XXIX.- CENTRALES QUE QUEMAN MADERAS Y BIOMASA

pfernandezdiez.es

Suministro de vapor a procesos industriales	*1115*
Pulpa y papel	*1116*
Procesado de alimentos	*1116*
Suministro de vapor para generación energética	*1117*
Cogeneración	*1117*
Plantas que queman biomasa	*1117*
Combustibles	*1118*
Combustión de madera y biomasa	*1118*
Combustión combinada con combustibles tradicionales	*1119*
Combustión de lodos	*1120*
Sistemas de combustión	*1120*
Cámara exterior anexa	*1120*
Parrilla porosa	*1122*
Parrilla móvil	*1123*
Hogar con zona de combustión controlada (CCZ)	*1125*
Secadores y pulverizadores	*1126*
Lecho fluidificado	*1128*
Diseño de componentes de caldera para combustión de madera y biomasa	*1128*
Parrilla, distribuidor de combustible, quemadores y hogar	*1129*
Sobrecalentador	*1129*
Banco de caldera	*1130*
Economizador	*1130*
Equipos auxiliares	*1132*
Ventiladores de tiro forzado (FD), inducido (ID), y de aire secundario (OFA)	*1132*
Sopladores retráctiles, rotativos y de rastrillo	*1133*
Sistemas de manipulación del combustible	*1134*
Sistemas de manipulación de la ceniza	*1134*
Sistemas de aire	*1135*
Aire bajo la parrilla (aire primario) y sobre el nivel del fuego (aire secundario)	*1135*
Equipos para el control de emisiones	*1136*
Colectores de polvo	*1136*
Precipitadores	*1136*
Filtros de tela o cámaras de sacos	*1137*
Depuradores húmedos	*1137*
Impacto medio ambiental	*1137*
Emisión de partículas, óxidos de NOx, SOx, CO y compuestos orgánicos volátiles (VOC)	*1137*
Tecnología avanzada para el control de los NOx en plantas de residuos	*1139*
Fundamentos físicos del método	*1141*
Correcciones y errores de medida	*1142*
Descripción del sistema de medida AGAM	*1143*
Tecnología avanzada en plantas de residuos procedentes de la molienda de granos	*1145*
Referencias	*1147*

Las maderas y la biomasa cubren un amplio campo de materiales que se pueden utilizar como fuentes combustibles para la generación de vapor.

La *madera* engloba cortezas, astillas, aserrín, recortes de tamaños superiores e inferiores rechazados en los procesos de fabricación de pulpa, trozos completos de árboles, etc.

La *biomasa* engloba hojas, hierbas, bambú, corteza de pino, caña de azúcar (bagazo), granos de café, cáscaras de arroz procedentes de la industria de procesado de alimentos, etc. Los residuos sólidos municipales (basuras) contienen una gran cantidad de biomasa.

Los combustibles de *maderas* y de *biomasa* fueron algunos de los primeros *materiales* que se utilizaron como fuentes *energéticas*, y aunque su empleo declinó cuando estuvieron disponibles otros combustibles fósiles, más consistentes y fácilmente transportables, como carbones, aceites y gases, siempre han existido aplicaciones particulares en las que han tenido preferencia como combustibles.

Los factores que han intervenido en su actual desarrollo, son:

- El coste creciente de los combustibles fósiles

- El desarrollo de tecnologías que permiten una mejor utilización de los subproductos industriales

- La tendencia en muchas industrias hacia la cogeneración, generando electricidad y vapor para procesos industriales

XXIX.1.- SUMINISTRO DE VAPOR A PROCESOS INDUSTRIALES

Pulpa y papel.- La industria de la pulpa y del papel es el mayor usuario de combustibles de biomasa, como productos residuales de cortezas, aserrín, peladuras, recortes de madera, lodos de clarificador, etc, procedentes de la fabricación de pulpa y papel y de la manufactura de la industria maderera.

Las necesidades energéticas requeridas para la manipulación de la pulpa se cumplimentan:

- Utilizando vapor en una gran variedad de equipos (máquinas y turbinas de vapor, calentadores de aire con serpentines de vapor, rodillos secadores y calentadores indirectos)

- Mediante la inyección directa de vapor

Estos requisitos y la disponibilidad de productos residuales, conducen a una selección de calderas que queman madera y residuos madereros, para la industria de la pulpa y del papel.

Procesado de alimentos.- Es otra industria que tiene grandes necesidades energéticas, atendidas preferentemente por vapor; la preparación mecánica, la cocción, el secado y el enlatado de conservas requieren de una fuente energética.

Muchos alimentos dejan, tras de sí, subproductos residuales ricos en celulosa o en otros materiales orgánicos (hidrocarburos), como: $\begin{cases} \textit{- La producción de café instantáneo genera posos de café} \\ \textit{- La obtención de azúcar libera el bagazo de la caña de azúcar} \\ \textit{- La preparación de coco descarta las cáscaras de coco} \\ \textit{- Al arroz se le quita la cáscara antes de empaquetarlo} \\ \textit{- Muchos frutos secos se venden tostados desprovistos de cáscaras} \end{cases}$

Son muchos los productores que han instalado calderas que queman estos materiales de biomasa, con equipos muy parecidos a los diseñados para la industria de la pulpa y del papel.

XXIX.2.- SUMINISTRO DE VAPOR PARA GENERACIÓN ENERGÉTICA

Cogeneración.- La mayoría de las aplicaciones de calentamiento se pueden cumplimentar con vapor saturado a 150 psig (11,3 bar), e incluso a menor presión.

La cogeneración es la producción simultánea de energía $\begin{cases} \textit{eléctrica o mecánica} \\ \textit{térmica para procesos} \end{cases}$ y tiene una elevada eficiencia térmica, por cuanto el calor residual de la producción de electricidad en vez de enviarlo a la atmósfera, desperdiciándolo, se aprovecha en un proceso.

En una instalación de cogeneración, el vapor sobrecalentado a una presión relativamente alta pasa a través de una turbina de vapor, o de una máquina de vapor, en la que se le extrae su energía; el vapor de escape se utiliza como una *fuente de calor* para otros procesos.

La *eficiencia de la conversión*, se define en la forma:

$$\frac{\textit{Calor absorbido en la turbina de vapor + Calor absorbido en el proceso}}{\textit{Energía almacenada en el vapor}} \approx 100\%$$

La *eficiencia global* de un proceso de cogeneración se aproxima mucho a la eficiencia térmica de la caldera sola.

En la *industria de la pulpa y del papel* existen otras razones, aparte del rendimiento, para la utilización de la cogeneración. Estas plantas industriales están, frecuentemente, alejadas de fuentes económicas y fiables de electricidad y de combustibles fósiles convencionales, como consecuencia de su implantación en ambientes naturales de materias fibrosas, como son los bosques, por lo que las instalaciones de cogeneración, equipadas con calderas energéticas que quemen madera, están plenamente justificadas.

Plantas que queman biomasa.- Las cambiantes condiciones *económicas* y regulaciones medioambientales han hecho de las plantas de servicio público, que queman combustibles de biomasa, una fuente de energía eléctrica, a pesar de sus relativamente altos costes de inversión. Esto ha dado

lugar a una serie de *productores energéticos independientes (*IPP*)*, que construyen una planta que quema biomasa, cuyo único objetivo es generar ingresos, mediante la producción de energía eléctrica que venden a una compañía eléctrica.

Algunas plantas se construyen con una turbina de condensación y, a veces, la planta se construye junto a otra que va a utilizar el vapor de escape.

Las condiciones económicas que favorecen estas instalaciones son el:

- *Coste de*
  - *los combustibles convencionales, a veces muy alto*
  - *los residuos madereros (relativamente bajos), y de otros combustibles de biomasa*
  - *el transporte (elevado), y vertido de la biomasa residual para relleno*
- *Ahorro en el coste de los equipos de control de emisiones*

Las maderas y los residuos madereros generan menores emisiones de NO_x *y* SO_2, que la mayoría de los combustibles fósiles. Se ha comprobado que la cantidad de NO_x producido en la recolección e incineración de las ramas podadas de la vid y de otros residuos, se reduce cuando se queman esos materiales en una instalación que queme madera de forma controlada.

XXIX.3.- COMBUSTIBLES

Constituyentes.- La madera y la mayoría de los combustibles de biomasa están compuestos por celulosa *y* humedad. La alta proporción de humedad es muy significativa, porque actúa como un *absorbente* de calor durante el proceso de combustión.

El calor latente de vaporización $r_{liq\text{-}vapor}$ disminuye la temperatura de la llama, dificultando la combustión eficiente de los combustibles de biomasa.

La celulosa, que contiene la energía química que se libera durante el proceso de combustión, contribuye a la afinidad del combustible con el oxígeno. La cantidad del oxígeno estructural (ligado al combustible) disminuye el aire teórico requerido para la combustión y, por tanto, la cantidad de N_2 incluida en los humos producto de la combustión.

La mayoría de los combustibles naturales de biomasa tienen *bajos porcentajes* de ceniza; sin embargo, algunos subproductos como los lodos procedentes del destintado de papeles impresos, contienen hasta un 50% de ceniza, sobre seco; estos lodos son difíciles de quemar, porque tienen altos contenidos de humedad y ceniza, y poco oxígeno estructural ligado al combustible.

Combustión de maderas y biomasa.- Se han establecido algunas líneas maestras, para la combustión de madera y biomasa, basadas en la experiencia:

- *En la mayoría de los hogares refrigerados por agua se puede mantener una combustión estable, a pesar de los elevados contenidos de humedad en el combustible, que tal como se recibe puede llegar hasta el 65%*

- La utilización de aire comburente precalentado reduce el tiempo requerido para el secado del combustible, previo a su ignición, siendo esencial para los sistemas de combustión con parrilla mecánica plana y alimentador distribuidor. La temperatura de diseño del aire varía directamente con el contenido de humedad del combustible

- Una elevada proporción de materia inflamable contenida en los combustibles de madera y biomasa, arde en forma de compuestos volátiles, por lo que una gran parte del aire comburente requerido (aire secundario) se añade por encima del combustible, (aire por encima del nivel de fuego)

- Los subcoques (chars) sólidos, producidos en las etapas iniciales de la combustión de madera y biomasa, son de muy baja densidad. Un tamaño del hogar conservador reduce la velocidad de los humos y mantiene el arrastre de subcoques en un nivel aceptable.

Los criterios de selección de un hogar incluyen:

- Un régimen de absorción de calor, referido al área superficial de la parrilla, de $\begin{cases} 10^6\ Btu/ft^2 h \\ (3{,}15\ MW_t/m^2\ ) \end{cases}$

- Un régimen de liberación de calor, referido al volumen del hogar, del orden de $\begin{cases} 17.000\ Btu/ft^3 \\ (176\ kW/m^3\ ) \end{cases}$

- Una velocidad creciente de los humos de 20 ft/s (6,1 m/s)

Con estos datos se producen, para unidades grandes, unos tiempos de residencia en el hogar del orden de 3 segundos, con el fin de mejorar la combustión de las partículas y minimizar las emisiones.

Combustión combinada con combustibles tradicionales.- La biomasa se puede quemar sobre parrillas móviles en hogares mecánicos diseñados para quemar carbón.

La biomasa se introduce en el hogar mediante un sistema de transporte, a través de una espita soplada por aire por debajo del alimentador de carbón o mediante un alimentador combinado, y se puede quemar con carbón pulverizado, aceite o gas natural, utilizando quemadores específicos para aquélla; en esta situación la parrilla se selecciona para quemar madera.

Cuando se quema biomasa con grandes cantidades de carbón, en hogar mecánico o pulverizado en lecho suspendido, la cantidad de ceniza procedente del carbón es mucho mayor que la que procede de la biomasa y, por tanto, los parámetros de diseño para carbón (índices de escorificación y de ensuciamiento) son los que intervienen en el diseño global.

Cuando se quema biomasa con aceites pesados que tienen alto contenido de S y Va, la ceniza que se acumula en las superficies de convección puede ser muy tenaz y, una vez desprendida de las mismas, puede ser muy abrasiva.

Siempre es preferible diseñar una unidad con bajas velocidades y temperaturas de humos, in-

dependientemente de los contaminantes presentes en el fuelóleo pesado y en la biomasa, ya que ambos parámetros pueden variar mucho, incluso por encima del campo operativo correspondiente a la caldera**.**

Combustión de lodos.- Los lodos de la industria papelera, especialmente los procedentes del destintado del papel impreso, son muy difíciles de quemar. Su elevado contenido de humedad y ceniza (que depende de la composición de los lodos) y la baja afinidad del combustible por el oxígeno (que depende del sistema de combustión) limitan su contribución al aporte total de calor al hogar.

Los aportes de calor más altos procedentes de lodos, para un sistema dado de combustión, se alcanzan normalmente con combustiones combinadas con otros combustibles de mejor calidad.

Los residuos de madera mezclados con lodos pueden presentar dificultades en el sistema de manipulación de combustible. Frecuentemente los lodos se segregan de otros combustibles, por ejemplo, en los puntos de transferencia entre cintas transportadoras, y pueden constituirse en la alimentación preferente de un alimentador.

En las aplicaciones de hogares con parrilla plana y alimentador distribuidor, el lodo denso y húmedo se puede apilar muy rápidamente en un determinado punto de la parrilla, por lo que ésta se debe inspeccionar continuamente, para determinar dónde se requieren los ajustes.

XXIX.4.- SISTEMAS DE COMBUSTIÓN

Se han desarrollado muchos métodos para quemar la madera y otros combustibles de biomasa, algunos de cuyos equipos se discuten a continuación.

CÁMARA EXTERIOR ANEXA.- Es un recinto con paredes de refractario conectado a un cerramiento convencional de caldera, Fig XXIX.1; a veces se refrigera con agua para proteger *y* prolongar la vida de las paredes de refractario. Los residuos de madera se introducen a través de una abertura situada en el techo de la cámara exterior anexa, y se queman en una pila sobre el suelo del recinto.

El aire por encima del fuego ($aire_{secundario}$) se introduce por toda la periferia del recinto, a través de filas de toberas practicadas en las paredes de refractario que lo configuran.

La ventaja principal de la cámara exterior anexa radica en que sólo una pequeña porción de la energía liberada en la combustión se absorbe en el mismo recinto, dado el elevado porcentaje de superficie de refractario, por lo que es posible quemar combustibles con hasta un 60% de humedad; además, como el combustible se quema apilado, la unidad es menos sensible a las interrupciones en el suministro de combustible.

La unidad opera mejor cuando $\begin{cases} Funciona\ con\ una\ carga\ estable\ (permanente) \\ Se\ quema\ un\ combustible\ estable\ (consistente) \end{cases}$

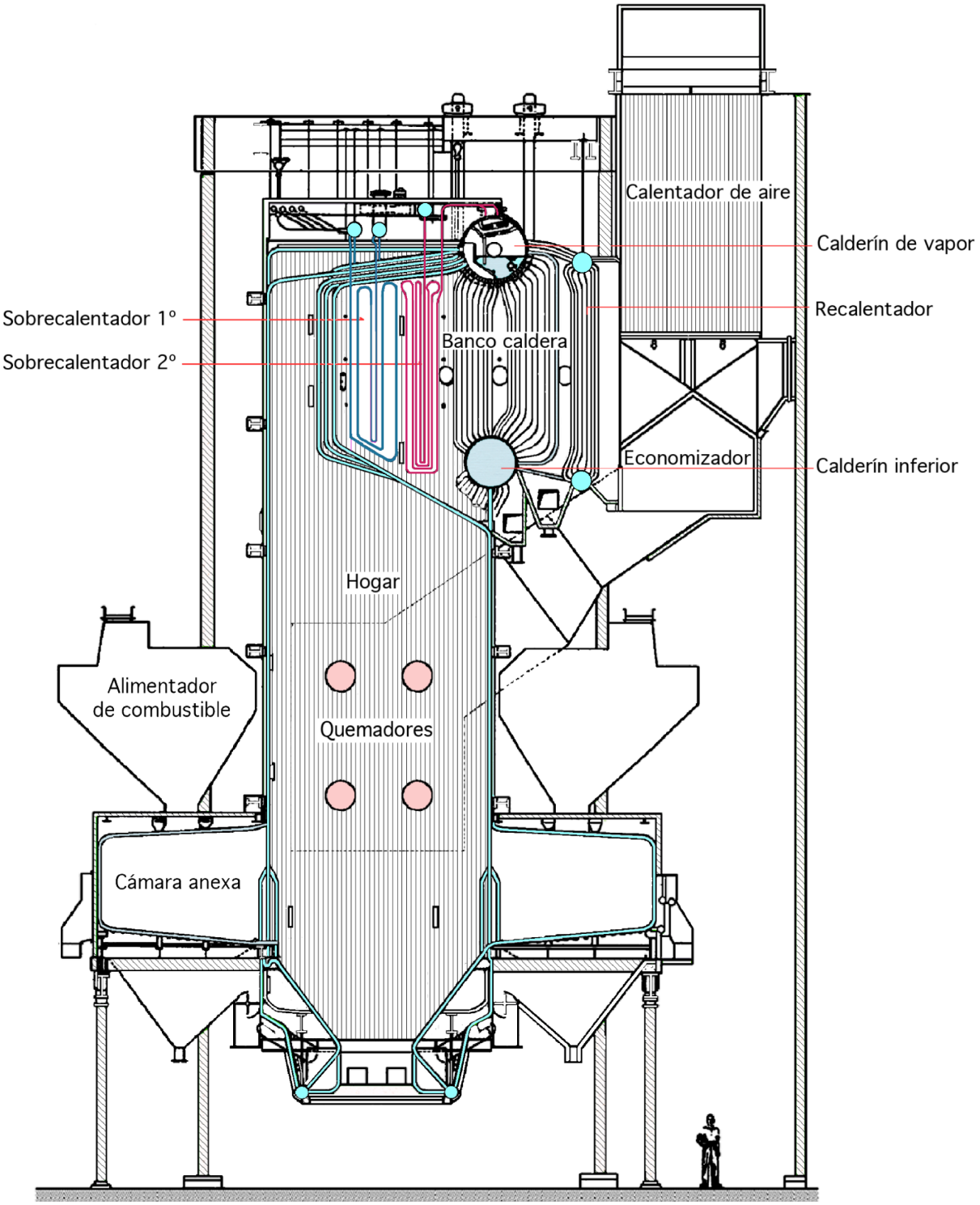


Fig XXIX.1.- Hogar con cámaras exteriores anexas, para quemar maderas

La unidad no responde con rapidez a los cambios en la demanda de carga.

El refractario está sujeto a daños que proceden de:

- *La fisuración y erosión provocadas por rocas o metales introducidos con el combustible*
- *El enfriamiento rápido por contacto con combustibles muy húmedos*
- *El recalentamiento cuando se quema madera muy seca*

La cámara exterior anexa hay que retirarla de servicio regularmente, para eliminar las cenizas que se hayan acumulado. Durante este período, la carga se reduce si la unidad está dotada de múltiples celdas, o si hay que quemar combustible auxiliar como en las unidades equipadas sólo con una cámara exterior anexa.

Durante el período de evacuación de la ceniza, a operación del hogar se mantiene con la mayor depresión posible, con el fin de reducir la posibilidad de que se puedan soplar humos calientes, llamas o ceniza caliente hacia el personal de limpieza.

La operación con un tiro elevado en el hogar conduce a grandes cantidades de aire comburente dentro de la cámara exterior anexa, lo que provoca que todo el combustible auxiliar se esté quemando con una baja eficiencia térmica, debido al enorme $aire_{exceso}$ comburente; ésto conduce a altas velocidades de los humos a través de las superficies de convección de la unidad, lo que puede provocar erosión, especialmente cuando las cantidades de subcoque (char), de ceniza y de polvo vitrificado salen de la cámara exterior anexa, con el aire, hacia la caldera.

PARRILLA POROSA.- Es una parrilla refrigerada por agua, Fig XXIX.2, configurada por bloques de hierro fundido (bloques Bailey) que están fijados a los tubos espaciados del suelo del hogar refrigerado por agua; los bloques de parrilla tienen agujeros para el aire, que pasa a su través desde debajo de la parrilla, hacia el combustible que está sobre ésta.

La parrilla se usa junto con $\begin{cases} otros\ distribuidores\ mecánicos\ de\ combustible \\ espitas\ de\ combustible\ sopladas\ con\ aire \end{cases}$

En cualquier caso se produce un tipo de combustión en lecho semisuspendido, dentro del cual las partículas más $\begin{cases} finas\ se\ queman\ en\ suspensión \\ pesadas\ se\ acumulan\ y\ queman\ sobre\ la\ parrilla \end{cases}$

La ceniza y materia extraña que queda en la parrilla, se eliminan mediante rasqueteado y evacuación manuales, por lo que la combustión de biomasa se tiene que interrumpir periódicamente, para realizar estas operaciones, constituyendo ésto su principal desventaja; la evacuación manual de la ceniza limita la profundidad del hogar y, por tanto, la capacidad de vaporización.

El 75% del aire comburente para la madera se introduce como $aire_{secundario}$ (por encima del nivel de fuego), a través de toberas en las paredes del hogar inferior, y el 25% restante como aire por la parte inferior de la parrilla.

Este sistema de combustión permite pequeños cambios de carga, modificando los flujos de combustible y aire, y es adecuado para combustibles de biomasa hasta un 55% de humedad.

Se han desarrollado equipos mecánicos de rasqueteado y evacuación de cenizas, para incrementar la profundidad permisible en el hogar y acelerar el proceso de evacuación de la ceniza, a la

vez que se provee de un cierto grado de protección para el operador, contra los humos, llamas y cenizas calientes, pero han resultado poco fiables en lo referente a sus características operativas de evacuación y a su función de protección.

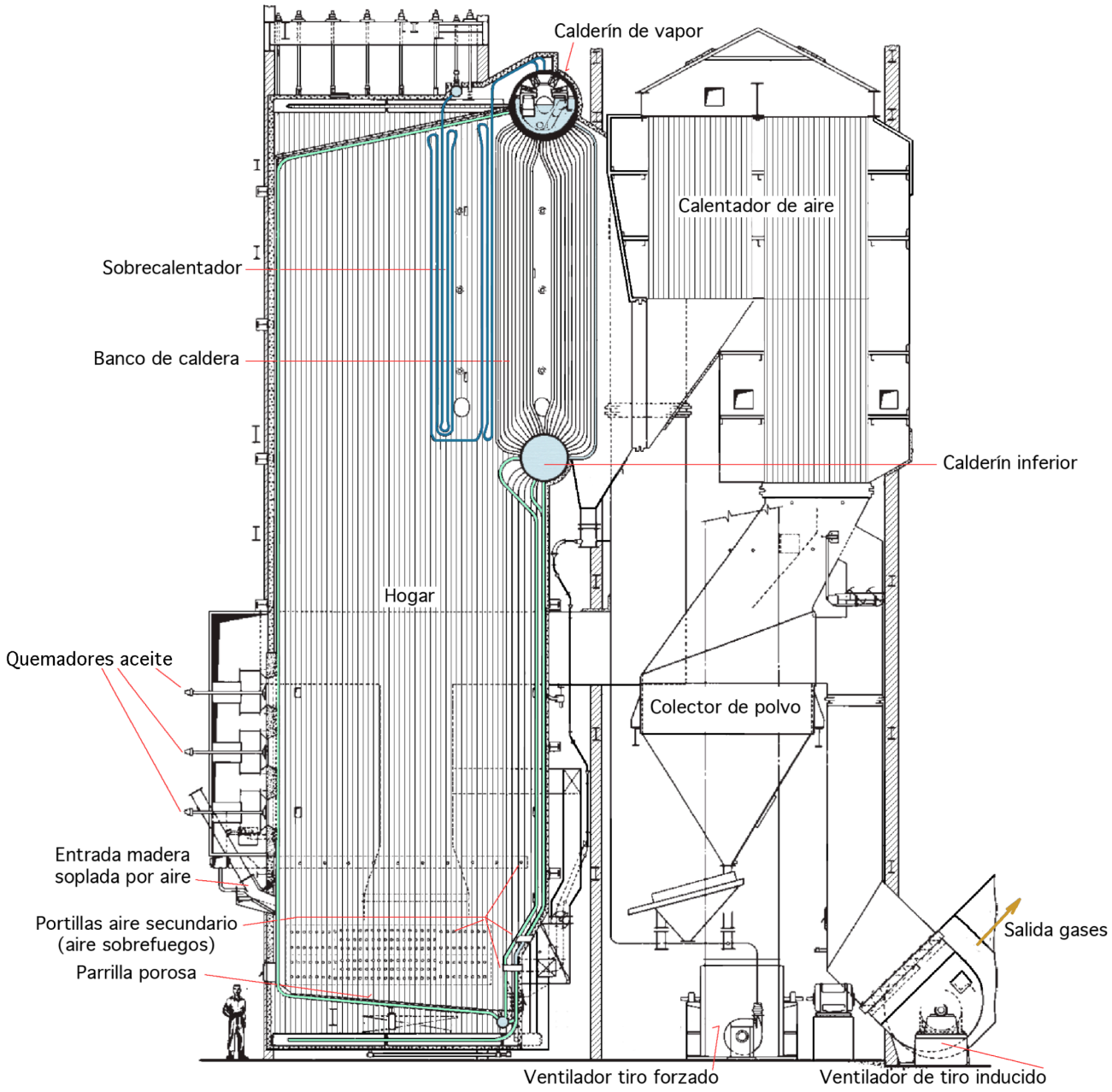


Fig XXIX.2.- Caldera con parrilla porosa, para quemar maderas

Parrilla móvil.- Se introdujo como una mejora del diseño de la parrilla porosa, Fig XXIX.3, y originalmente se desarrolló para la combustión en parrillas planas de carbones bituminosos y subbituminosos. La parrilla móvil facilita una descarga automática y continua de la ceniza (que es su principal ventaja), y consiste en una serie de barras de hierro fundido, unidas entre sí mediante cadenas, que se accionan lentamente por un mecanismo de ruedas dentadas.

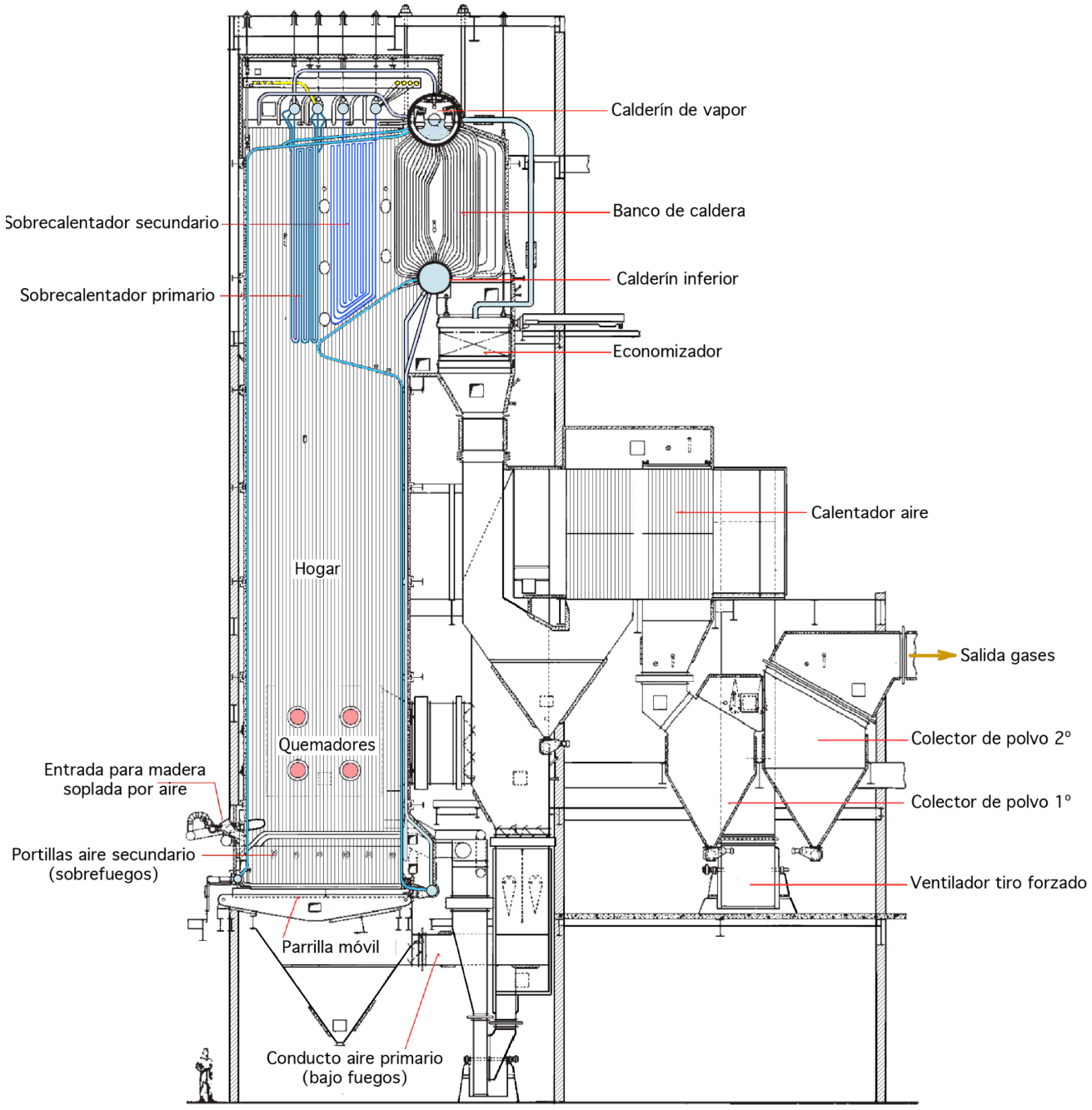


Fig XXIX.3.- Caldera con parrilla móvil, para quemar maderas

Las barras de hierro tienen agujeros a través de los cuales se admite el aire desde la parte inferior de la parrilla, que sirven también para su refrigeración, empleándose en esta misión del 60-85% del aire comburente, como aire inferior a la parrilla, por lo que sólo entre el 15÷40% se introduce como $aire_{secundario}$ por encima del nivel de fuego.

Para el $aire_{secundario}$ se utilizan filas de toberas en las paredes frontal y posterior del hogar. Los distribuidores de combustible y las formas de combustión, son iguales a los utilizados en las parrillas porosas. Para el carbón, la cantidad de $aire_{secundario}$ que se requiere para una combustión eficiente puede ser tan baja como el 15% del total.

La cantidad de ceniza presente en el carbón es mucho más alta que en el caso de la madera, por lo que es posible desarrollar, sobre la parrilla, un lecho de ceniza relativamente grande, con el fin de protegerla contra las altas temperaturas y para ayudar a la distribución del aire del inferior de la parrilla.

El carbón de menor humedad se quema, frecuentemente, sin aire comburente precalentado, requiriendo rara vez temperaturas del aire que superen los 350ºF (177ºC).

La parrilla móvil, aunque representa una mejora sobre la parrilla porosa, se debe considerar como un diseño de compromiso para la combustión de biomasa, ya que la utilización de aire precalentado y de biomasa con poca ceniza, reducen la posibilidad de refrigeración de la parrilla; ésta tiene muchas partes móviles que están sometidas al calor del hogar, lo que da lugar a elevados costes de mantenimiento.

Pueden utilizar combustibles de biomasa de poder calorífico entre $8{,}2 \div 15$ MJ/kg

HOGAR CON ZONA DE COMBUSTIÓN CONTROLADA (CCZ).- Se desarrolló específicamente para la combustión de biomasa (1979), Fig XXIX.4.

El diseño utiliza bóvedas en las paredes frontal y trasera del hogar, para crear en éste una zona inferior en la que se confine la combustión de la biomasa.

El $aire_{secundario}$ que penetra a través de las toberas ubicadas bajo las bóvedas, quema el combustible volátil que se desprende del lecho, junto a las partículas sólidas arrastradas por el flujo ascensional de los humos.

La optimización, ubicación y configuración de las toberas de $aire_{secundario}$, se hace con vistas a conseguir los siguientes objetivos: $\begin{cases} \textit{- Alta turbulencia en todas las secciones del hogar inferior} \\ \textit{- Flujo uniforme en el hogar superior} \\ \textit{- Mezcla completa de aire y combustible} \\ \textit{- Mínima necesidad de limpieza de la superficie de parrilla} \end{cases}$

La primera caldera con zona de combustión controlada (CCZ) (1980), se construyó para un flujo de vapor de $\begin{cases} 400.000\ lb/h \\ 50{,}4\ kg/s \end{cases}$ a $\begin{cases} 650\ psi \\ 44{,}8\ bar \end{cases}$ y $\begin{cases} 750ºF \\ 399ºC \end{cases}$, quemando madera y aceite.

Programas informáticos han confirmado las ventajas de la configuración del hogar (CCZ), facilitando una mezcla superior del $aire_{secundario}$ (sobre el fuego) en el hogar inferior, y poniendo de manifiesto la superioridad de $\begin{cases} \textit{un diámetro grande de } 4'' \div 6'' = (101{,}6 \div 152{,}4\ mm) \\ \textit{una presión media, de } 20''wg\ (4{,}98\ kPa) \end{cases}$ para las toberas de $aire_{secundario}$, en lugar de utilizar toberas de pequeño diámetro con elevadas presiones.

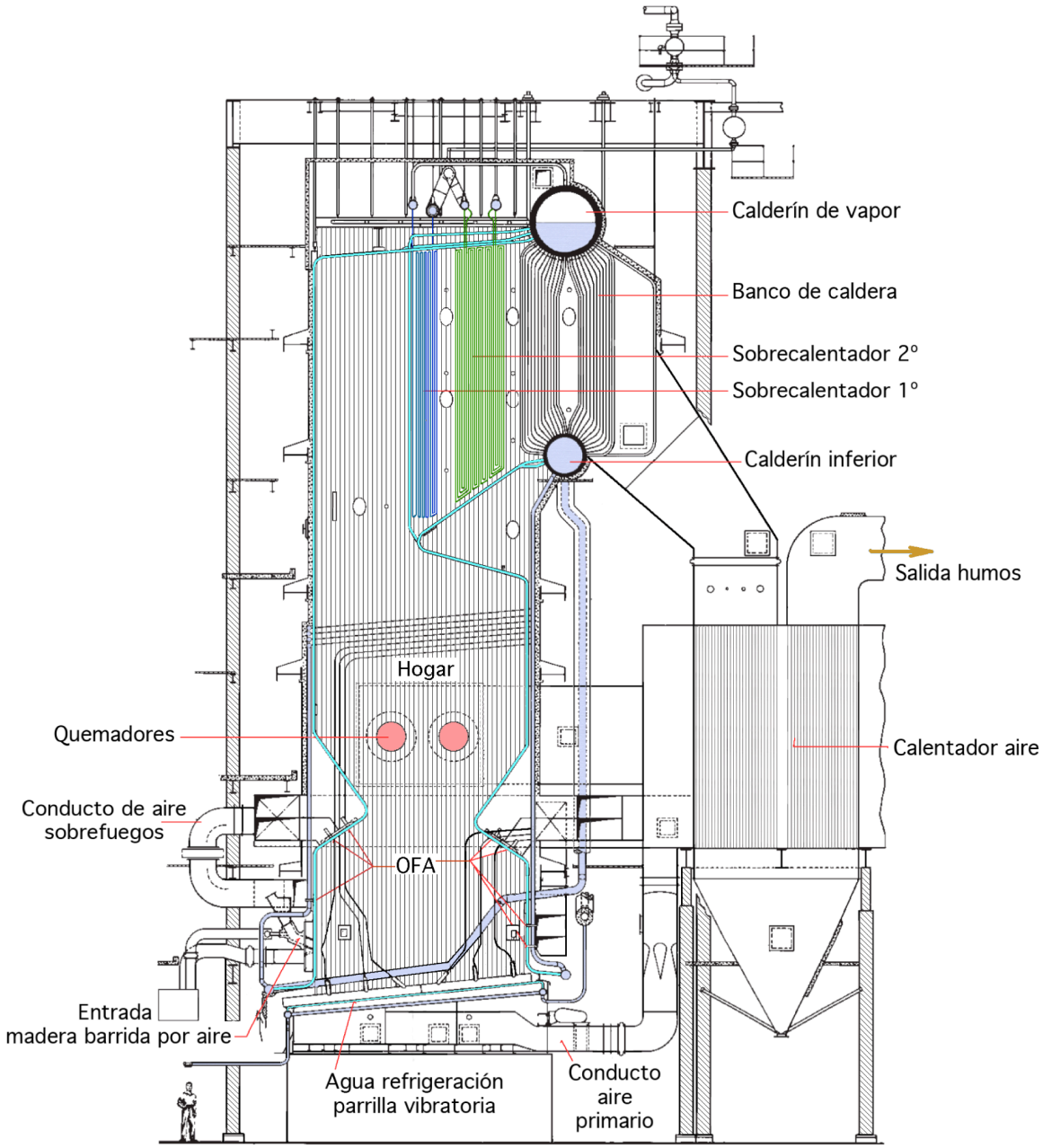


Fig XXIX.4.- Caldera Stirling de 2 calderines, para quemar maderas y con zona de combustión controlada (CCZ)

El hogar (CCZ) se utiliza muy frecuentemente con parrillas vibratorias refrigeradas por agua, para facilitar unos medios más fiables y eficientes de quemar biomasa, resultando muy efectivo al quemar combustibles con alta humedad (60%) sin necesidad de quemar combustible auxiliar, Fig XXIX.5

SECADORES Y PULVERIZADORES.- Si el combustible de biomasa disponible es alto en humedad, o si la capacidad de la instalación existente se tiene que incrementar, resulta económico secar el combustible, antes de que se queme en el hogar, con los humos de combustión de la caldera, en lugar de prensar el combustible para evacuar su humedad o de modificar la caldera para aumentar su capacidad.

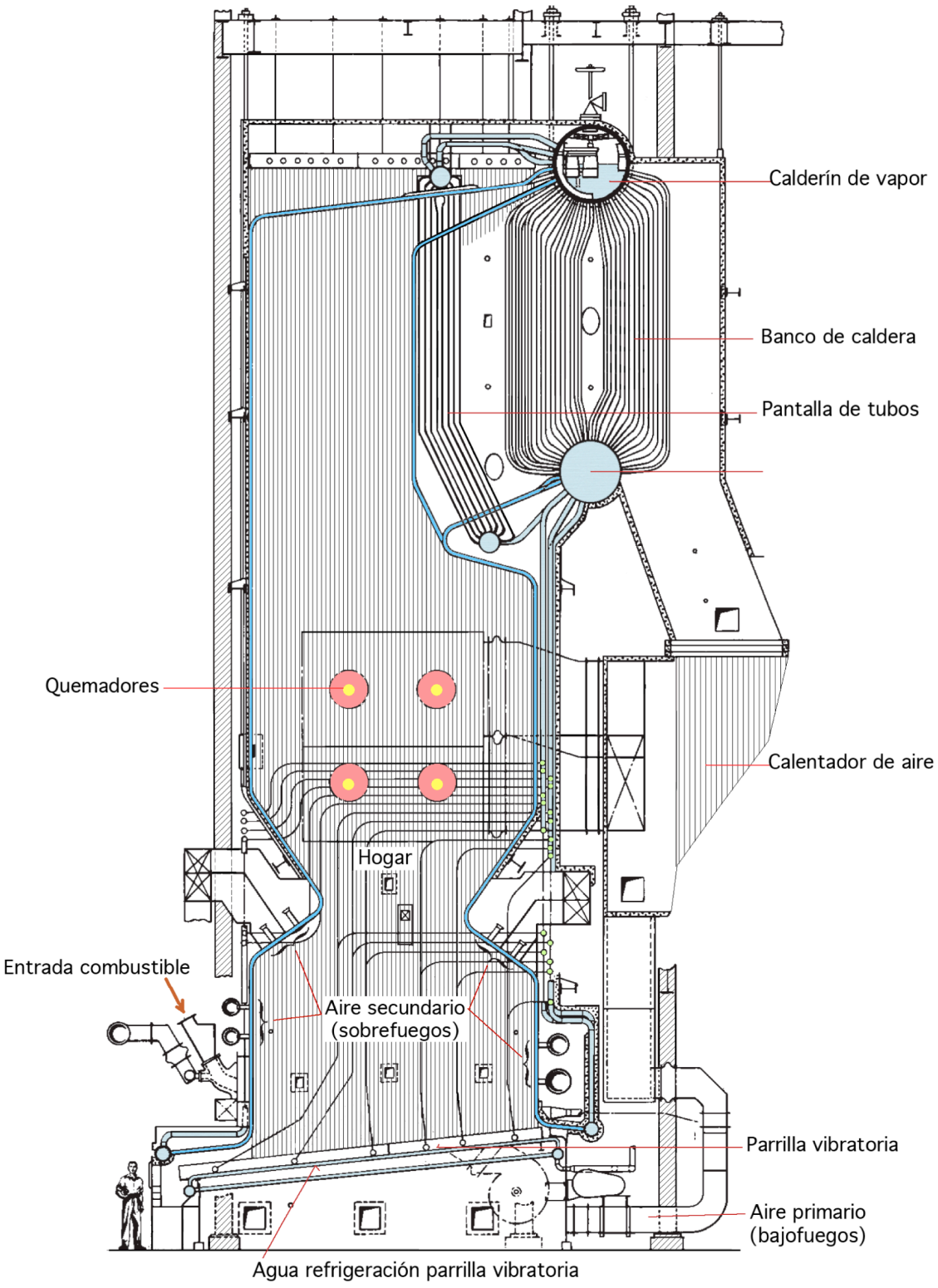


Fig XXIX.5.- Unidad con parrilla vibratoria refrigerada por agua, con zona de combustión controlada (CCZ)

Otras formas de quemar biomasa se concretan en la pulverización/secado. El secado se consigue mezclando la biomasa con los humos de la combustión calientes que salen de la caldera, pulverizándola en un ventilador/molino de mazas y retornando la mezcla hacia el hogar a través de un quemador; el producto obtenido, a excepción de las grandes piezas, no puede experimentar una re-

ducción de tamaño mayor. La mayoría de los demás sistemas de pulverización han demostrado que requieren de un mantenimiento importante, disponibilidades bajas y consumiendo, en las aplicaciones para biomasa, una gran cantidad de energía.

LECHO FLUIDIFICADO.- La combustión en lecho fluidificado se ha aplicado con éxito a un determinado tipo de combustibles residuales de madera, ofreciendo un determinado número de características funcionales que pueden ser ventajosas en ciertas aplicaciones. Este tipo de calderas permiten la utilización de combustibles contaminados, de poca energía, Sólo del $2 \div 3\%$ del lecho es carbono, estando compuesto el resto por material inerte (arena), que acumula una gran cantidad de calor en el hogar, y de esa forma se amortigua el efecto de las fluctuaciones transitorias del poder calorífico del combustible, sobre la generación del vapor.

La optimización de la caldera permite utilizar otros tipos de combustibles, como:

- La EcoFluid, de lecho fluidizado burbujeante (BFB), permite combustibles con un poder calorífico entre 3 y 20 MJ/kg, utilizada para quemas basuras agrícolas.

- La Power Fluid de lecho fluidificado circulante (CFB), permite combustibles con un poder calorífico entre 6 y 40 MJ/kg, como carbón, biomasa, basuras agrícolas y basuras con alto poder calorífico

Los lechos fluidos operan con temperaturas entre $\begin{cases} 1400 \div 1600ºF \\ 760 \div 871ºC \end{cases}$ que son considerablemente inferiores a las de combustión en unidades de parrilla plana, de 2200ºF (1204ºC).

Las temperaturas de los lechos fluidificados producen menos NO_x lo que es beneficioso en el caso de combustibles de madera y biomasa, con altos contenidos en N_2.

Las emisiones de SO_2 procedentes de la combustión de residuos de madera y biomasa se consideran insignificantes; sin embargo, cuando la contaminación del flujo principal de combustible por S representa un problema, se añade caliza al lecho fluido para lograr un alto grado de captura del S.

Los combustibles contaminados por S incluyen los residuos procedentes de la construcción y algunos lodos de papeleras.

El tipo de lecho fluidificado seleccionado depende de $\begin{cases} \textit{- el poder calorífico del combustible} \\ \textit{- cómo se recibe} \\ \textit{- los residuos de madera y de biomasa} \end{cases}$

- Para combustibles de poder calorífico $\begin{cases} \textit{bajo, se selecciona, en general, el lecho fluido burbujeante} \\ \textit{alto, resulta más adecuado el lecho fluido circulante} \end{cases}$

XXIX.5.- DISEÑO DE COMPONENTES DE CALDERA PARA COMBUSTIÓN DE MADERA Y BIOMASA

Parrilla.- Forma el suelo del hogar y facilita una superficie sobre la que se queman las partí-

culas más grandes del combustible; puede estar refrigerada por agua o por aire, y se puede dotar con un sistema de evacuación de ceniza $\begin{cases} \textit{para parrilla fija, o} \\ \textit{con un sistema de evacuación de ceniza automático y continuo} \end{cases}$; la mayor parte de las parrillas se componen de barras de parrilla de hierro fundido o acero aleado.

Distribuidor de combustible.- Los equipos más comunes para introducir el combustible en el hogar y quemarlo en lecho semisuspendido son $\begin{cases} \textit{los distribuidores mecánicos} \\ \textit{las espitas de combustible-aire a presión} \end{cases}$ y se diseñan para distribuir el combustible uniformemente sobre la superficie de la parrilla.

Para efectuar la distribución del combustible, el distribuidor mecánico utiliza una rueda de paletas; en algunas instalaciones se utilizan variadores de velocidad.

La espita utiliza aire a AP; para lograr la distribución del combustible se utiliza una compuerta (cortatiros) rotativa; la trayectoria del combustible que sale de la espita se altera mediante una rampa situada en la parte inferior de la espita.

Quemadores.- Se utilizan para quemar todo o parte del combustible de biomasa, siendo su diseño parecido al de los quemadores convencionales para carbón pulverizado. Los combustibles que se pueden quemar incluyen $\begin{cases} \textit{polvo de las lijadoras} \\ \textit{polvo de las aserradoras con menos del 35\% de humedad} \\ \textit{materiales finos recogidos en un secador de combustible} \end{cases}$

Para evitar posibles inestabilidades en $\begin{cases} \textit{el flujo} \\ \textit{la calidad del combustible} \end{cases}$, hay que mantener continuamente en servicio una llama piloto de combustible auxiliar.

Hogar.- Tiene dos funciones principales:

- Facilitar un volumen en el que todo el combustible se pueda quemar completamente

- Absorber el calor suficiente para enfriar los humos hasta una temperatura determinada, con la que la ceniza volante en polvo arrastrada no ensucie las superficies de convección

Esto se consigue mediante parrillas de dimensiones adecuadas, con las holguras suficientes en los quemadores auxiliares que impidan el impacto de las llamas sobre las paredes del hogar.

Las calderas modernas se construyen con paredes membrana; en algunos casos puede resultar adecuado construirlas con tubos y ladrillos refractarios. En estas circunstancias, el requisito de un mantenimiento frecuente se compensa por la reducción en el coste de instalación y por una mejor facilidad de operación debido a las mayores temperaturas del hogar.

Sobrecalentador.- En una caldera que quema madera, su dimensionado puede ser complicado debido a diversos factores. Para un determinado combustible que se vaya a quemar, el cálculo de la superficie depende de la temperatura final del vapor y del tipo de control. El espaciado tubular,

lateral y longitudinal, se selecciona de modo que se minimicen el ensuciamiento y la erosión; una caldera que quema maderas, es raro que queme un combustible que mantenga todas estas características.

En general pueden cambiar el $\begin{cases} contenido\ en\ humedad \\ análisis\ del\ combustible \end{cases}$, afectando ambos parámetros a la relación $\frac{Flujo\ de\ humos}{Flujo\ de\ vapor}$

Como existen disponibles también una diversidad de combustibles auxiliares como, aceites, gases o carbones, cuando se diseña un sobrecalentador hay que conocer la magnitud de todas las condiciones operativas. Los componentes de la ceniza afectan al diseño del sobrecalentador; por ejemplo, en las cortezas de troncos que flotan en el agua de mar, se encuentran altos niveles de cloruros, lo que obliga a la utilización de materiales de alta aleación, como el SS-310, para minimizar la velocidad de corrosión de los tubos del sobrecalentador inmersos en las zonas de altas temperaturas.

Banco de caldera.- Como consecuencia de la alta relación $\frac{Flujo\ de\ humos}{Flujo\ de\ vapor}$, y de las relativamente bajas presiones y temperaturas de trabajo, en la mayoría de las calderas que queman maderas se requiere una gran cantidad de superficie de vapor saturado.

Como consecuencia de las bajas temperaturas adiabáticas de llama, la absorción de calor en el hogar es baja, en comparación con la de los combustibles aceite o gas; en consecuencia, en una caldera que quema madera, una gran parte de la superficie total de calentamiento está configurada como superficie del banco de caldera (superficie de vaporización).

En algunos casos, la superficie del hogar se aumenta colocando pantallas de agua delante de los sobrecalentadores, con el fin de reducir la temperatura de los humos que entran en el sobrecalentador y, también, para protegerlo de la radiación procedente de las zonas de combustión activa del hogar. Esta superficie se dispone para:

- Flujos cruzados, caldera Stirling de dos calderines, Fig XXIX.4

- Flujos longitudinales, calderas Towerpack soportadas por su parte inferior, Fig XXIX.6.

Como los combustibles de madera contienen arena y otras materias minerales, junto con la ceniza, la velocidad de los humos en los pasos de convección o en el banco de caldera se deben mantener bajas, por debajo de 60 ft/s (18,3 m/s).

Economizador.- Cuando se requiere reducir la temperatura del extremo final del generador de vapor hasta un determinado nivel, se ubica un economizador entre el banco de caldera y el calentador tubular de aire; el economizador se diseña de forma que la temperatura de los humos a la entrada del calentador de aire, se reduzca hasta el nivel requerido.

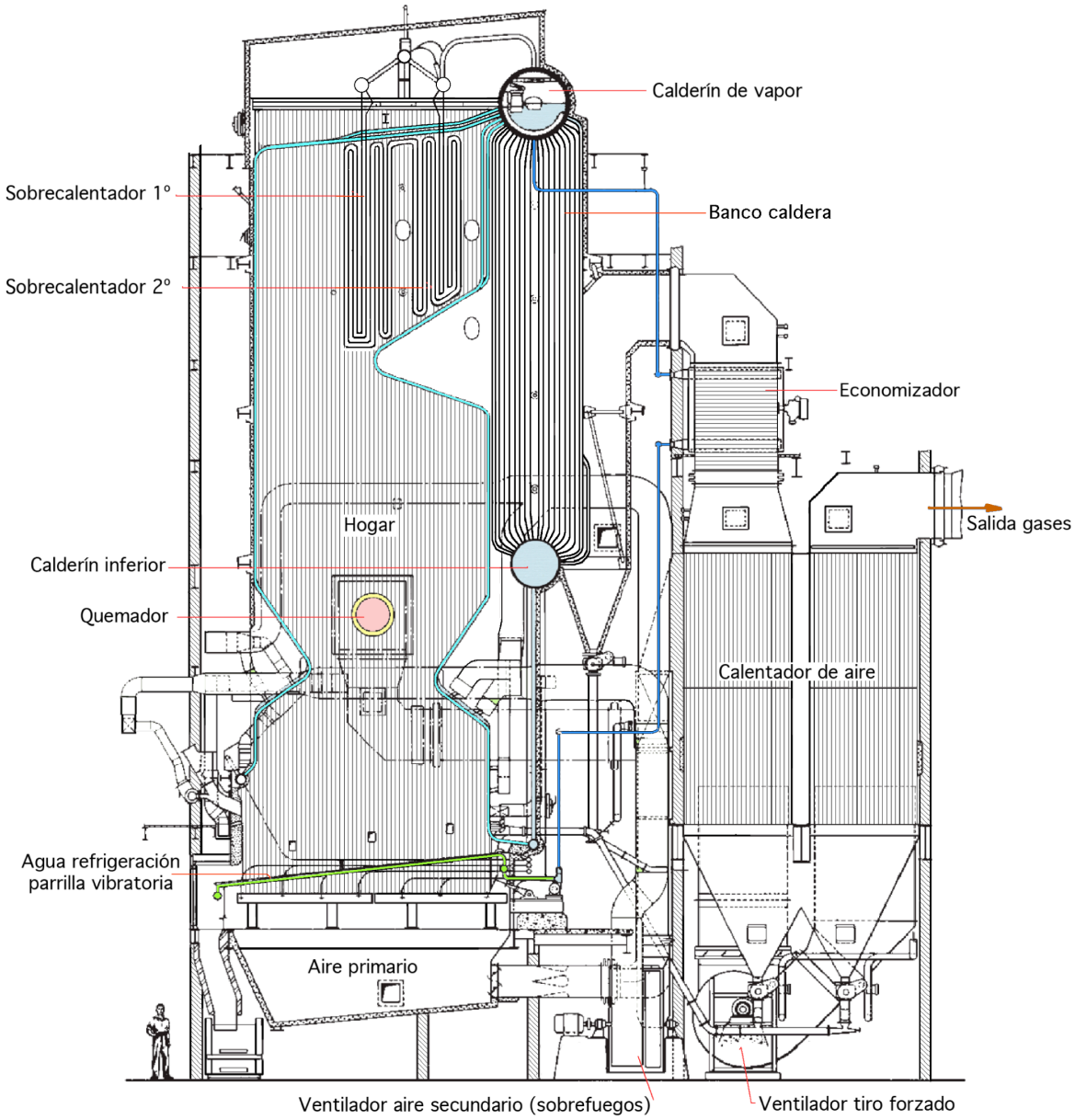


Fig XXIX.6.- Caldera de flujo longitudinal

Algunas veces, el orden en la disposición de estos equipos, economizador y calentador de aire, se puede invertir; por ejemplo, si se necesita una alta temperatura de gases de combustión a la salida, como parte de una instalación que incorpora un secador de combustible que necesita humos calientes para eliminar la humedad del combustible; la misma instalación debe contar, cuando el secador se encuentre retirado de servicio para mantenimiento o reparación, con una baja temperatura de salida de humos, lo que es deseable, con el fin de lograr una mayor eficiencia térmica. Para proveer aire caliente, en ambos supuestos operativos, el economizador se debe utilizar como el último recuperador de calor.

La temperatura se controla mediante un by-pass que se ubica en el lado de humos.

Hay que tener en cuenta que la temperatura de los humos de salida es:

- Menor cuando se quema combustible procedente del secador

- Mayor cuando se quema combustible de alta humedad con el secador fuera de servicio, si no se provee ningún medio de control

En el diseño del economizador en unidades que queman madera, hay que limitar la velocidad de los humos; en todos los casos se utilizan economizadores compuestos por tubos lisos.

Las calderas que queman madera están equipadas con calentadores de aire para quemar todos los combustibles de madera, excepto los más secos.

Debido a la presencia de ceniza, arena y subcoque (char) en el gas de combustión, se selecciona un calentador recuperativo, con los tubos dispuestos en disposición regular, mejor que al tresbolillo, para así reducir la resistencia en el lado del aire y facilitar el mantenimiento.

La configuración más común es la de circulación de:

- Los humos (dos pasos) por el interior de los tubos de diámetro exterior 2,5" (63,5 mm)

- El aire por el exterior

El calentador de aire tubular, cuando cuenta con dos pasos en el lado de humos, puede actuar como un colector mecánico de polvo de bajo rendimiento, del orden del 50%.

La baja velocidad de los humos en la tolva y el cambio en la dirección de los mismos de 180º, facilitan la separación de las partículas más grandes y pesadas de subcoque y de arena.

En obturaciones debidas a los contaminantes de los humos, se pueden necesitar tubos de 3" (76,2 mm de diámetro exterior).

XXIX.6.- EQUIPOS AUXILIARES

VENTILADORES.- Las calderas que queman madera requieren ventiladores de tiro forzado (FD), de tiro inducido (ID) y normalmente de $aire_{secundario}$ (OFA).

Los ***ventiladores de tiro forzado (FD)*** no requieren más consideraciones de diseño que la determinación de su capacidad y su presión estática. El diseño de tiro forzado se determina tras considerar $\begin{cases} \textit{- sólo la combustión de madera} \\ \textit{- sólo la combustión de combustible auxiliar} \\ \textit{- la combustión de madera y combustible auxiliar} \end{cases}$, según sean la cantidad y presión del aire requerido para cada una de estas condiciones; estos ventiladores están controlados para mantener una presión constante en la caja de aire, a la salida del calentador tubular de aire.

Los ***ventiladores de tiro inducido (ID)*** se diseñan teniendo en cuenta:

- La abrasividad de los humos

- La cantidad de humos que hay que manipular

- La pérdida de carga que hay que vencer

- La temperatura de los humos

La abrasividad de los humos depende de:

- El tipo y de la eficiencia del equipo colector de polvo que se haya instalado

- La ubicación del ventilador, aguas arriba o aguas debajo del colector

Los ventiladores de tiro inducido se utilizan para controlar la presión del hogar, de forma que en el punto en cuestión tengan entre $\begin{cases} \text{- 0,1 a - 0,5 wg} \\ \text{- 0,025 a - 0,12 kPa} \end{cases}$

La cantidad de humos y la pérdida de tiro que se utiliza para seleccionar estos ventiladores, deben tener en cuenta no sólo el funcionamiento esperado de la caldera, sino también las posibles variaciones en el $\begin{cases} \textit{poder calorífico} \\ \textit{aire teórico} \\ \textit{contenido de humedad del combustible} \end{cases}$

Los ***ventiladores de aire***$_{\textbf{\textit{secundario}}}$ o aire por encima del fuego (OFA) están expuestos a un servicio severo, ya que tienen que elevar la presión del aire hasta 30"wg (7,5 kPa), y recibir el aire calentado en el calentador tubular de aire a una temperatura de 650ºF (343ºC).

Cuando se selecciona un ventilador de $aire_{secundario}$, es importante detallar y explicitar la máxima temperatura de aire que debe ser capaz de manipular.

SOPLADORES.- Las superficies de transferencia de calor por convección se tienen que diseñar para que en ellas se puedan alojar sopladores, ya que las calderas que queman biomasa son susceptibles de tener arrastres de ceniza y de carbono.

Los *sopladores retráctiles* se deben utilizar en el sobrecalentador y en las superficies del banco de caldera con alta temperatura.

Los *sopladores rotativos* se utilizan en $\begin{cases} \textit{las áreas de bancos de caldera con baja temperatura} \\ \textit{el economizador} \end{cases}$ aunque se prefieren los sopladores retráctiles en el supuesto de que haya espacio suficiente.

Los *sopladores rastrillo* se utilizan sobre las placas tubulares de los calentadores recuperativos de aire, en el lado de humos. Estos sopladores utilizan vapor, saturado o sobrecalentado, como medio para limpiar los pasos de humos; las presiones de soplado están entre $\begin{cases} \textit{150 ÷ 250 psi} \\ \textit{10,3 ÷ 17,2 bar} \end{cases}$ y la secuencia de soplado normalmente se inicia una vez por cada turno.

La ceniza, en general, no es viscosa y es fácil de retirar mediante el soplado. El chorro de vapor de AP procedente de la tobera del soplador, limpia las superficies tubulares en un radio de 5 ft

(1,52 m), alrededor de la lanza del soplador.

Si se permite que la ceniza se acumule, ésta puede taponar los pasos de humos, provocando desequilibrios en los flujos que afectan a la circulación y a la transferencia de calor, y que obligan a una retirada forzosa de servicio de la caldera.

Si se permite que se acumulen partículas de $C_{inquemado}$, éstas pueden provocar un incendio en el lado de humos del equipo final del generador de vapor.

SISTEMAS DE MANIPULACIÓN DEL COMBUSTIBLE.- Los sistemas de combustible de biomasa pueden ser bastante complicados y de mantenimiento intensivo, debido a las características variables del combustible. Normalmente el combustible se transporta continuamente desde el almacenamiento hasta pequeños silos de carga correspondientes a cada distribuidor de combustible, que se mantienen llenos, retornando al almacenamiento el material combustible sobrante.

Los silos de carga están equipados con alimentadores de $\begin{cases} tornillo \\ cadena \end{cases}$, de velocidad variable, para controlar el régimen de combustible de biomasa que se introduce en el hogar.

Los alimentadores de velocidad variable deben ser capaces de operar:

- En un campo de regulación de 4/1, en control automático

- A velocidad muy baja, durante las condiciones de puesta en servicio, para poder constituir un lecho de combustible sobre la parrilla del hogar

El accionamiento de los alimentadores debe tener la potencia suficiente para ponerles en servicio, cuando el silo de carga se encuentre lleno de combustible.

Aguas arriba de los silos de carga, es normal disponer de grandes silos de almacenamiento de fondo móvil, con una capacidad de almacenamiento equivalente al consumo máximo de biomasa durante 8 horas, circunstancia que evita interrupciones en la alimentación de combustible a la caldera, si se presentan problemas en el equipo exterior de manipulación del mismo.

SISTEMAS DE MANIPULACIÓN DE LA CENIZA.- Para calderas que queman biomasa, se pueden considerar dos tipos de ceniza: $\begin{cases} - \textit{ del hogar inferior (escoria)} \\ - \textit{ volante en polvo} \end{cases}$

La *escoria del hogar inferior* consta de la ceniza que:

- Es rasqueteada y transportada por la parrilla fuera del hogar

- Cae a través de las aberturas entre barras de la parrilla hacia la tolva bajo la misma, llamada tolva de granzas o tolva de arrastres; esta escoria se compone de arena y piedras

La escoria en la descarga de la parrilla, se recoge por un transportador sumergido de cadena

con paletas y con una sección inclinada de deshidratación en su extremo de descarga.

La *ceniza volante en polvo* es la ceniza fina y el $C_{inquemado}$ que se recoge en las tolvas del banco de caldera, del economizador, del calentador de aire y del equipo de control de emisiones.

El equipo de manipulación de la ceniza volante en polvo puede contar con:

- *Sistemas de cadenas con paletas*
- *Transportadores de tornillo*
- *Transportadores hidráulicos*

Como la ceniza volante en polvo contiene un alto porcentaje de carbono caliente, es importante disponer en la descarga de cada tolva, de válvulas selladoras rotativas, para impedir la infiltración de aire que, a su vez, podría provocar un incendio en la tolva; por esta razón, todos los transportadores de ceniza volante en polvo tienen que ser estancos.

En algunos casos, la ceniza volante en polvo procedente de las tolvas del banco de caldera y del calentador de aire se reinyecta en el hogar, para disminuir la pérdida por inquemados y para reducir la cantidad de material del que hay que deshacerse; los elevados requisitos de mantenimiento en estos sistemas han limitado su uso.

SISTEMAS DE AIRE.- Se pueden clasificar según la posición de inyección, en los dos tipos siguientes de, aire: $\begin{cases} \text{- } bajo\ el\ nivel\ de\ fuego,\ o\ aire\ bajo\ la\ parrilla \\ \text{- } sobre\ el\ nivel\ de\ fuego,\ o\ aire_{secundario} \end{cases}$

El ***aire bajo la parrilla*** es de BP, del orden de 3”wg (0,75 kPa), y su cantidad depende del tipo de parrilla que se utilice, pudiendo ser, en cualquier caso, desde el $25 \div 75\%$ del aire total requerido para la combustión.

El objeto del aire bajo parrilla radica en:

- *Ayudar al secado del combustible*
- *Promover el desprendimiento de los volátiles*
- *Facilitar el oxígeno necesario para la combustión del subcoque que queda en la parrilla*
- *Para el caso de una parrilla refrigerada por aire, enfriar las barras de la parrilla*

Las *parrillas porosas* y las *vibrantes* se construyen con múltiples compartimentos de aire bajo las mismas, con compuertas independientes para que el operador pueda desviar el aire bajo parrilla hacia la zona del hogar donde está concentrado el combustible.

Las parrillas *móviles* se puede dotar con un solo compartimento de aire bajo la parrilla, por cada sección de accionamiento.

En el ***aire sobre el nivel del fuego***, la capacidad del sistema de $aire_{secundario}$ varía entre el 25 $\div$ 75% del aire total.

Para lograr una adecuada penetración del $aire_{secundario}$ en el flujo ascendente de volátiles procedentes de la parrilla, se modifica el tamaño de las toberas y la presión del aire correspondiente; las modernas toberas de $aire_{secundario}$ tienen de $\begin{cases} 3" \div 6" \\ 76{,}2 \div 152{,}4\ mm \end{cases}$ de diámetro, y utilizan presiones de aire que llegan a 20"wg (4,98 kPa).

El nivel de las toberas se controla independientemente, de forma que el $aire_{secundario}$ se pueda modificar de acuerdo con la carga y las características del combustible.

Cuando se utiliza un porcentaje de $aire_{secundario}$ superior al 40% del flujo total de aire, a muy alta temperatura, resulta más económico y eficiente, desde el punto de vista energético, proveer un ventilador de tiro forzado de AP, en vez de un ventilador de BP y un ventilador grande OFA de AP.

XXIX.7.- EQUIPOS PARA EL CONTROL DE EMISIONES

Colectores de polvo.- Los colectores mecánicos de polvo se utilizan aguas abajo del último recuperador de calor de la caldera, para recoger las partículas de ceniza volante en polvo de tamaño más grande, y proteger así el ventilador inducido. Se componen de una serie de tubos que forman un multiciclón, encerrado dentro de una estructura envolvente; constan de un tubo:

- *Exterior para la entrada de los humos, dotado de paletas fijas para imprimirles una rotación*
- *Interior sin paletas recuperadoras*

La eficiencia del colector de polvo se encuentra entre el 65 $\div$ 75%, con una pérdida de carga óptima entre $\begin{cases} 2{,}5 \div 3" \ wg \\ 0{,}62 \div 0{,}75\ kPa \end{cases}$; debido a la naturaleza abrasiva de la ceniza volante en polvo, los tubos exteriores del colector y los conos son de material resistente a la abrasión, 450 Brinell.

Precipitadores.- Los electrostáticos se instalan aguas abajo del colector mecánico, para reducir la concentración de partículas en los humos, con el fin de cumplimentar los requisitos medioambientales.

Debido al alto contenido en carbono que tiene la ceniza volante en polvo, es importante reducir la posibilidad de un incendio en el precipitador electrostático. Hay que asegurar que no exista ninguna fuga de aire hacia el interior del precipitador y que el polvo se está extrayendo continuamente desde las tolvas; en éstas se instalan detectores de nivel y detectores de temperatura.

Las instalaciones se pueden equipar con aparatos extintores de incendios como los dispositivos de inertización con vapor. También se recomienda interrumpir la alimentación eléctrica del precipi-

tador, si el contenido en oxígeno de los humos excede de un cierto valor.

Filtros de tela o cámaras de sacos.- Los colectores de cámaras de sacos raras veces se han utilizado en aplicaciones de combustibles de biomasa, debido a la posibilidad de incendios, aunque no se descarta que la llegada al mercado de materiales de sacos metálicos para altas temperaturas pueda cambiar la anterior tendencia en el futuro.

Depuradores húmedos.- Se han utilizado en aplicaciones de calderas quemando biomasa; sus desventajas radican en:

- La elevada caída de presión en los humos, que incrementa la potencia del ventilador de tiro inducido

- El alto consumo de agua

siendo necesario un sistema de $\begin{cases} \textit{recogida de la ceniza en polvo húmeda} \\ \textit{separación y clarificación del agua} \end{cases}$

Los depuradores húmedos han dado paso a los precipitadores electrostáticos como equipos preferidos para la limpieza final de los humos de combustión, habida cuenta de que no es preciso un depurador húmedo para reducir las emisiones de SO_2 procedente del combustible auxiliar.

Los depuradores húmedos contienen numerosas toberas pequeñas de rociado en el interior de una cámara, y se suelen emplear cuando se requiere $\begin{cases} \textit{una baja caída de presión en el lado de humos} \\ \textit{un pequeño consumo de agua} \end{cases}$, lo que resulta particularmente adecuado en las aplicaciones de modernización de instalaciones, en las que el depurador húmedo puede sustituir al colector mecánico de polvo, para mejorar la eficiencia de la depuración.

XXIX.6.- IMPACTO MEDIO AMBIENTAL

Emisión de partículas.- En un hogar mecánico de parrilla plana con distribuidor quemando corteza y madera, un $80 \div 95\%$ del residuo total de ceniza producida está en forma de partículas suspendidas en los humos, que están constituidas por un determinado número de materiales, como:

- Ceniza

- Contaminantes de arena que se han introducido durante la manipulación del combustible

- Subcoque inquemado procedente del hogar

- Humo salino, presente cuando los trozos de madera han estado en contacto con el agua de mar

El contenido de ceniza en los combustibles de maderas y de cortezas es muy bajo, del orden de $0{,}2 \div 5{,}3\%$ sobre base seca.

Aunque los contaminantes de combustibles no son apreciables, las partículas contienen normalmente altos porcentajes de subcoque (char) inquemado.

La carga de partículas en los humos que salen de la caldera, depende de las condiciones de combustión y de las aerodinámicas.

- Los parámetros de la combustión afectan a las partículas mediante el grado de combustión completa que alcanza el subcoque arrastrado, e incluyen el calor $\begin{cases} absorbido\ por\ unidad\ de\ superficie \\ desprendido\ por\ unidad\ de\ volumen \end{cases}$*, que son los dos factores de diseño que afectan a la temperatura del hogar, al tiempo de residencia y a la combustión completa del subcoque (char).*

- La importancia de los factores aerodinámicos radica en el hecho de que las parrillas planas con alimentador distribuidor están diseñadas para operar con algún grado de combustión en lecho suspendido.

Las variables que tienden a incrementar la relación $\frac{Velocidad\ en\ el\ hogar}{Tamaño\ medio\ de\ partículas\ de\ subcoque}$ tienden a aumentar la carga de partículas en los humos.

Algunos de estos factores incluyen: $\begin{cases} la\ humedad\ del\ combustible\ y\ su\ contenido\ en\ finos \\ el\ área\ de\ la\ planta\ de\ caldera \\ el\ escalonamiento\ del\ aire \\ el\ nivel\ de\ aire_{exceso} \end{cases}$

Para combustibles de madera y cortezas, que no contengan cantidades de arena apreciables, la carga de partículas en los humos, a la salida del calentador de aire de una unidad moderna de parrilla plana con alimentador distribuidor, está entre $\begin{cases} 1 \div 3\ granos\ /DSCF \\ (2{,}4 \div 7{,}2\ g/m^3\ N) \end{cases}$

Óxidos de nitrógeno.- Las emisiones de NO_x procedentes de la combustión de maderas y cortezas son muy bajas, en comparación con las correspondientes a las de los combustibles fósiles tradicionales. Las temperaturas de combustión cuando se queman maderas, son bajas, por lo que se forma poca cantidad de NO_x térmico, procedente del nitrógeno contenido en el aire comburente; las emisiones de NO_x dependen, por lo tanto, del contenido de nitrógeno que tenga el combustible.

La conversión del nitrógeno estructural del combustible en NO_x depende de una serie de factores de operación que comprenden el: $\begin{cases} - \ exceso\ de\ aire\ (aire_{exceso}\ ) \\ - \ escalonamiento\ del\ aire_{comburente} \\ - \ calor\ liberado\ por\ unidad\ de\ volumen\ del\ hogar \\ - \ contenido\ de\ humedad\ en\ el\ combustible \end{cases}$

Los NO_x varían inversamente al contenido de humedad en el combustible, aunque la magnitud de esta correlación es poco significativa.

Teniendo en cuenta todos los factores considerados, las emisiones de NO_x cuando se queman maderas y cortezas en hogares mecánicos, varían entre $\begin{cases} 0{,}2 \div 0{,}4\ lb/10^6\ Btu \\ 0{,}09 \div 0{,}17\ g/MJ \end{cases}$

Dióxido de azufre.- Las maderas y las cortezas contienen menos de 0,1% de S elemental, sobre base seca. Durante el proceso de combustión, algo de este S ($10 \div 30\%$) se puede convertir en SO_2. Las cantidades de S en las maderas y del SO_2 formado, están en la frontera de detección de los instrumentos analíticos; las emisiones de SO_2 de los hogares mecánicos que queman maderas y cortezas, no suelen exceder de 0,03 lb/10^6 Btu ó (0,01 g/MJ).

Monóxido de carbono.- Entre todas las emisiones asociadas a las combustiones de maderas y cortezas, la del CO es la más variable. Como este compuesto es el resultado de una combustión incompleta, la cantidad de CO dependerá de consideraciones relativas al tiempo de residencia, temperatura y turbulencia del proceso, siendo los factores más importantes, que determinan las emisiones de CO: $\begin{cases} - \textit{El aire}_{exceso} \\ - \textit{El mantenimiento del poder calorífico del combustible} \\ - \textit{La regularidad en la distribución del combustible} \end{cases}$

Las condiciones de $\begin{cases} \textit{Alto aire}_{exceso} \textit{ y bajo aire}_{exceso} \\ \textit{Alta humedad del combustible} \\ \textit{Carga reducida} < \textit{70\% del régimen máximo continuo} \end{cases}$, incrementan la concentración de CO en los humos. Las modernas unidades de parrillas planas con alimentadores distribuidores, que queman sólo maderas y cortezas, operando en régimen permanente, emiten CO con valores aproximados de $\begin{cases} 0,1 \div 0,5 \; lb / 10^6 \; Btu \\ 0,04 \div 0,22 \; g / MJ \end{cases}$

Compuestos orgánicos volátiles (VOC).- Son productos gaseosos procedentes de una combustión incompleta, por lo que la combustión de maderas y cortezas viene afectada por las mismas condiciones y factores que la emisión de CO; las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (VOC), expresadas en metano no suelen exceder de 0,05 lb/10^6 Btu (0,02 g/MJ).

XXIX.7.- *TECNOLOGÍA AVANZADA PARA EL CONTROL DE LOS NO_x EN PLANTAS DE RESIDUOS*

La diversa composición del combustible puede dar lugar, por ejemplo, a cambios rápidos e importantes del poder calorífico y del comportamiento de la ignición, causando considerables variaciones en la generación de calor y, por consiguiente, en las temperaturas del hogar. Dependiendo del tipo del combustible, de su distribución y del suministro de aire, se originan unos desequilibrios de la temperatura de hasta 150ºC y a veces más. Las temperaturas normales a la salida del hogar, medidas con termopares y promediadas, se pueden utilizar como temperaturas de referencia, pero estas temperaturas medias no informan sobre el perfil de temperaturas o los desequilibrios dentro de los niveles de inyección.

Las radiaciones procedentes de las paredes del hogar afectan también a la medida, dando por resultado desviaciones de la temperatura real de los humos de 60÷100ºC. Los depósitos de ceniza volante en los termopares provocan un efecto de aislamiento cada vez mayor con el paso del tiempo en funcionamiento; dependiendo del grosor de estos depósitos, las temperaturas medidas están, a menudo, disponibles en el sistema de control del proceso con un retraso de tiempo de más de10 minutos

Para asegurar que en cualquier situación de funcionamiento, la inyección se produzca siempre a la temperatura donde el grado de reducción del NO_x es más alto y el aporte de NH_3 más bajo, se puede utilizar un sistema acústico de medida de la temperatura del gas (AGAM) que se utiliza para conseguir una eficiencia más alta. Este sistema mide la temperatura real del gas, en la sección transversal de la cámara de combustión, en el entorno cercano a los puntos de inyección, Fig XXIX.7.

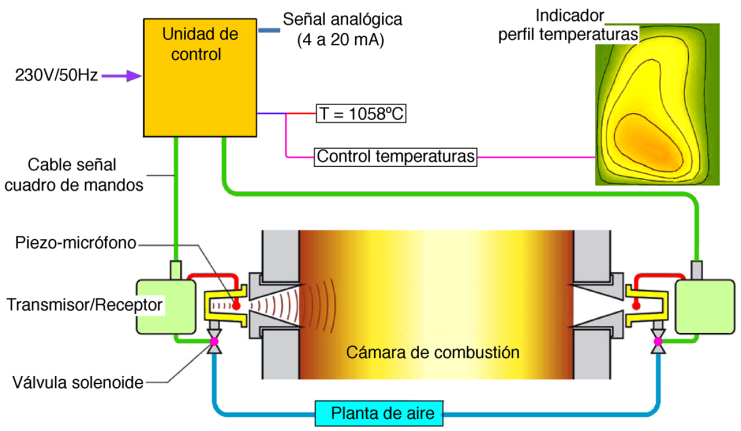


Fig XXIX.7.- Disposición básica del sistema AGAM de medida acústica de la temperatura de los humos

El sistema consiste en una unidad transmisora y otra receptora, de idéntico diseño mecánico y eléctrico, montadas en las paredes de la cámara de combustión y unidad de control exterior, respectivamente. Durante la medida, se abre una válvula electromagnética (solenoide) en la línea de aire comprimido del lado del transmisor, generando señales acústicas que, simultáneamente, se registran en el lado del transmisor y en el lado del receptor.

A una distancia determinada de la pared, la velocidad de los humos se puede relacionar con una temperatura, o lo que es lo mismo, en la temperatura de la supuesta trayectoria de las partículas de humos. Combinando los datos de varios equipos transmisor/receptor se determina la distribución bidimensional de la temperatura.

El perfil de temperatura se divide en secciones y se asigna a cada lanza o grupos individuales de lanzas, de forma que se puedan cambiar a otro nivel dependiendo de la temperatura de los humos medida. Esto asegura que la inyección llegue a las ubicaciones más eficaces para la reacción,

incluso en zonas en las que la temperatura de los humos varía rápidamente, funcionando la instalación de SNCR siempre en la gama óptima respecto a la reducción del NO_x, al aporte de NH_3 y al consumo

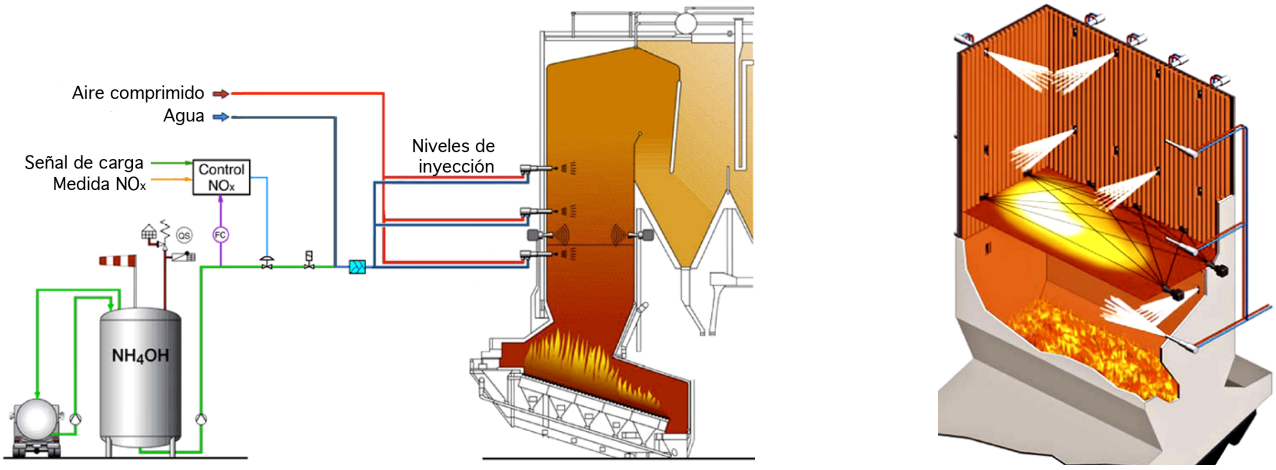


Fig XXIX.8.- Esquema de inyección de amoníaco a 3 niveles, con tecnología acústica, en caldera que quema residuos, y cambio de lanzas individuales dependiendo de la temperatura del flujo de gases

El cambio de lanzas, dependiendo de la temperatura de los humos, puede ser solamente una respuesta al cambio y condiciones de funcionamiento menos óptimas en el hogar. Sin embargo, si se iguala el flujo y el perfil de temperatura de los humos durante la combustión antes de que se inyecten los aditivos se alivia el control de la unidad SNCR y puesto que los cambios de las lanzas serían menos frecuentes el NO_x y las concentraciones de gas limpias serían más uniformes. También para el proceso de la incineración en sí mismo sería útil utilizar las temperaturas determinadas por el sistema (AGAM) no sólo para incorporarlas directamente en el sistema de control de la planta de SNCR, sino también para controlar el funcionamiento y el fuego de leña en la parrilla.

Los resultados obtenidos durante la operación prueban que se pueden conseguir, permanentemente, humos con contenidos en NO_x por debajo de 100 mg/Nm^3 y adicción de NH_3 por debajo de10 mg/Nm^3, e incluso con valores por debajo de los indicados. Resultados fiables se han conseguido, por ejemplo, en una incineradora en Alemania, con humos con menos de 70 mg/Nm^3 de NO_x e inyección de NH_3 menor de 8 mg/Nm^3, que se han mantenido durante largos periodos de tiempo.

Las plantas nuevas que se equipan de este sistema de medida acústica de la temperatura y con tres niveles de inyección, para cambiar cada lanza individual, se caracterizan por una inyección relativamente baja de NH_3 y humos con valores bajos de NO_x.

FUNDAMENTOS FÍSICOS DEL MÉTODO.- La velocidad con la que un impulso de sonido se propaga a través de un flujo de gases depende de la temperatura de ésto; la relación se rije por la ecuación:

$$c_s = \sqrt{\gamma\ g\ R\ T}\ ,\ \textit{en la que}\ \begin{cases} c_s\ \textit{es la velocidad del sonido en el medio} \\ \gamma\ \textit{es el peso específico medio de los gases} \\ R\ \textit{es la constante universal de los gases} \\ T\ \textit{es la temperatura de los gases} \\ M\ \textit{es la masa molecular de los gases} \end{cases}$$

En la práctica, el valor de la velocidad del sonido en el medio viene dado en función del tiempo de vuelo medido a través del espacio entre el transmisor de sonido y la unidad receptora. Como la distancia entre el transmisor y el receptor se conoce, con la ecuación anterior se calcula la temperatura.

Ejemplo.- Un pirómetro acústico está operando en un horno en una longitud de trayectoria de 6 m. El tiempo de vuelo del impulso de sonido medido es de 8,5 milisegundos

Un análisis del flujo del gases basado en el gas seco (% en volumen) es, por ejemplo:

$N_2 = 82\%\ vol\ ;\ O_2 = 6\%\ vol\ ;\ CO_2 = 12\%\ vol\ ;\ H_2O = 5\%\ humedad$

que sólo sirve para determinar las constantes termodinámicas de los gases de combustión de partida, pero que con la central en funcionamiento varían continuamente. La temperatura promedio de la trayectoria se calcula a partir de éste análisis previo del flujo de gases del que se han obtenido:

$\gamma = 1,28\ ;\ M = 29,24\ g/mol$, *(valores muy aproximados a los del aire), por lo que:*

$$T(^oK) = \frac{c_s^2 M}{8310,4\ \gamma} = \frac{(\frac{6}{8,5 \times 10^{-3}})^2 \times 29,4}{8310,4 \times 1,28} = 1369^oK = 1096^oC$$

Correcciones y errores de medida.- La medida y los parámetros de la ecuación anterior están sujetos a error por las fluctuaciones ocasionados por los cambios en la composición de los gases, influencia del número de partículas, longitud de la trayectoria, velocidad de los gases, etc.

a.- Influencia por cambio en la composición de los gases.- Los componentes de los gases N_2, O_2, CO_2, CO y H_2O no se pueden expresar en % de volumen, como ya hemos indicado, ya que según el nivel están variando continuamente. La influencia sobre los resultados han sido examinados en plantas de incineración de desechos donde se detectaron grandes fluctuaciones en la composición de los gases, al tiempo que el pirómetro acústico hacía sus medidas y tomaba datos por encima de los quemadores o por encima de los inyectores de $aire_{secundario}$.

Si por ejemplo se toman datos de gases en dos niveles: $\begin{cases} CO_2:\ 9,9 \div 13,6\ y\ 12,9 \div 16,3\ \%\ vol \\ O_2:\ 5,6 \div 10,4\ y\ 2,7 \div 6,7\%\ vol. \\ CO:\ 187,0 \div 430,0\ y\ 321,0 \div 1786\ mg/m^3 \\ H_2O:\ 5,0 \div 10,0\ \%\ humedad \end{cases}$

a partir de una serie de medidas individuales (más de 100), el error resultante en la temperatura sería del orden de ± 1,4 %.

b.- Influencia de las partículas.- Para demostrar la influencia de la concentración de polvo en los resultados obtenidos, se comprobó que, por ejemplo, en los niveles 1 y 2 la concentración de partículas era de 5.000 mg/m^3 (gas seco nivel 1) y 10.000 mg/m^3 (gas seco nivel 2), por lo que la velocidad del sonido era c_{s1}= 703.5 m/s y c_{s2} = 702 m/s respectivamente, con c_s = 705 m/s para un ambiente libre de materia. El error resultante derivado de las fluctuaciones por el contenido de partículas sería del orden de ± 0,4 %.

c.- Influencia de la longitud de la trayectoria.- Existe una dependencia cuadrática entre la temperatura y la longitud de la trayectoria, por lo que una inexactitud en la distancia de L = ± 0,1 % se traduce en un error del ± 0,2 % en la temperatura. La medida exacta de la longitud de la trayectoria es crucial, particularmente en distancia pequeñas.

d.- Velocidad del flujo del gases.- El incremento de la velocidad del flujo del gases a través de la trayectoria considerada afecta a la velocidad del sonido; por ejemplo, en gases a la temperatura T = 1.000ºC y c_s = 700 m/s, la velocidad promedio del flujo en el espacio de la trayectoria de 1 m/s llevaría a un error de un 0,3%.

Los gradientes de temperatura pueden modificar la curvatura de la trayectoria del sonido (Fernat-Bending). A lo largo de las paredes de la caldera pueden existir gradientes de temperatura del orden de 1000ºK/m; a una distancia de 0,5 m o más, el gradiente de temperatura se reduce en 100 ºK/m o menos. El error en la medida atribuido a la distorsión a lo largo de la trayectoria puede ser del orden de un 3,5%, siendo el error típico de un 0,2%.

Error Total.- Teniendo en cuenta las consideraciones anteriormente resumidas, el error total que depende del tipo de combustión y del tipo de combustible, puede estar entre un 1 ÷ 2%.

El error asociado a la medida del tiempo de vuelo (típicamente < 0,5%) y la inexactitud sistemática debida a la corrección final o a la compensación del tiempo de vuelo, no se han considerado suficientemente. La compensación del tiempo de vuelo tiene en cuenta el tiempo de vuelo entre el transmisor y la pared de la caldera y de la pared de la caldera al receptor. La corrección final se debe determinar muy cuidadosamente para trayectorias del sonido muy cortas y/o calderas de grandes paredes.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE MEDIDA AGAM.- Aunque ya se han anticipado algunas características técnicas, vamos a enunciar otras muy significativas como:

a) Desarrollo y ejecución técnica.- El sistema AGAM usa señales de banda ancha en el rango audible. El empleo de esta gama de frecuencias es consecuencia de que la temperatura depende de:

- El efecto de amortiguamiento de las señales de alta frecuencia

- La interferencia dominante de baja frecuencia debida a la combustión

El primer sistema de generación de sonido usaba una fuente electrodinámica de sonido; en la actualidad el impulso de sonido se produce con aire presurizado. La determinación del tiempo de vuelo se lleva a cabo por técnicas de correlación.

b) Construcción y operación.- El sistema transmisor-receptor consiste en unidades mecánica y eléctricamente idénticas para la toma de datos en el hogar y una unidad externa de control. El impulso de sonido requerido lo produce el aire de servicio de la planta, en donde el aire presurizado mantiene la libre existencia de partículas en suspensión. Para hacer la medida, la válvula magnética se abre en el lado del transmisor, que induce un impulso de sonido en un amplio rango de frecuencias (ruido blanco), siendo registrada la señal en ambos receptores. En la unidad de control la señal se filtra, nivela y ajusta. La señal digital se usa para determinar el tiempo de vuelo entre el transmisor y el receptor con técnicas de correlación especialmente desarrolladas. La señal de sonido producida muestra la misma intensidad para todas las frecuencias producidas.

c) Configuración del sistema.- El sistema estándar se emplea en hornos con temperaturas hasta 2000ºC; el tamaño del horno o promedio de la longitud de la trayectoria va desde $1 \div 35$ m. En sistemas donde sea suficiente una pequeña resolución en la distribución de temperaturas, se pueden usar unidades de medida de trayectoria simple para una o dos trayectorias independientes.

En sistemas donde se requieran grandes resoluciones en la distribución de temperaturas, se colocan varias unidades de transmisores acústicos en el perímetro del horno para obtener un conjunto de trayectorias independientes de temperatura. La medición en cada trayectoria se realiza en serie, ya que solo puede estar trabajando a la vez un par emisor-receptor.

d) Temperaturas en un plano bidimensional.- Una posibilidad de los sistemas de medida de trayectoria múltiple es la generación de perfiles de distribución de temperaturas en un plano bidimensional, que se visualizan en un monitor como un plano de contornos isométricos, o como un diagrama de temperaturas promedio de una zona. Se pueden realizar varios procesos tomográficos para calcular la matriz de temperaturas desde las trayectorias de temperatura, siendo uno de los métodos de cálculo el algoritmo de Bezier. La exactitud del método permite estudiar el cálculo de perfiles de temperatura usando diagramas de generación artificial. El dato tomográfico se calcula idealmente y por medio de un rayado integral se reconstruye un perfil espacial bidimensional, pudiéndose realizar una comparación entre el original y el reconstruido, obteniéndose datos para una determinada configuración de la trayectoria.

e) Aplicaciones en plantas de incineración de desechos.- El sistema de medida acústica de la temperatura de los gases de combustión se puede instalar en grandes calderas, plantas de energía de desechos, plantas de desechos peligrosos con hornos giratorios, hornos de cemento, etc. El pirómetro acústico ayuda a mantener identificados y corregir problemas en los quemadores, escoria (pi-

caduras), sobrecalentamientos del horno y mejorar su disponibilidad y eficiencia.

En plantas de energía de desechos se usa para realizar el control del sistema de encendido, sistemas SNCF y para registrar la temperatura del gas bajo determinadas regulaciones en los quemadores.

Otra aplicación es la de medir la distribución de la temperatura por encima de los rodillos de la parrilla para regular la incineración sobre la misma.

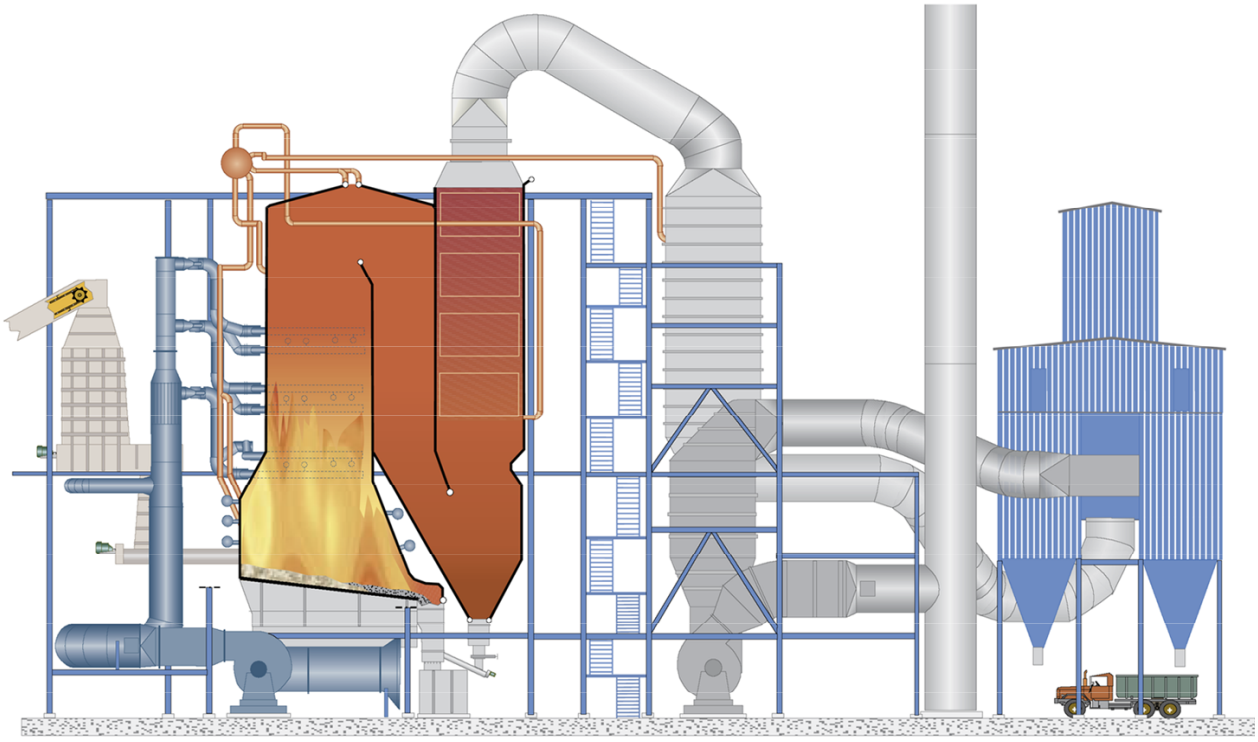
f) Ejecución del control en sistemas de encendido y control SNCF en plantas de incineración de desechos usando el sistema de trayectoria simple.- La principal ventaja del sistema pirómetro acústico es el tiempo de reacción de la señal acústica de la temperatura. El registro de temperaturas es más rápido que el obtenido con otros parámetros de control convencionales, desde 1/2 minuto hasta algunos minutos, tiempo que permite actuar sobre los mecanismos de control para obtener una mejor eficiencia térmica y una producción estable de vapor; la experiencia en plantas de energía de desechos ha permitido reducciones en las fluctuaciones de vapor hasta un 60%, con las consiguientes reducciones en las fluctuaciones de carga, mejorando la eficiencia utilizando convenientemente la alimentación del combustible. La estabilidad térmica mejora el contenido de O_2 y decrece las emisiones contaminantes de CO.

XXIX.8.- *TECNOLOGÍA AVANZADA EN PLANTAS DE RESIDUOS PROCEDENTES DE LA MOLIENDA DE GRANOS*

La caldera se enciende fundamentalmente con salvados, que son un residuo de la molienda del grano del trigo usado para la producción de etanol, Fig XXIX.9. El vapor de la caldera se expansiona en una turbina para generar electricidad, y a la salida de la misma a BP, se aprovecha en los procesos de calefacción en la fábrica de etanol. Esta caldera de salvado no puede suministrar todo el vapor requerido en el proceso, por lo que se utiliza gas natural complementario para suplir la energía restante.

Los gases se calientan en un sobrecalentador externo y se llevan a la caldera de salvado. El sobrecalentador externo permite un diseño compacto y una alta conversión de la energía de los gases en electricidad. El salvado una vez dosificado en el silo, se introduce en la caldera mediante un sistema de alimentación de tornillos. La combustión se produce sobre una rejilla vibrante refrigerada por agua, ya que ésta tiene la capacidad de manejar los combustibles de biomasa con un bajo coste de mantenimiento y de operación.

Para evitar problemas, la caldera se diseña con dos pasos de caldera para asegurar el suficiente enfriamiento de los gases combustible antes de incorporarlos en la parte de convección.



Datos técnicos: Capacidad nominal 100 t/h vapor ; Potencia calorífica 13,5 a 17 MJ/kg; Flujo de vapor 100 t/h; Temperatura de la caldera de salvado 430°C; Temperatura final 520°C; Presión 93 bar; Temperatura agua de alimentación 105°C Emisiones garantizadas con 6% de O_2 seco: CO = 145 mg/Nm³ ; NO_x = 278 mg/Nm³; Polvo = 18 mg/Nm³; NH_3 = 30 mg/Nm³; HCl = 25 mg/Nm³; SO_2 = 179 mg/Nm³

Fig XXIX.9.- Central de Wance, Bélgica, que utiliza salvados de trigo y gas natural para la obtención de etanol

Como es de esperar que este combustible de salvado genere suciedad y escoria en las paredes de la caldera, ésta se han equipado con sopladores de agua para su limpieza.

Los gases del sobrecalentador externo se mezclan en la caldera de salvado antes del paso de convección. La caldera y el economizador son de tipo vertical. La ceniza inferior se elimina con un transportador de cadena sumergido y se lleva a un depósito de ceniza.

REFERENCIAS CAP XXIX.- CENTRALES QUE QUEMAN MADERAS

B&W.- STEAM : ITS GENERATION AND USE.- 40th Edition, Chapter 28.- The Babcock and Wilcox Company.-Barberton, Ohio, USA, 1992

J.S. Gittinger .- B&W .- Barberton, Ohio, U.S.A. ; W.J. Arvan Palm Beach Resource Recovery Corporation .-Florida, U.S.A. - CONSIDERATIONS FOR THE DESIGN OF RDF-FIRED REFUSE BOILERS BR-1657 .- Presented to: Power-Gen Europe 98 .- Milan, Italy, 1998

Technical Paper BR-1393.- THE EVOLUTION OF RDF BOILER DESIGNS THROUGH THE STATE-OF-THE-ART SYSTEM AT PALM BEACH.- Babcock & Wilcox, Barberton, Ohio, 1989.

Technical Paper BR-1366.- RESOURCE RECOVERY IN PALM BEACH.- Babcock & Wilcox, Barberton, Ohio, 1989.

Topley, A.W.R.- THE CONTROLLED COMBUSTION ZONE (CCZ) BOILER FOR EFFICIENT BURNING OF WASTEWOOD.- PIMA - Paper Industry Management Association., 1983

Hirata, T.- EVALUATION OF WOOD FUEL COMBUSTION IN HOT WATER BOILERS.- Energy from forest biomass : XVII IUFRO World Congress Energy Group proceedings / edited by W. Ramsay Smith

THE CONTROLLED COMBUSTION ZONE (CCZ) BOILER FOR EFFICIENT BURNING OF WASTE WOOD.- Babcock & Wilcox, 1981

Jim Riley, Mike DePero, George Nikitenko.- SUCCESSFUL MODERNIZATION OF THE SOLID WASTE AUTHORITY'S (SWA) PALM BEACH WASTE TO ENERGY FACILITY (PBREF 1).- Track: Renewable Energy.- Session Title: 9B – Cutting Edge Biomass . Applications for Power Generation