

**DB Riley, Inc. is now Riley Power Inc., a  
Babcock Power Inc. company.  
[www.babcockpower.com](http://www.babcockpower.com)**

**A DB RILEY TECHNICAL PUBLICATION**

**DISEÑOS MODERNOS DE CALDERAS  
CON COMBUSTIBLE DE MADERA  
HISTORIA Y CAMBIOS EN TECNOLOGÍA**

por

Kevin Toupin  
Jefe del Grupo de Diseño de Calderas y Resultados  
DB Riley, Inc.  
Worcester, Massachusetts, USA

Presentado en la  
Segunda Conferencia de Biomasa de las Américas  
Energía, Medio Ambiente, Agricultura e Industria  
Portland, Oregon  
Agosto 21-24, 1995  
y  
en el Seminario  
Economía de Energía en la Industria Azucarera de la Caña  
CENICAÑA  
Cali, Colombia  
Octubre de 1996

RST-137A

DEUTSCHE BABCOCK  
 **DB RILEY, INC.**

Post Office Box 15040  
Worcester, MA 01615-0040  
<http://www.dbriley.com>

# **DISEÑOS MODERNOS DE CALDERAS CON COMBUSTIBLE DE MADERA HISTORIA Y CAMBIOS EN TECNOLOGÍA**

**por**

**Kevin Toupin**  
**Jefe del Grupo de Diseño de Calderas y Resultados**  
**DB Riley, Inc.**  
**Worcester, Massachusetts, USA**

## **SINÓPSIS**

*Los diseños de las calderas y de los sistemas de combustión para quemar madera de deshecho han sido desarrollados en función directa con la percepción de la madera como combustible.*

*El objetivo de la tecnología de la combustión de la madera se ha desarrollado paulatinamente desde la incineración de desechos hasta la combustión eficiente de un combustible valioso y deseable. Con esta evolución, los sistemas de combustión y las calderas han sido perfeccionados para incrementar la disponibilidad, el rendimiento de la caldera y el rendimiento de la combustión. Además de esto, las temperaturas y las presiones del vapor han sido incrementadas gradualmente para responder a los más altos requerimientos del ciclo de la turbina resultando en nuevos diseños de sobrecalentadores. Recientemente, las regulaciones de emisiones dañinas al medio ambiente han agregado más cambios a los diseños de las unidades.*

*Esta disertación discute la historia y la evolución de la combustión de la madera e incluye una relación de los cambios y mejoramientos de los sistemas de las calderas y la combustión y de las modificaciones requeridas para responder a los límites impuestos por las regulaciones medioambientales.*

## HISTORIA Y CAMBIOS EN LA TECNOLOGÍA

La historia de la quema de los desechos de la madera puede ser separada en cuatro estados de desarrollo. El objetivo en cada estado es basado en la percepción de la madera como combustible.

	<b>Percepción</b>	<b>Objetivo del Diseño</b>
<b>ESTADO 1</b>	<b>Producto Indeseable de Desecho</b>	<b>Incineración</b>
<b>ESTADO 2</b>	<b>Vapor Gratis</b>	<b>Recuperación de Calor e Incineración</b>
<b>ESTADO 3</b>	<b>Desechos de Madera como Combustible Vendible</b>	<b>Incremento en los Rendimientos de la Caldera y de la Combustión</b>
<b>ESTADO 4</b>	<b>Combustible Valioso y Reducción de Emisiones</b>	<b>Reducciones de Emisiones y mayor Incremento en la Relación de Calor</b>

### ESTADO 1–Incineración

Al principio, los desechos de la madera<sup>1</sup> eran considerados una incomodidad que demandaba la necesidad de salir de ellos. La quema era usualmente el método escogido para su eliminación y los diseños de combustión eran basados en incineración a costo mínimo de capital. Un método usado comúnmente para la incineración era la quema en una pila dentro de un recinto de metal llamado “Incinerador de Tepee (tienda india)”. No se consideraba precauciones para recobrar el calor ó consideraciones sobre el medio ambiente. Refiérase a la Figura 1, ESTADO 1- “Incinerador Tepee” para ver una vista típica lateral de este sistema.

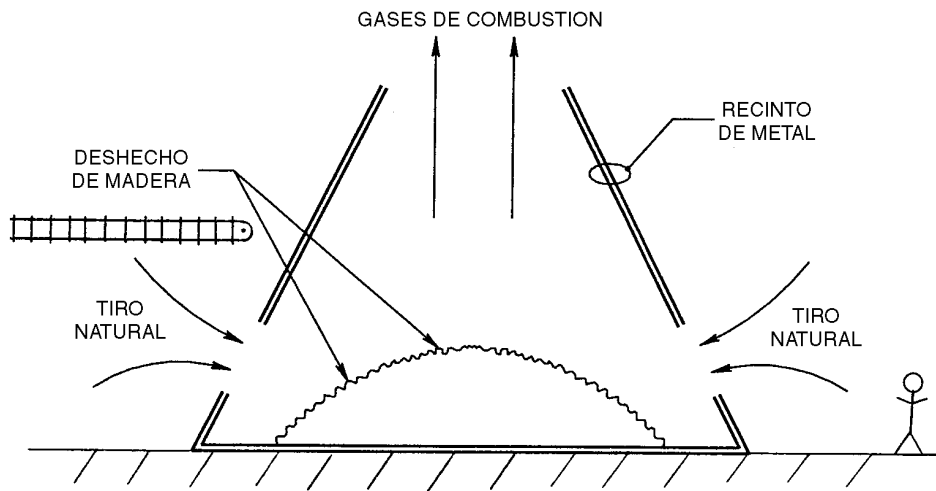


Figura 1 Estado 1–Incinerador de “Tepee”

<sup>1</sup> Desechos de madera se definen como los subproductos de las industrias maderera y del papel. Los subproductos incluyen cortezas, ramaje, serrin, y madera de baja calidad.

## ESTADO 2-Vapor Gratis

En esta era, el principal objetivo para la incineración de la madera era el salir del deshecho. Un segundo objetivo llegó a ser la generación gratis de vapor para uso en el proceso o para el calentamiento. Se comenzó a instalar equipo de recuperación de calor junto con el sistema de incineración. También se fueron introduciendo avances en combustión como el desarrollo del “Horno Holandés”. El “Horno Holandés” demostró avances iniciales en el sistema de combustión tales como:

- Cámara de combustión de material refractario
- Primeros pasos en el uso de aire sobre el hogar para ayudar a la combustión que ocurre sobre la pila de combustible.

Refiérase a la Figura 2, ESTADO 2, Vapor Gratis - “Horno Holandés” para ver una vista lateral de este sistema de caldera. Estos sistemas eran confiables pero producían bajo rendimiento de combustión (alto nivel de monóxido de carbono (CO), alta pérdida de ceniza en la ignición<sup>2</sup> y bajo rendimiento de caldera, (Altas temperaturas en la chimenea y altos requerimientos de exceso de aire). Los sistemas de remoción de cenizas eran manuales. Estas unidades generaban normalmente flujos de 10.000 - 40.000 lbs/hr de vapor de baja presión a temperaturas de saturación o con un poco de sobrecalentamiento.

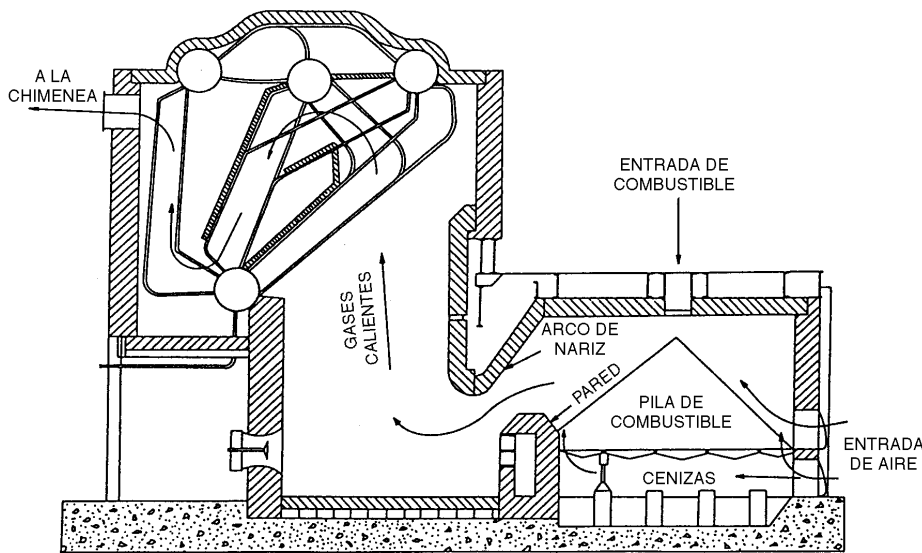


Figura 2 Estado 2 – Vapor Gratis - “Horno Holandés”

## ESTADO 3–Desecho de Madera como Combustible

Durante este período, la percepción de los desechos de madera había cambiado de un producto de disposición incómoda a un combustible vendible. Los diseños de los sistemas de combustión y de recuperación de calor se habían desarrollado con el objetivo de mejorar el rendimiento. Métodos innovativos de combustión y nuevos diseños de calderas fueron el resultado. Los mejoramientos en la combustión y la recuperación de calor incluyeron:

- Quema en suspensión con el desarrollo de las parrillas viajeras con distribuidores neumáticos de combustible y subsecuente desarrollo de sistemas de aire de sobrefuego.

<sup>2</sup> Pérdida de ceniza en la ignición (LOI “Loss on Ignition”) es el porcentaje en peso de combustibles no quemados en la muestra de ceniza.

- Parrillas con descarga automática de cenizas que incluían parrillas de vuelco, parrillas estacionarias refrigeradas por agua y limpiadas a vapor, parrillas vibratorias refrigeradas por agua y parrillas viajeras.
- Sistemas de reinyección de brasas para reducir los combustibles no quemados en las cenizas.
- Adición de calentadores de aire para mejorar el proceso de combustión ayudando a la evaporación de la humedad en el desecho de madera y para incrementar el rendimiento de la caldera al reducir la temperatura de chimenea.
- Continuación del desarrollo de sistemas de aire de sobrefuego con niveles y configuraciones múltiples con el objetivo de mejorar la combustión que ocurre en suspensión.
- El uso de hogares refrigerados por agua para reducir el mantenimiento del refractario y la formación de escoria en las paredes.
- Métodos para reducir la erosión en los tubos que incluyeron la adición de escudos de protección de tubos y la reducción de pasos en los circuitos generadores.
- Adición de sobrecalentadores para incrementar la relación de calor.
- Incrementación de las presiones de vapor para mejorar la relación de calor.

Las primeras calderas diseñadas durante esta era eran bajas, lo que reducía el tiempo de retención del combustible en el hogar. (aproximadamente 1,25 segundos). refiérase a la Figura 3 ESTADO 3, Desecho de Madera como Combustible - Diseño Inicial.

A medida en que los diseños de las calderas progresaban, la altura del hogar fué extendida para incrementar el tiempo de retención en el hogar (aproximadamente 2,25 segundos). El incremento del tiempo de retención en el hogar redujo tanto las emisiones de CO como el combustible no quemado en la ceniza. Refiérase a la Figura 4, Estado 3, Desecho de Madera como Combustible - Diseño Mejorado. Estas unidades generaban flujos de vapor de entre 30.000 a 40.000 lbs/hr, generalmente a presiones de 600 a 900 psi y temperaturas de vapor de 750 a 825°F.

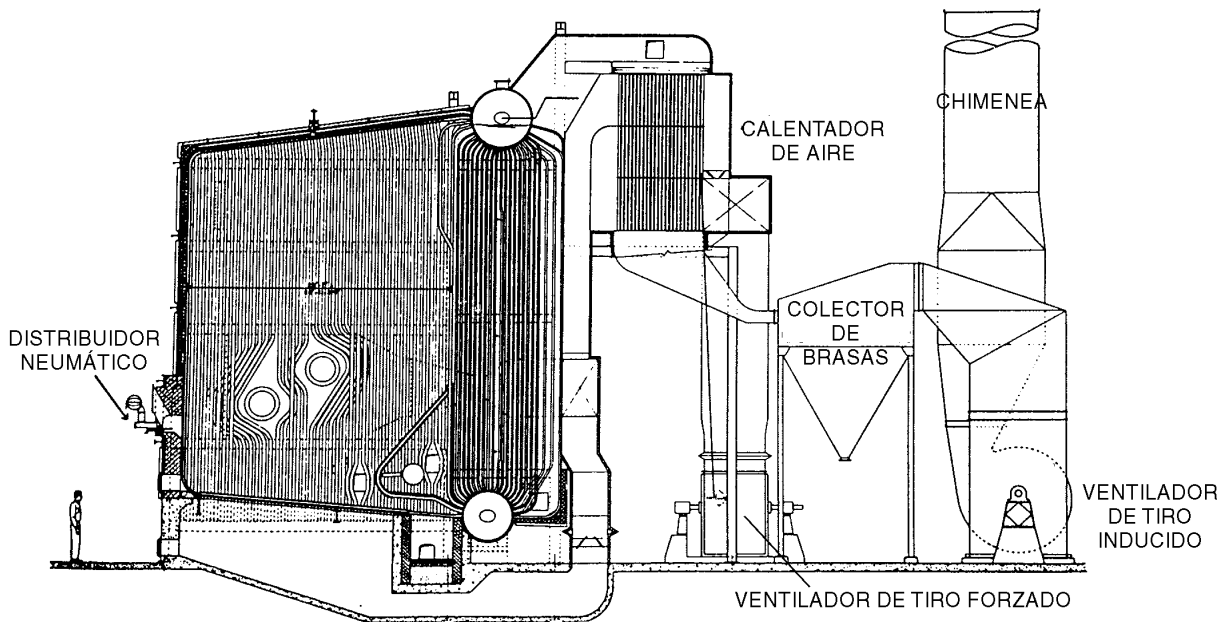
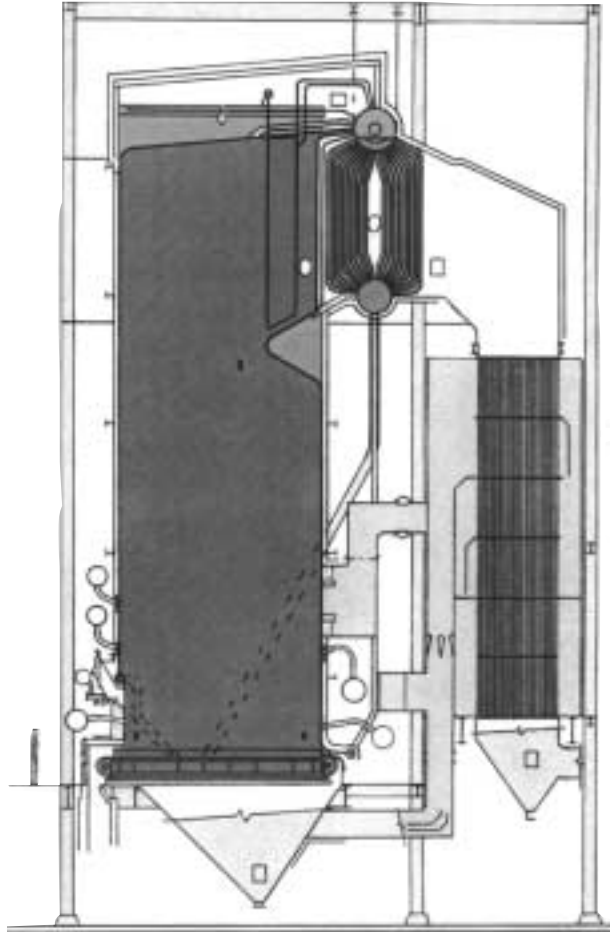


Figura 3 Estado 3—Desecho de Madera como Combustible - Diseño Inicial



*Figura 4 Estado 3–Desecho de Madera como Combustible - Diseño Mejorado*

#### **ESTADO 4–Reducciones en Emisiones y Mejoramientos en la Relación de Calor**

Debido al incremento en el precio del desecho de madera y a los requerimientos más restringidos en las emisiones, fueron desarrolladas mejores parrillas y mejores diseños para la combustión.

Dramáticos cambios en el diseño ocurrieron durante este estado de desarrollo. Tres diferentes diseños emergieron con el objetivo de mejorar el proceso de combustión (la reducción de emisiones y la reducción de carbón no quemado en la ceniza). Los tres diseños fueron:

- Modernización de la parrilla.
- Cama Burbujeante Fluidizada
- Cama Fluidizada Circulatoria

Cada uno de estos diseños se examina a continuación.

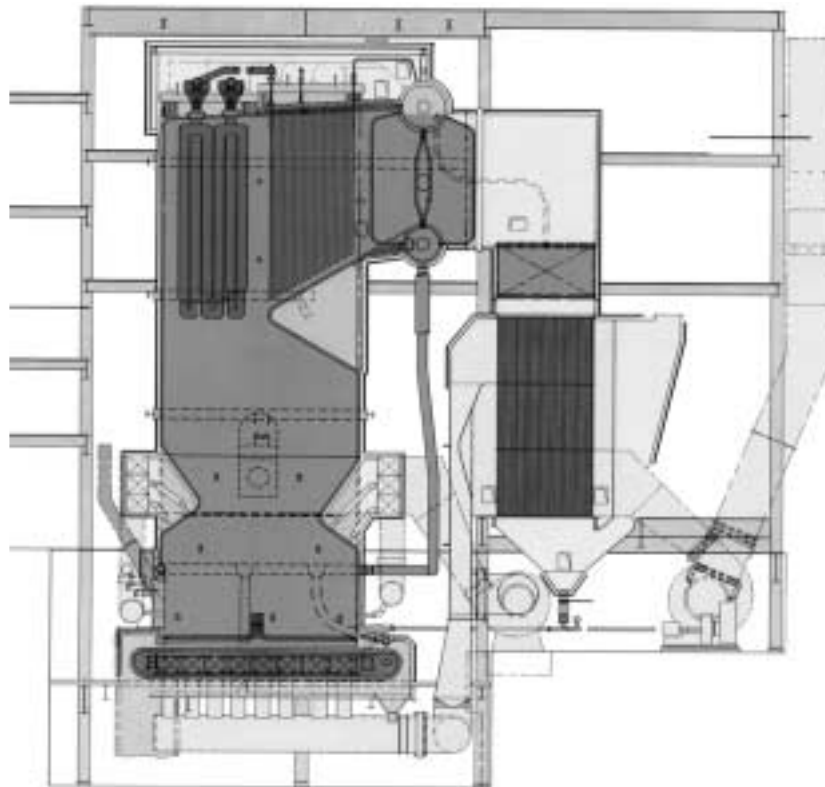
##### **4.1 Diseño Moderno de la Parrilla**

Tanto el sistema de combustión como las parrillas fueron mejorados con los siguientes cambios:

- Mejoramientos en los sistemas de aire de sobrefuego.

- Mejoramientos en la distribución del combustible en la parrilla.
- Mejoramientos en la distribución del aire de combustión con el desarrollo de la cámara de vientos compartimentalizada y modificaciones de la parrilla.
- Reducción en los requerimientos de exceso de aire de 40 a 30%.
- Reducción de la razón de liberación de calor en la parrilla desde un diseño máximo de 1.000.000 a 850.000 BTU/hr-ft<sup>2</sup>.
- Incremento del tiempo de retención en el hogar hasta aproximadamente 3,0 segundos.
- Incremento de las condiciones del vapor hasta 1.500 psi y 955°F.
- Nuevas configuraciones con arcos en el hogar para reducir la estratificación de los gases de combustión a lo largo de las paredes e incrementar la mezcla de aire y combustible.
- La adición de sistemas de Reducción Selectiva no Catalítica (Selective Noncatalytic Reduction (SNCR)) para reducir las emisiones de NO<sub>x</sub> hasta en un 50%.

Refiérase a la Figura 5, ESTADO 4 - Reducciones en Emisiones y Mejoramientos el la Relación de Calor, Diseño Modernizado de la Parrilla para ver una caldera con este sistema. Estas unidades generan flujos de vapor de 100.000 a 500.000 lbs/hr. con presiones de hasta 1.500 psi y temperaturas de sobrecalentamiento de hasta 955F.



*Figura 5 Estado 4 - Reducciones en Emisión y Nuevos Requerimientos en la Relación de Calor. Diseño moderno de la Parrilla.*

## 4.2 y 4.3-Diseños de Cama Fluidizada Burbujeante y Cama Fluidizada Circulatoria

La combustión en cama fluidizada es un proceso en el cual el combustible se suspende en una mezcla turbulenta ascendente de aire y material inerte (generalmente arena). Las bases de diseño de sistemas de combustión en cama fluidizada son las siguientes:

- Mejoramiento de la mezcla e interacción del combustible y el aire de combustión.
- Más largo tiempo de retención en la zona de combustión.
- Temperaturas de combustión uniformes.
- Menores temperaturas de combustión, lo que reduce la generación de NO<sub>x</sub>.

La cama fluidizada burbujeante opera con bajas velocidades en la cama de combustión (3 -8 ft/sec) lo que en turno reduce el combustible y las partículas de ceniza llevadas con los gases. Los sistemas de Cama Fluidizada Burbujeante son menos complicados que los de Cama Circulatoria y son usados generalmente con combustibles uniformes y con cambios mínimos en el régimen de carga.

La Cama Fluidizada Circulatoria es diseñada para más altas velocidades en la cama de combustión (10 - 30 ft/sec) lo que resulta en levantamiento de las partículas de combustible y cenizas, que a su turno requiere la recirculación de las partículas de ceniza y combustible no quemado de nuevo a la cama fluidizada. Esta recirculación asegura la completa combustión y es también usada para regular la temperatura de la cama fluidizada. Los sistemas de Cama Fluidizada Recirculante son generalmente más complicados comparados con los de Cama Burbujeante pero tienen más flexibilidad para control de carga y variaciones en combustible.

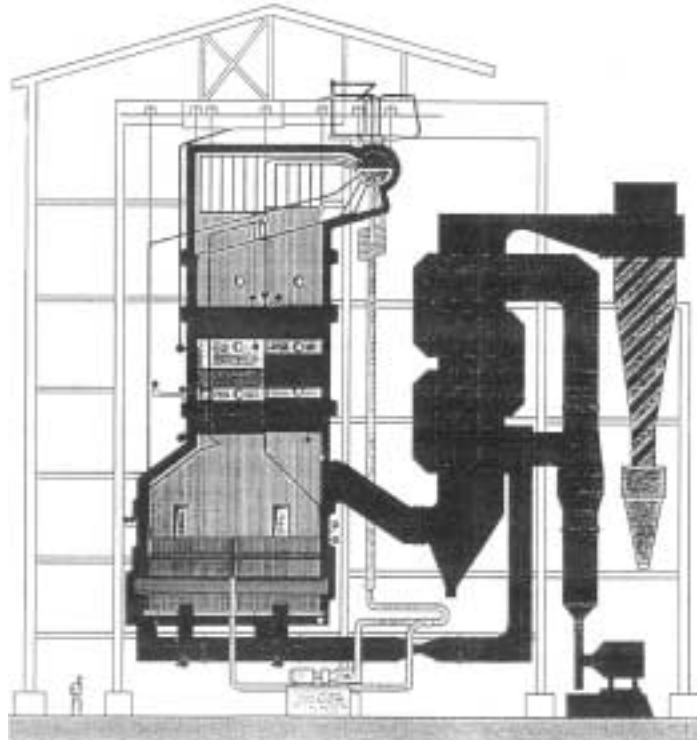
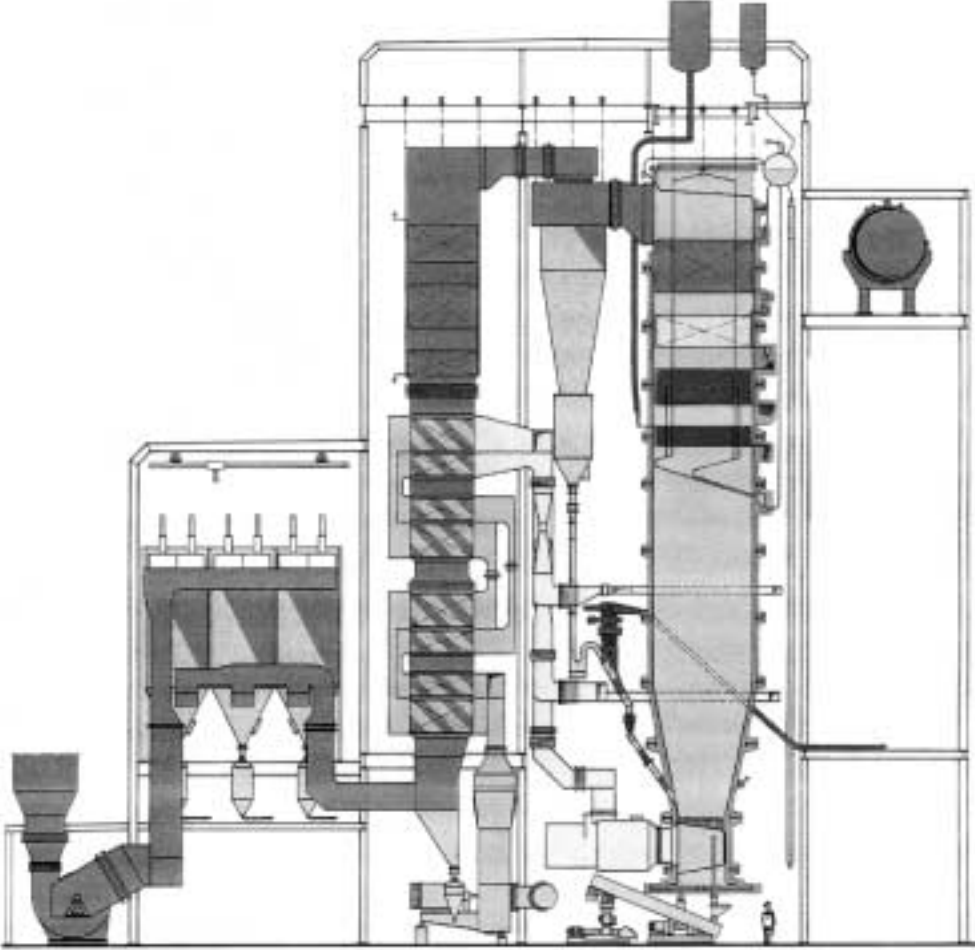


Figura 6 Estado 4 - Reducciones en las Emisiones y Nuevos Requerimientos en la Relación de Calor. Diseño de Cama Fluidizada Burbujeante.



Ambos diseños de calderas fluidizadas también incorporan las mejoras más recientes en el diseño de sistemas de aire de sobrefuego y condiciones incrementadas de vapor de hasta 1.500 psi y 955F.

Refiérase a las Figuras 6 y 7 - Reducciones en Emisiones y Mejoramientos en la Relación de Calor Diseños de Cama Fluidizada Burbujeante y Cama Fluidizada Circulatoria, respectivamente, para ver arreglos de estos sistemas.



*Figura 7 Estado 4–Reducciones en las Emisiones y Nuevos Requerimientos en la Relación de Calor. Diseño de Cama Fluidizada Recirculante.*

La siguiente tabla muestra y compara el Resumen General del Rendimiento de los Estados Históricos 2, 3 y 4.

**Resumen Histórico General del Rendimiento (45 - 55 % Humedad en la Madera)**

	Parrilla Horno Holandés	Parrilla Tubo y Ladrillo Hogar Bajo	Parrilla Pared Soldada Hogar Alto	Diseño de Parrilla Moderna	Diseño de Cama Fluída a Burbujas	Diseño de Cama Fluída Circulante
Flujo de Vapor lbs/hr x 10 <sup>3</sup>	10 - 40	50 - 200	100 - 500	100 - 500	50 - 200	150 - 500
Presión de Vapor. psi	200 - 300	250 - 600	450 - 825	1250 - 1500	450 - 1500	900 - 1500
Temp. del Vapor °F	Sat.	Sat. - 725	725 - 900	825 - 955	825 - 955	825 - 955
Emisión						
CO Lbs/Millón BTU (PPM)	* 0.8 - 3.2 (1000 - 4000)	0.4 - 1.6 (500 - 2000)	0.35 - 0.60 (430 - 735)	0.1 - 0.35 (120 - 430)	0.05 - 0.15 60 - 180	0.05 - 0.15 60 - 180
NO <sub>x</sub> Lbs/Millón BTU (PPM)	-	-	0.15 - 0.20 (112 - 149)	0.15 - 0.25 (112 - 188)	0.15 - 0.17 (112 - 128)	0.15 - 0.17 (112 - 128)
Con SNCR lbs/Millón BTU	-	-	-	0.1 - 0.17	-	-
Con SNCR ppm	-	-	-	(75 - 130)	-	-
Combustibles no quemados						
Pérdida de Rendimiento (%)	* 5	4.0 - 6.0	2.0 - 4.0	1.0 - 1.5	0.5	0.5
Retención en el Hogar Seg. **	-	1.5	2.2	3.0	4.5 - 5.5 por ciclo	3.0 - 4.5
en la Parrilla BTU/hr-ft <sup>2</sup>	-	1,000,000	1,000,000	850,000	NA	NA

\* Basado en la experiencia en combustión de pila, No hay datos en este diseño

\*\* Basado en velocidades de gases de combustión. Le retención de las partículas será mayor dependiendo en tamaño, peso, contenido de humedad etc.

Nota: El resumen mostrado arriba presenta una lista general típica de los rendimientos resultantes. Los rendimientos pueden variar en base a diseños individuales de diferentes fabricantes.

La siguiente sección revisa, en mayor detalle, los mejoramientos más importantes en el diseño de los siguiente equipos:

- Diseños de la Parrilla
- Diseños del hogar
- Diseños de los distribuidores de combustible
- Diseños de Aire de Sobrefuego
- Diseños de Reinyección de Brasas
- Diseños del Sobrecalentador

### **1. Diseños de la Parrilla**

**Objetivo:** Suministrar una superficie para quemar las partículas más grandes del combustible y para remover la ceniza y materiales inorgánicos después de la combustión. Corrientemente las parrillas más comunes son la parrilla viajera con alimentación de esparcidor, parrillas estacionarias enfriadas por agua y limpiadas por vapor y parrillas estacionarias vibrantes.

**Mejoramientos:**

- Mejor distribución del aire de combustión por medio de la compartimentalización del pleno de aire de la parrilla. Ésto permite la regulación del flujo de aire a las secciones de la parrilla para balancear este flujo.
- Mejores diseños para incrementar la caída de presión (incrementar la presión del pleno) lo que mejora la distribución del aire a través de la parrilla y reduce la influencia del espesor de la cama de combustible y cenizas en la distribución del aire.
- Mejores materiales metalúrgicos que permiten temperaturas del aire de combustión de hasta 600°F. Altas temperatura de aire de combustión mejora el secado de maderas de alta humedad.
- Mejores diseños de los sellos de las parrillas lo que reduce las fugas alrededor de la periferia de la parrilla.

### **2. Diseños del Hogar**

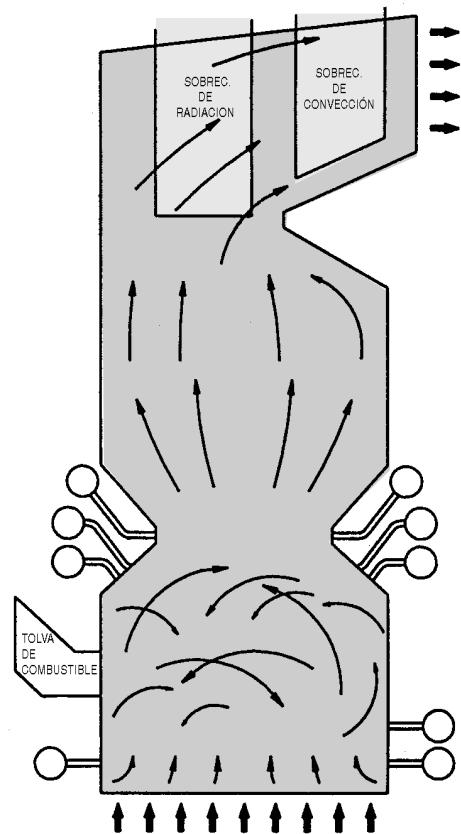
**Objetivo:** Quemar el combustible y recobrar el calor radiante generado por el proceso de la combustión. Refiérase a la Figura 8, Objetivos del Diseño del hogar, que muestra las zonas separadas del hogar y los objetivos del diseño.

**Mejoramientos:**

Nuevas configuraciones del hogar han sido desarrolladas para mejorar el rendimiento de la combustión (reducir CO y pérdida en la ignición) quermando al mismo tiempo una gama de combustibles de desechos de madera. Los objetivos de las nuevas configuraciones del hogar son:

- Establecer una zona de combustión definida.
- Reducir la estratificación a lo largo de las paredes laterales.

Zona 4	<p>Minimiza la estratificación de la velocidad de los gases a través de los bancos de tubos</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduce la erosión en los tubos</li> <li>• Reduce los desbalances en temperatura</li> </ul>
Zona 3	<p>Distribución uniforme del gas de combustión</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Minimiza la estratificación de la velocidad de los gases</li> <li>• Combustión completa de CO</li> <li>• Minimiza el transporte de partículas encendidas</li> </ul>
Zona 2	<p>Máxima turbulencia, mezcla y penetración del aire de sobrefuego para completa combustión en suspensión</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduce estratificación a lo largo de las paredes de agua</li> <li>• Incrementa el tiempo de retención en la zona de combustión</li> </ul>
Zona 1	<p>Distribución uniforme del combustible sobre la parrilla. El sistema de aire de sobrefuego no debe afectar la distribución del combustible sobre la parrilla.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Secamiento del combustible</li> <li>• Ignición del combustible</li> </ul>



*Figura 8 Objetivos del Diseño del Hogar*

- Incrementar la mezcla y turbulencia en la zona de combustión.
- Incrementar el tiempo de permanencia en la zona de combustión y hogar principal.
- Minimizar la llevada de combustibles no quemados.

Los nuevos diseños incluyen paredes planas, arco simple y arco doble todos con sistemas de aire de sobrefuego a varios niveles.

### 3. Diseños de Distribución de Combustible

- Objetivo: Distribuir uniformemente el combustible sobre la superficie de la parrilla.
- Distribuidores neumáticos de combustible utilizando aire pulsante a alta presión.
  - Ausencia de partes mecánicas expuestas a la radiación del hogar.
  - Mejora en la combustión en suspensión de las partículas pequeñas de combustible.

Mejoramientos:

Mejores dispositivos de ajuste del alcance y distribución lateral mediante el uso de presión de aire, veletas de desvío y placas para ajustar el ángulo de trayectoria.

#### **4. Diseños de Aire de Sobrefuego**

Objetivo: Completar la combustión en suspensión y reducir el acarreo de combustible no quemado.

Mejoramientos:

- Cambios en el diseño para incrementar la turbulencia y mezcla del aire de sobrefuego en el proceso de combustión mediante la mejora en la penetración de las boquillas y optimización en la localización de éstas.
- Reducción de la estratificación de los gases de combustión a lo largo de las paredes de agua.

#### **5. Diseños de reinyección de brasas**

Objetivo: El objetivo de este sistema es el de reinyectar el combustible no quemado desde las tolvas del paso de convección y/o del colector de polvo, de nuevo a la zona de combustión para ser reencendido.

Mejoramientos:

- Mejorado el diseño del separador de arenas con el desarrollo de separadores rotatorios para incrementar su confiabilidad.
- Mejorados los diseños para mantener esparcimiento uniforme del combustible en la parrilla.

#### **6. Diseños del Sobrecalentador**

Objetivo: El objetivo del sobrecalentador es el aumentar la temperatura del vapor por encima de la de saturación.

Mejoramientos:

- Adición de superficies radiantes de sobrecalentamiento.
- Incremento del espaciamiento de tubos para reducir depósitos de escorias.
- Mejoramientos en la metalurgia.

Los datos contenidos en este documento son solamente informativos y no son ofrecidos, ni deben ser supuestos, como garantía o responsabilidad contractual.