500* | *400* | *300* | *250* | *200* | *150* |
| *Sólidos en suspensión* | *300* | *250* | *150* | *100* | *60* | *40* | *20* | *10* |

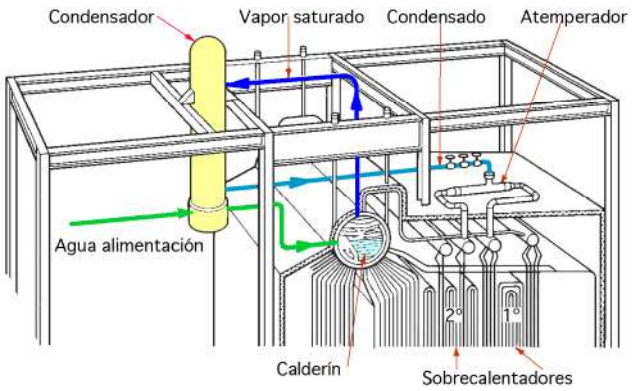



*Fig XXVI.4.- Sistema atemperador-condensador, que suministra agua pura a un atomizador de agua de atemperación por medio de una condensación de vapor del calderín*

***Control medioambiental.-*** Las emisiones atmosféricas procedentes de calderas industriales, se restringen por diversas regulaciones. Los contaminantes a controlar comprenden, principalmente, el $SO_2$, el $NO_x$ y las partículas sólidas; otros contaminantes se controlan en aplicaciones especiales, como en el caso de plantas de energía a partir de basuras.

Una caldera energética puede estar equipada con los siguientes componentes:

*- Quemadores de bajo $NO_x$ para limitar la formación de este contaminante*

*- Precipitador electrostático, para limitar las emisiones de ceniza volante en polvo a menos del 0,2%*

*- Sistema de desulfuración de humos (FGD), por caliza húmeda, para la eliminación del $SO_2$*

***El control del $SO_2$ en las plantas industriales se puede hacer por tres vertientes distintas:***

*- Combustión de combustibles con bajo contenido en S*

*- Eliminación del $SO_2$ durante el proceso de combustión, mediante la aplicación, por ejemplo, de la tecnología del lecho fluidificado*

*- Eliminación del $SO_2$ formado posteriormente a la combustión, inyectando un absorbente en el hogar o mediante un tratamiento de desulfuración de humos (FGD) por vía seca o por vía húmeda.*

Cuando se queman combustibles con bajos contenidos en S se suelen emplear sistemas de desulfuración de humos por vía seca, utilizando la caliza como reactivo, combinados con filtros de sacos.

***El control de los $NO_x$ se centra en limitar su formación durante el proceso de combustión;*** en todo caso, la tecnología aplicada está ligada al sistema de combustión seleccionado, con:

*- Quemadores de bajo $NO_x$ para unidades de carbón pulverizado, aceite y gas*

*- Sistemas de $aire_{secundario}$ sobre el lecho para hogares mecánicos*

*- Combustión a baja temperatura en lechos fluidificados*

En caso de necesidad, para una mayor depuración se puede añadir un sistema de tratamiento

postcombustión de reducción catalítica selectiva (SCR) y una reducción no catalítica selectiva (SNCR)

En general, para la combustión de todos los combustibles, con excepción de los gases limpios o de fuelóleos especiales, se requiere un control postcombustión de las partículas sólidas emitidas, requisito que se cumplimenta con el empleo de precipitadores electrostáticos (ESP) o de filtros de saco.

## XXVI.2.- TIPOS DE CALDERAS PARA APLICACIONES INDUSTRIALES

***CALDERA ENERGÉTICA STIRLING (SPB).-*** Es una unidad colgada, con dos calderines y un paso único de humos, Fig XXVI.1, 5 y 6. En algunos casos resulta rentable sustituir el diseño de dos calderines por otro con un solo calderín y una unidad de caldera modular más pequeña, Fig XXVI.5 y 7.

El hogar completo está refrigerado por agua, utilizando la construcción de paredes membrana, configuradas por tubos de 3" (76,2 mm) de diámetro, separados 4" (101,5 mm) entre ejes, para funcionar con tiro equilibrado o con hogar presurizado. Los separadores-ciclón de la mezcla *vapor-agua* se disponen como depuradores o secadores primarios y secundarios del vapor en el interior del calderín, para facilitar una alta calidad de vapor seco, tal como el que se necesita en los actuales diseños de sobrecalentadores y turbinas de vapor. El hogar incluye un arco o bóveda saliente que sirve para dirigir los humos hacia la sección del sobrecalentador y proteger a éste de la alta temperatura de radiación del hogar.

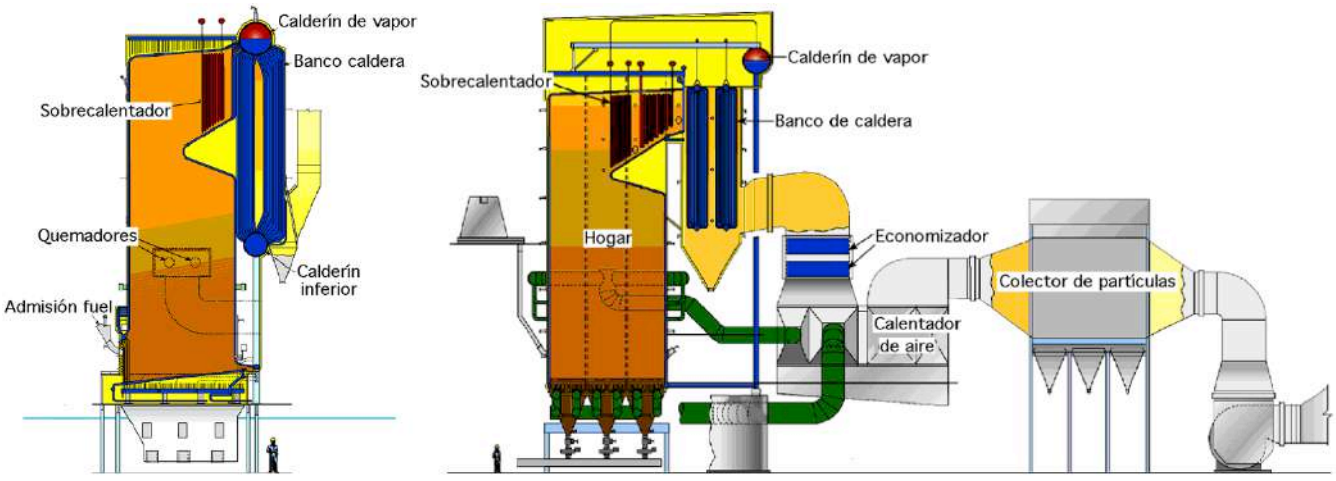



*Fig XXVI.5.- Calderas Stirling de dos calderines y un calderín, con colector de partículas*

Pueden quemar combustibles sólidos, líquidos y gaseosos, y para adecuarse mejor a la combustión particular de cada tipo, existen diversas configuraciones del hogar, Fig XXVI.8, en las que:

*- La parte inferior del hogar en forma de tolva se usa para el caso de quemar carbón pulverizado*

*- El hogar con fondo plano, se emplea para quemar gas o fuelóleo*

*- El hogar con extremo inferior abierto se utiliza para recibir una parrilla de hogar mecánico; los combustibles pueden ser carbón, madera, bagazo, biomasa, combustibles derivados de residuos y residuos sólidos municipales, tal como se reciben*

Los hogares para combustibles que tienen cantidades significativas de finos o altas humedades, tal como ocurre con la madera, la biomasa, el bagazo y los combustibles derivados de residuos, se diseñan siempre con hogares de bóveda dual, (bóvedas frontal y posterior), que ayudan a definir la zona de combustión y permiten una mejor ubicación de las boquillas de $aire_{secundario}$, que son especialmente interesantes para combustibles sólidos con gran cantidad de finos. Este diseño se desarrolló y patentó por B&W como hogar con zona de combustión controlada (CCZ). La caldera energética Stirling (SPB) se equipa, además, con un economizador y/o un calentador de aire, para facilitar la recuperación del calor desarrollado en el sistema. Para muchos combustibles, el calentamiento del aire comburente es una cuestión importante; el carbón pulverizado requiere aire caliente para secar el combustible, siendo imprescindible para una buena combustión de combustibles húmedos, como la madera, el bagazo y la biomasa. Existen otros diseños que atienden a casos especiales de combustibles, capacidades, presiones, temperaturas, etc., que pueden constituir una alternativa. Las calderas energéticas Stirling se diseñan para cumplimentar unas condiciones específicas de vapor y de combustible, construyéndose con una serie de componentes prediseñados que minimizan los costes de ingeniería y el tiempo de entrega.

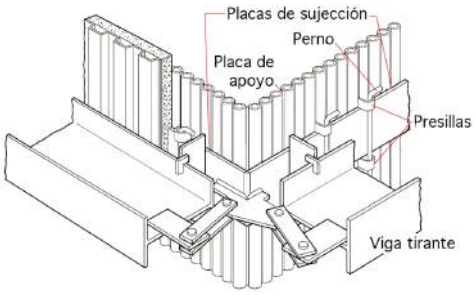


*Fig XXVI.6.- Sellado de la esquina de un hogar*

La anchura y profundidad del hogar se proyectan con un incremento de 1 ft (0,3 m), de forma que los sellos en las esquinas del hogar estén perfectamente determinados, Fig XXVI.6.

La distancia entre ejes de los calderines está entre $\begin{cases} 16 \div 32\ ft \\ 4{,}9 \div 9{,}8\ m \end{cases}$, lo que permite ubicar las puertas de acceso, las aberturas de sopladores, las vigas tirantes y las plataformas.

La variedad de dimensiones permite diseñar con gran flexibilidad para satisfacer los requisitos propios de cada proyecto, en cuanto a: $\begin{cases} \text{- Temperatura de los humos a la salida del hogar} \\ \text{- Holguras o separación entre quemadores} \\ \text{- Tiempo de residencia} \\ \text{- Tamaño de la parrilla} \\ \text{- Velocidad de los humos} \\ \text{- Espaciado en convección, etc} \end{cases}$

Características de diseño: $\begin{cases} \text{- Queman carbón pulverizado, fuelóleo, gas: } \begin{cases} 150.000 \div 1.200.000\ lb/h \\ 18{,}9 \div 151{,}2\ kg/s \end{cases} \\ \text{- Presión de vapor, hasta 2.000 psig (138 bar)} \\ \text{- Hogar mecánico: } \begin{cases} 150.000 \div 400.000\ lb/h \\ 18{,}9 \div 50{,}4\ kg/s \end{cases} \text{ ; temperatura vapor} < 1.000^{\circ}F\ (538^{\circ}C) \\ \text{- Hogar mecánico para madera, bagazo, biomasa: } \begin{cases} 180.000 \div 600.000\ lb/h \\ 22{,}7 \div 75{,}6\ kg/s \end{cases} \end{cases}$

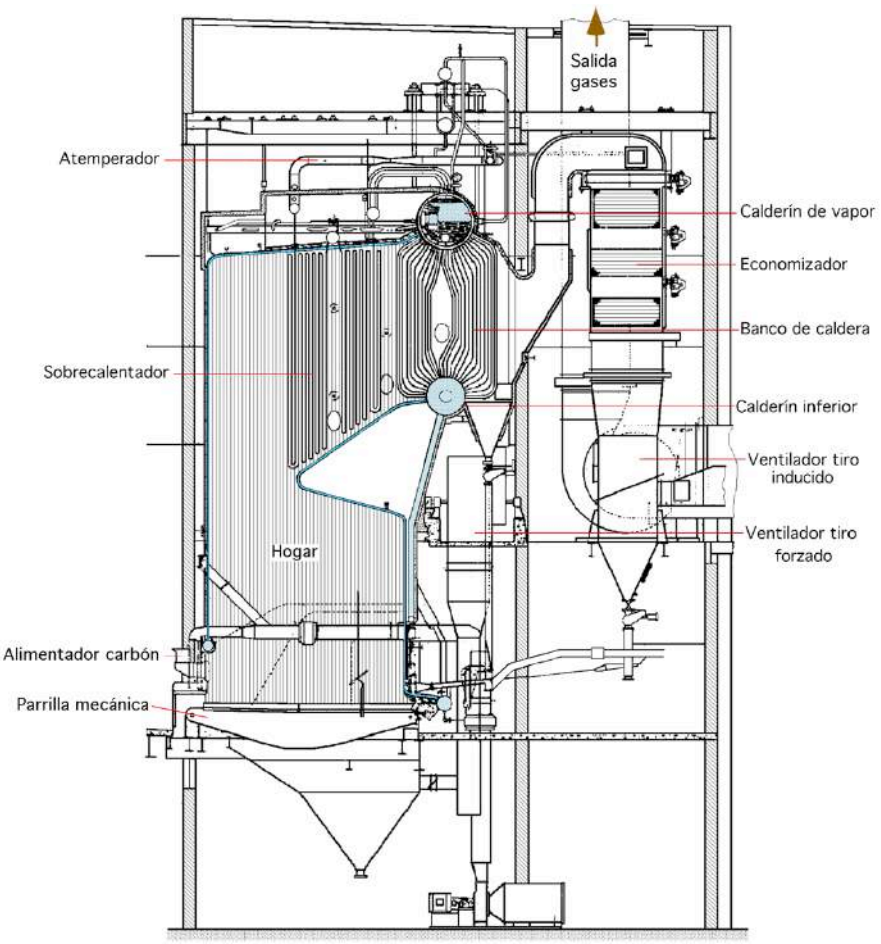



*Fig XXVI.7.- Caldera Stirling de dos calderines para combustión en hogar mecánico*

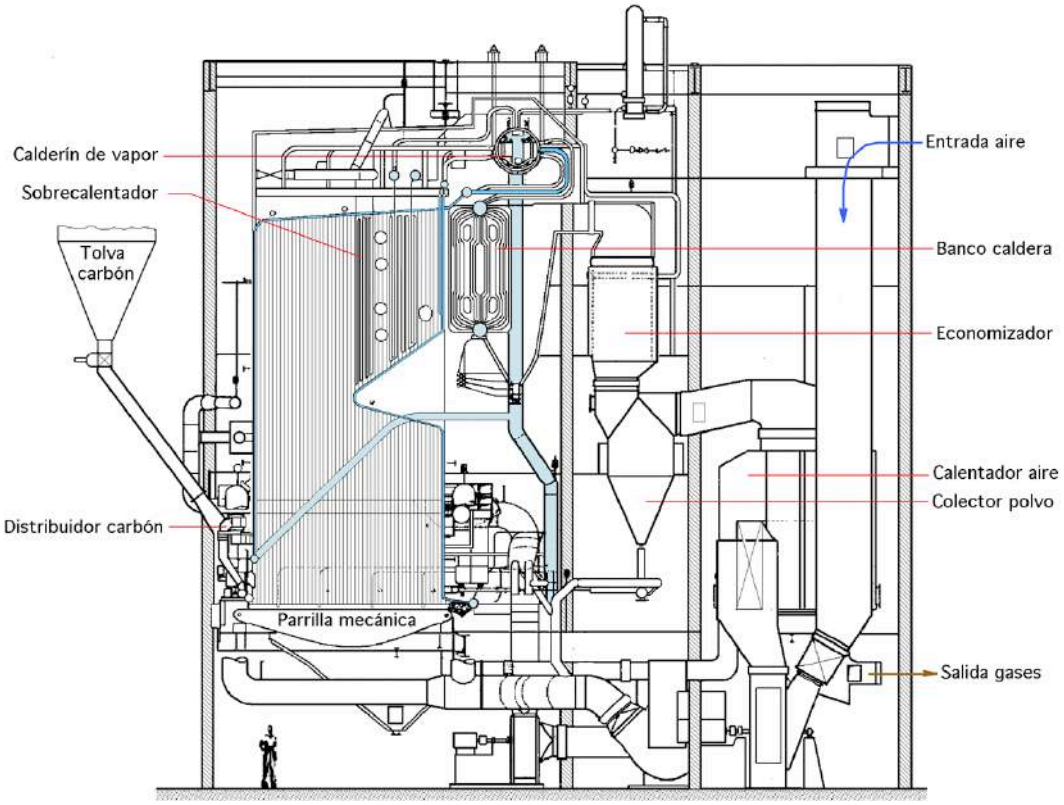
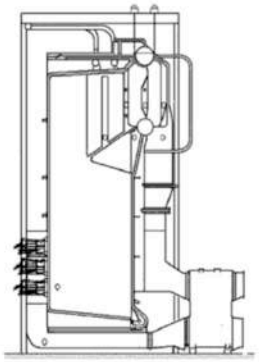
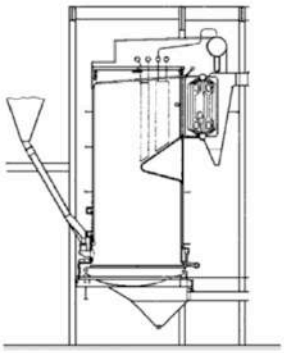


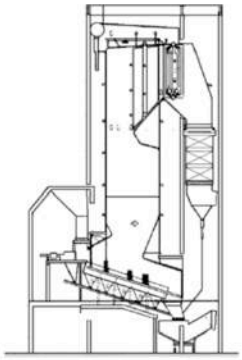

*Fig XXVI.8.- Caldera Stirling (SPB) de un calderín, para combustión en hogar mecánico*



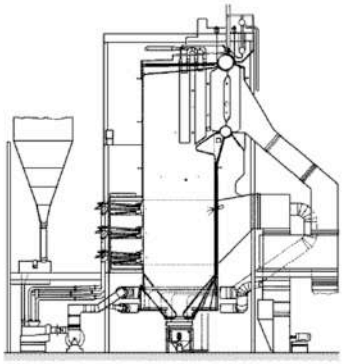
*a)SPB 2 calderines fuelóleo y gas*



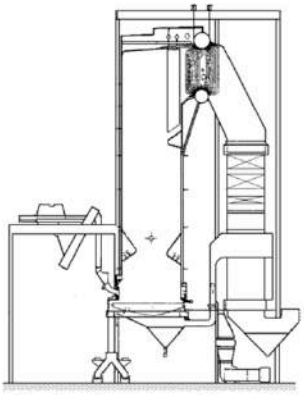
*b) SPF 1 calderín parrilla mecánica carbón*



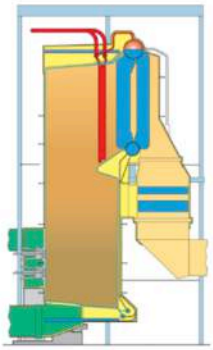
*c) SPB 1 calderín parrilla oscilante basuras (MSW)*



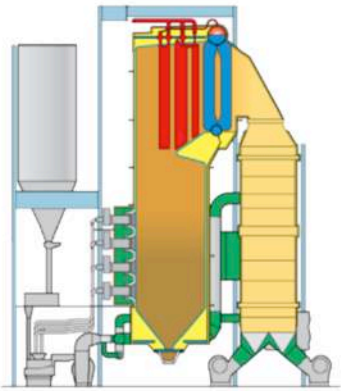
*d) SPB 2 calderines quema carbón pulverizado*



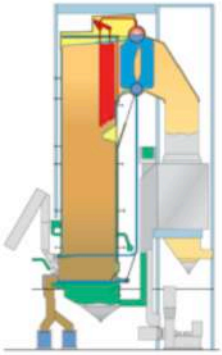
*e) SPB 2 calderines hogar, parrilla mecánica, quema combustibles derivados de residuos (RDF)*



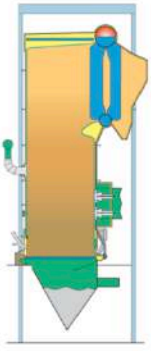
*f) Quema gas CO y petróleo*



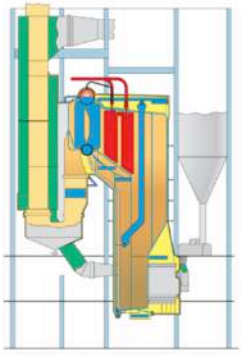
*g) Carbón pulverizado, gas de horno de cok y gas de horno alto*



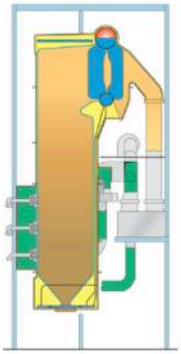
*h) Quema combustibles de desechos*



*i) Quema petróleo, gas natural y biomasa*



*j) Caldera ciclón que quema carbón*



*k) Quema carbón pulverizado, petróleo y gas*

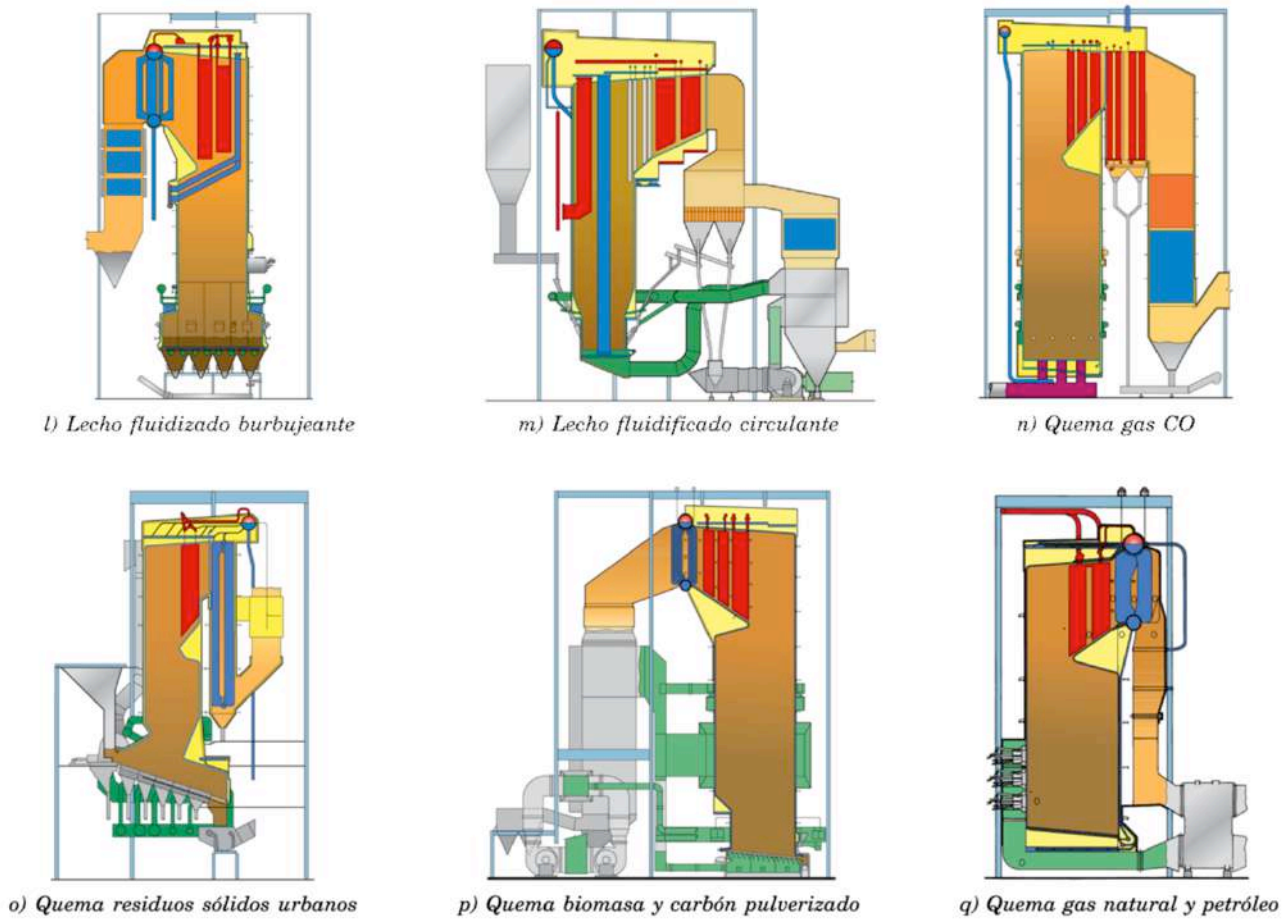



*Fig XXVI.9.- Algunas configuraciones de hogar de caldera energética Stirling para diversos combustibles*

***CALDERA TOWERPACK.-*** Es una versión de la Stirling (SPB), diseñada específicamente para las pequeñas cantidades de vapor requeridas en plantas industriales pequeñas, Fig XXVI.10; incorpora muchas características constructivas de la (SPB), como las paredes membrana, los separadores ciclón de *vapor-agua* y las bóvedas de paredes de hogar, específicas para quemar madera o biomasa.

Es el diseño preferido para bajas capacidades de vapor, y combustibles sólidos difíciles de quemar, como la madera, la biomasa y el carbón troceado; puede tener uno o dos calderines y está apoyada en el suelo.

*Caldera ensamblada en taller:*
- *Capacidad: 20.000÷60.000 lb/h = (2,52÷7,56 kg/s)*
- *Presión de vapor: 150÷1000 psig = (1,03÷6,9 MPa)*
- *Temperatura del vapor saturado: 750°F (399°C)*

*Caldera levantada in situ:*
- *Capacidad: 60.000÷150.000 lb/h = (7,56÷18,9 kg/s)*
- *Presión de vapor: 150÷1600 psig = (1,03÷11,03 MPa)*
- *Temperatura del vapor saturado: 900°F (482°C)*

*Caldera de alta capacidad:*
- *Capacidad: 150.000÷300.000 lb/h = (18,9÷37,8 kg/s)*
- *Presión de vapor: 1000÷1800 psig = (6,9÷12,41 MPa)*
- *Temperatura del vapor saturado: 1000°F (538°C)*

*Características técnicas*

- *Son una versión de las calderas Stirling diseñadas para menores capacidades*
- *Capacidad: 20.000÷300.000 lb/h = (2,5÷37,8 kg/s).*
- *Presión de vapor:*
  - *Caldera de 1 calderín 2600 psig = (17,9 MPa)*
  - *Caldera de 2 calderines 1500 psig = (10,3 MPa)*
- *Temperatura del vapor: 1000ºF = (538ºC).*
- *Queman*
  - *Combustibles sólidos tipo madera, biomasa y carbón troceado*
  - *Petróleo y gas natural*

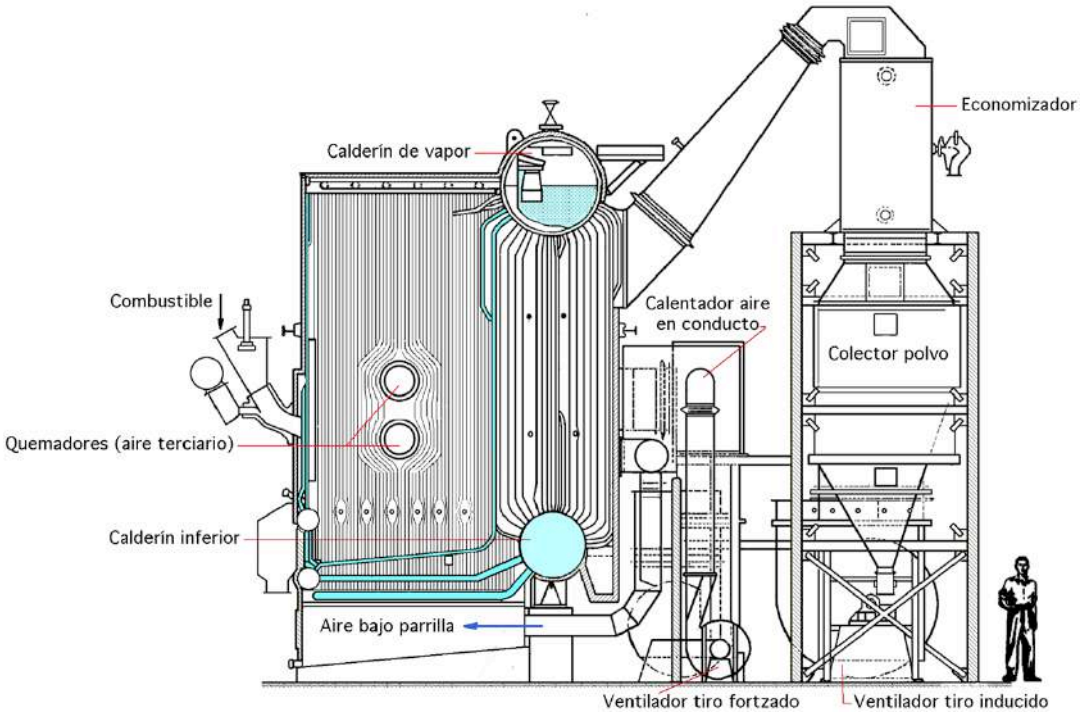



*Fig XXVI.10.- Caldera Towerpack apoyada en el suelo, de 2 calderines*

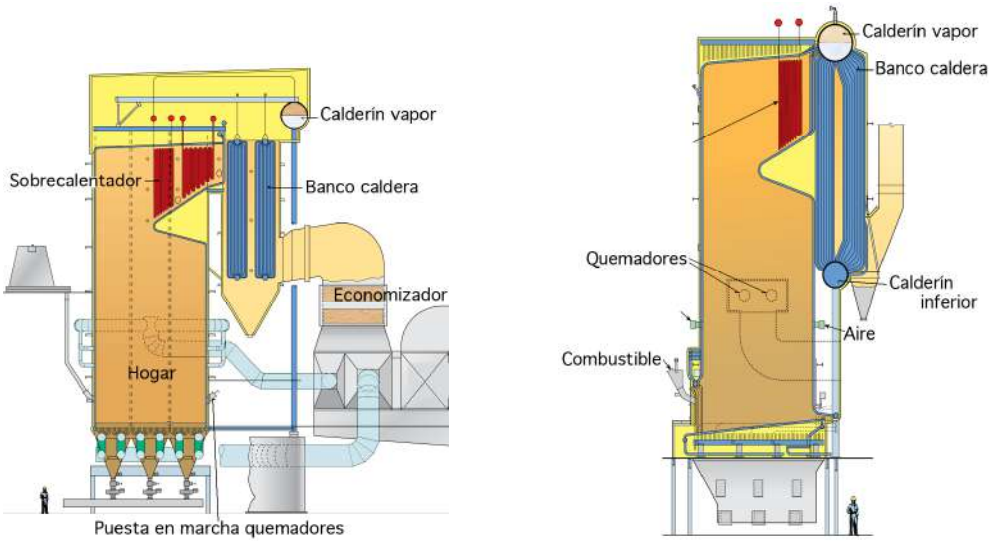
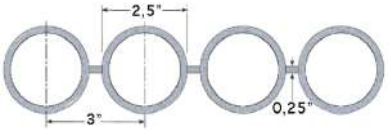



*Fig XXVI.10a.- Calderas Towerpack de 1 y 2 calderines*

***CALDERA (PFI).-*** Es una unidad de dos calderines, apoyada en el suelo, con paso múltiple de humos y diseñada para quemar combustibles líquidos y gaseosos, Fig XXVI.11 y 12. Debido a la extensión del cerramiento del hogar, la caldera (PFI) es idónea para combustibles subproductos, como el gas de horno alto (BFG), el gas de coke (COG) y el CO del pirolizador catalítico de refinería.




El hogar resulta adecuado para $\begin{cases} \text{- } \textit{unidades de tiro equilibrado} \\ \text{- } \textit{hogares presurizados} \end{cases}$ y está completamente refrigerado por agua; en su construcción se utilizan paredes membrana configuradas con tubos de 2,5" (63,5 mm) de diámetro y una separación entre ejes de 3" (76,2 mm).

La caldera (PFI) ensambla en taller todos sus componentes.

*- El hogar se puede transportar de forma que los paneles de pared membrana, con sus colectores superior e inferior completamente ensamblados; son dos paneles para cada una de las paredes laterales y otros dos para cada uno de los componentes de techo, pared frontal y suelo*

*- Las gargantas de los quemadores están integradas en los paneles de la pared frontal*

*- La unidad está apoyada sobre pilares de hormigón e incorpora un sobrecalentador purgable*

*- Una cámara de aire que:*
- *envuelve la parte superior de la pared frontal, techo y pared posterior*
- *sirve como conducto de aire hasta la caja de aire a quemadores*
- *cuenta con una placa divisora en la parte posterior, como salida de humos*

*- Para obtener una temperatura económica a la salida de los humos y recuperar el calor residual se usa un calentador de aire o un economizador*

El diseño es semejante a un paso de humos a todo lo largo del banco tubular de la caldera, en el que los humos fluyen horizontal y paralelamente a los calderines, a través del banco; para dirigir los humos a través de los tubos se utiliza un deflector de paso múltiple, que maximiza la transferencia de calor.

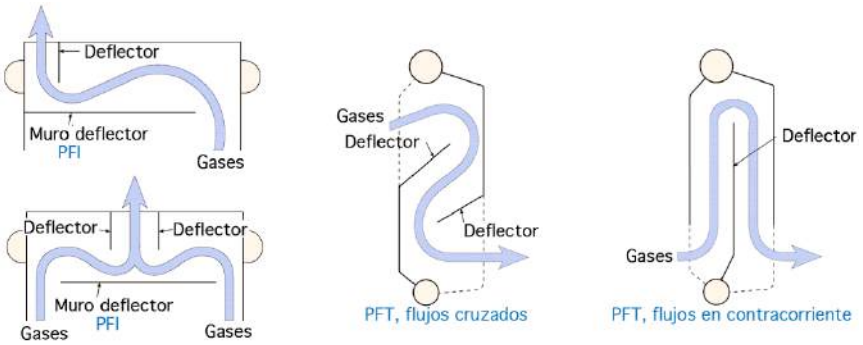



*Fig XXVI.11.- Circulación de humos en calderas PFI y PFT*

A la salida del hogar, detrás de una pantalla, se sitúa un sobrecalentador de bucle invertido, purgable, de forma que quede protegido de la radiación directa procedente del hogar; su ubicación facilita la transferencia de calor semiradiante, con la que se obtiene en todo el intervalo de cargas

una curva de variación de temperatura relativamente plana, que minimiza la atemperación para el adecuado control de la temperatura del vapor.

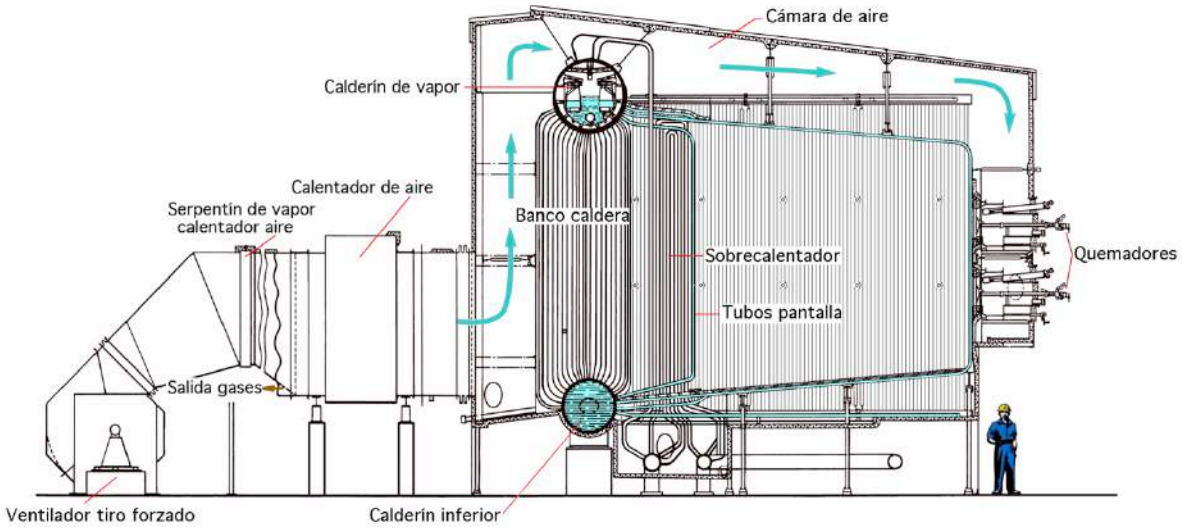



*Fig XXVI.12.- Caldera con hogar integrado tipo PFI*

En el interior del calderín se incluyen ciclones separadores de vapor, con secadores depuradores primarios y secundarios, para producir un vapor con la calidad que se exige en los actuales sobrecalentadores y turbinas. Las unidades disponen de tres distancias entre ejes de calderines, correspondiendo cada una de ellas a una determinada profundidad del hogar, existiendo para cada distancia tres o cuatro anchos posibles del hogar.

$$\textit{Características de diseño:} \begin{cases} \text{- Presión de vapor hasta 1.150 psig (80 bar)} \\ \text{- Capacidad } \begin{cases} 100.000 \div 500.000 \; lb/h \\ 12{,}6 \div 63{,}0 \; kg/s \end{cases} \text{, (11 tamaños)} \\ \text{- Temperatura hasta 950°F (510°C)} \end{cases}$$

***CALDERA (PFT).-*** Incorpora muchas de las características constructivas específicas de la caldera PFI y se ha desarrollado como una prolongación del diseño de la misma, para asumir el funcionamiento de los ciclos de turbina de vapor a alta temperatura y presión:

*- Tiene dos calderines*

*- Es de tipo apoyada*

*- Cuenta con paredes membrana en el hogar configuradas con tubos de 3" (76,2 mm) separados entre ejes 4" (101,6 mm)*

*- Lleva ciclones separadores en el calderín*

*- Dispone de un sobrecalentador purgable*

Algunas de las diferencias radican en un:

*- Sobrecalentador alternativo colgado (no purgable)*

*- Recorrido del flujo de humos que cubre todo el ancho del banco de caldera, con flujos en dirección vertical*

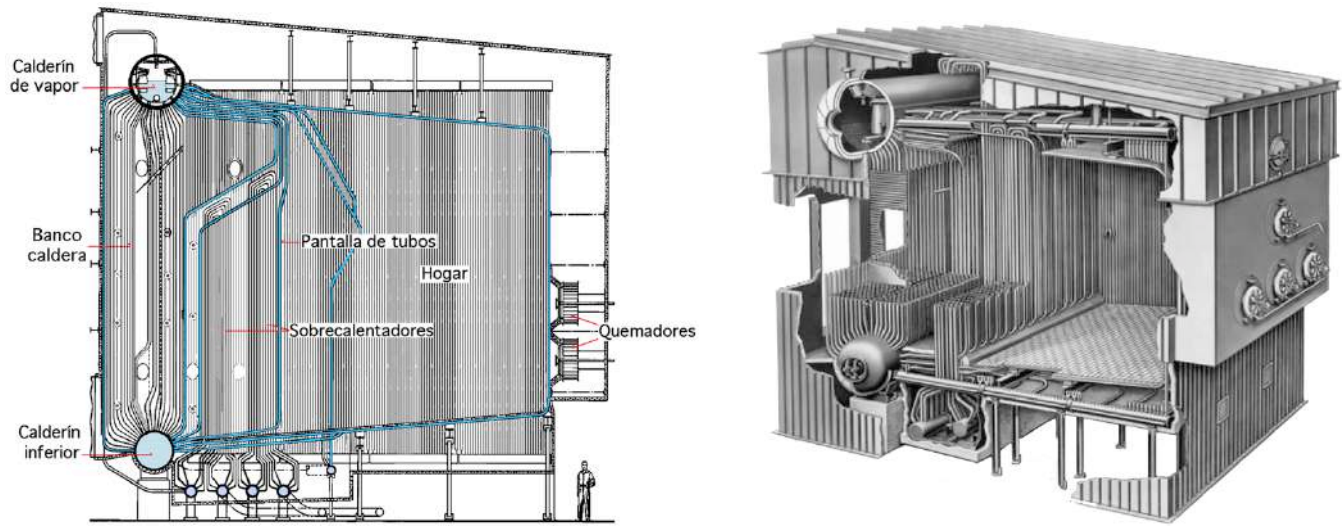



*Fig XXVI.13.- Caldera con hogar integral PFT*

Las unidades PFT son particularmente aptas para quemar combustibles líquidos, con un elevado contenido en ceniza, gas de horno alto y CO, ya que las cavidades existentes facilitan el espacio para colocar los sopladores retráctiles requeridos para la limpieza. Se diseñan con dos distancias entre ejes de calderines y con varias profundidades y anchuras de hogar, para satisfacer el amplio campo de capacidades característico de este diseño.

$$\textit{Características de diseño:} \begin{cases} \text{- Presión de vapor hasta 1.800 psig (125 bar)} \\ \text{- Capacidad } \begin{cases} 300.000 \div 800.000\ lb/h \\ 37{,}8 \div 100{,}8\ kg/s \end{cases} \text{, (37 tamaños)} \\ \text{- Temperatura hasta 1000°F (538°C)} \end{cases}$$

***CALDERA (FM).-*** Es una unidad montada completamente en taller y transportable por ferrocarril; tiene dos calderines, y es de tipo soportada, Fig XXVI.14. Es un diseño que tiene el hogar a un lado de la unidad y el banco de caldera al otro lado de la misma, separados por una pared deflectora. El fuego se desarrolla paralelamente a los ejes de los calderines, hacia la pared posterior, en la que los humos giran 180º y, a continuación, fluyen hacia la salida.

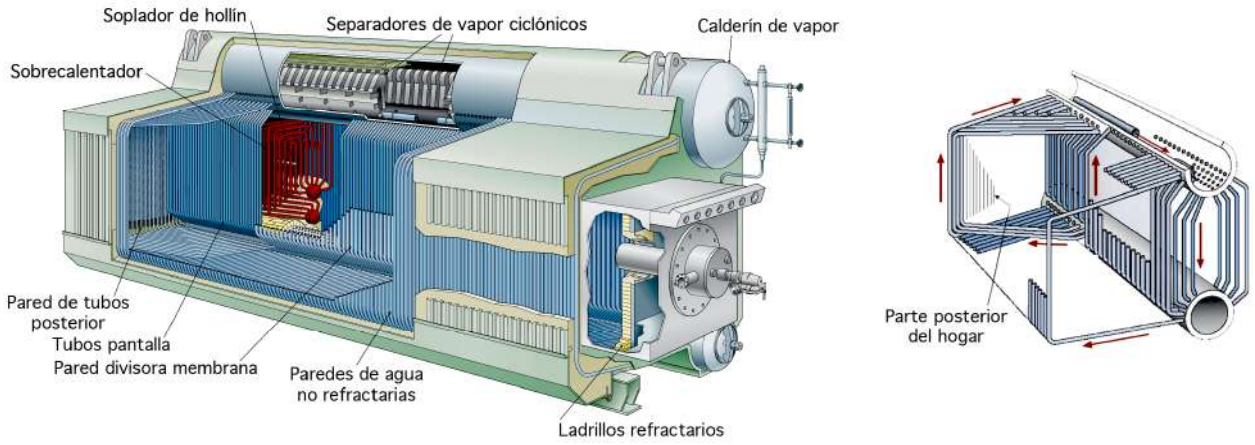



*Fig XXVI.14.- Caldera con hogar integrado (Package) tipo FM). Detalle de las tuberías membrana*

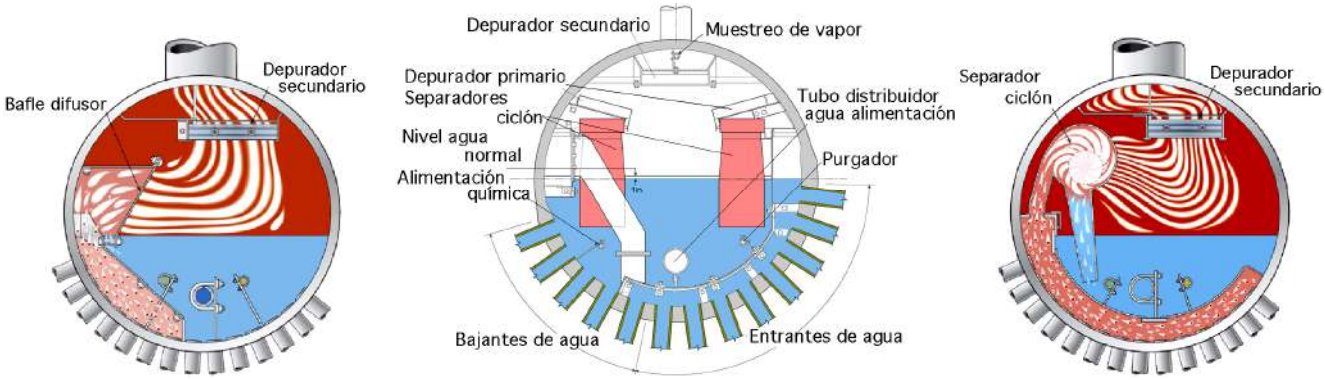



*Fig XXVI.15.- Calderines utilizados en las calderas (Package) tipo FM*

Muchas unidades están equipadas con un economizador o con un calentador de aire.

El hogar presurizado es estanco a gases y cuentan sólo con un ventilador de tiro forzado.

Para unidades pequeñas que operan con presiones en el hogar relativamente bajas, se utiliza una construcción de hogar claveteada y una envolvente interna.

$$\textit{Características de diseño:}\begin{cases}\text{- Temperatura vapor}\begin{cases}800°F\,(427°C)\ \textit{para fuelóleo}\\850°F\,(454°C)\ \textit{para gas natural}\end{cases}\\\text{- Presión de vapor 1250 psig (8,62 bar), para una capacidad} < \begin{cases}30.000\ lb/h\\3,8\ kg/s\end{cases}\\\text{- Capacidad}\begin{cases}10.000 \div 260.000\ lb/h\\1,3 \div 32,8\ kg/s\end{cases}\end{cases}$$

En unidades mayores que operan con presiones en el hogar más altas, se emplean hogares de paredes membrana; están diseñadas para diferentes tamaños que satisfagan las capacidades asignadas a las mismas, siendo la profundidad del hogar el único parámetro variable para cada tamaño.

***CALDERAS DE ALTA CAPACIDAD (HCFM).-*** Son derivaciones del diseño de la caldera (FM), Fig XXVI.16; se pueden ensamblar en el muelle de carga y descargar, tras el transporte de sus componentes, en el lugar de implantación; sus dimensiones requieren que el transporte sea naval.

El diseño de estas unidades está orientado a la combustión de fuelóleos y gases y se dotan con hogares presurizados configurados por paredes membrana.

Para incrementar su capacidad se utilizan quemadores múltiples. Al igual que la caldera (FM), se diseñan para diversas profundidades de hogar, que es el único parámetro variable.

$$\textit{Características de diseño:}\begin{cases}\text{- Presión del vapor hasta 1.050 psig (73 bar)}\\\text{- Capacidad}\begin{cases}200.000 \div 350.000\ lb/h\\25,2 \div 44,1\ kg/seg\end{cases}\\\text{- Temperatura del vapor hasta 825°F (441°C)}\end{cases}$$

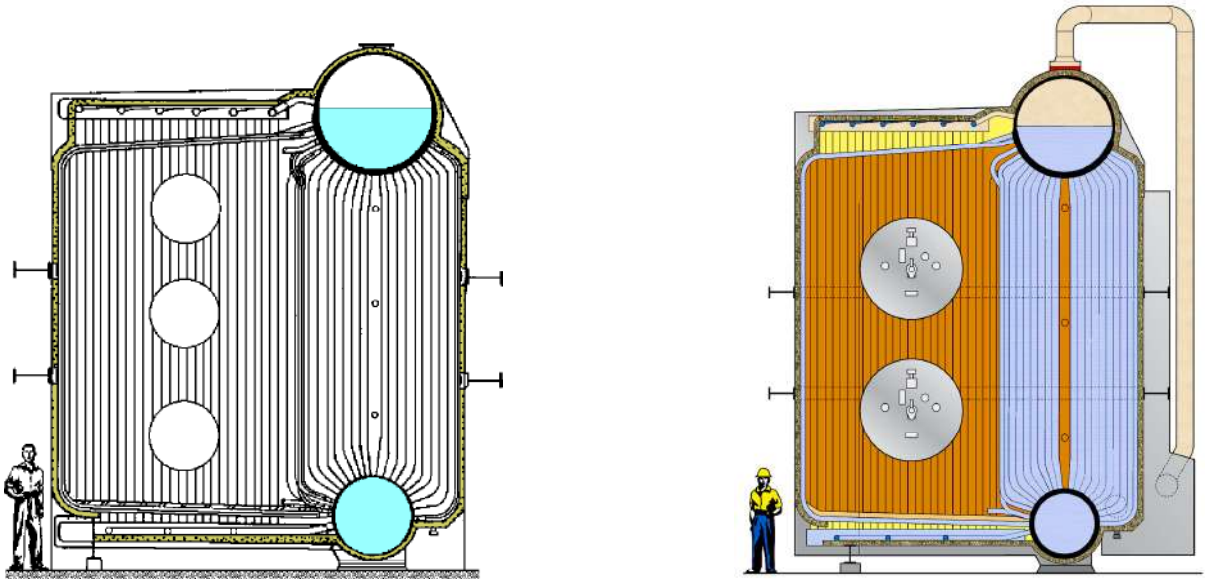


*Fig XXVI.16.- Caldera (HCFM) de alta capacidad*

***CALDERA (PFM).-*** Es una caldera tipo (FM), Fig XXVI.17, de mayor capacidad y elevada presión, diseñada para su ensamblaje en muelle o en el lugar de implantación y que se transporta en barco. Este diseño quema también gas y fuelóleo y cuenta con un hogar presurizado configurado por paredes membrana. Para alcanzar un incremento en su capacidad se emplean quemadores múltiples.

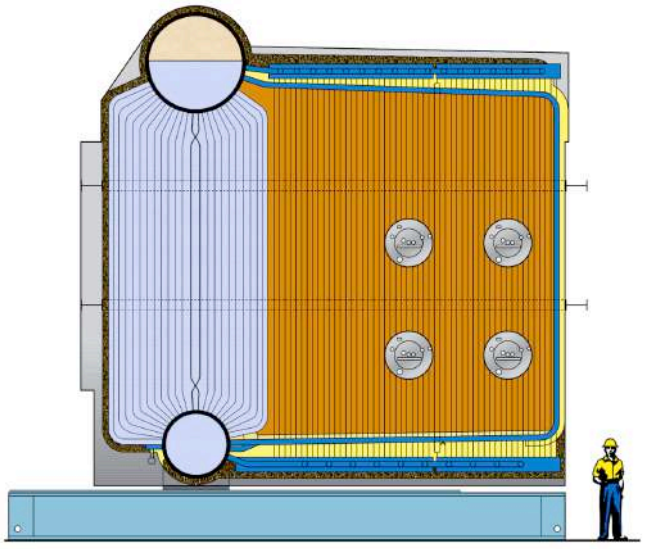


*Fig XXVI.17.- Caldera PFM*

La profundidad del hogar es el único parámetro constructivo.

*Características de diseño:*

- *Presión de vapor hasta 1.800 psig (125 bar)*
- *Capacidad* { *200.000÷600.000 lb/h* ; *25,2÷75,6 kg/seg* }
- *Temperatura del vapor hasta 1000ºF (538ºC)*

***CALDERAS DE LECHO FLUIDIFICADO.-*** Estas calderas de lecho fluido, ofrecen un concepto singular de combustión en un lecho específico que controla el proceso de combustión y, cuando se requiera, el de las emisiones de $SO_2$ y $NO_x$.

Para la combustión en un lecho fluidificado existen dos opciones:

*- La caldera de lecho fluidificado circulante (CFB), que se utiliza en calderas nuevas para muchas aplicaciones*

*- La caldera de lecho fluidificado burbujeante (BFB), que se utiliza en aplicaciones específicas de modernización y remodelación de calderas obsoletas*

***CALDERA DE LECHO FLUIDIFICADO CIRCULANTE (CFB).-*** Es una caldera apoyada por su parte inferior, Fig XXVI.18; tiene uno o dos calderines, dependiendo de la necesidad de disponer de un banco vaporizador para la absorción del calor; el combustible se alimenta por la parte inferior del hogar mediante:

- *Tornillos*
- *Alimentadores de cadena*
- *Boquillas o espitas de chorro de aire, según el combustible de que se trate*

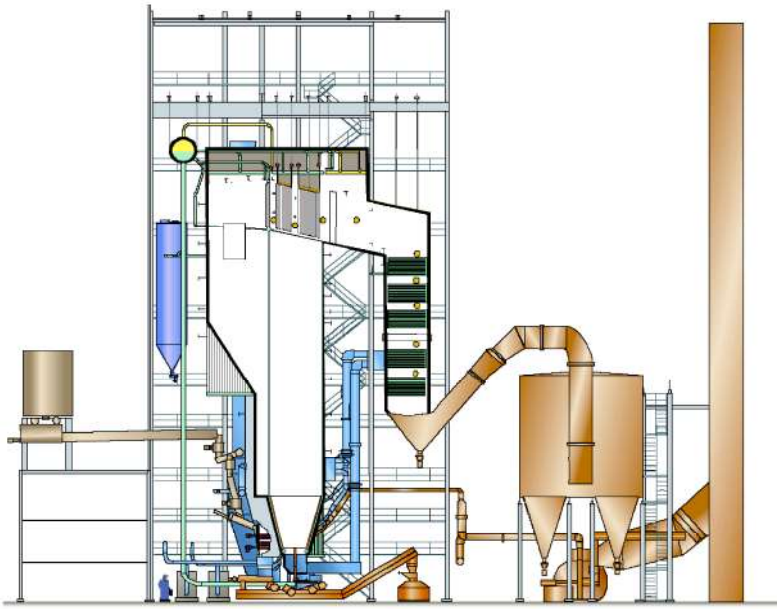


*Fig XXVI.18.- Caldera CFB de un calderín, 94 MWt, 33,4 kg/seg, 89 bars, 480ºC de Foster Wheeler*

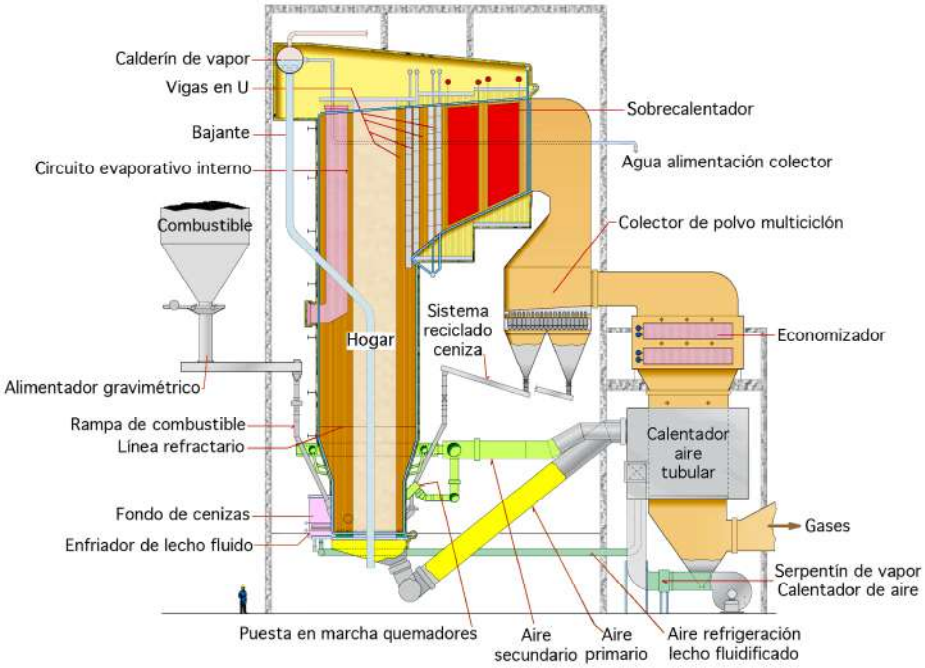



*Fig XXVI.19.- Caldera CFB colgada, B&W*

Cuando se requiere eliminar el $SO_2$ el material del lecho es caliza o arena. La cantidad de material circulante del lecho es varias veces superior a la cantidad de combustible presente en la unidad. Modificando la densidad del lecho se obtiene la temperatura necesaria para maximizar la eliminación del $SO_2$, del orden de 1550ºF (843ºC).

El total de sólidos en humos que ascienden por el hogar, es función de la cantidad de calor que absorben las paredes de agua. Los humos cargados de sólidos salen del hogar hacia unos separadores de partículas, configurados por vigas en U; el 98% de las partículas sólidas se separan y caen a lo largo de los perfiles en U a una tolva y se reciclan hacia el hogar, siendo controladas por una válvula en L, a fin de facilitar el flujo necesario para mantener la temperatura y densidad del lecho fluidificado requeridas. Los humos que salen de la sección de vigas en U, se dirigen a las superficies de convección, análogas a las de otros diseños de calderas.

La caldera (CFB) se ha seleccionado para aplicaciones con combustibles de elevado contenido en S (coque de petróleo, carbón, lodos de tanques de combustible, breas de aceites, etc) y para otras aplicaciones con maderas y combustibles de biomasa. Como consecuencia de operar a una temperatura mucho menor que la correspondiente a una combustión convencional, la caldera de lecho fluidificado circulante (CFB) genera del orden de la mitad de los $NO_x$ que las demás calderas industriales, alimentadas con similares combustibles sólidos; constituye una alternativa a la caldera energética Stirling (SPB), sea ésta de carbón pulverizado o con hogar mecánico, que frecuentemente está equipada para eliminar el $SO_2$, con un depurador y con un equipo de reducción catalítica o no catalítica, dotado con la correspondiente inyección de amoniaco con vistas a la reducción de los $NO_x$.

La elección de estas tecnologías requiere evaluar un determinado número de factores, entre los que se incluyen:

- *La eliminación de emisiones*
- *Las características de diseño:*
  - *Presión de vapor < 1.850 psig (129 bar)*
  - *Capacidad* $700.000 \div 1.000.000\ lb/h$ ó $88{,}2 \div 126\ kg/s$
  - *Temperatura del vapor hasta 1000°F (538°C)*
- *El coste del combustible, reactivos y de inversión*

***CALDERA DE LECHO FLUIDIFICADO BURBUJEANTE (BFB).-*** En algunos de sus elementos componentes es similar a la caldera (CFB). Va suspendida, puede tener uno o dos calderines y quemar una amplia variedad de combustibles, con notable limpieza y eficiencia, Fig XXVI.21

En la caldera de lecho fluidificado burbujeante (BFB), la velocidad del aire se mantiene lo suficientemente baja para que el material del lecho se mantenga en la parte inferior de la unidad, y los sólidos no circulen por el resto del cerramiento del hogar. Esta característica es particularmente atractiva para las aplicaciones de modernización, remodelación y reequipamiento, en las que la parte inferior del hogar existente se puede retirar y sustituir por un lecho (BFB), Fig XXVI.20,22, sin

modificaciones importantes en el resto del hogar, en los cerramientos del paso de convección y en las superficies termointercambiadoras. Estas reconversiones permiten recuperar el nivel de la capacidad perdida por alguna caldera, como consecuencia de un cambio $\begin{cases} \text{- } de\ combustible \\ \text{- } en\ las\ características\ de\ las\ cenizas \end{cases}$

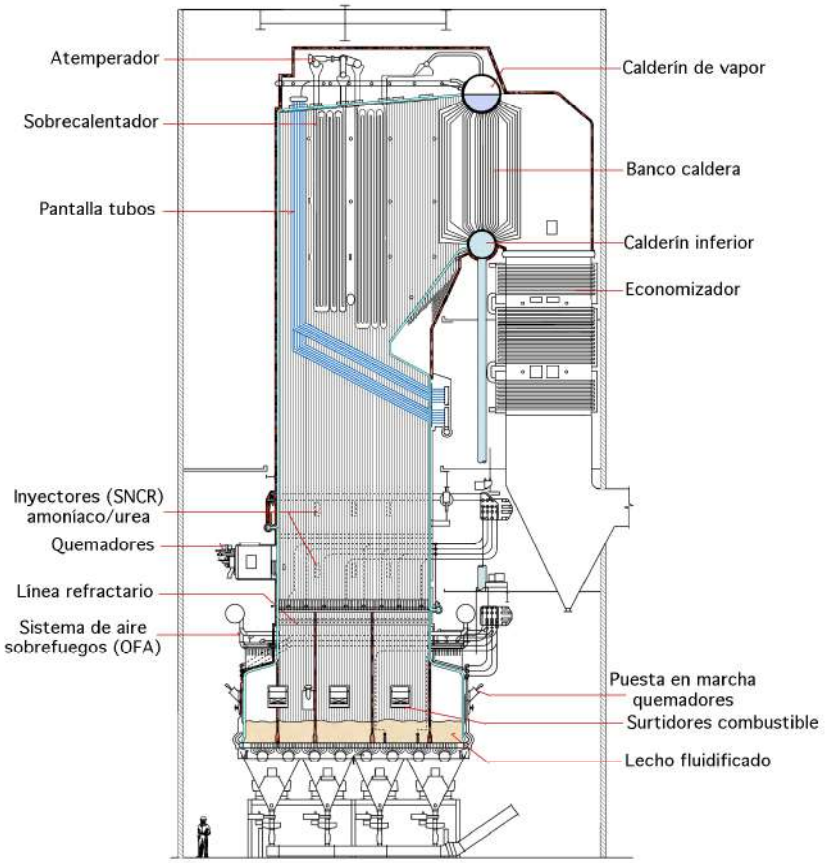



*Fig XXVI.20.- Caldera reconvertida con lecho (BFB)*

*Tabla XXVI.2.- Características de la caldera y del combustible*

| *Componente* | *Unidades* | *Funcionamiento normal* | | | *Futuro* |
|---|---|---|---|---|---|
| *Vapor* | *lb/hora* | *60.000* | *45.000* | *30.000* | *60.000* |
| | *kg/seg* | *7,56* | *5,67* | *3,78* | *7,56* |
| *Temperatura del vapor* | *ºF* | *750* | *750* | *735* | *750* |
| | *ºC* | *399* | *399* | *391* | *399* |
| *Carbón* | *lb/hora* | *3.973* | *3.128* | *1.608* | *4.158* |
| | *kg/seg* | *0,5* | *0,4* | *0,2* | *0,52* |
| *Lodos* | *Tons seco/día* | *100* | *100* | *100* | *140* |
| | *Tm/día* | *90,7* | *90,7* | *90,7* | *127* |
| *N gas* | *lb/hora* | *448* | *23* | *0* | *0* |
| | *kg/seg* | *0,056* | *0,003* | *0* | *0* |
| *Aire al hogar* | *lb/hora* | *165.400* | *137.500* | *96.500* | *189.100* |
| | *kg/seg* | *20,8* | *17,3* | *12,2* | *23,6* |
| *FGR en el lecho* | *lb/hora* | *44.000* | *33.500* | *15.500* | *44.500* |
| | *kg/seg* | *5,5* | *4,2* | *2* | *5,6* |
| *Flujo de gases* | *lb/hora* | *161.800* | *137.000* | *102.800* | *178.600* |
| | *kg/seg* | *20,4* | *17,3* | *13* | *22,5* |
| *Carga de polvo* | *lb/hora* | *3.608* | *3.486* | *3.266* | *3.845* |
| | *kg/seg* | *0,5* | *0,4* | *0,4* | *0,6* |
| *Temperatura flujo de gases* | *ºF* | *335* | *330* | *320* | *350* |
| | *ºC* | *168* | *166* | *160* | *177* |

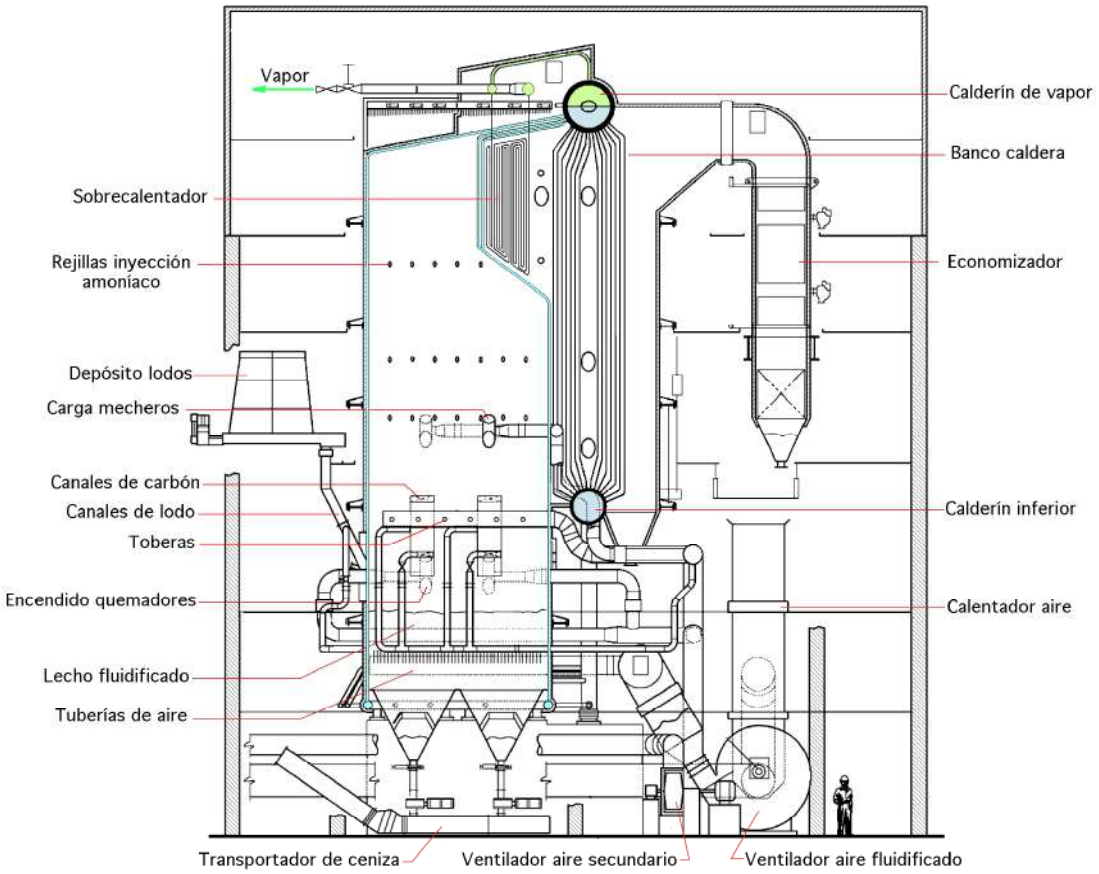



*Fig XXVI.21.- Caldera de lecho fluido burbujeante BFB que quema carbón y lodos*

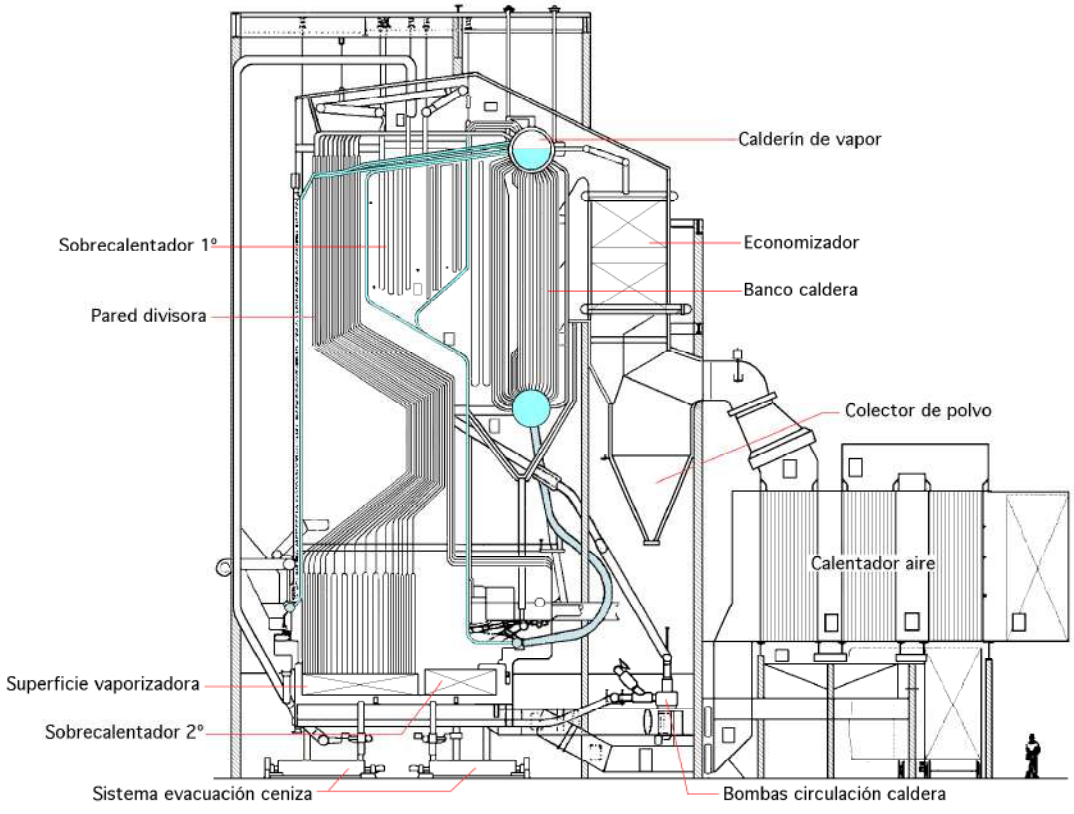



*Fig XXVI.22.- Reequipamiento sobre caldera de lecho fluido burbujeante BFB a presión atmosférica*

Las modernizaciones de calderas industriales y de pequeñas calderas energéticas de servicio público, permiten reducir las emisiones de $SO_2$ y $NO_x$. En calderas nuevas, el lecho fluidificado burbujeante (BFB) está particularmente indicado para combustibles residuales con alta humedad, como son: *- Los lodos cloacales*; *- Otros lodos de* { *molinos de pulpa*, *papel*, *plantas de reciclado de papel*

***CALDERA PARA MEJORAR LA EXTRACCIÓN DE PETROLEO (EOR).-*** Para la recuperación mejorada de petróleo (EOR) existen tres grandes categorías de técnicas que están funcionando a nivel comercial, con diverso éxito, como la { *- recuperación térmica*, *- inyección de gas, $CO_2$*, *- inyección de productos químicos*

En la recuperación térmica, que es la que nos interesa, se han desarrollado unidades que cubren una singular necesidad del mercado, como se desprende de su propia denominación. Es una técnica de extracción de petróleo que consiste en recuperar el petróleo crudo o betún que no habría sido posible con técnicas de explotación convencionales. Una caldera produce vapor húmedo $x = 0,8$ a elevada presión, la necesaria para inyectarlo en los estratos que contienen los componentes pesados que se desean extraer. La inyección de vapor reduce la viscosidad del petróleo y aumenta la presión en el depósito del mismo, por lo que es más fácil de recuperar, ya que ayuda al movimiento de éste hacia los pozos de producción.

En esta caldera se utiliza un circuito de un paso *agua-vapor*, o proceso directo de vaporización.

El agua de alimentación fluye continuamente por un circuito tubular simple a través de la sección del economizador, hacia la sección del hogar, en el que el agua se vaporiza hasta alcanzar el título 0,8.



*Fig XXVI.23.-Caldera para extracción mejorada de petróleo (EOR)*

Si la llama se mantiene bien separada de las paredes del hogar y se utilizan bajos regímenes de liberación de calor, se puede tolerar un agua de alimentación relativamente mala (con 100.000 ppm de sólidos), por lo que sólo se precisa de un mínimo tratamiento de este agua de alimentación, al tiempo que el agua que se separa del petróleo se puede reciclar hacia la caldera, con una mínima limpieza.

El control del proceso se completa mediante el bombeo del agua de alimentación requerida hacia el economizador, a la presión de 2500 psig (173 bar), y la regulación del régimen de fuegos del quemador, para mantener el título del vapor (x = 0,8) a la salida de la unidad.

Las unidades se proyectan en tamaños desde $\begin{cases} (5 \div 50).10^6\ Btu/h \\ 1,5 \div 14,7\ MW_t \end{cases}$

Las unidades pequeñas se pueden ensamblar completamente en taller, hasta una capacidad de $\begin{cases} 40.10^6\ Btu/h \\ 11,7\ MW_t \end{cases}$ y se montan sobre una plataforma remolque, para su transporte en una sola pieza.

Las unidades más grandes se ensamblan en taller en varias secciones que, posteriormente, se montan en el lugar de funcionamiento.

*Características de diseño:* $\begin{cases} \text{- capacidad hasta 48.000 } lb/h, (6\ kg/s) \\ \text{- presión de vapor hasta 2.500 psig (172 bar)} \end{cases}$

## *REFERENCIAS CAPITULO XXVI.- DISEÑO DE CALDERAS INDUSTRIALES*


*B&W.- STEAM: ITS GENERATION AND USE.- 41th Edition, chapter 24, The Babcock & Wilcox Company Barberton, Ohio, USA.-1992*

*V. Ganapathy, J. Rentz, D. Flanagan.- HEAT RECOVERY BOILERS FOR PROCESS APPLICATIONS.- ABCO Industries, Abilene, Tx.- ESL-IE-85-05-120*

*V. Ganapathy.- INDUSTRIAL BOILERS AND HEAT RECOVERY STEAM GENERATORS DESIGN, APPLICATIONS AND CALCULATIONS.- ABCO Industries, Abilene, Texas, U.S.A.*

*H Anderl, K Kaufmann.- 110 MWTH CFB BOILER RV-LENZING FOR INCINERATION OF WASTE MATERIALS (RDF) AND SLUDGE.- Babcock Borsig Power – Austrian Energy.- Austria*

*The Babcock&Wilcox Company.- BOILERS FOR INDUSTRY AND SMALL POWER, Cap 27*

*G. J. Stosur, Petroleum Consultant.- EOR: PAST, PRESENT AND WHAT THE NEXT 25 YEARS MAY BRING.- Conference Paper, 84864-MS, Society of Petroleum Engineers, SPE International Improved Oil Recovery Conference in Asia Pacific, 20-21 October 2003, Kuala Lumpur, Malaysia, ISBN 978-1-55563-965-5*

*E. B. Wooruff, H. B. Lammers, T. F. Lammers.- STEAM PLANT OPERATION: DESIGN AND CONSTRUCTION OF BOILERS.- 7ª Edición*