XXVIII.- CENTRALES QUE QUEMAN BASURAS

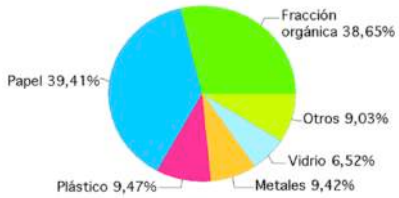
pfernandezdiez.es

Introducción	*1061*
Combustión de basuras: en masa y preparadas (RDF)	*1064*
Corrosión	*1065*
Unidades de combustión en masa	*1067*
Unidades que queman combustibles derivados de basuras	*1068*
Combustión en masa	*1069*
Tamaño de la planta de caldera y capacidad del hogar mecánico	*1070*
Diseño del hogar mecánico	*1072*
Manipulación y sistema de alimentación del combustible	*1073*
Sistema de aire comburente	*1074*
Sistemas de manipulación de ceniza	*1075*
Extractor de ceniza de brazo móvil	*1076*
Tolva de ceniza de compuerta doble	*1076*
Ceniza volante de limpiadores, precipitadores y filtros de saco	*1076*
Combustión de basuras preparadas RDF	*1077*
Calderas específicas para quemar RDF	*1078*
Sistemas de preparación de los RDF	*1081*
Rendimiento y calidad de los RDF	*1082*
Procesado de los RDF	*1084*
Separación de vidrio, piedras, arenisca y polvo	*1085*
Recuperación de latas de Al, y residuos voluminosos de tamaños superiores (OBW)	*1085*
Línea de troceado de neumáticos	*1086*
Sistemas de alimentación de combustible	*1086*
Alimentador aforador de RDF, espitas distribuidoras por chorro de aire, y parrillas sinfín	*1086*
Diseño del hogar inferior	*1087*
Temperatura de los humos a la salida del hogar	*1088*
Sistemas de manipulación de ceniza	*1088*
Readaptaciones para RDF	*1089*
Diseño del sobrecalentador	*1090*
Diseño de la caldera	*1091*
Diseño del hogar superior	*1091*
Banco de generación de vapor	*1092*
Economizador y calentadores de aire	*1092*
Equipo de limpieza de ceniza	*1093*
Quemadores auxiliares de aporte	*1093*
Equipo de control de contaminación atmosférica	*1094*
Anexo.- Central para la incineración de residuos basura (RDF) y lodos RV-LENZING DE 110 MWt (CFB)	*1098*
Referencias	*1111*

Los métodos utilizados para la eliminación de las basuras vienen determinados por el coste y el impacto medioambiental, y han pasado por la mezcla con aguas negras, la alimentación animal, los vertederos, terraplenes y rellenos y la incineración.

La incineración, sin recuperación de calor, no ha sido una opción popular, ni económicamente aceptable, por las normas medioambientales responsables del control de la contaminación atmosférica y por la alternativa barata de los terraplenes.

La evolución de la recuperación de calor por incineración en calderas de calor residual o calderas recuperadoras de calor se aplicó a calderas de agua caliente, posteriormente a calderas de vapor de baja temperatura y presión y, en la actualidad, a calderas de paredes de agua con hogares mecánicos integrados.



Análisis de una basura

Los parámetros de diseño y las características de funcionamiento de una caldera que quema basuras, dependen de sus componentes, que varían con el tiempo y con el lugar.

En USA, los residuos sólidos municipales (MSW) se componen de papeles y plásticos, con un contenido en humedad más bajo y un poder calorífico más alto, que los del resto del mundo.

La Tabla XXVIII.1 recoge algunos análisis representativos de basuras, que cubren un campo de poder calorífico superior desde $\begin{cases} 300 \div 350^{o}F \\ 149 \div 177^{o}C \end{cases}$

Con las crecientes comodidades en alimentos, plásticos, embalajes, contenedores y las decrecientes cantidades de restos de comida en las basuras, el promedio de los residuos sólidos urbanos ha aumentado su poder calorífico y disminuido su contenido en humedad, Tabla XXVIII.2.

En el reciclado del vidrio, aluminio y otros metales, se ha producido un incremento del poder calorífico de las basuras, mientras que en el reciclado de papeles y plásticos, ha disminuido.

En la actualidad se espera un reciclado del 40%, que las instalaciones transformadoras de basura en energía quemen el 50%, y el 10% restante se destine a vertederos, terraplenes y relleno de terrenos.

El crecimiento de las instalaciones transformadoras de basura en energía en USA, (1980), se aceleró debido a los crecientes costes del vertido en terraplenes y a la creación por el gobierno de un mercado para la venta de energía eléctrica.

Conforme se van cerrando las antiguas zonas de vertido (terraplenes), cada vez resulta bastante más difícil encontrar nuevos lugares que, además, se ubican lejos de las fuentes originarias de

basuras, con el consiguiente aumento de los costes del transporte de las mismas. La preocupación de contaminación del agua terrestre han conducido a diseños de terraplenes caros, con varias capas de contención y sistemas de vigilancia) y control.

La eliminación de las basuras es un problema a nivel mundial, y no es de fácil solución; para ello hay que
- *generar menos basuras*
- *reciclar componentes, que se puedan reutilizar económicamente*
- *quemar las basuras residuales*
- *verter la ceniza de la combustión en terraplenes y rellenos*

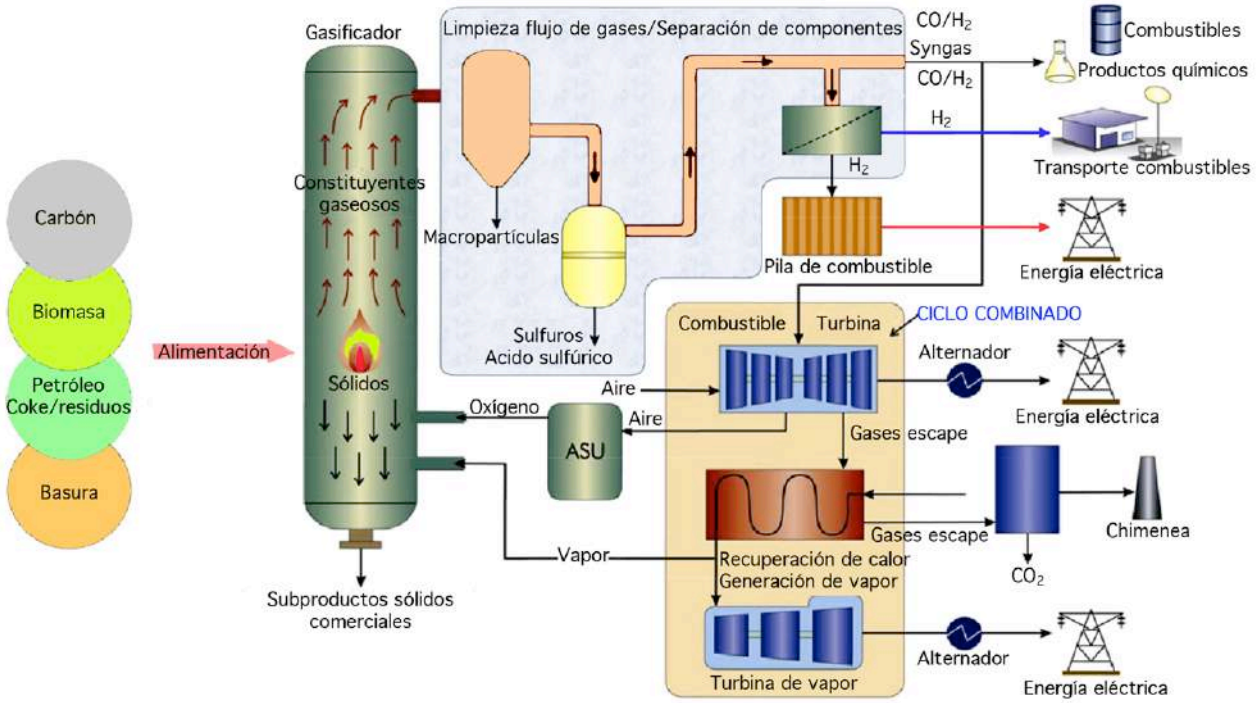


Fig XXVIII.1.- Esquema de algunas opciones energéticas en las que participan las basuras

Tabla XXVIII.1.- Algunos análisis representativos de basuras

Potencia calorífica inferior		*Análisis de combustibles de basuras, tal como se recibe, en % en peso*							
Btu / lb	*kJ / kg*	*Carbono*	*Hidrógeno*	*Oxígeno*	*Nitrógeno*	*Azufre*	*Cloro*	*Ceniza*	*Humedad*
3000	*6978*	*16,88*	*2,33*	*12,36*	*0,22*	*0,15*	*0,34*	*32*	*35,72*
3500	*8141*	*10,69*	*2,72*	*14,42*	*0,26*	*0,18*	*0,38*	*30*	*32,35*
4000	*9304*	*22,5*	*3,1*	*16,49*	*0,3*	*0,21*	*0,42*	*27*	*29,98*
4500	*10467*	*25,32*	*3,49*	*18,55*	*0,34*	*0,24*	*0,46*	*23*	*28,6*
5000	*11630*	*28,13*	*3,88*	*20,62*	*0,38*	*0,27*	*0,5*	*21*	*25,22*
5500	*12793*	*30,94*	*4,27*	*22,68*	*0,42*	*0,3*	*0,54*	*18*	*22,85*
6000	*13956*	*33,76*	*4,66*	*24,75*	*0,46*	*0,33*	*0,58*	*14*	*21,46*

Tabla XXVIII.2.- Tendencias en los porcentajes de componentes de las basuras en USA

Incremento de poder calorífico, por tonelada de basura		
1960	*1980*	*2000*
4.200 Btu / lb (9.769 kJ / kg)	*4.500 Btu / lb (10.467 kJ / kg)*	*5.200 Btu / lb (12.095 kJ / kg)*
Incremento del % de papel y cartón	*Incremento del % de plásticos*	*Reducción de desperdicios alimentarios*
1970 (33%)	*1970 (2,7%)*	*1970 (11,5%)*
2000 (41%)	*2000 (9,8%)*	*2000 (6,8%)*

Tabla XXVIII.3.- Análisis de residuos sólidos municipales, como combustibles derivados de basuras en comparación con el carbón bituminoso

Componentes			
% en peso	Residuos sólidos municipales	Combustibles derivados de basuras	Carbón bituminoso
Carbono	27,9	36,1	72,8
Hidrógeno	3,7	5,1	4,8
Oxígeno	20,7	31,6	6,2
Nitrógeno	0,2	0,8	1,5
Azufre	0,1	0,1	2,2
Cloruros	0,1	0,1	-
Agua	31,3	20,2	3,5
Ceniza	16	6	9
Poder calorífico superior (húmedo)			
Btu/lb	5100	6200	13000
kJ/kg	11836	14421	30238

XXVIII.1.- COMBUSTIÓN DE BASURAS

Para quemar las basuras municipales se utilizan dos técnicas, que se distinguen por el grado de preparación del combustible

Combustión en masa.- Se utiliza la basura sin preparación alguna, tal como se recibe; sólo se retiran de la misma los artículos que son demasiado grandes o incombustibles.

Los vehículos de recogida de basuras las descargan y vuelcan directamente en los fosos de almacenamiento, desde donde se transportan hasta la tolva de carga de la parrilla del hogar mecánico, Fig XXVIII.2. La fracción combustible de las basuras se quema y la no combustible pasa a través del hogar mecánico cayendo al foso de ceniza, de donde se recupera para llevarla a su vertido final.

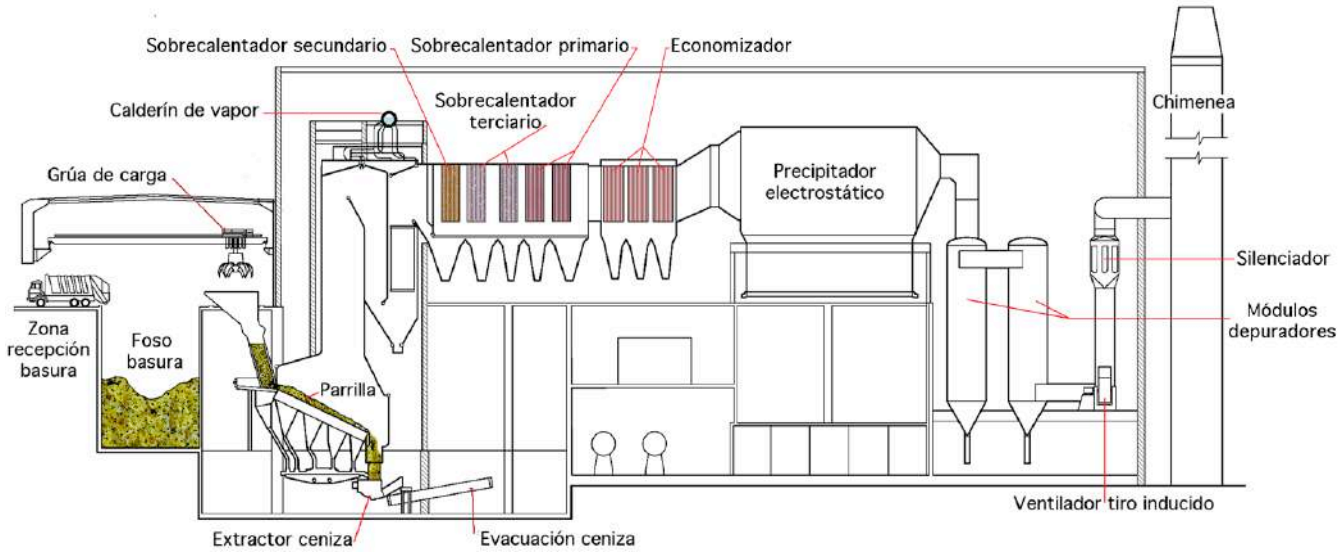


Fig XXVIII.2.- Esquema de caldera de combustión en masa europea B&W

Combustión de basuras preparadas (RDF).- Emplea como combustible la basura preparada (RDF), a partir de la basura tal como se recibe; las operaciones a realizar son:

- *Separación y clasificación*

- *Recuperación para lograr productos vendibles o reciclables Fig XXVIII.3*

- *El material restante se lleva a los alimentadores de la caldera y al emparrillado sinfín de la misma*

El combustible derivado de basuras (RDF) se quema parcialmente en $\begin{cases} - \textit{ suspensión} \\ - \textit{ masa} \end{cases}$ sobre la parrilla del hogar mecánico; en suspensión se pueden quemar las partículas finamente trituradas, para complementar los fuegos convencionales en las grandes calderas utilizadas para la generación de electricidad.

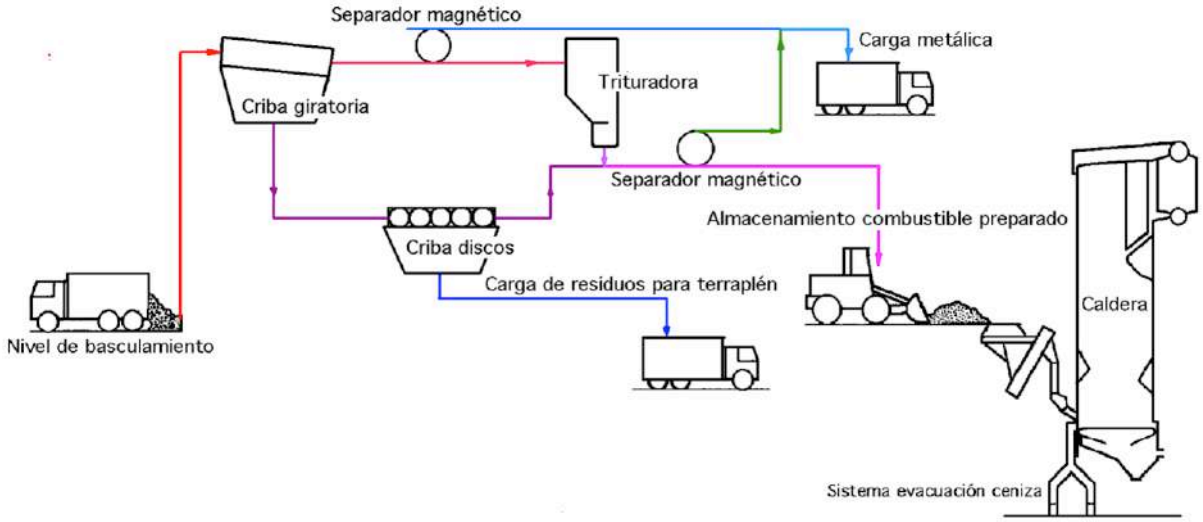


Fig III.3.- Esquema de preparación de combustible derivado de basura (RDF)

CORROSIÓN.- Los humos de las basuras municipales son, en general, muy corrosivos. Los componentes causantes de la corrosión presentes en los carbones, aceites y otros combustibles, están también en las basuras, Tabla XXVIII.4. La corrosión que se presenta en las calderas que queman basuras se provoca por los cloruros que se depositan en el hogar, en el sobrecalentador y en los tubos del banco de caldera.

Tabla XXVIII.4.- Componentes corrosivos en combustibles

Carbones	*Sodio*	*Azufre*	*Potasio*				
Aceites	*Sodio*	*Azufre*	*Vanadio*				
Basuras	*Sodio*	*Azufre*	*Potasio*	*Vanadio*	*Cloro*	*Plomo*	*Cinc*

Los mecanismos de corrosión por cloruros son por:

- *Ácido clorhídrico (HCl) en los humos*
- *Deposiciones de NaCl y KCl en las superficies tubulares*
- *Cloruros metálicos de bajo punto de fusión ($ZnCl_2$ y $PbCl_2$)*
- *Estar fuera de servicio con sales húmedas en las superficies tubulares*

La pérdida de metal tubular debida a la corrosión, depende de la temperatura, Fig XXVIII.5.

Las calderas que queman basuras y operan a presiones de vapor altas, tienen temperaturas más elevadas en los tubos del hogar. La temperatura del metal de los tubos del sobrecalentador depende de la temperatura del vapor que contienen en su interior, que es quien controla la temperatura del metal tubular, en lugar de ser la temperatura de los humos exteriores a los tubos.

La corrosión en la zona del hogar se agrava como consecuencia de un deficiente tratamiento químico del agua. Si en la pared interior de los tubos se forman deposiciones, la temperatura del metal tubular se incrementa y la corrosión en el hogar se acelera.

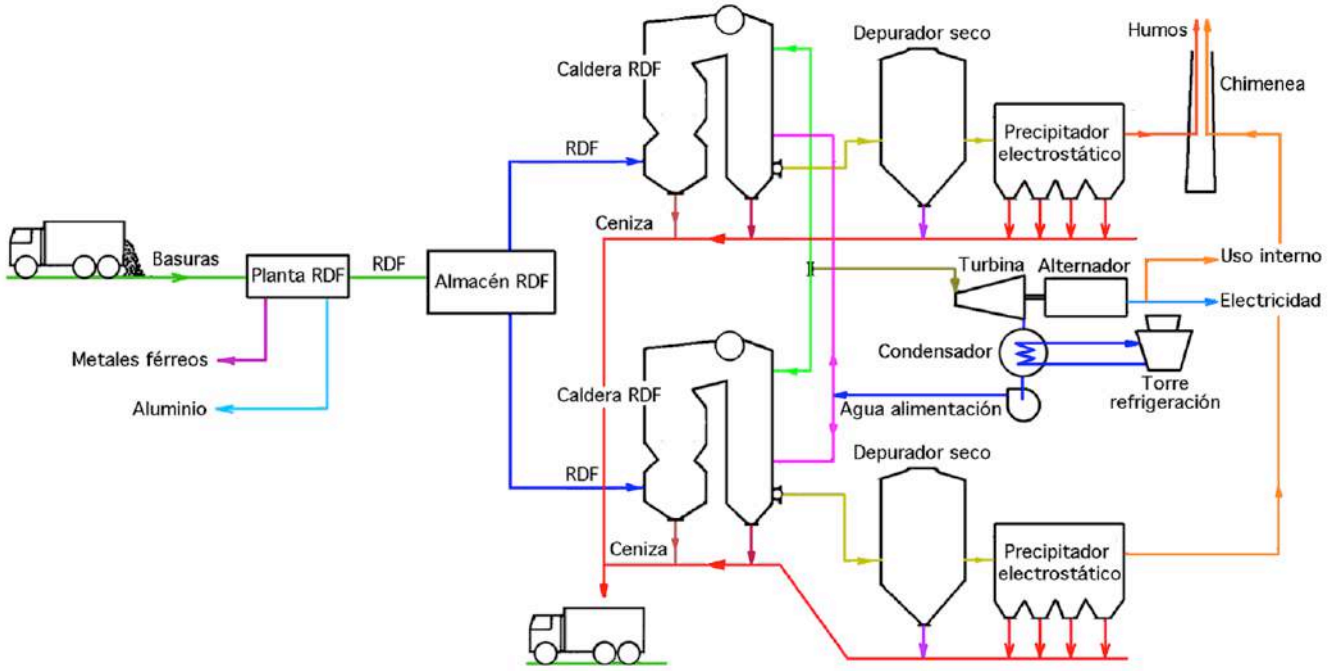


Fig XXVIII.4.- Esquema de planta transformadora de basuras (RDF), (Palm Beach Resource Recovery Facility)

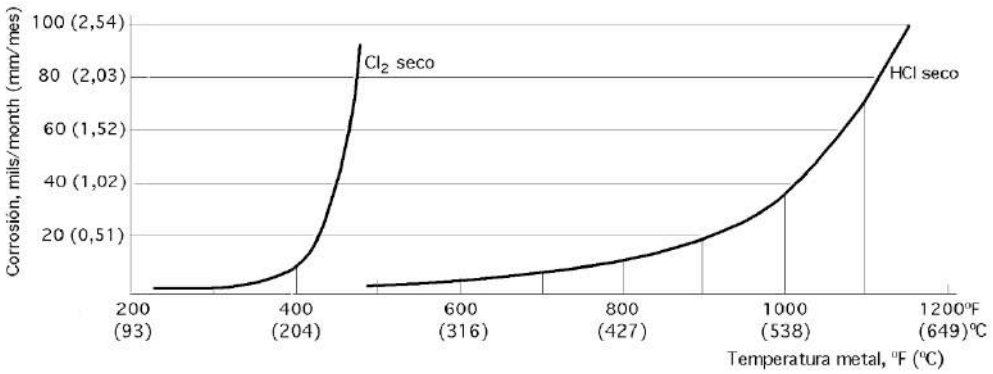


Fig XXVIII.5.- Corrosión del acero al C, en cloro y ácido clorhídrico

Las normas de calidad del agua de alimentación y del agua de caldera son de igual exigencia en unidades que queman basuras y en las que queman otros combustibles. No obstante, las normas para el mantenimiento de la calidad del agua es más crítica en las calderas que queman basuras, debido a la naturaleza altamente corrosiva de su combustible.

Corrosión del hogar inferior.- La atmósfera de la parte más baja del hogar, en unidades de combustión en masa y en las de combustión de RDF, cambia constantemente entre atmósfera oxidante y atmósfera reductora y puede acelerar la corrosión, por lo que deben contar con alguna forma de protección contra la misma. El área protegida se debe extender a las cuatro paredes del hogar, hasta una altura de unos 30 ft (9,1 m) por encima de la parrilla, cota en la que con cierta seguridad predominan las zonas oxidantes.

UNIDADES DE COMBUSTIÓN EN MASA.- Todas las calderas para basuras con combustión en masa, incorporan algún tipo de $\begin{cases} \textit{- protuberancia en forma de clavos} \\ \textit{- refractario de carburo de silicio (CSi)} \end{cases}$, para proteger las paredes membrana del hogar inferior, Fig XXVIII.6.

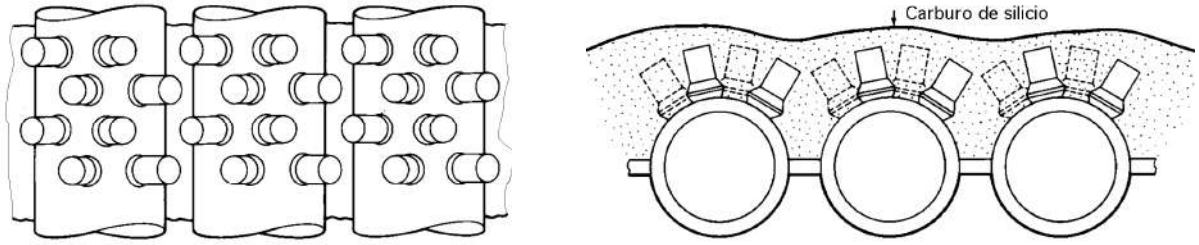


Fig XXVIII.6.- Protuberancias y refractario del hogar inferior de una unidad quemando en masa

El material refractario debe tener una conductividad térmica elevada, que minimice la reducción de la efectividad de la superficie refrigerada por agua protegida por el carburo.

Existen zonas (bordes de parrillas) en las que su resistencia puede disminuir debido al desgaste por erosión, originada por el rozamiento de la $\begin{cases} \textit{basura combustible} \\ \textit{ceniza} \end{cases}$, cuando se desplazan con la parrilla hacia la descarga de ceniza. En estas zonas se utilizan materiales de CSi, que ofrecen una buena resistencia a la erosión, aunque tienen menor conductividad térmica.

Una alternativa mejor para proteger los bordes de la parrilla, consiste en la utilización de bloques de refractario, rígidamente unidos a las paredes del hogar, en todo lo alto de la boca de la tolva de carga, que es del orden de 4 ft (1,2 m), en la pared frontal del hogar, llegando a 1 ft (0,3 m) de altura en el lado de descarga de la ceniza, Fig XXVIII.7.

La disposición, longitud y diámetro de los clavos se escogen con cuidado, con vistas a la posibilidad de mantener el refractario en su sitio y maximizar la transferencia de calor a lo largo de los clavos, hacia los tubos de las paredes del hogar, con el fin de:

- Facilitar la máxima refrigeración, para mantener la temperatura del refractario tan baja como sea posible, lo que influye en la vida del refractario, en el ensuciamiento de las paredes del hogar y en los costes de mantenimiento

- Tener una menor superficie termointercambiadora en la parte superior del hogar, para lograr la temperatura deseada en los humos que salen del hogar, como consecuencia de la mayor cantidad de calor retirada en la parte inferior del mismo

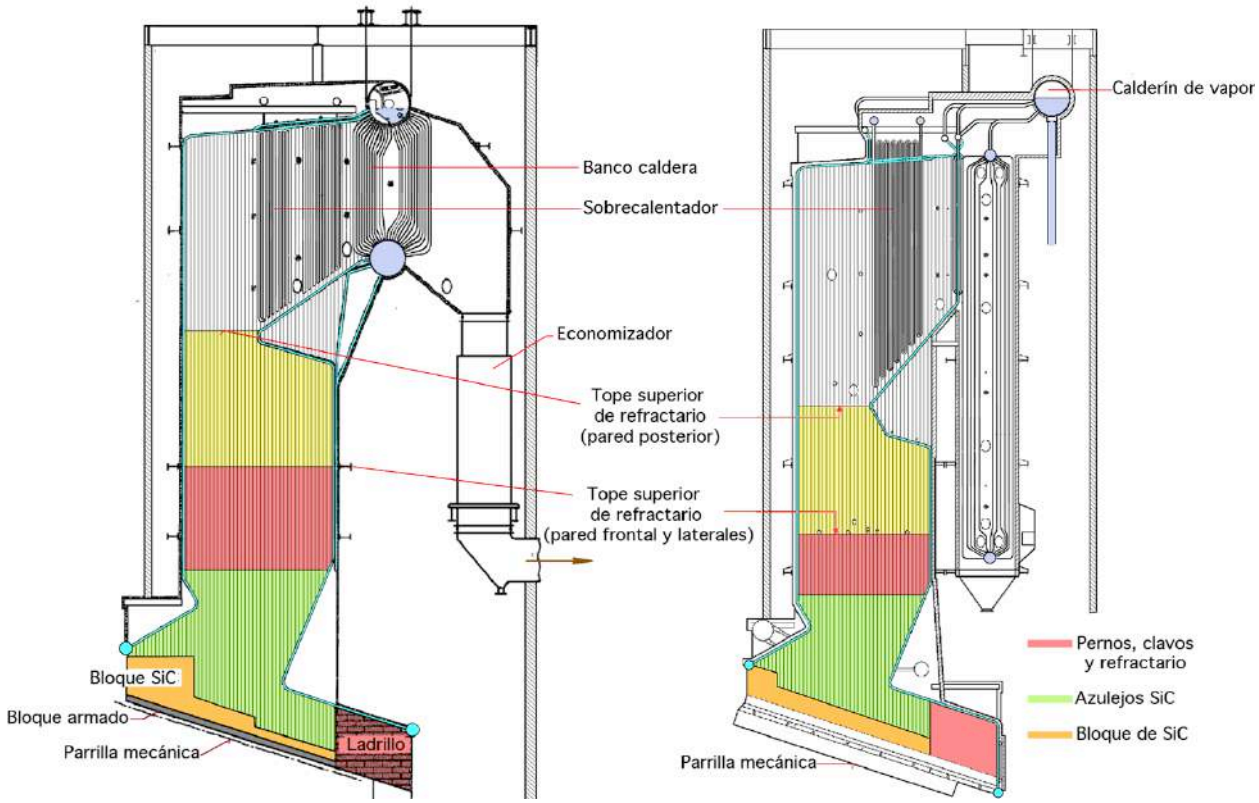


Fig XXVIII.7.-Ubicación y tipo de refractario en unidades que queman masa

UNIDADES QUE QUEMAN COMBUSTIBLES DERIVADOS DE BASURAS.- Con anterioridad a 1980, las calderas que quemaban combustibles derivados de basuras (RDF) se instalaban con tubos desnudos de acero al C en la parte inferior del hogar y sin protección alguna, sin tener en cuenta la corrosión en el hogar inferior. Las primeras unidades, que operaban a baja presión y temperatura del vapor, no experimentaron problemas de corrosión. Cuando se aumentó la presión y temperatura en las unidades, la corrosión se incrementó y se hizo necesario proteger el hogar inferior.

En las unidades de combustión de RDF se ensayaron los mismos diseños de clavos y refractario, que se utilizaron en las unidades de combustión en masa, lo que resolvió un problema y planteó otro nuevo. En este proceso de combustión, un alto porcentaje de la combustión se desarrolla en suspensión, con altas temperaturas de las llamas, en la parte baja del hogar.

Cuando se aplican clavos y refractario, los tubos de la parte inferior del hogar están aislados, de modo que la $\begin{cases} \text{- } transferencia\ de\ calor\ es\ menor \\ \text{- } temperatura\ de\ los\ gases\ de\ combustión\ en\ el\ hogar\ inferior\ es\ mayor \end{cases}$, lo que da lugar a una escorificación sobre la superficie del refractario que cubre las paredes del hogar inferior.

Para proteger los tubos desnudos de acero al C en la parte baja del hogar, de la corrosión de los cloruros encontrados en las calderas que queman basuras, en lugar de proceder al aislamiento térmico de estos tubos, se les recubre con una capa soldada de material Inconel, que se ha mostrado efectiva al minimizar la corrosión (1980).

En 1989 se toma la decisión de proteger los tubos con Inconel, durante el proceso de construcción de las unidades; los tubos bimetálicos, Fig XXVIII.8, constituidos por un tubo interior de acero al C y un tubo exterior de Inconel, permitían alcanzar una protección más uniforme, que la obtenida por soldadura, de una capa superpuesta.

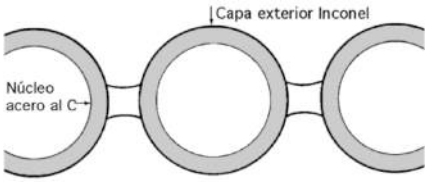


Fig XXVIII.8.- Tubo bimetálico

En la actualidad, en las calderas que queman combustibles derivados de basuras (RDF), el tubo bimetálico constituye el estándar industrial para la protección contra la corrosión en la parte inferior del hogar.

XXVIII.2.- COMBUSTIÓN EN MASA

La combustión en masa es la tecnología de combustión de basuras más común en todo el mundo. En USA, (cuyo combustible de basuras tiene mayor poder calorífico y menor contenido en humedad), tendían a grandes unidades regionales, diseñadas para mayores presiones y temperaturas de funcionamiento, (generación de electricidad), en lugar de construir pequeñas plantas locales como en Europa y Japón, que se destinaban a la producción de agua caliente y vapor a baja presión para calefacción.

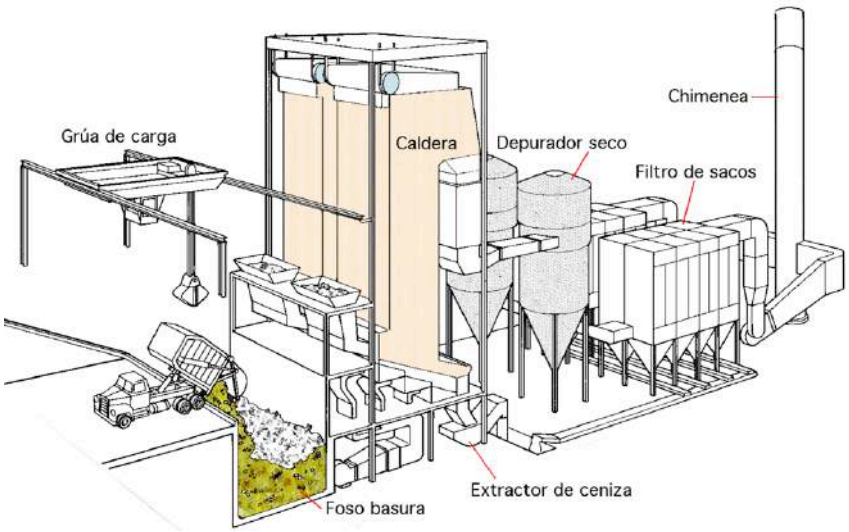


Fig XXVIII.9.- Instalación USA para combustión en masa

Cuando aumentan y generalizan las preocupaciones medioambientales, muchas de las primitivas unidades de combustión de basuras experimentaron problemas de funcionamiento, relacionados con:

- Alta escorificación en el hogar

- Mayores temperaturas de salida de los humos del hogar, que provocaban recalentamientos del metal de los sobrecalentadores y a excesivos ensuciamientos en las secciones de convección

- Fallos de tubos a consecuencia de la corrosión acelerada relacionada con su temperatura

- Producción de dioxinas y furanos durante el proceso de combustión, relacionada con un sistema de combustión inadecuado, sin las óptimas turbulencias y mezcla de combustible-aire en el hogar inferior

Tamaño de la planta de caldera.- Una planta de basuras de debe dimensionar para manipular las basuras que se vayan a entregar a la planta, independientemente de su poder calorífico.

La caldera se diseña para la máxima entrada de basura diaria, considerando un poder calorífico medio de las basuras del orden de $\begin{cases} 4500\ Btu/lb \\ 10.467\ kJ/kg \end{cases}$

En USA estos valores suelen ser de $\begin{cases} 5200 \div 5500\ Btu/lb \\ 12.095 \div 12.793\ kJ/kg \end{cases}$

Capacidad del hogar mecánico.- El hogar mecánico para quemar basuras tiene dos límites, el $\begin{cases} \text{- aporte de calor} \\ \text{- peso diario aceptable de basura} \end{cases}$

Si una planta de $\begin{cases} 1000\ ton/day \\ 907\ Tm/día \end{cases}$ *de basura tiene dos calderas iguales de* $\begin{cases} 500\ ton/day \\ 454\ Tm/día \end{cases}$ *cada una, y el poder calorífico de la basura que se considera para el diseño es de* $\begin{cases} 5000\ Btu/lb \\ 11630\ kJ/kg \end{cases}$*, cada caldera tiene un límite máximo de aporte de calor de* $\begin{cases} 208{,}3.10^6\ \ Btu/h \\ 61{,}1\ MW_t \end{cases}$

- Si el poder calorífico de la basura es > $\begin{cases} 5000\ Btu/lb \\ 11.630\ kJ/kg \end{cases}$*, el límite máximo de aporte de calor no se puede exceder, por lo que el nº de toneladas diarias se ha de reducir a <* $\begin{cases} 500\ ton/day \\ 454\ Tm/día \end{cases}$

- Si el poder calorífico es < 5000 Btu/lb, la unidad puede procesar más de $\begin{cases} 500\ ton/day \\ 454\ Tm/día \end{cases}$ *de basura, hasta el límite máximo de toneladas diarias del hogar mecánico, que se define:*

- En función de la capacidad de basuras por unidad de anchura, que es un dato para una óptima alimentación y distribución del combustible

- Como consecuencia de un límite de peso por unidad de superficie, que es un límite estructural

Estos límites se encuentran en el siguiente campo:

- Por 1 ft (0,3 m) de anchura frontal $\begin{cases} 30\ ton/day \\ 27\ Tm/día \end{cases}$

- Flujo másico por unidad de superficie de parrilla $\begin{cases} 65\ lb/ft^2 h \\ 2{,}74\ kg/m^2 h \end{cases}$

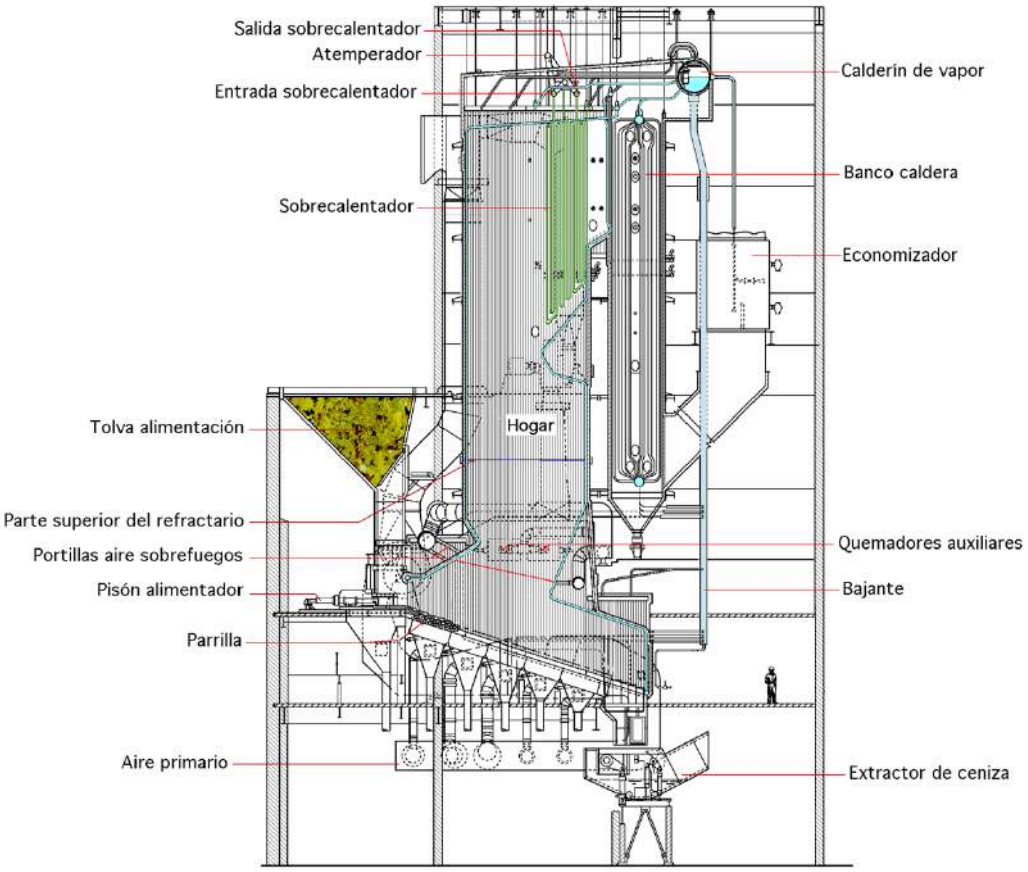


Fig XXVIII.10a.- Típica unidad USA quemando en masa

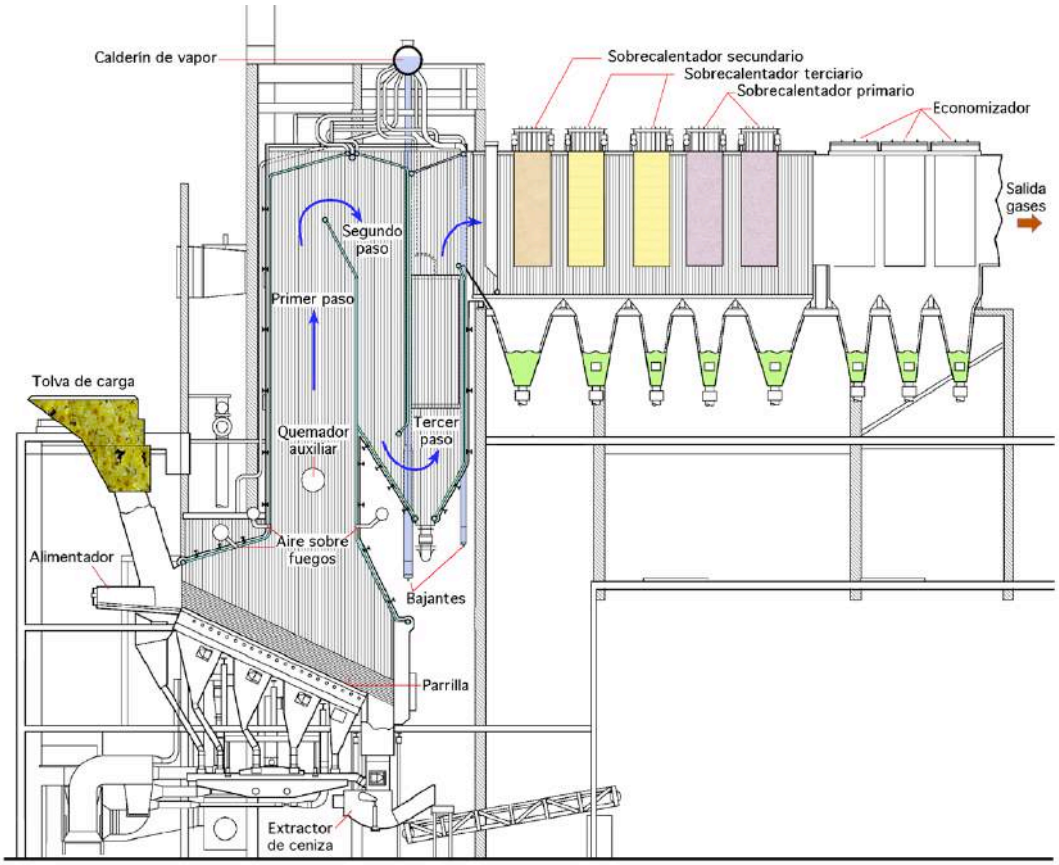


Fig XXVIII.10b.- Típica unidad europea quemando en masa

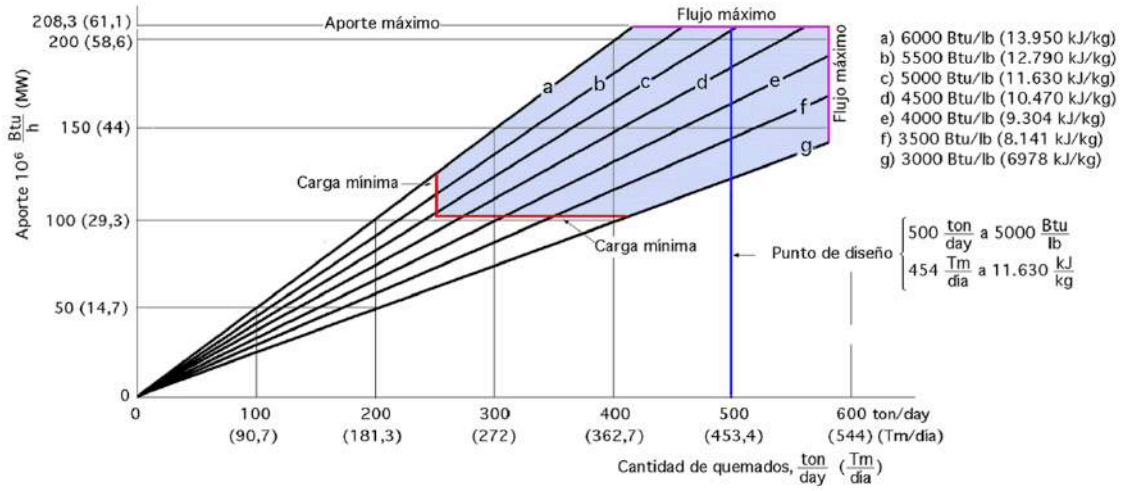


Fig XXVIII.11.- Diagrama correspondiente a una unidad de caldera que quema $\begin{cases} 500\ ton/day \\ 454\ Tm/día \end{cases}$ *de basura con* $\begin{cases} 5.000\ Btu/lb \\ 11.630\ kJ/kg \end{cases}$

La superficie de la parrilla se establece en función de la velocidad de liberación de calor, del orden de $\begin{cases} 300.000 \div 350.000\ Btu/ft^2 h \\ 946.350 \div 1.104.080\ W/m^2 \end{cases}$, aunque para combustibles con $\begin{cases} \text{- bajo poder calorífico} \\ \text{- altas humedades} \end{cases}$, esas cifras pueden ser inferiores.

La anchura y profundidad del hogar mecánico vienen también relacionadas con cada tipo de combustible:

- Con un alto poder calorífico, un combustible de baja humedad requiere un hogar mecánico menos profundo, ya que el combustible tiende a quemarse con mucha más rapidez

- Con un bajo poder calorífico, un combustible de alta humedad requiere un hogar mecánico estrecho y más profundo, ya que en este caso se precisa un mayor tiempo de residencia en la parrilla del hogar mecánico

Combinando estos criterios se puede fijar el nº máximo de Tm/día del hogar mecánico.

Existe una carga mínima, a manipular en un hogar mecánico dado, que se define en función del nº de Tm/día mínimo y del aporte de calor mínimo para una buena combustión.

Diseño del hogar mecánico.- La combustión de residuos sólidos municipales (MSW) requiere un hogar mecánico robusto y fiable, para poder transportar y quemar con éxito basura sin clasificar. La mayoría de los hogares mecánicos utilizan algún tipo de acción oscilante (vaivén), en los distintos eslabones que componen la parrilla, que se diseña con filas de eslabones, alternativamente móviles y estacionarios, en escalera y con pendiente descendente para ayudar a mover la basura a lo largo del hogar. Cada fila solapa con la siguiente, y las filas alternadas se soportan desde un bastidor móvil, accionado por cilindros hidráulicos, Fig XXVIII.12.

La acción de las parrillas oscilantes hace que la basura ruede y mezcle a través de todo el hogar, exponiendo continuamente nuevo material a las altas temperaturas del lecho y facilitando que

entre en contacto el $aire_{comburente}$ con todas las partes de la basura que se encuentren en combustión.

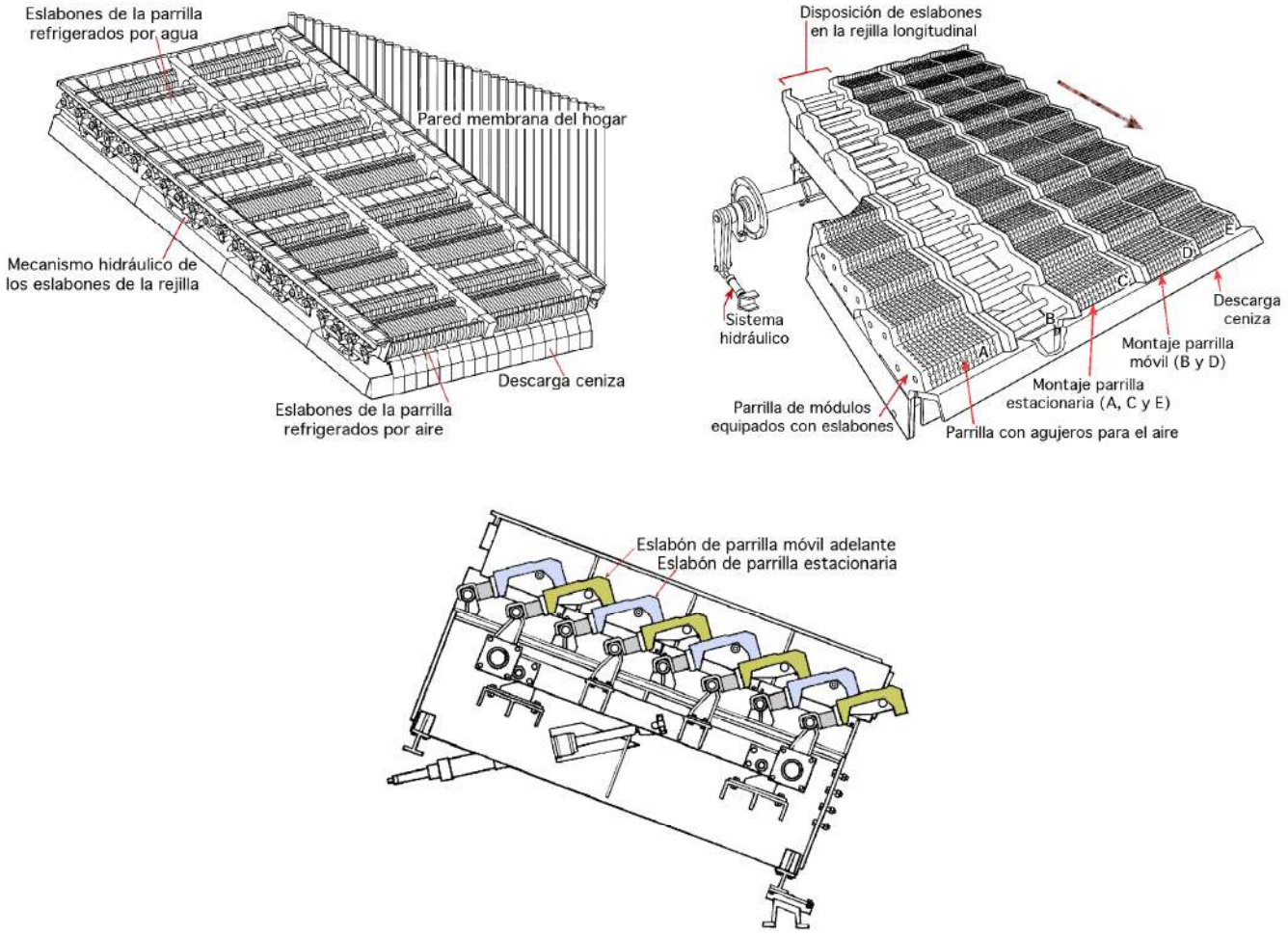


Fig XXVIII.12.- Parrillas oscilantes de hogar mecánico (a,b) y disposición de los eslabones (c)

Para basuras de bajo poder calorífico y alta humedad, el diseño del hogar mecánico incorpora entre uno y tres eslabones especiales que se ubican al final de cada módulo de la parrilla, según sea la longitud global del hogar mecánico. Estos eslabones provocan una acción de desplome y rodadura de la basura, cuando la combustión se verifica fuera de los mismos, lo que puede dar lugar a enormes desviaciones en las emisiones de CO. La posibilidad de controlar el aire inferior de la parrilla, en múltiples zonas a lo largo y ancho del hogar mecánico, constituye un factor importante para minimizar las emisiones de CO y los NO_x, lo que se consigue con un adecuado diseño del hogar mecánico.

Manipulación del combustible.- Los residuos sólidos municipales (MSW) entregados a la planta de basuras, se descargan directamente en el foso de almacenamiento, que sirve también para mezclar el combustible, obteniéndose unas características en composición y poder calorífico, compatibles con las calderas.

Sistema de alimentación de combustible.- Para alcanzar una combustión con mínimas emisiones de CO y NO_x y generación de vapor constante, es indispensable controlar la alimentación de combustible. En la parte inferior de la tolva de carga de alimentación, hay unos brazos hidráulicos que empujan el combustible sobre la parrilla del hogar mecánico (empujadores), a una velocidad determinada.

El control hidráulico de los brazos se realiza ajustando cada hora $\begin{cases} \text{- } la\ velocidad\ de\ desplazamiento \\ \text{- } el\ número\ de\ carreras \end{cases}$ de los émbolos.

Sistema de $aire_{comburente}$.- *El* $aire_{primario}$ se alimenta a las cámaras de aire situadas bajo cada módulo de la parrilla. Una compuerta de regulación situada a la entrada de cada una de estas cámaras, controla el aire que entra bajo cada sección, Fig XXVIII.13.

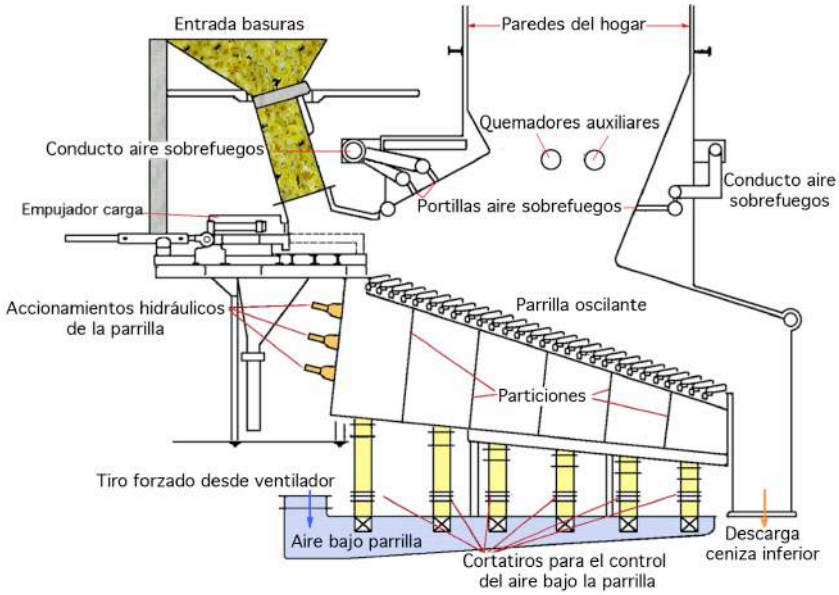


Fig XXVIII.13.- Sistema de aire comburente

La superficie de la parrilla se diseña para admitir de forma uniforme en toda ella, el $aire_{primario}$ hacia la basura que se encuentra en combustión. Para ello se proveen unas pequeñas portillas o toberas de aire, sobre la superficie de las barras individuales de los diversos eslabones de la parrilla. Estas portillas de aire engloban unas aberturas que equivalen al 3% del área de la parrilla, lo que garantiza la suficiente caída de presión para una buena distribución del flujo de aire a través de la parrilla, independientemente de la profundidad de la basura que haya sobre la misma.

Los sistemas de aire por debajo de la parrilla, se diseñan para el 70% del aire total, aunque durante la operación normal el aire bajo parrilla no llega a un 60% del total. Como la basura contiene un alto porcentaje de volátiles, una gran parte del $aire_{comburente}$ entra en el hogar como $aire_{secundario}$, (aire por encima del lecho de combustión), a través de las paredes del hogar.

Las portillas de $aire_{secundario}$ se ubican en las paredes frontal y posterior del hogar, de modo que éste fluya paralelamente al flujo normal que discurre dentro de la unidad.

Los sistemas de aire sobre el lecho se diseñan para el 50% del $aire_{comburente}$ total, suministrando durante la operación normal hasta un 40% del total.

La función del $aire_{secundario}$ sobre el lecho:

- Facilita el aire y la turbulencia necesaria, para mezclar los humos con el $aire_{comburente}$

- Suministra el O_2 *necesario para la combustión completa de los volátiles en la parte baja del hogar*

El $aire_{exceso}$ en el hogar está entre el $80 \div 100\%$, y una combustión se dice es completa cuando el valor del CO presente en los humos del hogar es de 100 ppm o menos.

Para ayudar a la combustión de combustibles húmedos durante largos períodos de tiempo lluvioso, el sistema incluye calentadores de aire con serpentines de vapor, diseñados para alcanzar temperaturas del aire entre $\begin{cases} 300 \div 350^{o}F \\ 149 \div 177^{o}C \end{cases}$, con el fin de secar estos combustibles y mantener la temperatura en el hogar; se utilizan para *el* $aire_{primario}$ ya que este aire es el que directamente ayuda al secado del combustible húmedo; se diseñan de forma conservadora, con un espaciado entre aletas de $5 \div 6{,}4$ mm.

La mayoría de las plantas toman el $aire_{comburente}$ del foso de almacenamiento, con el fin de minimizar los olores, el cual suele estar contaminado con polvo y materiales textiles que pueden obturar los serpentines de vapor, por lo que hay que incluir algún tipo de filtro para mantenerlos limpios.

Para combustibles con humedad muy alta se pueden utilizar (excepcionalmente) quemadores de combustible auxiliar, para estabilizar la combustión en el hogar. En operación normal, para alcanzar una buena combustión no se necesitan quemadores de combustible auxiliar, ni calentadores de aire con serpentines de vapor.

SISTEMAS DE MANIPULACIÓN DE CENIZA.- Una vez quemada la basura, la ceniza toma la forma de ceniza $\begin{cases} \text{- ligera, ceniza volante en polvo} \\ \text{- basta o escoria, que sale de la parrilla del hogar mecánico} \end{cases}$

La ceniza volante en polvo se arrastra por el flujo de humos, hasta que se retira mediante un aparato de recogida, o cae en las tolvas de la caldera, del economizador o del calentador de aire.

La escoria de la parrilla del hogar, que se expulsa directamente al exterior, y sale por la canalización del extremo de descarga de la parrilla y por las tolvas del hogar, consta de:

- *Ceniza procedente de* { *el combustible*; *las paredes del hogar*; *el sobrecalentador* }

- *Deposiciones de ceniza sobre la parrilla*

Extractor de ceniza de brazo móvil.- La escoria de las unidades de combustión en masa y hogar mecánico, puede contener grandes trozos de material no combustible; su tamaño varía desde finas partículas, hasta objetos pesados no combustibles contenidos en la basura.

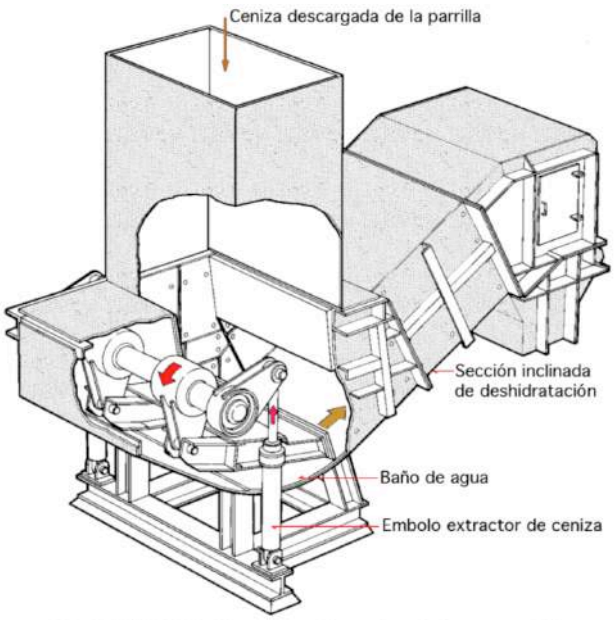


Fig XXVIII.14.- Extractor de ceniza de brazo móvil

La escoria procedente del canal de descarga de la parrilla cae en un baño de agua que forma parte del extractor de ceniza de brazo móvil, que apaga la escoria y controla la pulverización Fig XXVIII.14.

Una vez apagada la escoria, un brazo hidráulico la empuja, comprime y deshidrata, (quedando con una humedad del 15÷20%), hacia una sección de escurrido inclinada antes de la descarga a un camión o a un silo. La escoria se retira de las proximidades de la descarga del hogar mecánico mediante transportadores vibrantes y cintas transportadoras.

Tolva de ceniza de compuerta doble.- En lugar de un extractor de escoria como el mencionado, se pueden utilizar tolvas de escoria con doble compuerta, Fig XXVIII.15, superior e inferior, para controlar el flujo de escoria entrante y saliente de la misma. El apagado de la escoria se realiza en el interior de la tolva mediante agua atomizada.

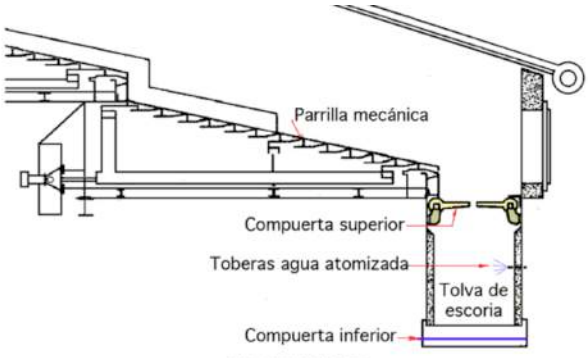


Fig XXVIII.15
Tolva de ceniza para hogar mecánico de combustión en masa

Ceniza volante de limpiadores, precipitadores y filtros de saco.- La ceniza volante en polvo recogida en las tolvas de limpiadores, precipitadores y filtros de saco se puede manipular mediante tornillos mecánicos en seco o por medio de transportadores de cadena. Estas unidades operan continuamente para minimizar los problemas de atascos en las tolvas, y descargan sobre un transportador de recogida que, en general suele ser de cadena. Los transportadores mecánicos son estancos al polvo, pero no tienen por qué serlo a gases, por lo que suelen emplear dispositivos independientes de sellado, como cierres rotativos y dobles válvulas de mariposa con contrapeso.

XXVIII.3.- COMBUSTIÓN DE BASURAS PREPARADAS (RDF)

La tecnología de los combustibles derivados de basuras (RDF) se desarrolla en USA como alternativa al método de combustión en masa. Inicialmente, los RDF se utilizaban como combustibles suplementarios en las grandes calderas energéticas de servicio público, que quemaban carbón; los RDF se procesaban y dimensionaban con un tamaño máximo de 1,5"(38 mm), y estaban compuestos casi en su totalidad por plásticos ligeros y papel; para su utilización en fuegos suplementarios o auxiliares, se sugieren las siguientes limitaciones:

- *Un máximo aporte de RDF equivalente al 20% del aporte de calor*
- *Ningún aporte de RDF mientras la caldera no opere a más del 50% de carga*

En la mayoría de los casos, los RDF se soplan a través de las paredes laterales del hogar, a la cota correspondiente a los quemadores de carbón pulverizado, por medio de un quemador de RDF dotado con un impulsor de distribución del combustible (empujador), Fig XXVIII.16.17.

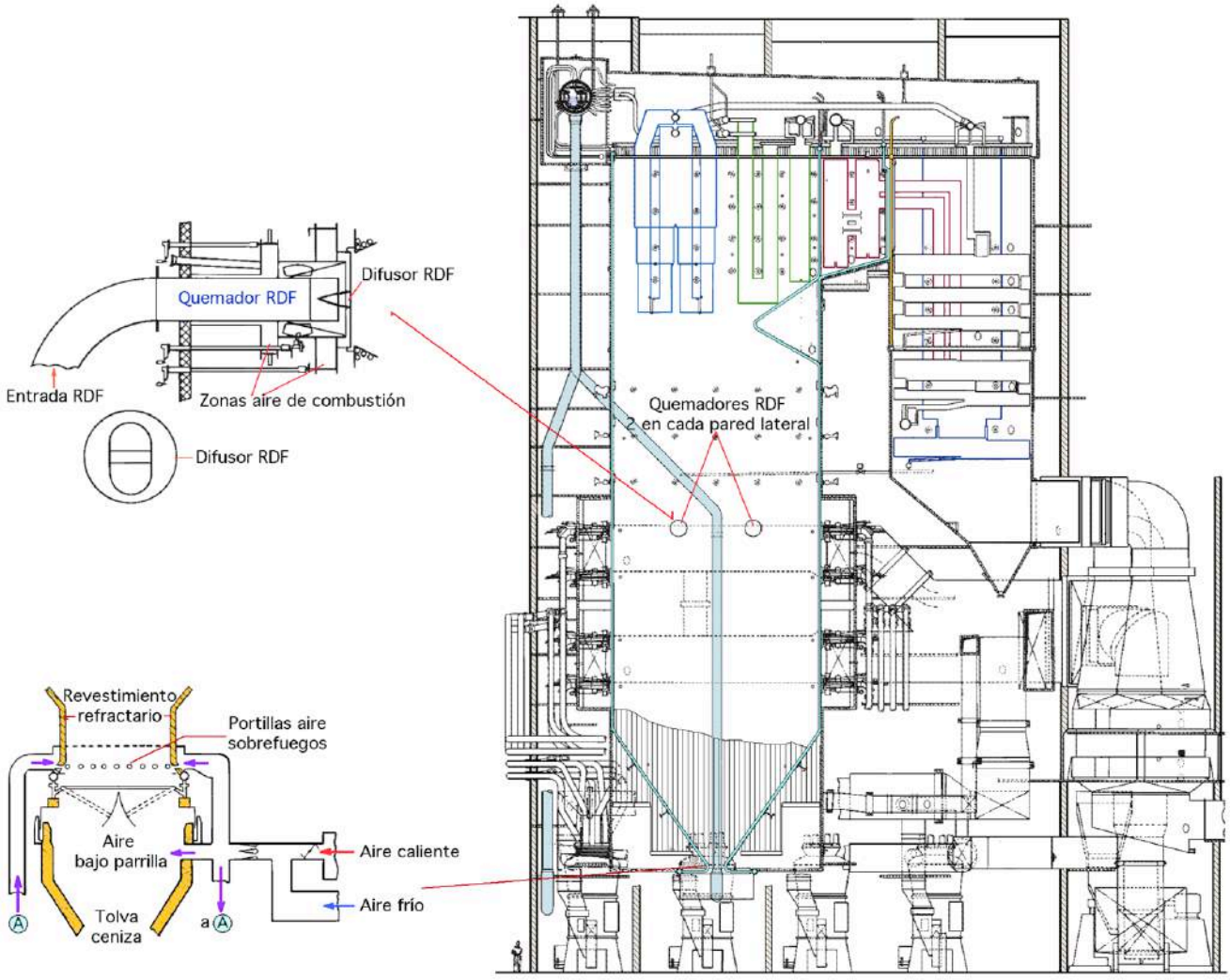


Fig XXVIII.16.- Caldera radiante RB (B&W) que quema RDF como combustible suplementario

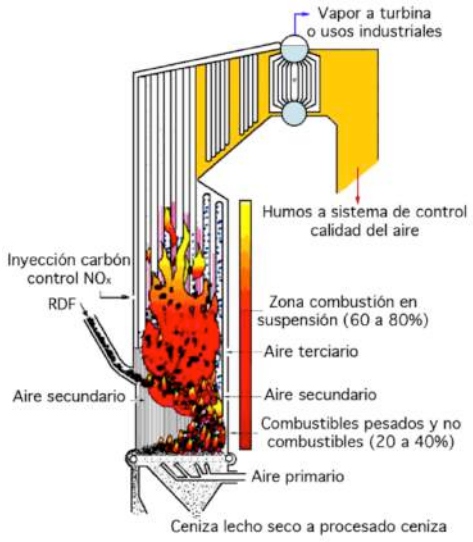


Fig XXVIII.17.- Unidad que quema RDF

La mayor parte de los RDF arden en suspensión, en la zona de alto aporte de calor, correspondiente a la del fuego del carbón pulverizado; parte del combustible más pesado cae al fondo del hogar.

En la parte inferior de la entrada a la tolva de escoria, se ubica una parrilla basculante que permite la completa combustión de las piezas más pesadas del combustible, antes de que se descarguen en el sistema de ceniza.

Calderas específicas para quemar RDF.- Los RDF se han convertido en el principal combustible utilizado en calderas diseñadas para generar vapor a plena carga. Si no se dispone de RDF, la caldera se diseña para que pueda alcanzar la plena carga quemando madera, carbón o gas natural. Para la retirada y puesta en servicio de la unidad la caldera de RDF cuenta con quemadores auxiliares de aceite o gas.

El diseño de las calderas de *primera generación* que empezaron a quemar RDF como combustible principal, (Hamilton, Ontario, Canadá (1972) y Akron, Ohio, USA (1979)) estaba muy influenciado por la tecnología de las calderas que quemaban madera, en lo referente al:

- *Sistema de* { *- alimentación de combustible* / *- aire secundario* }
- *Diseño y dimensionado del hogar mecánico*

La experiencia adquirida condujo a los diseños de *segunda generación*, que mejoraron:

- *Los sistemas de* { *- preparación de los RDF* / *- alimentación de combustible* }
- *El diseño de la caldera*

e incluían el diseño del primer alimentador específico para RDF y la utilización de un solape soldado de acero aleado en el hogar inferior, para proteger la unidad contra la corrosión.

La *tercera generación* coincide con el actual estado de diseño, Fig XXVIII.19.20.21, en el que la caldera cuenta con:

- *Una disposición abovedada del hogar inferior*
- *Un sistema de aire$_{secundario}$ mejorado que aumenta la eficiencia de la combustión*
- *Un sistema de procesado de combustible mejorado*

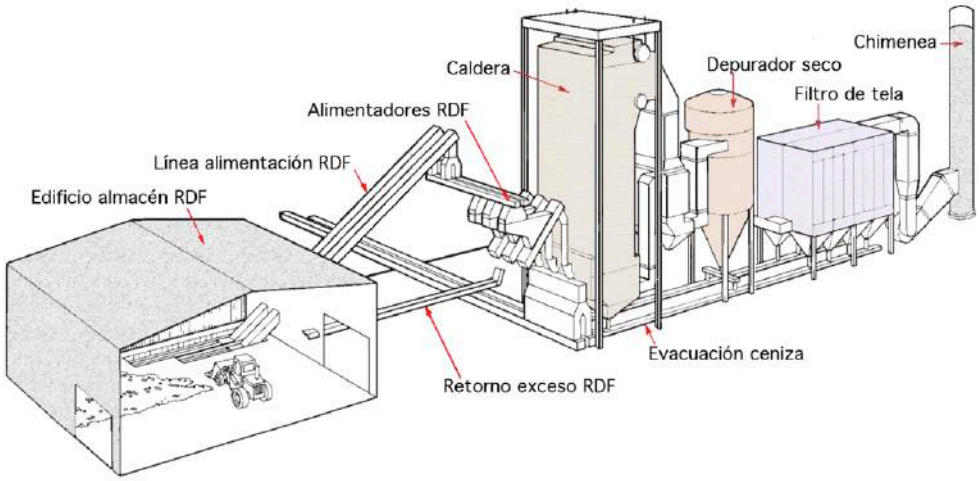


Fig XXVIII.18.- Típico sistema RDF de obtención de energía de las basuras

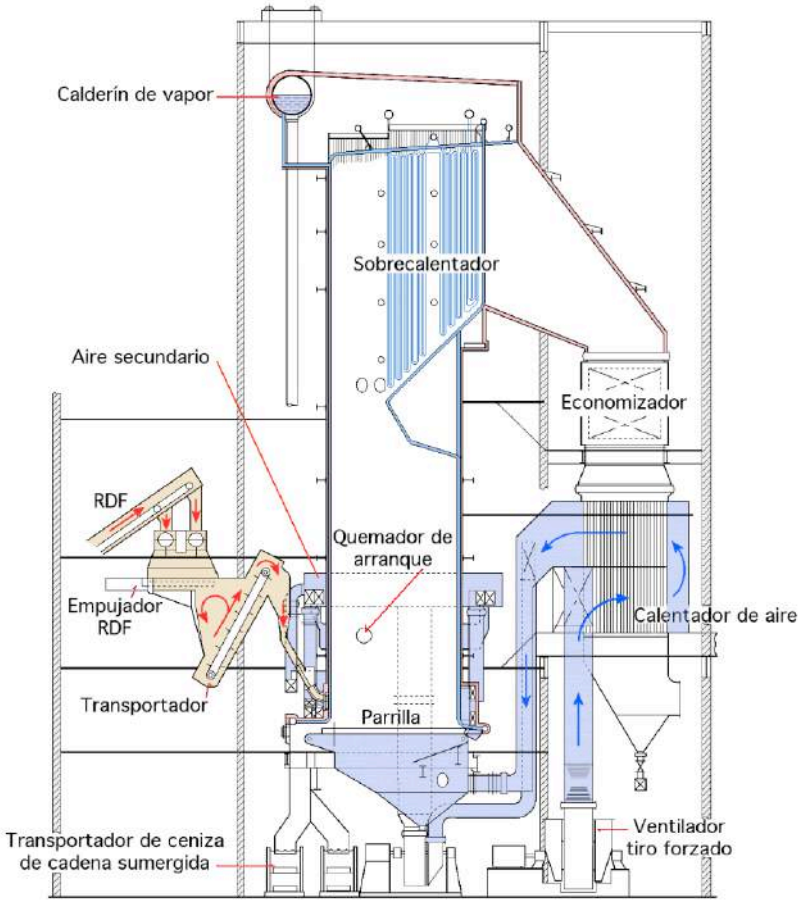


Fig XXVIII.19.- Caldera Stirling dual, RDF y fuelóleo (tercera generación), un calderín

Características de diseño:
- *uno o dos calderines, paredes membrana y protección anticorrosiva en la parte baja del hogar*
- *capacidad: del orden de* {*350.000 lb/h* / *44,1 kg/s*} *de flujo de vapor y 100÷1000 tn/day de desechos*
- *presión de vapor de diseño* {*1800 psig* / *12,4 MPa*} *; temperatura del vapor: 930°F (500°C)*
- *combustibles*
  - *residuos sólidos municipales (MSW) tal como se reciben*
  - *desechos derivados del fuel (RDF) para*
    - *calderas nuevas*
    - *aplicaciones con gas y fuel*

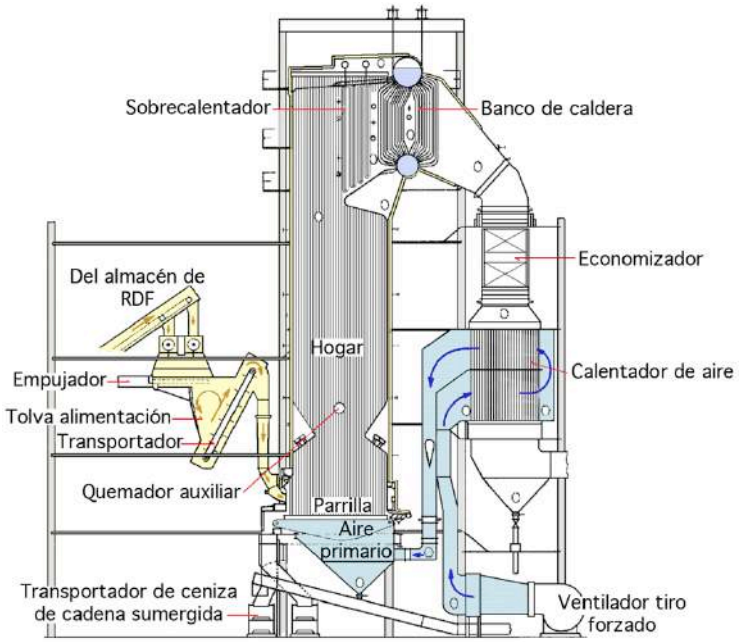


Fig XXVIII.20.- Unidad para RDF y fuelóleo (tercera generación), dos calderines

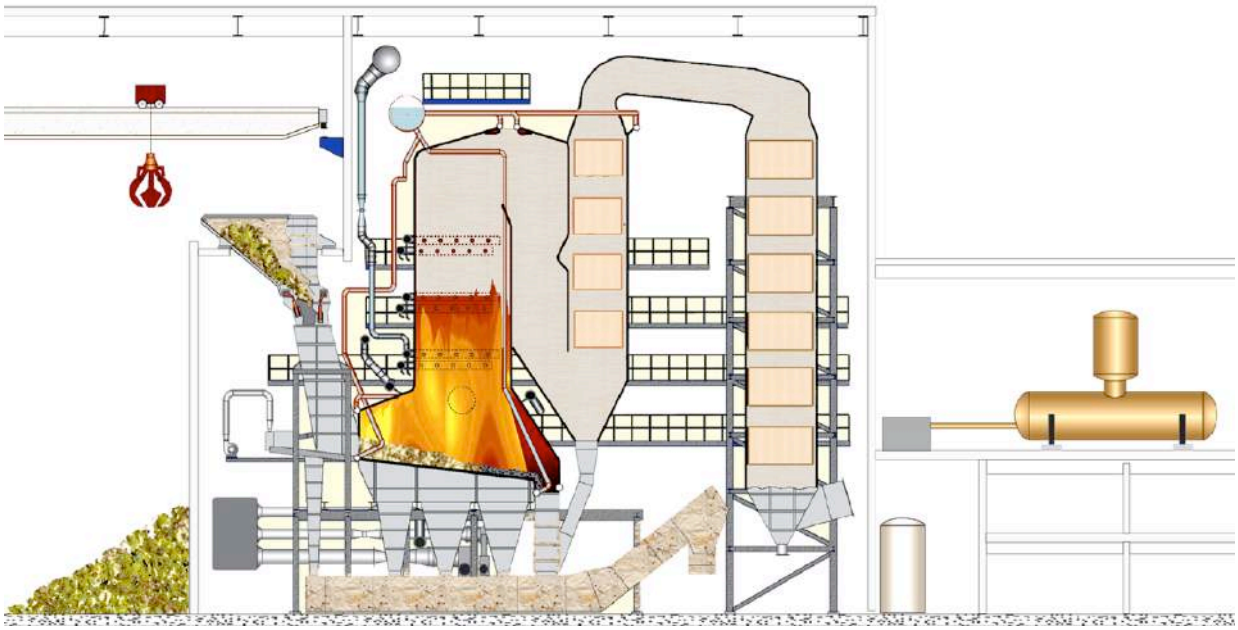


Fig XXVIII.21.- Instalación de central RDF, que quema basura y madera (Strängnäs, Suecia)

Diseño:
- *el hogar lleva una rejilla vibratoria refrigerada por agua*
- *la ceniza inferior se elimina con un transportador de cadena sumergida*
- *la caldera tiene dos pasos de radiación*
- *{los recalentadores, el economizador} están en disposición vertical*
- *los NO_x se eliminan en una planta SNCR inyectando amoníaco en el primer paso de la caldera*
- *la limpieza de humos consiste en un filtro de sacos e inyección de cal, seguida por un {depurador, condensador}*
- *el vapor se expansiona en una turbina*
- *el calor de la condensación se utiliza en calefacción urbana*

Tabla XXVIII.5.- Características de la central de (Strängnäs, Suecia), Fig XXVIII.21

Datos de la planta dual			*Basura*	*Madera*
Capacidad nominal de vapor	*36,7 MW*	*Flujo*	*48 Tm/h*	*46 Tm/h*
Potencia calorífica	*7 a 15 MW/kg*	*Temperatura vapor*	*427°C*	*482°C*
Potencia (incl. condensación del humo)	*24 MWt*	*Presión de vapor*	*13 bars, 7 MW*	*13 bars, 7 MW*

Emisiones previstas			
CO	*50 mg/Nm³ + 11% $O_{2\ (seco)}$*	*N_2O*	*20 mg/MJ fuel*
NO_2	*50 mg/Nm³ + 11% $O_{2\ (seco)}$*	*HCl*	*10 mg/Nm³ + 11% $O_{2\ (seco)}$*
Polvo	*10 mg/Nm³ + 11% $O_{2\ (seco)}$*	*SO_2*	*50 mg/Nm³ + 11% $O_{2\ (seco)}$*

Sistemas de preparación de los RDF.- La *primera generación* de sistemas de procesado de RDF estaba constituida por los sistemas de trituración y quemado. La basura una vez recibida iba a una trituradora/quebrantadora de martillos, que producía un RDF con un tamaño máximo de 6 x 6" (152 x 152 mm). Los materiales ferrosos se retiraban por separadores magnéticos y el resto de los componentes, muchos de ellos indeseables, entraban en la caldera

Las partículas de vidrio trituradas iban embebidas en la madera y en el papel, dando lugar a un conjunto muy abrasivo que entraba a la caldera en suspensión. Como los RDF son materiales compactos, se presentan problemas para sacarlos de los silos de almacenamiento.

Los sistemas de procesado de *segunda generación* reconocieron y solventaron algunos de estos problemas; así:

- Para reducir las partículas abrasivas en el combustible, el triturador se desplazó hacia atrás en el sistema de procesado, y se dispuso un tipo de quebrantadora basta para limitar el tamaño

- Se introdujo un equipo de clasificación por tamaños, para separar las fracciones menores de 1,5" (38,1 mm), que fundamentalmente estaban compuestas de vidrios, cerámica y polvo, y se enviaban al basurero, escombrera o terraplén.

En los sistemas de procesado de RDF de *tercera generación, Fig XXVIII.22,* el primer componente del equipo es un molino batidor cuyo cometido principal es romper las bolsas de basura.

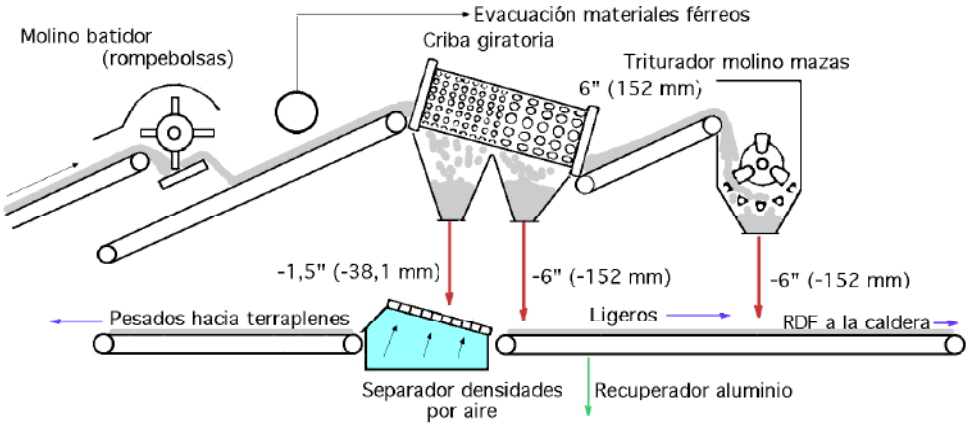


Fig XXVIII.22.- Sistema de procesado de RDF de 3ª generación

- La basura se separa por tamaños en una criba giratoria o en una criba de disco, dejando los tamaños inferiores a 1,5" (38,1 mm) para su vertido en terraplenes, escombreras o basureros

- Se dispone de un clasificador separador por densidad, para separar las fracciones ligeras (papeles, plásticos, etc.) y lograr la máxima recuperación de calor

- Se puede incluir la extracción y recuperación de Al del flujo, de tamaño { *- superior a 1,5" (39,1 mm)* / *- inferior a 6" (152 mm)*

Rendimiento de los RDF.- El contenido en ceniza de los RDF está relacionado con el rendimiento del sistema de procesado, es decir, con el porcentaje de combustible procedente de los RDF obtenido de una cantidad dada de residuos sólidos municipales MSW. Un rendimiento del 70% significa que se han obtenido 70 toneladas de RDF por cada 100 toneladas de MSW recibidas.

- En un sistema de procesado de bajo rendimiento, la porción de MSW que se rechaza es alta en cenizas y en contenido de inertes y, por tanto, el RDF resultante es de bajo contenido en ceniza

- En un sistema de alto rendimiento, la mayoría de los materiales rechazados son metales ferrosos e inertes (vidrio, cerámica, polvo) que no tienen poder calorífico

Cuando un sistema de procesado de RDF se diseña para un elevado rendimiento, mucha de la ceniza se queda en la fracción del combustible RDF por lo que su contenido en ceniza se incrementa.

El poder calorífico del RDF es inversamente proporcional al rendimiento; cuando se rechaza parte del combustible la cantidad resultante de RDF es menor pero con un poder calorífico más alto.

Un rendimiento del 93% representa un sistema de triturado y de combustión, en el que sólo se ha retirado el metal ferroso, por lo que el poder calorífico del RDF es ligeramente mayor que el poder calorífico correspondiente del MSW recibido en la instalación.

Tabla XXVIII.6.- Basura típica de referencia (MSW), residuos sólidos municipales

Análisis de componentes	*MSW (% peso)*
Cartón ondulado	*5,53*
Periódicos	*17,39*
Revistas	*3,49*
Otros papeles	*19,72*
Plásticos	*7,34*
Goma, cuero	*1,97*
Madera	*0,84*
Textiles	*3,11*
Residuos forestales	*1,12*
Residuos alimentarios	*3,76*
Combustibles mezclados	*17,75*
Hierro	*5,5*
Aluminio	*0,5*
Otros materiales no férreos	*0,32*
Vidrio	*11,66*
Total	*100*

Análisis elemental	*MSW (% peso)*	*RDF (% peso)*
Carbono	*26,65*	*31*
Hidrógeno	*3,61*	*4,17*
Azufre	*0,17 (máx. 0,30)*	*0,19 (máx. 0,36)*
Nitrógeno	*0,46*	*0,49*
Oxígeno	*19,61*	*22,72*
Cloro	*0,55 (máx. 1,00)*	*0,66 (máx. 1,20)*
Agua	*25,3*	*27,14*
Ceniza	*23,35*	*13,63*
Total	*100*	*100*
HHV	*4.720 Btu/lb*	*5.500 Btu/lb*
Poder calorífico	*10.979 kJ/kg*	*12.793 kJ/kg*
Recuperación del valor combustible % MSW		*96*
% Eficiencia másica = = 100 (RDF)/(MSW)		*83*

Tabla XXVIII.7.- % de RDF, ceniza y poder calorífico

Sin reciclado de la caja de humos			
Modo	*Combustión en masa*	*Triturado y quemado*	*RDF*
Relación RDF, %	*100*	*93*	*83 - 70*
Ceniza	*23,64*	*19,87*	*11,72 - 8,87*
Btu/lb	*4814*	*5146*	*5.641 - 5.834*
kJ/kg	*11197*	*11970*	*13.121 - 13.570*
Con reciclado de la caja de humos			
Modo	*Combustión en masa*	*Triturado y quemado*	*RDF*
Relación RDF, %	*100*	*93*	*85 - 71*
Ceniza	*19,58*	*17,16*	*9,91 - 6,59*
Btu/lb	*5513*	*5898*	*6.328 - 6.491*
kJ/kg	*12823*	*13714*	*14.719 - 15.098*

Los residuos sólidos municipales (MSW) suelen tener una composición parecida a la de los residuos presentados en la Tabla XXVIII.6. La mayoría de los residuos son combustibles, con contenidos en ceniza desde el 4% para la madera, hasta el 12% para el papel satinado de revistas. La fracción de vidrio, piedras y combustibles mezclados, contienen cantidades variables de piedras, arenisca y polvo.

La composición de los RDF depende del tipo de sistema de procesado y del rendimiento resultante; la Tabla XXVIII.7 indica la variación del contenido de ceniza en el combustible y su poder calorífico, al modificarse el rendimiento de los RDF en los diferentes sistemas de procesado.

CALIDAD DE LOS RDF

a) El RDF utilizado para *complementar al carbón pulverizado* en calderas energéticas, debe:

- Ser bajo en cenizas

- Tener mínimos de metales ferrosos y no ferrosos, como el Al

- Tener partículas lo suficientemente pequeñas para poder alimentar neumáticamente a la caldera

El sistema de procesado para este combustible es de muy bajo rendimiento, entre $40 \div 60\%$.

b) El RDF para calderas *con hogar mecánico de parrilla móvil*, debe:

- Ser bajo en cenizas, y tener un alto rendimiento en RDF a partir de los MSW

- Estar libre de metales ferrosos y no ferrosos, como el Al

- Tener una distribución de tamaños de partículas considerablemente mayor que la de un RDF para su utilización en ciclones o en calderas de carbón pulverizado

El sistema de procesado para este combustible debe tener un rendimiento, del $70 \div 85\%$.

c) El RDF producido en un *sistema de molido y quemado*, en el que el residuo sólido se tritura y el metal ferroso se retira, tiene un $\begin{cases} \text{- rendimiento del 93\%} \\ \text{- alto contenido de ceniza} \end{cases}$ y el 100% del Al, así como otros metales no férreos, vidrio, piedras y materiales cerámicos, contenidos en los residuos sólidos municipales originales

Aunque éste es un sistema de alto rendimiento, deseable para caldera con hogar mecánico de parrilla móvil, contiene grandes cantidades de Al, vidrio y otros materiales inertes, que provocan una importante abrasión en el hogar mecánico y en el hogar inferior.

PROCESADO DE LOS RDF.- Un sistema de procesado óptimo supone alcanzar el máximo rendimiento con la máxima recuperación de calor, siempre y cuando se retiren los materiales ferrosos, Al y vidrio, antes de entrar en la caldera, Fig XXVIII.23, e incluye lo siguiente:

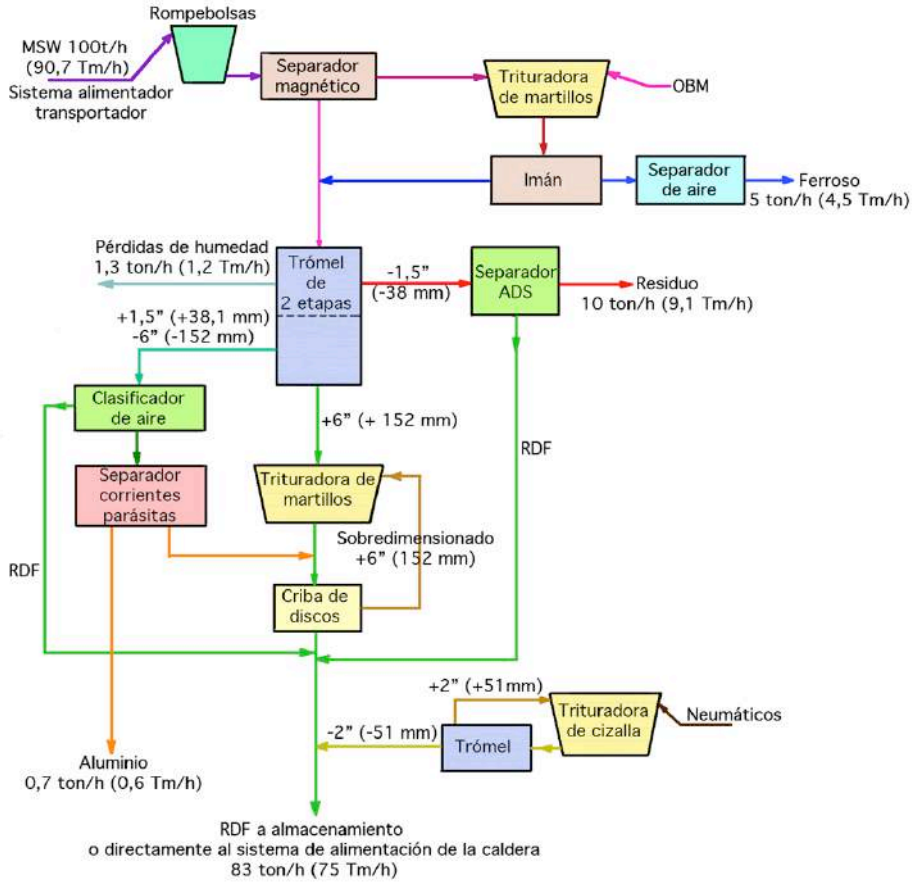


Fig XXVIII.23.- Componentes de un sistema completo de procesado de RDF

a) Transportadores alimentadores.- Los residuos sólidos se alimentan con cucharas cargadoras frontales a un transportador de banda articulada de acero que, a su vez, alimenta los transportadores alimentadores de los molinos batidores rompedores de bolsas.

b) Reducción del tamaño inicial.- En el molino batidor se abren las bolsas de basura, los residuos se trituran groseramente y las botellas de vidrio se rompen en trozos de 1,5"(38,1 mm) o menos.

c) Recuperación de metales ferrosos.- Se extraen de los MSW mediante un separador magnético. Los materiales se desplazan hacia un separador de aire, en el que el papel, plásticos y textiles se separan, dejando un producto ferroso limpio, siendo posible una recuperación del 90% del hierro.

d) Clasificación de tamaños y reducción final.- Después de retirar los materiales ferrosos, el material troceado se lleva a una criba rotativa (tromel), que es un aparato separador de unos 10 ft (3 m) de diámetro y 60 ft (18,3 m) de largo, que realiza las siguientes funciones:

- Separa el vidrio, la arena y los metales no ferrosos, de tamaño inferior a 1,5" (38,1 mm)

- Separa todo lo que es menor de 6" (152 mm) y mayor de 1,5" (38,1 mm), intervalo adecuado para un tamaño de combustible sin procesado adicional y que contiene el grueso de las latas de Al

- El tamaño superior a 6" (152 mm), pasa a un triturador secundario horizontal, que es el que tiene los mayores consumos de energía y gastos de mantenimiento, por lo que el proceso de RDF se diseña para reducir su carga, procediendo sólo al troceado de aquellos combustibles que resulten demasiado grandes para la caldera

El tamaño de las partículas se controla mediante una criba de disco que recicla el material de tamaño excesivo hacia el triturador secundario.

Separación de vidrio, piedras, arenisca y polvo.- El tamaño inferior al clasificado por el trómel (criba clasificadora de cilindros giratorios y eje inclinado), menor de 1,5"(38,1 mm), pasa por un separador por densidad en aire (ADS), diseñado para separar las partículas densas de las menos densas, por medio de vibración y barrido de aire. Este aparato puede eliminar el vidrio, piedras, arenisca, polvo, y los metales no ferrosos.

La fracción ligera, entre el 50÷90% del total alimentado al ADS, consiste en combustibles de alto poder calorífico, que se recuperan y mezclan con el flujo del combustible principal.

Recuperación de latas de Al.- Para optimizar la recuperación, se provee un clasificador separador de aire para tamaños superiores a 1,5"(38,1 mm) e inferiores a 6"(152 mm).

El clasificador retira la parte orgánica ligera del flujo, permitiendo que las latas de Al se hagan más visibles, para su retirada a mano.

La fracción pesada del clasificador se vierte sobre una cinta transportadora con numerosos puestos de selección a mano a ambos lados de la misma, recogiéndose las latas en una tolva para su transporte a una prensa y posterior aplastamiento.

Para la separación de las latas de Al, se puede instalar un separador de corrientes parásitas, en lugar del proceso manual, si la cantidad de latas es lo suficientemente alta que justifique su coste de inversión, (recuperación de un 60% del Al).

Residuos voluminosos de tamaños superiores (OBW).- La trituradora es un molino horizontal de martillos, utilizada para:

- Tritutar los metales ferrosos recuperados de la línea de procesado de los RDF

- Triturar los materiales sobredimensionados separados previamente, que incluyen los de línea blanca como, refrigeradores, lavadoras, ramas de árboles, etc

Los metales ferrosos se recuperan magnéticamente y se hace una limpieza final mediante un limpiador de aire; los no ferrosos se integran en el flujo de (RDF)

Línea de troceado de neumáticos.- Si en los MSW existe un suministro suficiente de neumáticos, se puede incluir una línea especial capaz de desmenuzar 500 neumáticos/hora, con una trituradora cortante. El equipo de trituración incluye un tromel, para devolver a la trituradora los trozos de neumático superiores a 2"(51 mm). Los trozos de neumático, de 2"x 2"= (51x 51 mm) o menos, constituyen el producto final, que se mezcla con el flujo de RDF.

Almacenaje de RDF.- Los RDF procedentes de cada línea se transportan a una instalación de almacenaje, y desde ella se alimenta directamente a la caldera, o a un transportador. Cuando la alimentación de los RDF es directa a la caldera, el exceso de RDF procedente del sistema de alimentación se retorna a la instalación de almacenaje de RDF.

SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN DE COMBUSTIBLE

Alimentador aforador de RDF.- Debe cumplir los siguientes criterios de diseño:

- Medida controlada del combustible para atender la demanda de aporte de calor

- Homogeneización del material para obtener una densidad constante

- Resolver problemas debidos a materiales sobredimensionados

- Operaciones de mantenimiento in situ

- Aparatos de detección y extinción de incendios

Para cada una de las espitas distribuidoras de combustible por chorro de aire, se utiliza un alimentador que cuenta con un silo alimentador más elevado, que se mantiene siempre lleno con el fin de asegurar un suministro continuo de combustible.

Espitas distribuidoras por chorro de aire.- Se utilizan con gran profusión en la industria de fabricación de pulpa y papel, y en los sistemas de combustión de RDF.

La distribución lateral del combustible, mediante espitas dispuestas en toda la anchura del hogar, permite una entrega de combustible bastante uniforme sobre la parrilla.

La distribución longitudinal se consigue modificando la presión del aire impulsado, que barre el suelo de la artesa.

Parrillas sinfín.- En la actualidad, los hogares mecánicos que queman RDF utilizan parrillas móviles que se desplazan desde la parte posterior del hogar hacia la frontal, en la dirección de

la distribución del combustible. Los parámetros de diseño de una unidad se presentan en la Tabla XXVIII.8.

Tabla XXVIII.8.- Criterios de diseño de la parrilla (unidades inglesas)

Parámetros	*Unidades*	*RDF*	*Madera*
Liberación calor parrilla	10^6 *Btu/ft²h*	*0,75*	*1,1*
Aporte por ft de ancho de parrilla	10^6 *Btu/h*	*15,5*	*29*
Combustible por in de ancho distribuidor	*lb/h*	*450*	*1000*
Ancho alimentación	*% ancho parrilla*	*45-50*	*45-50*
Velocidad parrilla	*ft/h*	*25*	*N/A*

Bajo la parrilla se utiliza una única caja de $aire_{primario}$.

- Un problema que se plantea en los hogares mecánicos de combustión en masa, es que la parte frontal cuenta con un gran volumen de combustible que se quema lenta y progresivamente en su desplazamiento sobre la parrilla, se reduce a un pequeño volumen de ceniza cuando llega a la parte posterior del hogar

- Para un hogar mecánico de RDF hay que mantener un lecho de ceniza uniforme de 8"÷10"= (0,2÷ 0,25 m), sobre toda la parrilla; con este espesor se minimiza la cantidad de materiales extraños, se rebaja la temperatura de la parrilla, se reducen los desgastes y se incrementa la vida de la misma.

- Otro problema radica en la acumulación de Al fundido, siendo la mejor solución para evitarlo, su retirada previa en el flujo de combustible. Si ésto no es posible, se puede mantener un espesor del lecho de ceniza adecuado, que provoque la solidificación del Al sobre él, en lugar de hacerlo sobre la parrilla.

La combustión en lechos fluidificados, tanto circulantes como burbujeantes, también se ha considerado con vistas a la combustión de RDF.

- En lechos fluidificados circulantes con hogares a alta presión, la alimentación compresible del RDF constituye un problema

- En lechos fluidificados burbujeantes, el sistema de alimentación podría ser el mismo que en un hogar mecánico

Cuando se quema carbón, la ventaja de un lecho fluido radica en la captura, dentro del baño, del SO_2 formado; sin embargo, la captura del HCl en el baño no se puede realizar para ciertos niveles de eliminación, por lo que se hace necesario un depurador final.

Un lecho fluidificado puede lograr fácilmente emisiones de NO_x menores y, dadas las exigencias de emisión cada vez más restrictivas, la combustión en lecho fluido puede llegar a constituir una alternativa para quemar los RDF.

DISEÑO DEL HOGAR INFERIOR.- Los primeros diseños de hogar inferior de las calderas que quemaban RDF se basaban en la tecnología utilizada para las calderas que quemaban madera, en la que se incluían:

- Sistemas de aire$_{secundario}$ dotados con múltiples toberas de pequeño diámetro, diseñadas para suministrar del 25÷30% del total del aire$_{comburente}$

- Hogares con paredes rectas

- Sistemas de inyección del combustible

y cuyo resultado fue una eficiencia de la combustión menor de la prevista, debido a la inadecuada turbulencia de la mezcla de combustible y comburente en el interior del hogar.

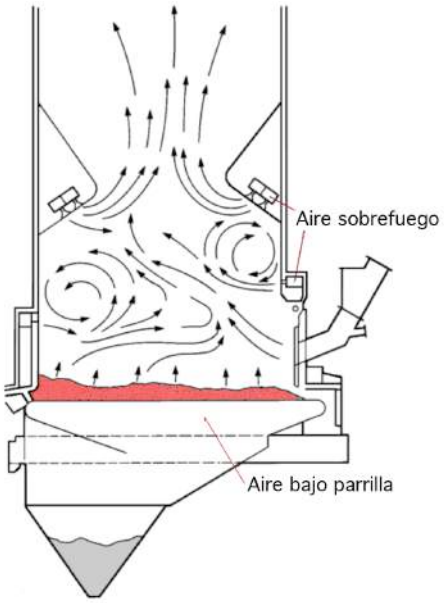


Fig XXVIII.24.- Hogar inferior
Zona de combustión controlada

Las unidades actuales para quemar RDF se diseñan con un número de toberas menor y de diámetro mayor, para suministrar el *aire$_{comburente}$* por encima del nivel del fuego (OFA), previstas además para el 50% del suministro de aire total y operando con el 40%.

También se ha adoptado para la combustión de RDF un diseño de hogar inferior con zona de combustión controlada (CCZ) (1970) que, en principio, se desarrolló para la combustión de madera con humedad muy alta, y que consiste en un hogar inferior con dos bóvedas idénticas, en las que se insertan las toberas de *aire$_{secundario}$*, Fig XXVIII.24; este diseño para aplicaciones de RDF sin sistema de reinyección de combustible, alcanzó menores pérdidas por $C_{inquemado}$ que los primitivos diseños, que necesitaban siempre la utilización de un sistema de reinyección.

Temperatura de los humos a la salida del hogar.- Al comienzo apenas existían datos sobre la combustión de los RDF, para poder predecir con exactitud la relación existente entre la superficie del hogar y la temperatura de salida de los humos. Dado el incremento observado en el poder calorífico de los RDF, a consecuencia de las variaciones en la composición de la basura bruta y del desarrollo de equipos de procesado mucho más eficientes, el tamaño de los hogares de tercera generación se ha incrementado para así alcanzar las temperaturas de humos previstas a la salida del hogar. La profundidad y anchura del hogar vienen determinadas por el tamaño de la parrilla del hogar mecánico, y se ha incrementado la altura del hogar para conseguir las altas temperaturas de los humos.

Sistemas de manipulación de ceniza.- La mayoría de los materiales no combustibles se retiran antes de que la caldera se alimente con el RDF, en especial los metales ferrosos y el Al, que pueden causar problemas cuando alcanzan la parrilla del hogar mecánico.

Los materiales no combustibles, y la mayor parte de la ceniza procedente de la combustión, se recogen en la parrilla móvil del hogar mecánico y se descargan por la parte frontal, en un transportador mecánico de cadena de tipo sumergido, Fig XXVIII.25, que consta de una artesa llena de agua en un extremo y seca en el otro, dotada de dos cadenas sinfín con paletas conectadas entre ellas. Las cadenas se mueven mediante un accionamiento a velocidad variable, para así manipular diversos tipos de ceniza.

El cabezal de retorno del transportador puede estar por encima del nivel de agua o sumergido; la ceniza procedente del conducto de descarga del hogar mecánico cae en el extremo sumergido del transportador de cadena; el agua absorbe el impacto de las piezas grandes, apaga la ceniza y facilita un cierre estanco a gases con el conducto de descarga del hogar mecánico.

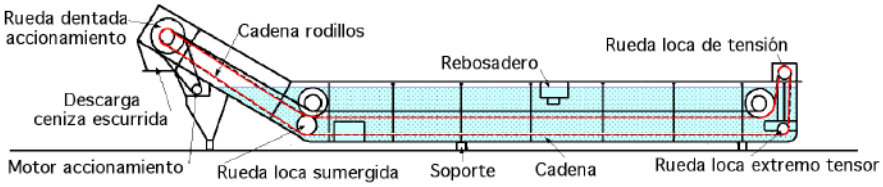


Fig XXVIII.25.- Transportador de cadena sumergido para ceniza de hogar mecánico con RDF

La ceniza residual se transporta desde la artesa llena de agua hacia una sección inclinada; la ceniza pierde el agua, se descarga en un silo de almacenamiento, y de ahí a un camión. Como el transportador de cadena sumergido emplea una acción de arrastre, no se utiliza en unidades que queman en masa, por los problemas de arrastre de grandes piezas no combustibles hacia la sección inclinada. La ceniza fina de la tolva de caldera, y la ceniza volante en polvo de la caldera, economizador y calentador de aire, y el polvo de las tolvas de limpiadores, filtros de saco o precipitadores, se manipulan de igual forma que en las calderas de combustión en masa.

Readaptaciones para RDF.- La mayoría de las calderas para quemar RDF, son instalaciones nuevas; sin embargo es posible readaptar o modernizar calderas existentes para convertirlas en calderas para RDF, siempre que se hayan diseñado para combustibles tipo madera o carbón.

La principal modificación afecta al aumento del tamaño del hogar, para lograr un volumen de hogar adecuado para la combustión de RDF. El volumen mayor se obtiene mediante la retirada de la parrilla y prolongando las paredes membrana del hogar, Fig XXVIII.26, que se protege de la corrosión mediante un revestimiento o tubos bimetálicos de Inconel.

Otras modificaciones de las partes a presión afectan a:

- La conversión del sobrecalentador en un diseño en contracorriente, a la vez que se introducen metales aptos para la protección contra corrosión

- La modificación de las superficies de caldera, economizador y calentador de aire, para conseguir una

adecuada distribución de las superficies termointercambiadoras y cumplimentar los estándares de velocidades, espaciado de tubos, etc., que se requieren para las basuras

- La instalación de una superficie de pantalla, para rebajar la temperatura de los humos que entran en el sobrecalentador

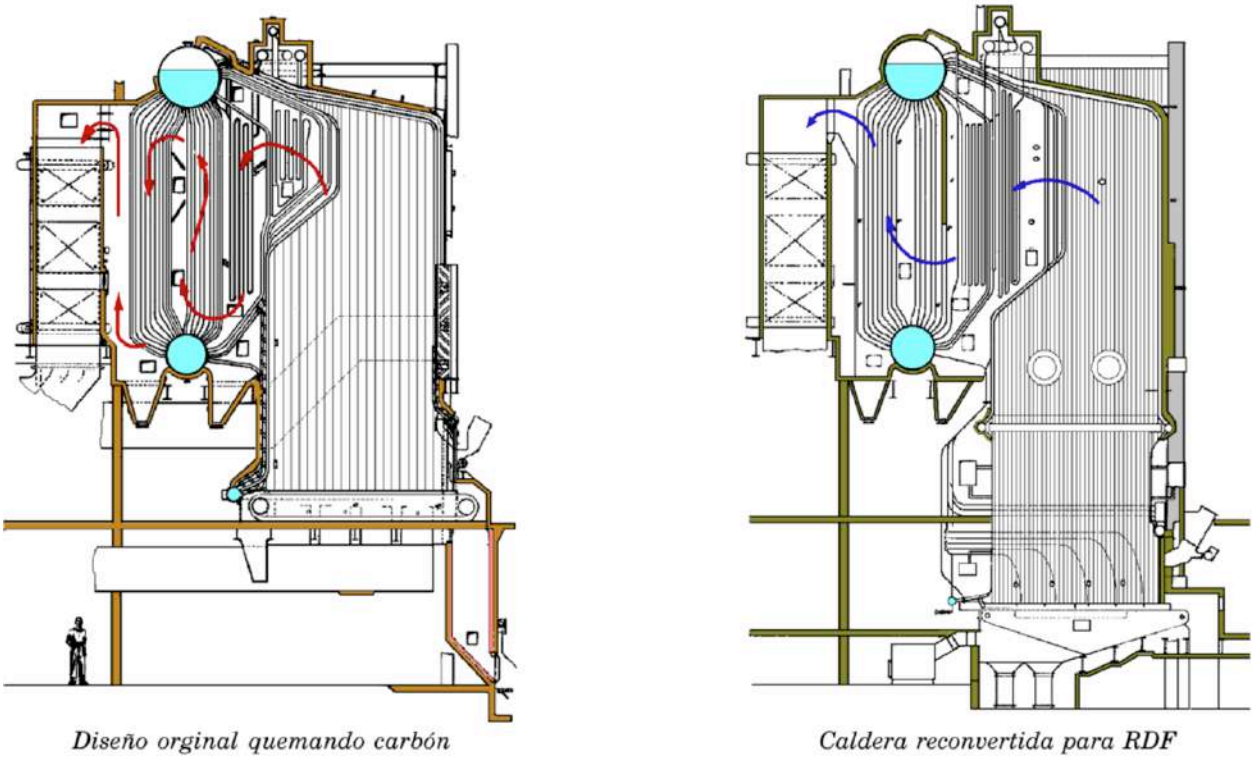


Fig XXVIII.26.- Readaptación de una caldera que quemaba carbón, en otra para quemar RDF

DISEÑO DEL SOBRECALENTADOR.- El diseño del sobrecalentador, con protección contra la corrosión, es fundamental para conseguir temperaturas del orden de 830ºF (443ºC), y presiones de vapor de 900 psig (63,1 bar) o más; este aumento supone un 50% en la presión y 80ºF (44ºC) en la temperatura, con relación a los diseños convencionales de calderas que queman basuras, lo que se traduce en una notable mejora en la eficiencia del ciclo.

La corrosión del sobrecalentador es función de:

- La temperatura y velocidad de los humos

- El espaciado entre tubos

- La temperatura del metal tubular y punto metalúrgico del tubo

- El equipo de limpieza de ceniza

Un sobrecalentador con:

- Menor temperatura de vapor, diseñado con algunos de estos criterios, puede experimentar una rápida corrosión

- Una temperatura de los humos baja a la salida del hogar, no asegura una larga vida al sobrecalentador

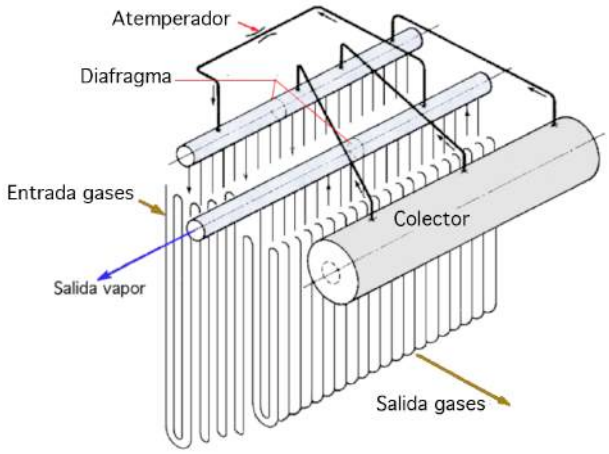


Fig XXVIII.27.- Sobrecalentador de flujos cruzados

Para obtener unas características operativas satisfactorias, es necesario tener en cuenta que un sobrecalentador diseñado con flujos en paralelo, tiene las condiciones más frías del vapor expuestas a las temperaturas más elevadas de los humos, y viceversa, por lo que hay que utilizar el material Incoloy en las secciones correspondientes a las temperaturas más altas del metal tubular y el acero al C en las secciones con menor temperatura tubular, Fig XXVIII.27

El sobrecalentador se diseña para minimizar el ensuciamiento y la erosión debida a las altas velocidades de los humos. La máxima velocidad de diseño es de 30 ft/s (9 m/s), aunque en la práctica se sitúa entre $10 \div 15$ ft/s = $(3 \div 4{,}6$ m/s).

El espaciado mínimo lateral, entre tubos del sobrecalentador, es de 6 in (152 mm).

DISEÑO DE LA CALDERA.- El diseño de los sistemas correspondientes al hogar inferior, de las parrillas y alimentadores para basuras es, en general, muy distinto para calderas que queman en masa y para calderas que queman RDF. Los requisitos de diseño para el hogar superior, superficie generadora de vapor, economizador, equipos auxiliares, (quemadores y equipo de limpieza de ceniza), son los mismos, para calderas de combustión en masa y para calderas RDF.

Diseño del hogar superior.- El hogar superior se dimensiona para tener una superficie de transferencia de calor adecuada, a fin de reducir a un nivel aceptable, la temperatura de los humos que entran en el sobrecalentador, minimizando el ensuciamiento del sobrecalentador y manteniendo bajas temperaturas del metal tubular para minorar la corrosión.

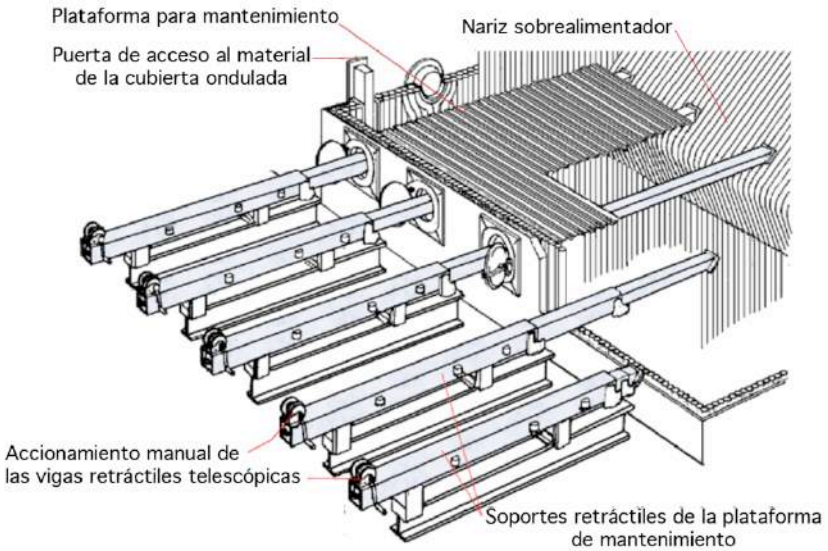


Fig XXVIII.28.- Plataforma de mantenimiento del hogar superior

Para completar la combustión del combustible en el hogar y para minimizar las emisiones de CO, se requiere de un cierto volumen de hogar, comprendido desde la cota en la que todo el $aire_{com-burente}$ ha entrado en el hogar (corresponde al punto más elevado de $aire_{secundario}$), hasta el punto en el que los humos entran en la primera superficie termointercambiadora de convección que corresponde al extremo de la bóveda del hogar, en la parte inferior del sobrecalentador, siendo el mismo para calderas que queman en masa, como para calderas que queman (RDF).

El hogar debe tener la suficiente superficie termointercambiadora que permita rebajar la temperatura de los humos a la entrada al $\begin{cases} \text{- } sobrecalentador\ a\ 1600ºF\ (870ºC) \\ \text{- } banco\ de\ caldera\ a\ 1400ºF\ (760ºC) \end{cases}$, a fin de reducir el ensuciamiento en la primera sección de convección, bien sea el sobrecalentador o el banco de caldera.

El tamaño del hogar $\begin{cases} \text{- } afecta\ al\ volumen\ en\ calderas\ de\ pequeña\ capacidad \\ \text{- } limita\ la\ temperatura\ en\ calderas\ de\ mayor\ capacidad \end{cases}$

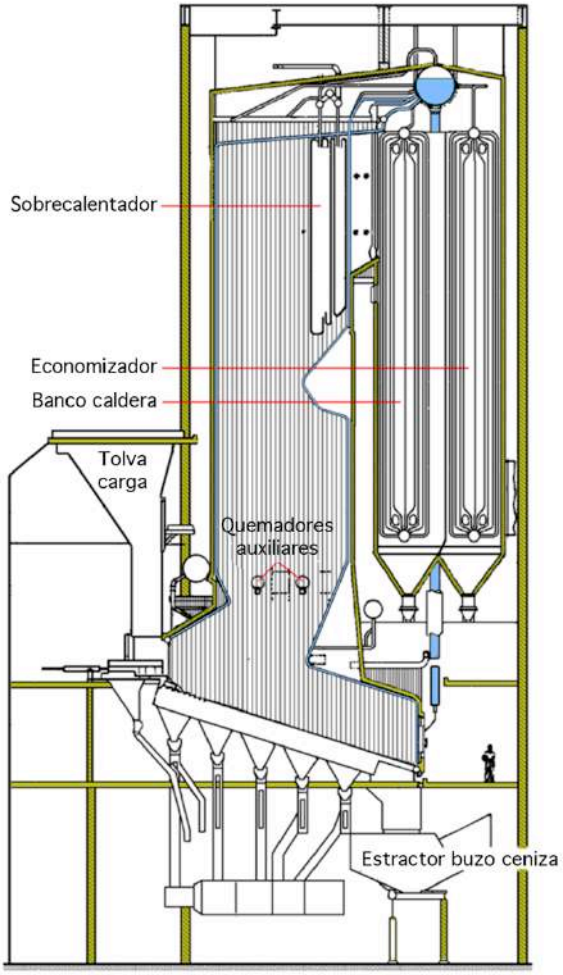


Fig XXVIII.29.- Unidad para quemar basuras con 1 calderín y un economizador de largo recorrido vertical

Banco de generación de vapor.- Las calderas de basuras utilizan diseños de uno o dos calderines.

- En el diseño de dos calderines existen un calderín de vapor (superior) y un calderín inferior, conectados entre sí por medio de los tubos de generación de vapor del banco de la caldera.

- En el diseño de un calderín, éste se coloca fuera del flujo de humos.

Los tubos del banco de generación de vapor se componen de módulos ensamblados en taller, que pueden tener un diseño con largo recorrido vertical, Fig XXVIII.29 o un diseño de flujo cruzado vertical. El espaciado lateral mínimo suele ser de 5" (127 mm), tanto en el diseño de dos calderines como en los módulos del banco de generación de vapor que se utilizan en el diseño de un calderín.

La velocidad máxima (de diseño) de los humos se establece en 30 ft/s (9,1 m/s)

Economizador.- El economizador puede ser de largo recorrido vertical o de flujo cruzado horizontal. El espaciado lateral del economizador nunca es inferior a 4" (102 mm).

La velocidad máxima de los humos es de $\begin{cases} 45\ ft/s \\ 13{,}7\ m/s \end{cases}$

Calentadores de aire.- Se utilizan para:

- Suministrar aire caliente con el fin de ayudar a secar y a encender la basura sobre la parrilla

- Incrementar la eficiencia térmica, cuando las altas temperaturas del agua de alimentación evitan rebajar las temperaturas de salida de la unidad, por medio de economizadores

Las unidades que queman RDF usan calentadores de aire para calentar el $aire_{comburente}$ entre $300 \div 350^{\circ}F = (149 \div 177^{\circ}C)$; pueden ser calentadores tubulares (recuperativos) y regenerativos, cuya disposición tiene que minimizar la posible corrosión en la zona de bajas temperaturas (extremo frío).

Debido a las fugas internas de aire y a su potencial ensuciamiento, los calentadores de los tipos regenerativos se sitúan a la salida de los precipitadores electrostáticos, en donde los humos están relativamente limpios.

Los precalentadores de aire por serpentines de vapor se sitúan a la entrada de aire, precalientan el aire ambiente y mantienen la temperatura por encima de los puntos ácidos de rocío.

Equipo de limpieza de ceniza.- Para mantener la efectividad de las superficies termointercambiadoras de convección y prevenir el atasco de los pasos de humos, es necesario eliminar la ceniza y los depósitos de escoria de las superficies externas de todos los tubos, mediante sopladores de vapor o de aire comprimido, prefiriéndose el vapor por su mayor densidad y por su mejor capacidad de limpieza.

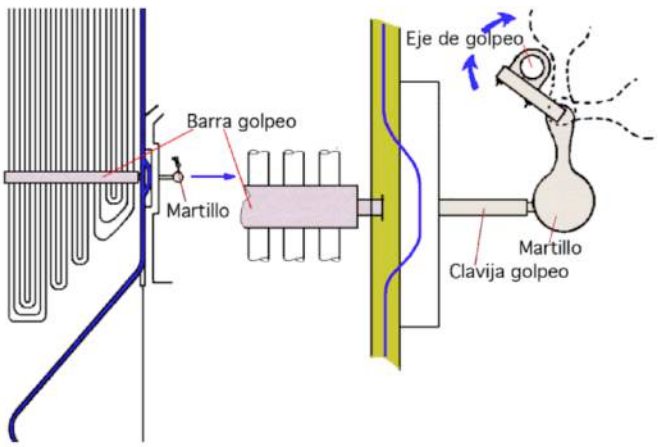


Fig XXVIII.30.- Sistema de golpeo mecánico para limpieza de sobrecalentadores

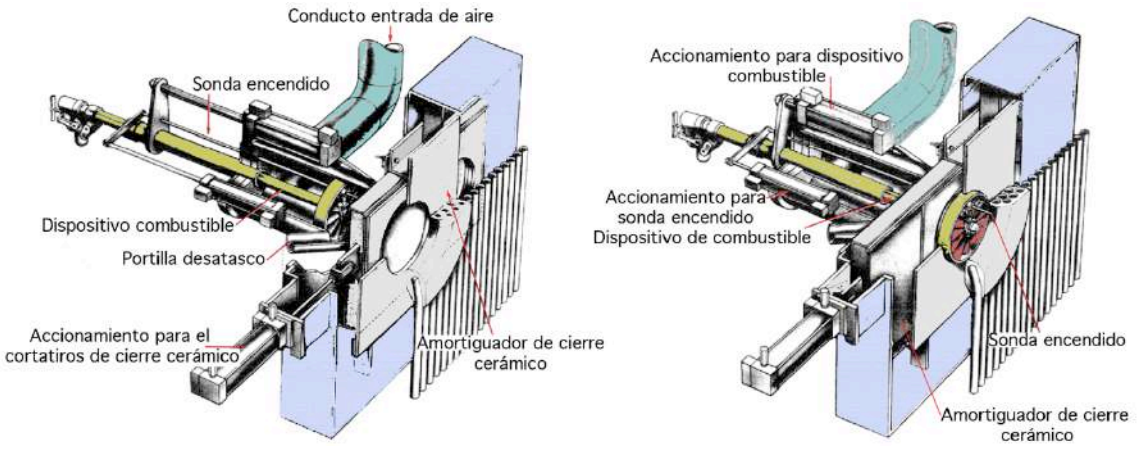
Para complementar el sistema de los sopladores, se puede instalar un sistema de golpeadores mecánicos, Fig XXVIII.30.

En este sistema, un determinado número de martillos golpea unos pernos con el objetivo de retirar la mayor parte de la ceniza, cuando todavía conforma sólo una ligera capa sobre los tubos, para protegerlos de una potencial corrosión; este sistema no elimina los sopladores, pero reduce el número de ciclos de soplado requeridos para mantener la limpieza.

Quemadores auxiliares de aporte.- Se utilizan quemadores de combustible auxiliar para mantener la temperatura del hogar durante $\begin{cases} \text{- la puesta y retirada de servicio} \\ \text{- las condiciones transitorias de parámetros fuera de diseño} \end{cases}$,

ya que una operación a bajas temperaturas del hogar puede dar lugar a una destrucción de los compuestos volátiles orgánicos incompleta.

En la mayoría de los casos, los quemadores de combustible auxiliar (aceite o gas) están diseñados sólo para un aporte de calor equivalente a un 25÷30 % del correspondiente al máximo de la caldera.



Posición fuera de servicio *Posición en servicio*

Quemador retraido y cortatiros cerámico cerrado *Quemador en posición de quemar*

Fig XXVIII.31.- Quemador de aporte auxiliar (AIB)

Cuando el quemador que quema aceite o gas se encuentra fuera de servicio, requiere de un flujo de aire que lo refrigere, como medida de protección contra su recalentamiento; ésto representa una pérdida de eficiencia y como estos quemadores auxiliares se usan con muy poca frecuencia, para el quemador auxiliar de aporte (AIB) destinado a calderas de basuras se utiliza un diseño especial, como un quemador retráctil, que se inserta en el hogar cuando se va a utilizar y que se retira cuando tiene que estar fuera de servicio. También se cuenta con un bloque móvil de refractario, que cuando el quemador está fuera de servicio, facilita protección contra la radiación del hogar.

Con el quemador en servicio, este bloque refractario se desplaza hacia un lado quedando el quemador insertado a través de un orificio practicado en el mismo, Fig XXVIII.31.

XXVIII.4.- EQUIPO DE CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Los distintos combustibles de calderas tienen componentes específicos propios, como el S, produciendo emisiones de contaminación atmosférica que exigen diseños de calderas y equipos de control de contaminación especiales. Un carbón alto en S es bastante homogéneo, y lo seguirá siendo en el futuro; sin embargo, la basura es un combustible heterogéneo, que puede cambiar incluso de día en día.

Prácticamente, cada componente de un combustible que puede convertirse en un indeseable

contaminante atmosférico, está presente en la basura. Al principio (1980), los únicos requisitos sobre emisiones se concretaban en las emisiones de partículas sólidas, NO_x y SO_2.

El sistema de combustión (relativamente frío) de las calderas para basuras y el contenido generalmente bajo de nitrógeno en el combustible, son generadores de bajas emisiones de NO_x; también son muy bajos los niveles de S en las basuras; por ello, las primitivas calderas para basuras estaban equipadas sólo con un precipitador electrostático (ESP) para control de partículas.

Tabla XXVIII.9.- Emisiones permisibles en chimeneas (1990)

Contaminante	*Concentración de la emisión*		*Emisiones*
NO_x	*ppmdv*	*200 a 350*	*Sin incluir tecnología de control de los NO_x*
CO	*ppmdv*	*20 a 100*	
Compuestos orgánicos volátiles (VOC)	*ppmdv*	*< 10*	
SO_2	*ppmdv*	*< 35*	*Con eficiencia de control final 70-90 %*
HCl	*ppmdv*	*< 20*	*Con eficiencia de control final 90-98 %*
Partículas	*g/DSCF*	*< 0,01*	
PCDD / PCDF	*Ng/m³N*	*< 10*	*Totales de dioxinas y furanos*
ppmdv = partes por millón en volumen seco			
DSCF = pie cúbico estçandar en seco			
PCDD = dibenzoparadioxina policlorada ; PCDF = dibenzofurano policlorado			

Conforme se fueron poniendo en servicio más unidades y se fueron obteniendo más datos de emisiones atmosféricas, se fueron aplicando nuevos requisitos sobre emisiones.

En USA, los objetivos de control que se señalaron por las agencias medioambientales fueron:

- *los hidrocloruros*
- *las dioxinas y furanos*
- *una larga lista de metales pesados*

Los *depuradores en seco*, que se utilizaron durante años para controlar las emisiones de SO_2 procedentes de unidades que quemaban carbón, se mostraron efectivos en el control de las emisiones de ácido clorhídrico (HCl), dioxinas, furanos y metales pesados procedente de las unidades que queman basuras. Con su empleo se produjo una escisión en el sistema de recogida de partículas, en precipitadores electrostáticos (ESP) y en filtros de tela, en los que la capa de ceniza y caliza que se recoge en los sacos, mejora la utilización del absorbente para la eliminación del SO_2 y del HCl.

El sistema preferido hoy día, en casi todas las calderas de basuras, es la combinación de depurador en seco y filtro de tela.

En algunas calderas de RDF se utilizaron sistemas de inyección de amoniaco o urea, y se alcanzaron reducciones de las emisiones de NO_x del orden del 40%; esta tecnología de control conocida como reducción selectiva no catalítica (SNCR), se aceptó rápidamente por las agencias medioambientales como la mejor tecnología disponible de control (BACT).

En ciertas áreas geográficas no afectadas por emisiones de NO_x se han evaluado sistemas de reducción selectiva catalítica (SCR) para alcanzar incluso un mayor control de los NO_x, hasta un 90%, en calderas de combustibles fósiles. Como los catalizadores se pueden envenenar con mucha facilidad por una multitud de sustancias, todas ellas presentes en las basuras en distinta concentración, se pueden hacer menos efectivos.

Los requisitos de emisiones de CO se han llevado a niveles más bajos, combinando los siguientes puntos:

- *Mejorando el sistema de aire$_{secundario}$*

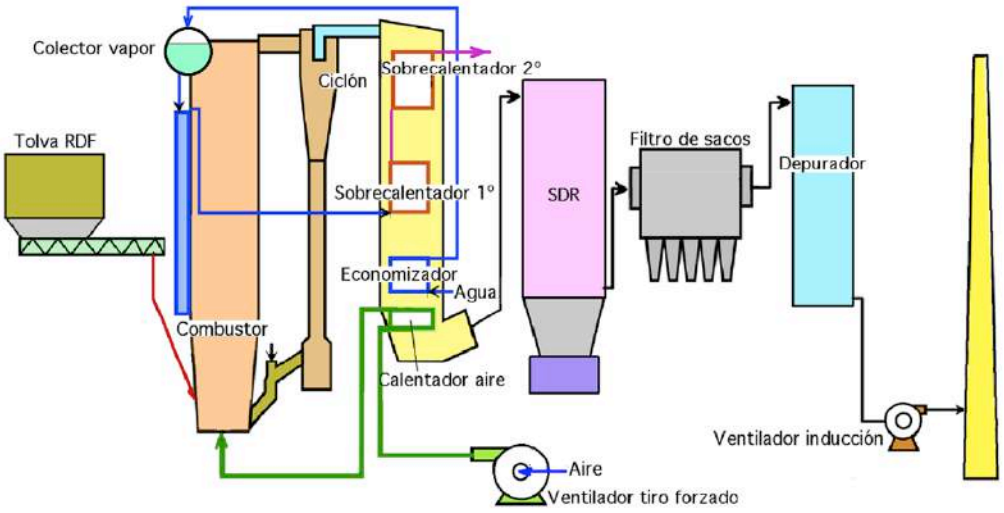


Fig XXVIII.32.- Esquema de caldera de cogeneración

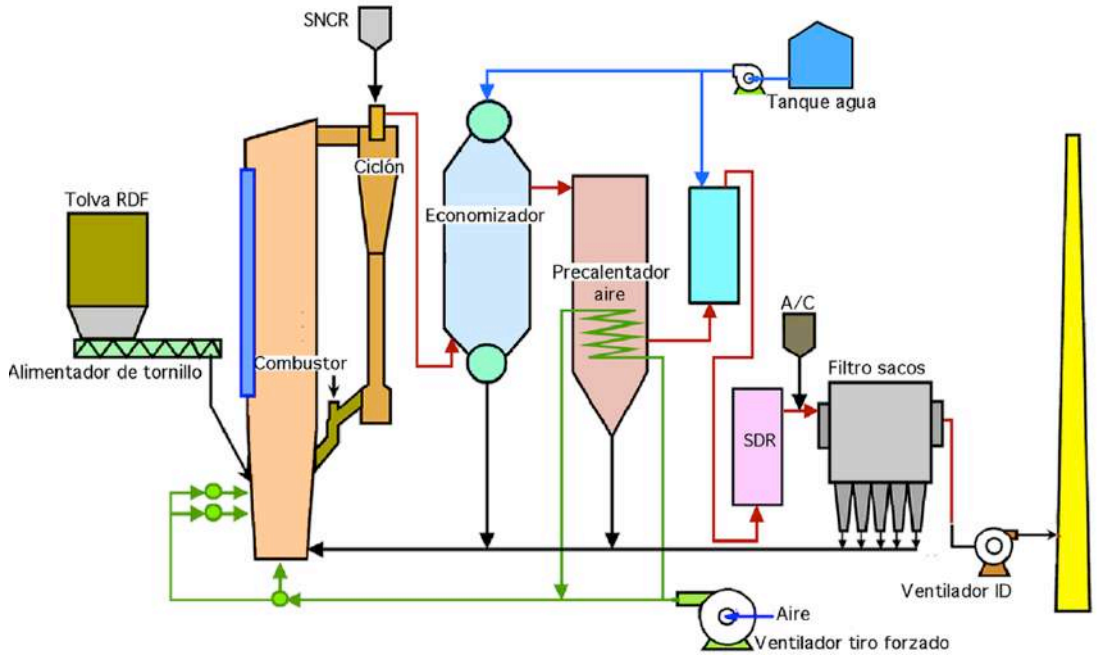


Fig XXVIII.33.- Esquema de caldera de agua caliente

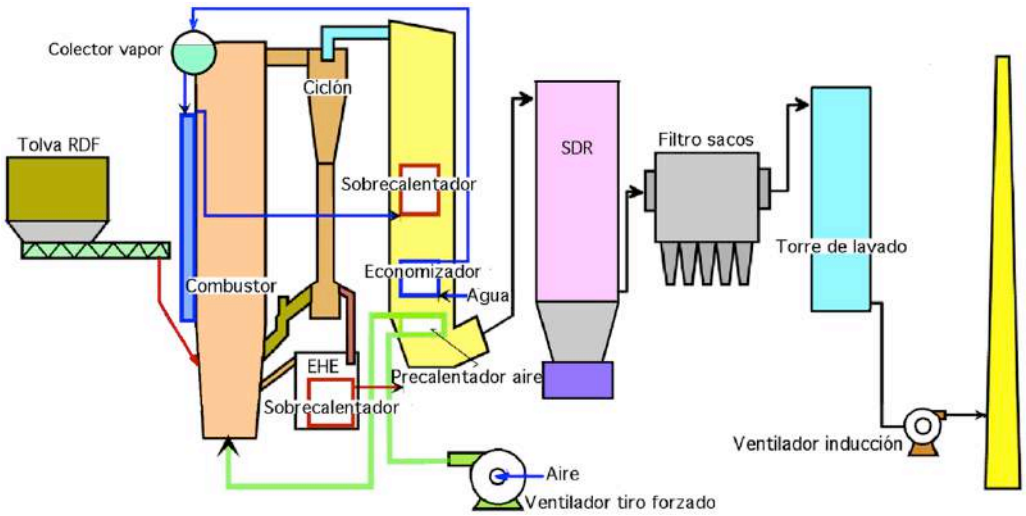


Fig XXVIII.34.- Esquema de RDF, CFBC. La caldera tiene intercambiadores externos al final del sobrecalentador En este sistema se adopta un aparato de circulación de partículas no mecánico

- Un mayor control del aire$_{primario}$ bajo la parrilla (más compartimentos de aire controlados individualmente)

- Sistemas mejorados de control de la combustión

- Mayores volúmenes de hogar

- Entrenamiento de operadores

Las emisiones atmosféricas procedentes de calderas que queman basuras están reguladas muy estrechamente, al igual que las de cualquier otro sistema de combustión.

ANEXO

CENTRAL PARA LA INCINERACIÓN DE RESIDUOS BASURA (RDF) Y LODOS RV- LENZING DE 110 MW_t (CFB)

La incineradora RV-Lenzing es la primera planta en Europa basada en la tecnología CFB, que funciona con combustibles basura (RDF) exclusivamente. Las experiencias de su funcionamiento demuestran que esta tecnología puede manejar una amplia gama de combustibles con poder calorífico del orden de 6,5 a 31 MJ/kg .

Principalmente consta de:

- Instalaciones de entrega y preparación del combustible (trituradoras, tamizadoras, separadores de metal)

- Silos de almacenamiento intermedio para los combustibles pretratados (capacidad para 4 días de operación)

- Sistema de combustión en caldera

- Limpieza de humos (filtro de sacos, depuradores, convertidor catalítico)

- Tratamiento térmico de los residuos de la ceniza

- Tratamiento de aguas residuales

La caldera y la instalación de limpieza de humos van instalados dentro de la sala de calderas existente, mientras que las instalaciones de entrega y tratamiento previo están situadas a unos 300 m. El combustible se transporta desde los silos de almacenamiento intermedio a la sala de calderas mediante un transportador tubular.

Combustibles.- La planta funciona sólo con materiales de desecho sin ningún otro combustible complementario como el carbón o aceite; los materiales de desecho pueden ser:

- Residuos procedentes del tratamiento biológico mecánico de basuras municipales e industriales con un poder calorífico relativamente alto, que no se pueden reciclar con eficacia

- Material de embalaje clasificado y pretratado mecánicamente

- Madera que se ha contaminado y que no se puede reciclar

- Lodos, barros y basuras procedentes de las depuradoras de aguas residuales

- Materiales desechados procedentes del reciclaje del papel

En la práctica, algunas de estas concentraciones son muy desfavorables, especialmente la entrada de cloro.

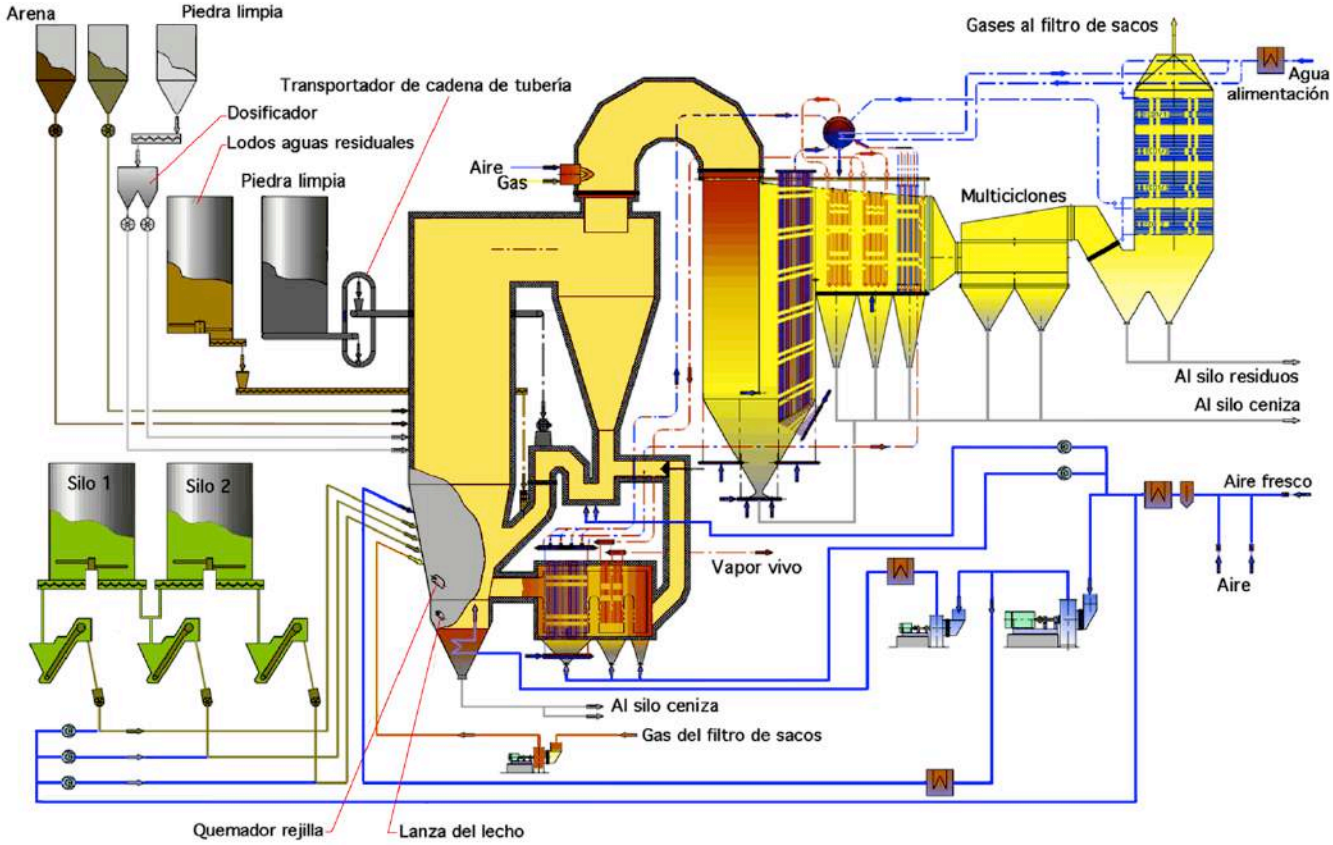


Figure XXVIII.35: Esquema de la central CFB, RV-Lenzing. La caldera incinera combustibles basura y lodos

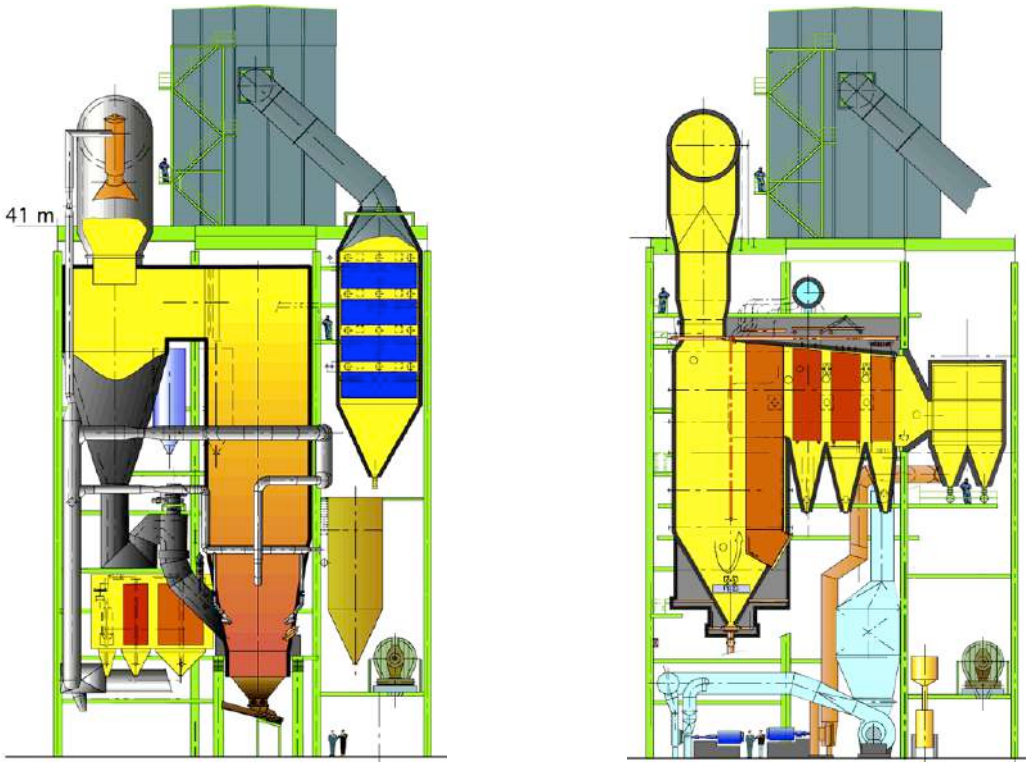


Fig XXVIII.36.- Vistas de la cámara de combustión y pasos de la caldera CFB, RV-Lenzing de 110 MWTH

Además, las altas tasas de álcalis y algunos otros materiales como el Zn contenido en los lodos de aguas residuales, favorecen la formación de cloruros metálicos, que tienen un impacto muy negativo en la calidad de la ceniza y en la caldera.

Todas las fracciones ligeras como las basuras municipales, materiales de embalaje, madera contaminada, etc., se pretratan simultáneamente según se entregan a la instalación y se utilizan como combustible principal. La mezcla se alcanza introduciendo los materiales pretratados en capas delgadas en el silo de almacenamiento intermedio.

El tornillo de descarga saca las partículas de combustible en varias capas, y efectúa una mezcla homogénea de las mismas, minimizando los cambios de calidad del combustible a la entrada de la caldera. El tamaño de grano máximo de cualquier partícula de combustible viene limitado a 100 x 100 x 20 mm, que en la práctica no se puede proporcionar, ya que algunos componentes vienen en pedazos mucho más grandes, modificando seriamente las propiedades mecánicas de la masa del combustible.

Los lodos de aguas residuales se queman sólo como combustible adicional. Según la calidad y el coeficiente de mezcla de las diversas fracciones y lodos de aguas residuales ligeros, el valor calorífico más bajo del combustible introducido en la cámara de combustión oscila entre 6,5 y 28,8 MJ/kg.

Además de los materiales de desecho citados, la planta puede funcionar también con combustibles convencionales como $\begin{cases} \text{- } gas\ natural \\ \text{- } gasolina\ y\ aceite \\ \text{- } carbón\ bituminoso\ de\ potencia\ calorífica\ entre\ 27\ y\ 31\ MJ/kg \end{cases}$

El gas natural y el aceite combustible se aplican por encima de la zona de fuegos de la caldera. El aceite se inyecta mediante lanzas, para lograr la estabilización inmediata de la combustión en lo que respecta a la temperatura del horno y capacidad del vapor, en caso de que se produzcan problemas imprevistos en el sistema de alimentación del combustible.

El carbón bituminoso se utiliza $\begin{cases} \text{- } durante\ la\ operacion\ inicial \\ \text{- } como\ combustible\ substituto \end{cases}$, si no hay combustibles de desecho cho disponibles debido a problemas en la entrega o en el tratamiento previo, y también como combustible de ayuda para los materiales de desecho con un poder calorífico extremadamente bajo. La operación mínima de la carga del gas natural y del aceite combustible solamente es posible al 50%, mientras que con el carbón bituminoso la caldera puede funcionar también a plena carga según la disponibilidad de la planta.

Considerando los diversos tipos de combustible, su potencia calorífica media oscila entre 6,5 y 31 MJ/kg. El requisito de optimizar la combustión y flexibilizar el combustible al máximo fueron las razones principales por las que se eligió, como sistema de combustión, el sistema de lecho fluidizado circulante.

Descripción técnica de la caldera CFB de la planta.- Datos técnicos principales:

- Temperatura del agua de alimentación a la entrada de la caldera, 106°C

- Vapor vivo, temperatura 500°C y presión 80 bar

- Flujo total del vapor vivo, 129 Tm / h

- La potencia máxima quemando
- *basuras proporciona 110 MW*
- *carbón es de 110 MW*
- *gas natural o aceite es de 55 MW*

- La potencia mínima con una temperatura del vapor vivo de 500°C es de 55 MW

Esta planta se ha erigido en el lugar que ocupaban tres calderas que quemaban carbón; el tamaño de la planta y la capacidad del vapor se determinaron no sólo por la cantidad de combustible de desechos disponible, sino también por las condiciones de espacio.

Tabla XXVIII.10.- Niveles de entrada del combustible

	Pot. calorífica MJ / kg	*Capacidad Tm / h*	*Densidad en bruto kg / m³*	*Flujo en volumen m³ / h*
Material de embalaje / Flujo sobre parrilla	*9 a 28*	*2 a 36*	*80 a 150*	*450*
Residuos de madera	*13*	*6 a 30*	*150*	*200*
Barro de aguas residuales	*1,5 a 2*	*4 a 18*	*900 a 1000*	*20*
Carbón bituminoso	*31*	*1 a 15*	*800*	*19*

La potencia máxima se determinó teniendo en cuenta la potencia calorífica entre 8 y 31 MJ/kg, lo que condujo a los niveles de entrada del combustible indicados en la Tabla XVII.9. Comparando respecto al carbón bituminoso, se observa los flujos extremadamente altos que, para los materiales de desecho, se tienen que manejar a la entrada por el sistema de combustible.

COMPONENTES

- Cámara de combustión y ciclón.- La cámara de combustión consiste en un cilindro que se reduce cónicamente en la parte más baja; el aire de combustión se inyecta por la parte inferior del horno al lecho de arena, casi con un 100% de cuarzo, que conforma un lecho fluidizado. Debido a la alta turbulencia los combustibles que entran en la cámara de combustión se distribuyen homogéneamente en el lecho fluidizado. El buen intercambio térmico entre el material del lecho y las partículas incandescentes del combustible, lleva a una excelente eficacia de la combustión en un campo de temperaturas relativamente bajo de 870 a 880°C.

El lecho expandido del CFB y la intensa circulación interna del material del lecho, aseguran una alta integración de los componentes ligeros del combustible, garantizando el tiempo suficiente de residencia; una determinada cantidad de material del lecho se envía al exterior del horno con el flujo de humos; un ciclón separa el humo y las partículas sólidas, que se reciclan nuevamente al interior de la cámara de combustión por su parte inferior.

El aire de la combustión adquiere en la parte más baja de la cámara de combustión diversos niveles. El 50% del aire se inyecta por los pasos de la rejilla, y el resto como $aire_{secundario}$ y $aire_{terciario}$ sobre la misma. Modificando el aire, las condiciones de la combustión se pueden ajustar a los diversos combustibles; en las temperaturas de funcionamiento de 870 a 880°C se inhibe la formación del NO_x térmico.

Los SO_2 de los humos (combinados con el S del combustible o con en el aire de combustión) se pueden capturar con piedra caliza que se dosifica en la cámara de combustión mediante un sistema de inyección neumático, por lo que el contenido de SO_2 en los humos se puede mantener por debajo de 2000 mg/Nm^3.

La cámara de combustión y el ciclón se comportan como un sistema adiabático; no existen superficies de calentamiento dentro de la cámara de combustión, por lo que para evitar efectos de corrosión y garantizar la combustión estable se utilizan temperaturas mínimas de 850°C con cualquier carga y combustible. La temperatura de la combustión se controla por un intercambiador de calor en lecho fluidificado externo; una parte del flujo del material del lecho fluidificado circulante se extrae y mediante un circuito cerrado se enfría, calentando las superficies termointercambiadoras *agua-vapor* antes de entrar de nuevo en la cámara de combustión; este flujo parcial de material de circulación del lecho se controla por una válvula de aguja refrigerada con agua.

Un aislamiento adicional exterior mantiene la temperatura superficial del metal por encima del punto de condensación de los gases para prevenir la condensación de los componentes de los gases que atraviesan el material refractario.

En el caso de un arranque en frío, la cámara de combustión y el ciclón se calientan hacia arriba por el gas o el fuel de los quemadores, junto con dos lanzas adicionales de fuel en el lecho, instalaciones que también se utilizan en la operación normal en el caso de perturbaciones en el sistema de carburante.

Cambiador de calor externo del lecho fluido.- Refrigera una fracción del flujo del material de circulación del lecho antes de realimentarlo nuevamente dentro de la cámara de combustión. El calor sensible del material del lecho se transfiere a los conductos *agua-vapor* de los bancos del sobrecalentador y del evaporador; el ajuste del flujo de material de circulación del lecho que pasa por estos intercambiadores de calor permite controlar la temperatura en la cámara de combustión.

El cambiador de calor en el lecho fluidificado externo consiste en varias cámaras alineadas de material refractario, que funcionan como pequeños lechos burbujeantes, separadas por paredes:

- Por la primera cámara, sin superficies calientes, la fracción del flujo caliente del material de circula-

ción pasa para igualar el flujo de la arena

- En la etapa siguiente, el flujo de material del lecho entra en dos cámaras refrigeradas, en donde están situadas las superficies de calentamiento agua-vapor del lecho

- Finalmente el material del lecho refrigerado se devuelve a la cámara de combustión fluidificada a través de un canal

Las cámaras se fluidifican con aire de la combustión; cada cámara va equipada con un ventilador para prevenir la interacción entre las cámaras, como puede suceder en los cambios de carga y en los cambios originados por el flujo del material de circulación.

Debido a las velocidades superficiales en las cámaras, relativamente bajas, el efecto de la erosión sobre las superficies termointercambiadoras del lecho se minimiza.

Entrada de las fracciones ligeras de combustible de basura y madera de desecho.- La fracción de combustible de basura se almacena en dos silos de acero cilíndricos con una capacidad de 200m^3. Los dispositivos y tornillos móviles de descarga distribuyen el material sobre tres líneas de alimentación del combustible.

El componente principal de cada línea de alimentación del combustible es un transportador inclinado de corredera que saca el combustible de un pequeño compartimiento de dosificación y lo transporta hasta un alimentador rotativo. El ángulo del transportador asegura el relleno de las cámaras de transporte y un flujo de combustible continuo. El control de la velocidad permite la dosificación exacta del combustible; se instala un raspador para rechazar aglomeraciones e igualar el combustible.

El combustible se introduce directamente en el lecho fluidizado del hogar por un sistema de inyección neumático; el aire del transporte neumático se toma del sistema de aire de combustión, de forma que los ventiladores de inducción separados para cada línea de alimentación del combustible, aseguran una sobrepresión constante del aire del transporte dentro de la cámara de combustión.

Los puntos de alimentación del combustible se sitúan a la misma altura que tienen las portillas de $aire_{secundario}$. En caso de que una línea de alimentación esté fuera de operación su portilla se utiliza como toma de $aire_{secundario}$, lo que asegura el suficiente enfriamiento de la portilla y previene el escape de humos fuera de la cámara de combustión.

A primera vista, este sistema de alimentación parece ser complicado, pero ofrece algunas ventajas significativas respecto a la eficacia de la combustión y las bajas emisiones de CO comparadas con los sistemas puramente mecánicos:

- El transportador de corredera garantiza un flujo de combustible constante en todos los casos de carga; debido al pequeño compartimiento de dosificación es posible compensar variaciones típicas en los tornillos de alimentación del flujo total de descarga del silo

- En el silo intermedio, el combustible se comprime por gravedad; el compartimiento de dosificación permite que el combustible se expanda y alcance su densidad natural. El alimentador siguiente, así como el sistema de inyección neumático, previenen la recompresión, por lo que el combustible se introduce en la cámara de combustión en una forma bastante mullida, que tiene un efecto positivo sobre la eficacia de la combustión

- Con el alimentador neumático de combustible, éste se inyecta en la base del lecho fluido y se distribuye uniformemente en el mismo, lo que tiene un efecto positivo sobre las fracciones ligeras del combustible

- Las reacciones de la combustión se aceleran debido al transporte de aire, ya que todas las partículas del combustible están rodeadas por el aire al entrar en el horno

- Los sistemas neumáticos ofrecen ventajas notables en lo que respecta a los requisitos de espacio alrededor de la cámara de combustión. Los sistemas mecánicos se tendrían que construir delante del combustor, conformando gran cantidad de dispositivos que están refrigerados por agua debido a la baja densidad del combustible en bruto. Las partes de dosificación mecánica en contracorriente desde un sistema neumático se pueden situar a cierta distancia de la cámara de combustión; los tubos del transporte neumático, relativamente pequeños, ahorran mucho espacio alrededor del combustor y ofrecen una alta flexibilidad

Entrada de lodos de aguas residuales.- Los lodos de aguas residuales no se alimentan con las fracciones ligeras, sino con un sistema de transporte propio; se almacenan en un silo de acero aparte, dentro del recinto de caldera y se dosifican mediante un tornillo de $\begin{cases} \textit{- descarga} \\ \textit{- embalaje} \end{cases}$, lo que asegura una distribución excelente del lodo sobre el lecho fluidizado; el flujo se controla volumétricamente variando la velocidad del tornillo de embalaje.

Entrada del carbón bituminoso.- El carbón se $\begin{cases} \textit{- almacena en un silo} \\ \textit{- descarga por un transportador} \\ \textit{- eleva por un tubo tipo elevador de cadena} \end{cases}$

Mediante un alimentador el carbón se introduce en el hogar en una zona que ofrece una distribución uniforme del combustible sobre el lecho fluidificado. Un alimentador rotatorio, con un separador de rechazo, actúa como dispositivo contra la sobrepresión de la cámara de combustión. En esta planta el carbón se considera únicamente como un combustible substituto para operaciones de corto período.

Entrada de aire.- El aire extraído en la producción de fibra viscosa de la planta Lenzing AG que está contaminado con compuestos de S, se utiliza como aire de combustión. La cantidad disponible de este tipo de aire es suficiente para cubrir casi la demanda de aire de la planta; sólo para casos con carga más elevada se puede añadir un poco de aire fresco.

Para mantener la temperatura bajo el nivel del punto de condensación todo el aire de combustión se precalienta mediante un calentador vapor/aire. Aguas abajo se toman algunos pequeños flujos de aire para la fluidificación del circuito cerrado del cambiador de calor en el lecho fluidificado exterior y del sistema neumático de inyección de combustible. El aire se comprime con ventiladores hasta la presión requerida.

La parte principal del aire de combustión se comprime por un ventilador de aire fresco.

Aguas abajo una fracción del flujo de aire se:

- Comprime en un ventilador tipo booster

- Calienta en un paso vapor/aire

- Inyecta en la cámara de combustión como $aire_{primario}$ *a través de la rejilla*

El resto se $\begin{cases} \text{- precalienta y utiliza como } aire_{secundario} \text{ y } aire_{terciario} \\ \text{- utiliza para refrigerar los sistemas de entrada del combustible} \end{cases}$

Cuando se utilizan combustibles de alto poder calorífico se hace necesaria una cierta recirculación de los humos, que se toman después del filtro de sacos, en contracorriente con el flujo de gases limpios, y se comprime con un ventilador.

Los ventiladores para el $\begin{cases} \text{- aire fresco} \\ \text{- } aire_{primario} \\ \text{- gas de recirculación} \end{cases}$ se equipan con un regulador de frecuencia

Contenido del lecho fluido y descarga de la ceniza del lecho.- El tamaño de grano del contenido del lecho puede venir influenciado cuando se introduce la arena fresca. Dependiendo del perfil de presiones del lecho de la cámara de combustión, la arena se dosifica por un cierre rotatorio y se alimenta directamente a la cámara de combustión por gravedad.

La ceniza del lecho se descarga por la parte inferior de la cámara de combustión; la rejilla garantiza la descarga de materiales gruesos como alambres, trozos de metal o piedras, mediante dos transportadores de tornillo refrigerados por agua; las partículas gruesas se separan por tamices vibratorios.

La descarga directa se realiza en dos líneas paralelas:

- El material grueso se transporta a un contenedor dispuesto exteriormente; como la cantidad de metales en la ceniza del lecho es muy alta, el material pasa al separador de metales para su reciclado

- El material fino se puede reintroducir en la cámara de combustión a través de un silo intermedio, y el sobrante se transporta neumáticamente a un silo exterior

Cámara de postcombustión.- Una vez pasado el ciclón, el flujo de humos entra en la cámara de postcombustión, que está totalmente recubierta de material refractario; un tiempo de residencia

de menos de dos segundos aguas abajo del punto de entrada al paso de aire, garantiza una temperatura mínima de 850°C. Para cumplir estas condiciones previas críticas, la cámara de postcombustión se equipa de un quemador adicional de gas, que comienza a funcionar automáticamente en caso de que la temperatura esté por debajo de 850ºC.

Caldera de recuperación de calor y flujo de humos barrido sobre las superficies de calentamiento.- El tipo de recirculación natural en la caldera de recuperación de calor se diseña teniendo en cuenta otras experiencias en plantas incineradoras, y consiste en pasos de radiación espaciados y bancos colgantes de superficies de calentamiento, que minimizarn la aglomeración de cenizas volantes y previenen reacciones químicas en los depósitos de ceniza, como la formación de CO secundario.

Pasos de radiación.- Una vez pasada la cámara de postcombustión, el flujo de humos entra en el *primer paso de radiación*, a una temperatura de 870 a 880°C, que se ha diseñado como una pared membrana sin ningún otro tipo de superficie intercambiadora interior, la cual se integra como una superficie evaporadora, debido a que la de presión de 80 bar hace que la temperatura de la superficie sea del orden de 300°C. Para limpiar las paredes membrana, en principio se instalaron dos ventiladores acústicos con el fin de obtener algunas experiencias en la limpieza de la caldera; en la actualidad, las paredes membrana se limpian mediante dos sopladores de lanza de agua, cuyo chorro se proyecta sobre la pared frontal destruyendo las capas de ceniza.

El *segundo paso de radiación* del flujo de humos se equipa con paredes aleteadas; todas las superficies de calentamiento están conectadas como evaporadores en los conductos *agua-vapor*; la limpieza superficial del hollín se realiza por ventiladores retráctiles cortos.

El humo sale del paso de radiación con temperaturas por debajo de 650°C, límite que se basa en experiencias de incineradoras de basuras y que minimiza el efecto de ensuciamiento sobre las superficies termointercambiadoras posteriores.

En el punto más bajo del primer paso de radiación, las paredes membrana conforman una tolva para descarga de las cenizas volantes.

Paso final de caldera.- Este conducto de caldera tiene un flujo de humos horizontal y consiste en paredes membrana que se integran en el sistema del evaporador de la caldera de circulación natural. Dentro de este conducto las superficies sobrecalentadoras 1/1, 1/2 y 2/1 y una parte del evaporador se disponen como bancos de tubos colgantes con los colectores en la parte más baja de los tubos. El sobrecalentador 1/1 está conectado en flujos paralelos en equicorriente para mantener la tensión térmica de estos tubos dentro de márgenes razonables, mientras que el resto de los sobrecalentadores se disponen en flujos en contracorriente.

Debido al notable contenido de Cl en los combustibles, el sobrecalentamiento en los equipos barridos por los humos en el paso de convección se limita a una temperatura por debajo de 400°C para prevenir la corrosión por el Cl. Estas superficies intercambiadoras se limpian mediante un dispositivo de golpeo mecánico; golpeando los cabezales de los bancos de tubos con impactos bien definidos, el banco de tubos entero se estimula oscilando en ciertas frecuencias que minimizan el ensuciamiento. Debido a la calidad pegajosa de la ceniza, se han instalado sopladores retráctiles cortos para limpiar las capas de ensuciamiento persistentes.

Tres tolvas en la parte inferior del extremo final de la caldera permiten descargar las cenizas volantes de cada banco de tubos. El humo abandona la caldera a una temperatura de 420°C.

Economizador.- Debido a requisitos de espacio se realiza como un paso vertical convencional con flujo de humos en contracorriente. Estos bancos de tubos deslizantes, están conectados en flujo en contracorriente excepto el banco más bajo, que está dispuesto con flujos en equicorriente para provocar la mayor evaporación posible. Como la planta no tiene ningún precalentador de aire, los bancos de tubos del economizador son las últimas superficies intercambiadoras a lo largo de la trayectoria de los humos.

Para permitir la inyección de C activado en el filtro de sacos siguiente, la temperatura de los humos que abandonan el economizador se limita a 170°C, lo que se consigue ajustando la temperatura mínima del agua de alimentación a 135°C mediante un precalentador de vapor de baja presión.

La pequeña cantidad de cenizas volantes del economizador se descarga por dos tolvas.

Multiciclones.- Además del filtro de sacos aguas abajo del economizador, va instalado un colector de polvo que consiste en 12 ciclones (en flujo paralelo) dispuestos entre el paso final de caldera y el economizador. Este multiciclón permite retirar una gran parte de las cenizas volantes del flujo de humos a la temperatura de 400°C antes de ser recontaminada por la formación de dioxinas y furanes que puede ocurrir a temperaturas más bajas.

Sistema de cenizas volantes.- Las cenizas volantes *descargadas en los pasos de radiación*, paso final de caldera y multiciclón se recogen mediante tornillos refrigerados por agua y se transportan neumáticamente a los silos de desechos para su disposición.

Las cenizas volantes *descargadas en el filtro de sacos* posiblemente se contaminarán con dioxinas, por lo que este tipo de ceniza se almacena en un silo intermedio separado y se puede tratar en una planta térmica de tratamiento de residuos.

FUNCIONAMIENTO.- La planta comenzó a funcionar en julio de 1998; excepto algunos días

quemando carbón para optimizar la planta, ésta ha funcionado la mayor parte del tiempo, exclusivamente con materiales de desecho en un intervalo de carga del 70 al 90%; los combustibles principales han sido materiales de embalaje, lodos de aguas residuales, y ocasionalmente maderas de desecho. La planta cumple con todos los estándares requeridos de parámetros de vapor y emisiones de la planta; las emisiones reales han estado, en algunos casos, por debajo de los límites prefijados.

El concepto de un CFB con una cámara de postcombustión y un paso final de caldera puede ser una combinación acertada.

Sistema de alimentación del combustible.- Los materiales de desecho tienen, en general, una densidad muy baja con respecto al carbón. Sin embargo, estos materiales se pueden comprimir apreciablemente por gravedad, lo que incrementa la tendencia a la aglomeración. Este comportamiento desfavorable del combustible depende del contenido de partículas fibrosas largas (hojas, alambres etc.) en la materia base; el tamaño máximo de cualquier partícula del combustible no debe exceder de 100 x 100 x 20 mm, cuestión que se cumple, ya que es casi imposible lo contrario, salvo cuando las cuchillas de las trituradoras han alcanzado el final de su curso de la vida, en donde aumenta el número de partículas de gran tamaño.

La masa compacta del combustible puede causar efectos indeseados dentro de los silos de almacenamiento de combustible. La situación se mejora instalando dispositivos de alivio dentro de los silos para reducir la presión dentro de la masa del combustible o modificando el equipo de descarga. Las obstrucciones temporales en los tornillos de descarga se pueden eliminar utilizando canales inclinados, más espaciosos, que proporcionan el espacio suficiente para la expansión del material comprimido.

Comportamiento de la ceniza y ensuciamiento de las superficies termointercambiadoras.- El ensuciamiento de las superficies termointercambiadoras de tubos barridas por los humos es un problema, ya que los cloruros metálicos desempeñan un importante papel.

La planta de Lenzing ha funcionado siempre con cantidades significativas de lodos de aguas residuales. Puesto que la mayor parte de éstos contienen mucho Ca, se origina una completa desulfuración del flujo de gases por los tubos en la cámara de combustión; contenidos cero de SO_2 en los humos son datos muy normales, lo que favorece la limpieza de los humos y evita la formación de sulfatos, que normalmente causan mucho menos problemas en lo que respecta al ensuciamiento de las superficies termointercambiadoras a las temperaturas de funcionamiento de un CFB, por cuanto se ha capturado todo el S; los metales Ca, Zn, y los álcalis que entraron con los lodos se combinan con el Cl formando cloruros metálicos que abandonan la cámara de combustión en estado líquido o en fase gaseosa.

Sin ningún equipo de limpieza, el área de solidificación y ensuciamiento aguas abajo, debido a las temperaturas de los humos cada vez mayores, comenzaba en el paso de radiación hacia los bancos de tubos del sobrecalentador en el paso final de caldera. Con la instalación de los sopladores de lanza de agua en los conductos de radiación estas capas de ensuciamiento se pueden eliminar con éxito.

Debido a los puntos de baja temperatura de fusión de los componentes de la ceniza (cloruros metálicos), ésta se deposita en capas, especialmente en las primeras filas de los tubos del banco, que no se pueden eliminar por el dispositivo de golpeo mecánico instalado, por lo que se hace necesaria la instalación de un equipo de sopladores en estos bancos convectivos del sobrecalentador.

Además de la instalación de los dispositivos adicionales de limpieza, es necesario atender a las diversas calidades del combustible y optimizar el proceso de la combustión; combinando convenientemente las diversas calidades del combustible, se puede reducir la formación de los componentes críticos de la ceniza.

Debido a su propiedad higroscópica, los cloruros metálicos pueden causar ensuciamiento en los bancos de tubos del economizador; si la temperatura del agua de alimentación cae por debajo de un cierto valor, la ceniza comienza a absorber humedad y se transforma en un material pegajoso, que no se puede eliminar fácilmente de los tubos del banco. Los cloruros de Zn y de Ca son responsables de efectos de ensuciamiento severos, de forma que la tasa de transferencia de calor disminuye y la temperatura de salida de los humos del economizador aumenta; manteniendo la temperatura del agua de alimentación en valores superiores a 135°C el problema se puede controlar.

Los materiales de embalaje pueden contener altos porcentajes de papel de Al, por lo que este metal se puede encontrar en las cenizas volantes en porcentajes notables; debido a la capa de óxido que se crea sobre el material, por el momento parece ser pasivo.

Si el tiempo de residencia es suficiente, las altas temperaturas y la humedad provocan una reacción lenta del aluminio elemental a óxido de aluminio, que se puede acelerar debido a la energía de reacción. El aumento de la temperatura de reacción a valores superiores a 1000°C pueden causar daños severos en algunos componentes de la planta, como el multiciclón, por lo que cualquier depósito de cenizas volantes dentro de la caldera se tiene que prever.

Corrosión por cloro.- Para prevenir la corrosión de las superficies del sobrecalentador por el Cl a alta temperatura, el sobrecalentamiento final no se dispuso en el flujo de gases del paso de convección de la caldera, sino en el cambiador de calor externo, donde el calor sensible del material de circulación del lecho se transfiere al sobrecalentador mediante superficies intercambiadoras del lecho por partículas convectivas. Sin embargo las superficies del sobrecalentador en el lecho de flujo

externo se dañan por efecto de la corrosión por el Cl, por lo que se tienen que renovar muchos de los tubos tras un relativamente breve periodo de tiempo operativo.

Los daños por erosión se detectaron en los tubos superiores de los bancos del sobrecalentador, próximos a la superficie del lecho fluido burbujeante. Los procesos de postcombustión de las partículas inquemadas del material circulante del lecho, así como las recombinaciones de los compuestos de Cl, ligados a las partículas de circulación como cloruros metálicos, suceden debido a la fluidificación con el aire; estos procesos forman una atmósfera local bastante agresiva muy cerca de los tubos del sobrecalentador.

Debido a la alta turbulencia en la superficie del lecho burbujeante, los productos de la corrosión se proyectan, por la arena móvil, sobre los tubos, erosionándolos y comenzando su corrosión. Esta interacción entre corrosión y erosión da lugar a la destrucción total de los tubos en breves periodos de tiempo.

El ácido clorhídrico gaseoso se transforma en partículas sólidas o líquidas, que se separan en el ciclón, por lo que la formación de componentes críticos de la ceniza se tiene que reducir por una combinación más conveniente de las diversas calidades del combustible, proporcionando el suficiente S para la formación máxima de sulfatos en vez de cloruros, lo que mejora el ensuciamiento de las superficies intercambiadoras barridas por los humos. Cuando los combustibles tienen un alto contenido en cloro, la temperatura del vapor vivo no debe exceder de 400°C; en cualquier caso, los bancos del sobrecalentador se deben diseñar como piezas de desgaste para un intercambio fácil y rápido.

Economizador.- El banco de tubos está construido con acero normal sin haberse detectado apenas problemas.

Paso final del sobrecalentador.- En los primeros períodos de funcionamiento, no se observó ninguna corrosión en la superficie de los tubos barridos por los gases en el paso final de caldera. Se instalaron sopladores para eliminar las capas de ceniza de los tubos, y la corrosión se detectó en la primera fila de tubos, que habían entrado en contacto directo con el chorro de vapor del soplador, ya que el vapor puede causar reacciones químicas entre el acero del tubo y los depósitos de ceniza, problema que se ha solucionado instalando tubos de aceros aleados para las primeras filas de los bancos.

REFERENCIAS CAP XXVIII.- CENTRALES QUE QUEMAN BASURAS

B&W.- STEAM: ITS GENERATION AND USE.- 40th Edition, Chapter 27.- The Babcock and Wilcox Company.- Barberton, Ohio, USA, 1992.

R.S. Rochford, S.J.Witkowski.- CONSIDERATION IN THE DESIGN OF A SHREDDED MUNICIPAL REFUSE BURNING AND HEAT RECOVERY SYSTEM.- Proceedings of the ASME Waste Processing Conference.- Chicago, 1978

D.I. Cramblitte.- AKRON RECYCLE SYSTEM IS ON-LINE.- Proceedings of the ASME Waste Processing Conference.- Washington, D.C., 1980

E.J. Campobenedetto.- CITY OF LAKELAND TO GENERATE POWER AND BURN MUNICIPAL WASTE.- Proceedings of the American Power Conference.- Chicago, 1982

J.F. Clunie.- THE INPORTANCE OF PROPER LOADING OF REFUSE FIRED BOILERS.- Proceedings of the ASME National Waste Processing Conference- Orlando, Florida, 1984

J.D. Blue, J.R. Strempek.- CONSIDERATIONS FOR THE DESIGN OS REFUSE-FIRED WATER WALL INCINERATORS.- Proceedings of the Conference on Energy from Municipal Waste, Washington, D.C., 1985

J.L. Barna, J.D. Blue, P.L. Daniel.- FURNACE WALL CORROSION IN REFUSE FIRED BOILERS.- Proceedings of the ASME National Waste Processing Conference.- Denver, Colorado, 1986

M.P. Hepp, R.M. Nethercutt, J.F. Wood.- CONSIDERATIONS IN THE DESIGN OF HIGH TEMPERATURE AND PRESSURE REFUSE FIRED POWER BOILERS.- Proceedings of the ASME National Waste Processing Conference.- Denver, Colorado, 1986

P.S. Larsen.- CONTINNOUSLY MONITORING FURNACE TEMPERATURE IN REFUSE BOILERS USING ACOUSTIC PYROMETRY.- Proceedings of the Waste Technology Conference.- Chicago, 1986

C.W. Chambliss, J.T. Hestle, R.M. McNertney.- OPERATING EXPERIENCE IS REFLECTED IN NASHVILLE'S NEW REFUSE BOILER.- Proceedings of the ASME/IEEE Power Generation Conference.- Portland, Oregon, 1986

N.H. Johnson, D.C. Reschly.- MSW AND RDF: AN EXAMINATION OF THE COMBUSTION PROCESS.- Proceedings of the ASME Joint ASME/IEEE Power Generation Conference.- Portland, Oregon, 1986

D.R. Gibbs, L.A. Kreidler.-FROM HAMILTON TO PALM BEACH: THE EVOLUTION OF DEDICATED RDF PLANTS.- Proceedings of the Processed Fuels and Material Recovery from Municipal Waste Symposium.- Washington, D.C., 1986

R.H. Herrmann.- RDF- FIRED SYSTEMS.- Proceedings of Waste-to-Energy: Exploring the Total Market.- Washington, D.C., 1987

J.A. Barsin.- INITIAL OPERATIONAL RESULTS OF A COAL-FIRED STEAM GENERATOR CONVERTED TO 100% RDF FUEL.- Proceedings of the ASME Joint Power Conference.- Miami, Florida, 1987

J.A. Barsin.- INITIAL OPERATING RESULTS OF COAL-FIRED STEAM GENERATORS CONVERTED TO 100% REFUS DERIVED FUEL.- Proceedings of the American Power Conference.-Chicago, 1988

J.D. Blue, D.R. Gibbs, M.P. Hepp.- DESIGN AND OPERATING EXPERIENCE WITH HIGH TEMPERATURE AND HIGH PRSSURE REFUSE-FIRED BOILERS.- Proceedings of the ASME National Waste Processing Conference.- Philadelphia, 1988

L. Strach.- OPERATING EXPERIENCE OF REFRACTORY LININGS IN MASS-REFUSE FIRED WATERWALL BOILERS.- Proceedings of the ASME National Waste Processing Conference.- Philadelphia, 1988

B.W. Jackson, J.E. Scheatzle, D.A. Taylor.- DESIGN TO CONVERT A THREE BOILER POWER PLANT TO RDF FIRING.- Proceedings of the Industrial Power Conference.- Houston, Texas, 1988

P.H. Schueler.- THE CASE OF DEDICATED REFUSE CONVERSION OF UTILITY BOILERS.- Proceedings of the Power-Gen Conference.- Orlando, Florida, 1988

J.D. Blue.- STANDARD HANDBOOK OF POWERPLANT ENGINEERING, Section 3, Chapter 6, McGraw-Hill, 1989

G.T. Bielawski.- RESOURCE RECOVERY IN PALM BEACH.- Proceedings of the International Conference on Municipal Waste Combustion.- Hollywood, Florida, 1989

J.D. Blue- WASTE FUELS: THEIR PREPARATION, HANDLING AND FIRING.- Standard Handbook of Powerplant Engineering, Section 3, Chapter 6, McGraw-Hill, 1989

D.R. Gibbs, L.A.Kreidler.- WHAT RDF HAS EVOLVED INTO.- Waste Age, 1989

D.E. Burnham.- THE EVOLUTION OF RDF BOILER DESIGNS THROUGH STATE-OF-THE-ART SYSTEM AT PALM BEACH.- Proceedings of the EPRI Conference on Municipal Solid Waste as a Utility Fuel.- Springfield, Massachusetts, 1989

W.C. Hanson, J.E. Scheatzle.- THE DESIGN AND START-UP OF ELK RIVER'S CONVERSION TO RDF FIRING.- Proceeding of the EPRI Conference on Municipal Solid Waste as a Utility Fuel.- Springfield, Massachusetts, 1989

R.H. Herrmann.- IMPROVEMENTS IN THE QUALITY OF RDF.- Proceedings of the EPRI Conference on Municipal Solid Waste as a Utility Fuel.- Springfield, Massachusetts, 1989

R.H. Herrmann.- PALM BEACH COUNTY WASTE PROCESSING FACILITY.- Proceedings of the GRCDA Resource Recovery Symposium.- West Palm Beach, Florida, 1990

D.R. Gibbs, M.P. Hepp.- MASS-BURN PLANT ACHIEVES HIGH AVAILABILITY, LOW EMISSIONS.- Power , 1990

E. Boman.- THE GREATER BRIDGEPORT REGIONAL RESOURCE RECOVERU PROJECT: A WASTE-TO-ENERGY REINCARNATION.- Proceedings of the ASME National Waste Processing Conference.- Long Beach, California, 1990

S.A. Scavuzzo, J.R. Strempek, L. Strach.- THE DETERMINATION OF THE THERMAL OPERATING CHARACTERISTICS IN THE FURNACE OF A REFUSE-FIRED POWER BOILER.- Proceedings of the ASME Waste Processing Conference.- Long Beach, California, 1990