XII.- COMBUSTIÓN DE GASES Y FUELÓLEOS

pfernandezdiez.es

Fuelóleos	*443*
Almacenamiento, viscosidad, análisis elemental, poder calorífico y densidad relativa	*445*
Temperatura de desprendimiento de gases, punto de inflamabilidad y temperatura de fluidez	*446*
Destilación, agua y sedimentos, residuo carbonoso, contenido en asfaltenos y perfil de la combustión	*446*
Gas natural	*447*
Transporte, almacenamiento y manipulación	*447*
Combustión de fuelóleos y gases	*448*
Quemadores	*448*
Ventiladores	*449*
Exceso de aire	*450*
Estabilidad y campo operativo de un quemador	*451*
Pulsación de quemadores	*451*
Rendimiento de la combustión	*452*
Técnicas de control de emisiones	*453*
Oxidos de nitrógeno	*453*
Aire exceso bajo	*454*
Quemadores fuera de servicio	*455*
Combustión en dos etapas	*455*
Estequiometría en zona de quemadores	*456*
Lumbreras de aire terciario y su ubicación	*456*
Quemadores	*456*
Geometría del hogar, control del gasto de aire y reciurculación de humos	*456*
Recombustión	*459*
Oxidos de azufre	*460*
Materias sólidas	*460*
Opacidad	*461*
Selección y diseño de quemadores	*462*
Quemador circular	*462*
Quemadores tipo S y tipo XCL-S para fuelóleo y gas	*462*
Quemador tipo DRB-XCL, para fuelóleo y gas	*463*
Atomizadores	*465*
Atomizadores mecánicos	*466*
Mecheros con atomizador mecánico uniflujo y con retroflujo	*466*
Mechero combinado con atomizador mecánico y con vapor	*467*
Atomizadores por vapor	*468*
Atomizador chorro-Y	*469*
Atomizador Racer	*469*
Atomizadores Chorro-T y Chorro-I	*469*
Equipamiento para gas natural	*470*
Antorchas multilanza de mezcla variable, hemisféricas y radiales	*470*
Gases subproductos	*472*
Puesta en servicio de calderas desde el estado frío	*473*
Ignitores y pilotos	*474*
Precauciones de seguridad	*477*
Referencias	*479*

XII.1.- FUELÓLEOS

El petróleo es el origen de los fuelóleos que se utilizan en la industria para la generación de vapor; antes de cualquier utilización se refina, aunque también se queman pequeñas cantidades sin que se someta a proceso previo alguno.

El refino del petróleo, en sus comienzos, consistía simplemente en un proceso de separación de las fracciones ligeras de otras más pesadas, mediante destilación fraccionada, obteniéndose formas impuras de querosenos, gasolinas, aceites lubricantes y fuelóleos. El aceite crudo que constituye el petróleo contiene, además de hidrocarburos, compuestos de S, O_2 y N_2, y trazas de Va, Ni, As y Cl; en su refino se utilizan procesos para separar impurezas, especialmente el S.

Las técnicas de refino del petróleo, son:
- *Craqueo y reformado térmicos*
- *Reformado catalítico*
- *Polimerización*
- *Isomerización*
- *Hidrogenación*

Los procesos de purificación de los productos petrolíferos incluyen:

- *El tratamiento con ácido sulfúrico*
- *El endulzado*
- *La extracción de mercaptanos*
- *El tratamiento con arcilla*
- *El tratamiento de hidrogenación*
- *La utilización de tamices moleculares, etc.*

El refino del crudo facilita una serie de productos, como los:

- *Utilizados como combustible: gasolinas, fuelóleo destilado, fuelóleo residual, fuelóleos para turbinas de gas, gases licuados, queroseno, coque de petróleo, etc*

- *Productos para otras aplicaciones que incluyen los lubricantes, parafinas, asfaltos, materias primas que alimentan la industria petroquímica, etc*

Los fuelóleos para generación de vapor son residuos de la destilación de los crudos.

Los combustibles con alto contenido de S tienen componentes pesados que plantean problemas durante la combustión, como:

- *La emisión de partículas sólidas y óxidos de S*
- *El coste de mantenimiento debido a los componentes corrosivos presentes en los gases de combustión*

Almacenamiento.- El fuelóleo se almacena sobre el suelo en tanques cilíndricos construidos con chapas de acero, para evitar pérdidas por evaporación y facilitar la protección contra incendios.

Para los aceites pesados, poco volátiles, las pérdidas en el almacenamiento son despreciables.

Productos más ligeros como las gasolinas, pueden volatilizar en tiempo caluroso lo suficiente como para provocar pérdidas apreciables; en este supuesto, se utilizan tanques con techo flotante, que eliminan la cámara de aire sobre la superficie libre del líquido, en la que se pueden acumular vapores.

Para los fuelóleos pesados, hay que limpiar periódicamente los $\begin{cases} \text{- tanques de almacenamiento} \\ \text{- sistemas de tuberías} \\ \text{- equipos de caldeo} \end{cases}$, debido a la acumulación de lodos y suciedad.

La seguridad y eficiencia en el transporte, la manipulación y combustión de un fuelóleo requieren un detallado conocimiento de sus propiedades.

Viscosidad.- Es un parámetro importante por su influencia sobre la velocidad a la que fluye por las tuberías y sobre el grado de atomización obtenido por un determinado equipo de combustión.

Análisis elemental.- Se utiliza para:

- *Determinar las necesidades de* $aire_{teórico}$ *necesario para la combustión*

- *Identificar las características de una posible emisión hacia el medio ambiente*

Poder calorífico.- Es la energía liberada por la combustión completa de la unidad de combustible. El $P_{cal.sup}$ determina la cantidad de combustible necesaria para alcanzar un determinado aporte de calor y se asume que todo el vapor de agua formado durante el proceso de combustión, condensa y enfría hasta la temperatura inicial medioambiental; el calor de vaporización del agua formada se incluye siempre en el $P_{cal.sup}$.

Una buena estimación del poder calorífico de un fuelóleo se obtiene mediante la corrección del poder calorífico superior, con la siguiente ecuación:

$$P_{cal\ sup_{aparente}} = \frac{P_{cal\ sup}\ \{100 - (A + M + S)\}}{100} + 40{,}5\ S$$

en la que: *A es el % de ceniza en peso ; M es el % de agua en peso ; S es el % de azufre en peso.*

Para el $P_{cal.inf}$ se asume que el vapor de agua no condensa ni enfría.

Densidad relativa.- Es la relación $\frac{Densidad\ del\ fuelóleo}{Densidad\ del\ agua}$; es un parámetro importante, porque el fuelóleo se compra por volumen. La escala más extendida para especificar la densidad de los fuelóleos es la de °API, confeccionada por el (American Petroleum Institute); dicha escala se basa en la

expresión:

$$^{\circ}API = \frac{141{,}5}{densidad_{relativa}\ 60/60^{\circ}F} - 131{,}5$$

en la que 60/60ºF = (16/16ºC) significa que la densidad relativa se refiere a la del aceite a 60ºF (16ºC) respecto a la del agua a 60ºF (16ºC).

Temperatura de desprendimiento de gases.- Es la menor temperatura a la que un fuelóleo volátil desprende vapores explosivos o inflamables; este parámetro es necesario para definir los requisitos adecuados para su almacenamiento y manipulación.

Punto de inflamabilidad.- Es la temperatura a la que se debe calentar el fuelóleo para que se produzcan los vapores suficientes que sean capaces de automantener una combustión continuada, cuando se encienden con una llama exterior.

Temperatura de fluidez.- Es la temperatura a la que el fuelóleo líquido inicia el flujo en condiciones estándar.

Destilación.- Es el proceso que determina la cantidad y número de fracciones distintas que contiene el fuelóleo líquido.

Agua y sedimentos.- Cuantifican los contaminantes presentes en el fuelóleo líquido; el sedimento consiste en compuestos de Ca, Na, Mg y Fe. Las impurezas de un fuelóleo proporcionan información sobre los posibles atascos que se pueden presentar en los equipos de manipulación y combustión.

Residuo carbonoso.- Es lo que queda tras calentar un fuelóleo líquido en ausencia de aire e indica la tendencia a la coquización que tiene un determinado combustible. Los ensayos que se utilizan para su determinación son el Conradson y el Ramsbottom.

Contenido en asfaltenos.- Los asfaltenos son productos compuestos hidrocarburados de elevado peso molecular y cadenas largas. El contenido en asfalteno de un producto petrolífero es el porcentaje en peso de materia libre de parafina, que es $\begin{cases} insoluble\ en\ n\text{-}heptano \\ soluble\ en\ benceno\ caliente \end{cases}$

Para que las estructuras de los asfaltenos se puedan quemar completamente, requieren elevadas temperaturas y altas energías de atomización. Un contenido alto en asfaltenos indica un potencial mayor para producir emisiones de partículas hacia el medio ambiente.

Perfil de la combustión.- El perfil de la combustión es una curva que representa la velocidad con la que arde una muestra de combustible en condiciones estándar conforme se incrementa la temperatura, e informa sobre la cantidad de combustible oxidado, no proporcionando datos absolu-

tos cinéticos o termodinámicos. Permite evaluar las características de combustión de los fuelóleos para determinar las cantidades de $aire_{exceso}$ y el tiempo de permanencia, necesarios para alcanzar una combustión completa.

XII.2.- GAS NATURAL

El gas que se encuentra en los yacimientos de petróleo, disuelto o como una cúpula gaseosa sobre su superficie libre, se denomina gas natural asociado; también se puede encontrar en yacimientos carentes de petróleo y, en este caso, se dice que es un gas natural no asociado.

El gas natural tomado directamente del yacimiento, se debe tratar convenientemente para producir gases combustibles; en principio, el gas natural se somete a un proceso de eliminación de condensados que se destinan para producir butano, propano y gasolina estabilizada; el butano y el propano se utilizan en forma de gas combustible embotellado y se distribuyen y almacenan licuados a presión y cuando se despresurizan, la expansión hace que el líquido hierva y se obtenga un combustible gaseoso.

El gas natural puede contener arena (que se separa en el yacimiento), y compuestos sulfurados gaseosos; el gas natural que contiene una excesiva cantidad de sulfuro de hidrógeno se trata mediante un proceso de desulfuración, que le elimina junto al CO_2.

Otros tratamientos adicionales eliminan los mercaptanos mediante fijación con sosa y extraen los hidrocarburos de cadena larga.

Cuando el gas natural se usa para sustituir o complementar un gas manufacturado, se le somete a un proceso que iguala o incrementa su poder calorífico con respecto al del gas manufacturado.

Transporte, almacenamiento y manipulación.- La distribución del gas natural está sujeta a limitaciones prácticas, como consecuencia de la presión requerida para su transporte. Un gasoducto de gran longitud necesita altas presiones, del orden de 1000 psig (70 atm), precisando a intervalos regulares de estaciones de bombeo para reponer las pérdidas de presión en la línea de transporte, operando siempre por razones económicas con un alto factor de carga.

La velocidad de extracción del yacimiento viene limitada por:

- Razones de conservación

- El coste de un gasoducto capaz de cubrir la demanda punta, funcionando a presión constante

Para cumplimentar las fluctuaciones de la demanda es necesario:

- Disponer de un almacenamiento local

- Complementar el suministro con gas manufacturado durante períodos breves

no resultando práctico variar el flujo de suministro para acomodarlo a las fluctuaciones en la demanda de los consumidores.

Los sistemas de almacenamiento sobre el terreno pueden ser:

- Grandes tanques, sellados generalmente con agua

- Recipientes tubulares, en paralelo con las líneas comerciales de gas natural

- El gasoducto de transporte, usado como depósito por elevación de la presión

En áreas de consumo donde existen pozos de gas, total o parcialmente agotados, se puede bombear gas a estos pozos lo que es una forma de almacenamiento subterráneo con un coste mínimo.

El gas natural en forma líquida se almacena en tanques de acero aislados, o es absorbido por una sustancia granular de la que se extrae calentándola con un gas caliente.

El gas natural está compuesto por metano y etano; el adecuado para la combustión en quemadores de centrales termoeléctricas convencionales y plantas industriales, debe tener una composición volumétrica con los siguientes valores mínimos:

70% de CH_4 ó 70% de C_3H_8 ó 25% de H_2

XII.3.- COMBUSTIÓN DE FUELÓLEOS Y GASES

QUEMADORES.- El quemador es el principal componente del equipo de combustión para fuelóleo y gas natural. En las unidades generadoras de vapor de plantas termoeléctricas convencionales y de plantas industriales, el quemador admite el combustible y el aire hacia el hogar, garantizando una combustión segura y eficiente, en particular cuando se está operando a plena potencia de la caldera.

El diseño del quemador determina: { *- Las características de la mezcla combustible-aire*; *- El tamaño y distribución de las partículas de combustible*; *- El perfil envolvente de la llama* }

La configuración del sistema de combustión comprende:

- El medio de transporte

- La medida y regulación del combustible y del aire hacia el hogar

- Los quemadores, ignitores y equipo de seguridad de la llama

Cuando se diseña un sistema de combustión y se establecen los requisitos funcionales, hay que tener en cuenta los siguientes factores:

- El régimen de alimentación de combustible y de aire, para cumplimentar la demanda de la caldera a lo largo de un determinado período operativo

- Los tipos de combustible que se van a quemar, incluyendo sus constituyentes elementales y las propiedades características de cada uno

- La eficiencia del proceso de combustión referido a cada uno de los combustibles, para minimizar la cantidad de combustible inquemado y el $aire_{exceso}$ *requerido*

- Las limitaciones impuestas sobre emisiones por las diversas legislaciones de carácter local, estatal o federal

- El tamaño físico y la complejidad del hogar y de los quemadores, para establecer el diseño más eficiente y económico

- El diseño físico de los componentes y de las propiedades de los materiales, para todo el equipo de combustión, con el fin de garantizar un servicio fiable y sin interrupciones a lo largo de prolongados períodos de tiempo

- Las normas y procedimientos de seguridad para el control de los quemadores y de la caldera, incluyendo la puesta en servicio, la retirada de servicio, los cambios de carga y las alteraciones y variaciones de combustible

El sistema de combustión se diseña para conseguir una óptima flexibilidad operativa de la unidad, teniendo en cuenta:

- La posible variación del tipo de combustible y sus propiedades

- El régimen de combustión del combustible

- Posibles combinaciones de los diversos quemadores en servicio y fuera de servicio

El control debe ser simple y directo, para asegurar una rápida respuesta frente a las variaciones de presión en la demanda.

VENTILADORES.- El $aire_{comburente}$ se proporciona a los quemadores por medio de ventiladores de tiro forzado. Para mejorar el rendimiento térmico y la eficiencia de la combustión y asegurar la estabilidad de la llama, el aire comburente se precalienta hasta una temperatura de $\begin{cases} 400 \div 600°F \\ 204 \div 316°C \end{cases}$, mediante calentadores situados en el circuito de aire, aguas abajo de los ventiladores.

Los ventiladores tienen que ser capaces de entregar la:

- Cantidad de aire adecuada para conseguir una combustión completa

- Presión necesaria para vencer las pérdidas de carga que sufre el flujo a través de los diversos componentes del sistema, como calentadores, quemadores, cortatiros de control y conductos

En la combustión, el $aire_{total}$ es el requerido para quemar teóricamente todo el combustible, más el $aire_{exceso}$ necesario para alcanzar la combustión completa.

El sistema de alimentación del combustible debe ser capaz de regular su presión y gasto hacia

los quemadores y ofrecer garantías de acuerdo con los códigos de protección contra incendios.

En aplicaciones que cuentan con múltiples quemadores, la adecuada distribución del combustible entre los distintos quemadores constituye un punto crítico para una operación segura y eficiente del sistema de combustión.

Los sistemas de tuberías y válvulas se deben diseñar con los límites permitidos de velocidad, presión absoluta y caída de presión.

Exceso de aire.- Es el aire suministrado para la combustión y refrigeración, siendo superior al requerido teóricamente para la combustión del combustible. El $aire_{exceso}$ compensa las imperfecciones propias del sistema de suministro de aire que origina una mala distribución del mismo entre los diversos quemadores de la planta.

A *plena presión,* con todos los quemadores en servicio al 100% de su capacidad, el $aire_{exceso}$ requerido para quemar gases y fuelóleos, expresado como porcentaje del total de $aire_{estequiométrico}$, se sitúa entre un $5 \div 10\%$ según sea el tipo de combustible y la técnica del sistema de combustión.

A *carga parcial* se puede operar con niveles de aire inferiores a estos valores si la eficiencia de la combustión no se modifica, la cual es función del: $\begin{cases} \text{- } CO \text{ de los inquemados presentes en la ceniza} \\ \text{- Hollín y de la emisión de partículas} \\ \text{- La opacidad en la chimenea} \end{cases}$

Mediante un diseño cuidadoso de $\begin{cases} \text{los quemadores} \\ \text{el sistema de alimentación del aire} \end{cases}$, el $aire_{exceso}$ se puede mantener en un valor muy bajo, que minimiza la pérdida de calor sensible en la chimenea.

La operación a carga parcial requiere siempre un $aire_{exceso}$ adicional.

Cuando se opera a *presión reducida*, la menor velocidad del aire a quemadores da lugar a una menor eficiencia en la mezcla *combustible-aire*.

Si a carga parcial se incrementa el $aire_{exceso}$ la turbulencia en la combustión se mejora, manteniéndose el rendimiento global de la misma; el $aire_{exceso}$ y la mejor mezcla en quemadores compensan la menor temperatura del hogar a carga parcial. En otros casos, las condiciones funcionales de la caldera a carga parcial obligan a utilizar $aire_{exceso}$ superior al normalmente requerido para dicha carga, con el fin de $\begin{cases} \text{- mantener la temperatura especificada del vapor} \\ \text{- minimizar la corrosión en el lado frío de la unidad generadora de vapor} \end{cases}$

También es necesario un $aire_{exceso}$ adicional cuando se opera con quemadores fuera de servicio, a los que hay que suministrar el suficiente aire de refrigeración con el fin de evitar que se dañen por recalentamiento.

Para comprobar la temperatura del metal y poder establecer el $aire_{exceso}$ que resulte suficiente para mantener la temperatura de los quemadores por debajo de los límites máximos admisibles, en algunos quemadores se instalan termopares.

Estabilidad y campo operativo de un quemador.- Un diseño adecuado del sistema de combustión y quemadores, permite su funcionamiento estable en todo el campo operativo.

Un *quemador estable* es aquél en el que el frente de llama permanece relativamente estacionario estando la raíz de la llama firmemente ligada a los elementos combustibles procedentes del quemador; para asegurar una combustión estable, el quemador se diseña de modo que no pueda soplar o succionar la llama a consecuencia de velocidades variables en los flujos del combustible y aire.

En las calderas se opera en un amplio campo de presiones sin tener que poner quemadores fuera de servicio, lo que reduce la necesidad de $aire_{exceso}$ con vistas a la refrigeración de los mismos.

La carga operativa del quemador se define como la relación:

$$\frac{\textit{Entrada de combustible a plena carga}}{\textit{Entrada de combustible a la menor carga parcial con la que se puede mantener una combustión estable}}$$

Las limitaciones de carga se determinan por
- *Las características del combustible*
- *La velocidad de los flujos de combustible y aire*
- *La relación de presiones del combustible a* { *plena carga* / *carga parcial*
- *La adecuación del sistema de* { *seguridad* / *vigilancia de las llamas*

Para lograr un amplio rango de cargas se dispone de un sistema automático y fiable de la supervisión de la llama:

- Cuando se queman gases, es posible llegar a relaciones de carga del orden de 10/1, ya que el gas natural es fácil de quemar y controlar

- Cuando se quema fuelóleo, la relación de carga es del orden de 5/1, dependiendo de las características del combustible, de la flexibilidad del sistema de alimentación y de la técnica de atomización; los fuel-óleos y aceites residuales son más difíciles de quemar que el gas natural

Las características de la combustión dependen de:

- La distribución de tamaños de las partículas de combustible

- Del $aire_{exceso}$

- De la turbulencia propia del quemador

Pulsación de quemadores.- Es un fenómeno asociado a la combustión del gas natural y, en menor medida, a la combustión de algunos fuelóleos; tiene lugar cuando bolsas de gas ricas en com-

bustible o en O_2, se inflaman súbitamente dentro de los límites del recinto de la llama.

La llama resultante de un quemador en pulsación se acompaña de un sonido que se conoce como ruido de fondo de la combustión; es una vibración de baja frecuencia que puede coincidir con la frecuencia natural de vibración del cerramiento del hogar, entrando en resonancia, y dando lugar a una vibración aparente en toda la caldera que, en algunos casos, puede llegar a ser violenta y persistente.

En calderas con grandes hogares, la vibración se puede atribuir algunas veces a un quemador; puede empezar o terminar súbitamente, a causa de pequeños ajustes en el flujo de aire al quemador o al apartar del servicio determinados quemadores.

El problema de la pulsación se corrige modificando la disposición física del quemador que afecte a la configuración de la mezcla combustible-aire. Se eliminan pulsaciones modificando el perfil de la garganta de los quemadores: $\begin{cases} \text{- } \textit{Corrigiendo anomalías en su aerodinámica} \\ \text{- } \textit{Modificando la boca de descarga del combustible} \end{cases}$

Existen curvas empíricas que se utilizan en el diseño de calderas, que relacionan la probabilidad de pulsación con la relación de velocidades entre el combustible y el aire del quemador.

Los problemas de pulsaciones se minimizan y se hacen menos frecuentes, con:

- *Una cuidadosa elección de la geometría del hogar*
- *La configuración del fuego en cada quemador*
- *La aerodinámica de los quemadores*

Rendimiento de la combustión.- La combustión completa tiene lugar cuando se oxidan completamente todos los elementos inflamables del combustible. En las calderas, el objetivo es alcanzar el máximo grado de eficiencia en la combustión, con el mínimo $aire_{exceso}$ posible.

El rendimiento de la combustión disminuye cuando aumenta el $aire_{exceso}$, valorándose por la pérdida de eficiencia debida a $\begin{cases} \textit{la combustión incompleta} \\ \textit{el calor sensible de los humos en chimenea} \end{cases}$

En el rendimiento de la combustión influyen una serie de factores como:

- *El* $aire_{exceso}$
- *La mezcla en el quemador*
- *Las propiedades del combustible*
- *El medio ambiente térmico del hogar*
- *El tiempo de permanencia*
- *El tamaño y distribución de las partículas de combustible*

Desde el punto de vista del rendimiento óptimo de la combustión para un determinado diseño, resultan críticas las siguientes consideraciones:

- Una cuidadosa distribución y control del gasto de combustible y de aire hacia los quemadores

- El diseño del quemador y de sus componentes, tiene que facilitar una mezcla de combustible y aire que sea lo más perfecta posible, provocando, en todo caso, una rápida combustión turbulenta

- La correcta disposición de los quemadores y la geometría del hogar, tienen que facilitar el tiempo suficiente de permanencia para completar las reacciones de oxidación con vistas a una combustión estable y automantenida

Cuando se quema fuelóleo y según sean las propiedades del combustible, las pérdidas de calor debidas al $combustible_{inquemado}$ pueden llegar a ser del orden del 0,2%, que se considera despreciable cuando se quema gas natural.

La eficiencia de la combustión con fuelóleos, se mide normalmente como:

- Emisiones de CO y de partículas sólidas
- Opacidad en chimenea

En general, se considera el intervalo de $50 \div 150$ ppm como niveles satisfactorios de CO.

XII.4.- TÉCNICAS DE CONTROL DE EMISIONES

La creciente preocupación por la contaminación atmosférica ha modificado por completo el diseño de las calderas y su sistema de combustión. La combustión de los combustibles fósiles produce emisiones a las que se han atribuido
$$\begin{cases} \textit{- La formación de la lluvia ácida} \\ \textit{- La formación de la humiebla o smog} \\ \textit{- La modificación de la capa de ozono} \\ \textit{- El efecto invernadero} \end{cases}$$

Para mitigar estos problemas se ha establecido una legislación con el fin de limitar los NO_x, las partículas en suspensión y la opacidad del penacho en la chimenea.

ÓXIDOS DE NITRÓGENO.- Durante el proceso de combustión se forman óxidos de nitrógeno, NO y NO_2 (designados como NO_x), mediante dos mecanismos que dan lugar a sendos óxidos:

- El NO_x de origen térmico procedente del aire

- El NO_x procedente del combustible

El *NO_x térmico* es el resultado de la disociación y oxidación del N_2 contenido en el $aire_{comburente}$; la velocidad y el grado de formación del *NO_x* térmico depende de la disponibilidad de O_2 durante el proceso de combustión, creciendo exponencialmente con la temperatura absoluta.

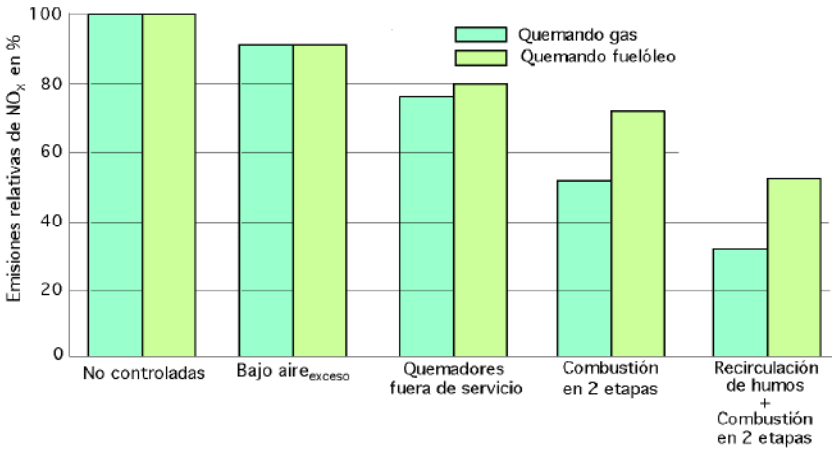

Fig XII.1.- Reducciones aproximadas en la emisión de NO_x, para quemadores de fuelóleo y gas, con diversas técnicas de control

Las reacciones de formación del *NO_x térmico* ocurren con gran rapidez, a temperaturas de combustión por encima de 2800ºF (1538ºC); en el caso de la combustión de gas natural y fuelóleos, constituyen la principal fuente de formación de los NO_x porque estos combustibles apenas tienen N_2 en su composición.

El *NO_x del combustible* es el que procede de la oxidación del N_2 que se encuentra en el combustible, como elemento componente en forma de compuestos volátiles. El método más eficaz para controlar la formación del NO_x del combustible consiste en restringir la disponibilidad de O_2 en las primeras etapas de la combustión durante el desprendimiento de volátiles del combustible.

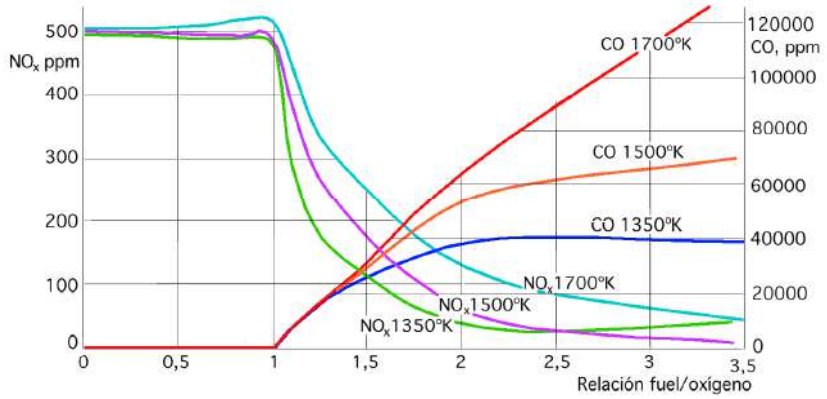

Fig XII.2.- Valores de NO_x y CO, según la relación fuel/oxígeno

Bajo aire$_{exceso}$.- Reduce de forma efectiva las emisiones de NO_x con una pequeña inversión; es un procedimiento adecuado que incrementa el rendimiento térmico restringiendo la formación de los NO_x térmicos. Si la $\begin{cases} estabilidad\ de\ los\ quemadores \\ eficiencia\ de\ la\ combustión \end{cases}$ se mantienen en niveles aceptables, la reducción del $aire_{exceso}$ puede rebajar las emisiones de NO_x en un $10 \div 20\%$, como máximo.

El éxito de este método depende de las propiedades del combustible y del cuidadoso control de

la distribución de combustible y aire a los diversos quemadores. La operatividad de las unidades puede exigir métodos de medida sofisticados en la regulación de los flujos de combustible y aire hacia los quemadores, introduciendo modificaciones en el sistema de entrega de aire que aseguren distribuciones idénticas entre los quemadores.

Quemadores fuera de servicio.- Una forma grosera de combustión en dos etapas consiste en poner algunos quemadores fuera de servicio, lo que reduce la emisión de NO_x. Cuando se cuenta con quemadores múltiples, se pueden disponer algunos en situación de fuera de servicio, por lo que las entradas y aporte a los quemadores que continúan en servicio se tienen que incrementar para mantener la carga de la caldera.

Las entradas de combustible en los quemadores en servicio, si no se modifica el flujo total de aire, dan lugar a mezclas más ricas en combustible, que limitan la disponibilidad de O_2 y, por tanto reducen a la vez el NO_x del combustible y el NO_x térmico. Al mismo tiempo los registros de aire de los quemadores (cortatiros) que están fuera de servicio se mantienen en posición abierta y de esta forma el aire sirve como un flujo de $aire_{terciario}$.

Cuando este método llega a reducciones significativas de las emisiones de NO_x se tienen:

- *Mayores niveles de CO en humos*
- *Desequilibrios de O_2 en el extremo final del lado de humos*

Cuando se trata de la combustión de fuelóleos, se puede producir un incremento en la emisión de partículas y una mayor opacidad en la chimenea.

COMBUSTIÓN EN DOS ETAPAS.- La combustión en dos etapas permite conseguir reducciones importantes en las emisiones de NO_x. El $aire_{comburente}$ se dirige a la zona del quemador en cantidades menores que las teóricamente requeridas para la combustión completa del combustible; el resto de aire se introduce a través de unas portillas de $aire_{terciario}$ sobre el nivel de fuegos.

El desvío de esta fracción de $aire_{comburente}$ que iba destinado a los quemadores, reduce la concentración de O_2 en la parte baja del hogar y limita en la misma la oxidación del N_2 del combustible. Con la introducción del resto de aire por encima del hogar, también se reduce la temperatura punta de la llama.

Mediante el sistema de combustión en dos etapas, se pueden reducir las emisiones de NO_x hasta un 50% manteniendo unas aceptables condiciones de funcionamiento.

En el diseño de un sistema de combustión en dos etapas, hay que tener en cuenta los siguientes factores:

- ***Estequiometría en la zona de quemadores***.- La fracción de $aire_{teórico}$ dirigida a los quemadores, se prefija para un adecuado dimensionado de $\begin{cases} los\ quemadores \\ las\ lumbreras\ de\ aire_{terciario} \end{cases}$. Una estequiometría para la zona de quemadores entre 0,85÷ 0,90 proporciona niveles deseados en la reducción de NO_x sin efectos adversos notables en la $\begin{cases} estabilidad\ de\ la\ combustión \\ potencia\ de\ la\ caldera \end{cases}$

- ***Lumbreras de $aire_{terciario}$.-*** Se diseñan para que este aire se mezcle con los gases en la segunda etapa de la combustión; estas lumbreras regulan el gasto y la penetración del aire para promover la mezcla tanto más cerca de las paredes, como en el centro del hogar. La eficiencia de la mezcla se debe mantener para todo el campo de $\begin{cases} cargas\ de\ la\ caldera \\ estequiometrías\ previstas\ en\ la\ zona\ de\ quemadores \end{cases}$.

Para el diseño del sistema de combustión en dos etapas, hay que mantener el $aire_{terciario}$ un tiempo suficiente entre la zona de quemadores y la zona de lumbreras de $aire_{terciario}$, complementado con el tiempo de permanencia entre las lumbreras y la salida del hogar. Las lumbreras de entrada de $aire_{terciario}$ se sitúan de forma que se optimice la $\begin{cases} redución\ de\ los\ NO_x \\ eficiencia\ de\ la\ combustión \end{cases}$ y se limite la variación de la temperatura de los humos a la salida del hogar

- ***Quemadores.-*** Deben tener la posibilidad de operar con bajos regímenes de flujos y con reducidas velocidades de aire, sin detrimento alguno en la estabilidad de la combustión. En una combustión en dos etapas, el $aire_{estequiométrico}$ en la zona de quemadores se incrementa cuando se reduce la carga, para asegurar que la velocidad del aire en los quemadores se mantenga por encima de los límites mínimos, lo que garantiza presiones diferenciales positivas en la caja de aire del hogar para cargas reducidas (potencias) del generador de vapor.

- Geometría del hogar.- Durante las etapas primera y segunda de la combustión, la geometría del hogar influye mucho en $\begin{cases} -\ la\ ubicación\ de\ los\ quemadores\ y\ llamas \\ -\ el\ tiempo\ de\ permanencia \\ -\ el\ medio\ ambiente\ térmico\ del\ recinto \end{cases}$

Un hogar de gran tamaño favorece menores niveles de NO_x porque las temperaturas de combustión son menores y los tiempos de residencia mayores.

- Control del gasto de aire.- Las lumbreras de $aire_{terciario}$ forman parte de un dispositivo que consiste en una caja de aire, separada de las cajas de aire convencionales; de esta forma el aire que va hacia las portillas de control de los NO_x se puede medir y regular, independientemente del $aire_{comburente}$ que va a los quemadores, lo que permite operar con niveles estequiométricos en el hogar inferior.

Para optimizar la combustión en el sistema de dos etapas, es necesario flexibilizar la regula-

ción de los gastos de combustible y aire en los quemadores; consecuencia de ésto es la aparición de quemadores mejorados, que adecuan la demanda en los diversos quemadores individuales, con un control más preciso del gasto de aire y de la configuración de la llama.

En los gases de combustión reductores de la parte baja del hogar, el S presente en el combustible genera con más probabilidad sulfuro de hidrógeno H_2S, que SO_2 y SO_3. La acción corrosiva de los humos reductores y la mayor corrosión de los tubos de pared en la parte baja del hogar, depende mucho de la concentración en H_2S, por lo que la combustión en dos etapas no se recomienda cuando se queman fuelóleos residuales con mucho S.

- Recirculación de humos.- La recirculación de humos hacia los quemadores es una forma de reducir el nivel de emisiones de NO_x cuando la contribución del $N_{2\ del\ combustible}$ es pequeña en la formación del NO_x total, por lo que la recirculación de humos se limita a las aplicaciones de combustión del gas natural y fuelóleos. Reintroduciendo los humos tomados a la salida del economizador, en el flujo de $aire_{comburente}$, las puntas de temperatura de la llama en los quemadores se rebajan y las emisiones de NO_x se reducen significativamente, Fig XII.3.

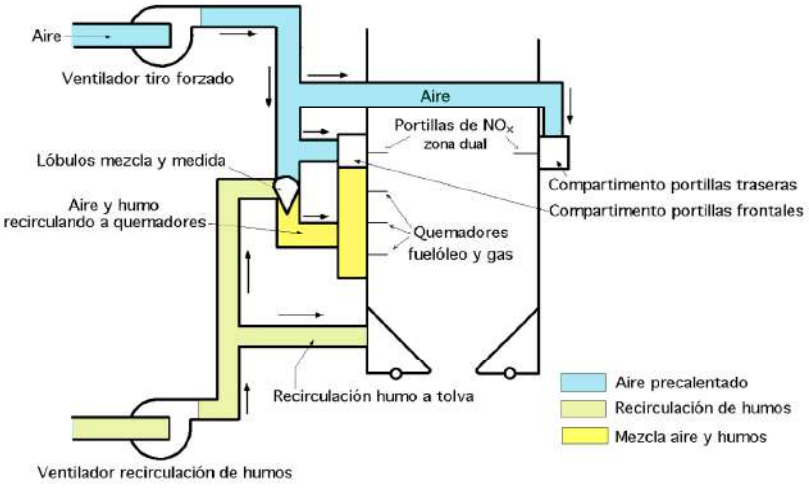

Fig XII.3.- Sistema de bajo NO_x por recirculación de humos, para combustión de petróleo y gas

Para mezclar el humo que recircula, con el $aire_{comburente}$, éste se introduce lateralmente en los lóbulos de medida del $aire_{secundario}$ y sale a través de las lumbreras situadas aguas abajo de los orificios de toma para medida de aire; este procedimiento asegura la mezcla $humos\text{-}aire_{comburente}$ antes de que ésta llegue a los quemadores y no afecta a la medida del gasto de aire que tienen los lóbulos.

En general, un aumento del régimen de recirculación de humos hacia los quemadores, produce una reducción significativa de los NO_x.

Los parámetros que definen el límite práctico de la recirculación de humos para el control de

los NO_x son: $\begin{cases} - \textit{ los niveles de referencia de emisión de los } NO_x \\ - \textit{ las limitaciones relativas al tamaño de los equipos y componentes de la caldera} \end{cases}$

Otros factores limitativos son:

- La estabilidad de los quemadores

- La concentración de O_2 en la mezcla comburente empleada, que se debe mantener, para garantizar una operación segura y fiable del sistema de combustión, por encima del 17% sobre base seca

Los *ventiladores* de humos se diseñan para un gasto determinado y para una presión estática capaz de hacer frente a las pérdidas correspondientes a los $\begin{cases} \textit{Conductos de aire y humos} \\ \textit{Dispositivos de mezcla} \\ \textit{Quemadores} \end{cases}$

En el caso de remodelación de la unidad hay costes importantes asociados al recorrido de los conductos de aire y humos, con el fin de facilitar la mezcla de ambos.

El incremento a plena potencia de los gases del hogar, implica modificaciones en las superficies termointercambiadoras correspondientes al paso de convección y en los procedimientos normales de funcionamiento, en donde la introducción de un sistema de recirculación de humos para control de los NO_x, implica la instalación de lumbreras de $aire_{terciario}$ para introducir el $aire_{comburente}$ residual sobre el nivel de fuegos.

Los quemadores para $\begin{cases} \textit{fuelóleos (mecheros)} \\ \textit{gases (antorchas)} \end{cases}$ diseñados inicialmente sin haber previsto la recirculación de humos, no tienen el tamaño adecuado para soportar los mayores gastos de una recirculación. La cantidad de humos necesaria para una reducción significativa en las emisiones de NO_x da lugar a unas velocidades en la garganta del quemador que exceden de las habituales en el diseño, lo que puede provocar la inestabilidad del quemador y en el caso de la combustión de gases, una pulsación inadecuada.

La instalación de lumbreras de $aire_{terciario}$ junto con la introducción de un sistema de recirculación de humos, provoca siempre dos situaciones beneficiosas:

- Menores emisiones de NO_x como consecuencia de la combustión en 2 etapas

- Una disminución del flujo másico de aire hacia los quemadores, que facilite la mayor carga que procede de la recirculación de humos

Cuando se emplea la recirculación de humos en combinación con el $aire_{terciario}$, es conveniente situar las portillas de entrada de este aire en una zona concreta de la caja de aire, separada de la caja de aire correspondiente a los quemadores, que permite un uso más eficiente de los ventiladores, ya que sólo la porción de humos que se introduce a través de los quemadores es efectiva en el control de emisiones de los NO_x.

RECOMBUSTIÓN.- Es una técnica relativamente nueva de control de los NO_x que se realiza en el interior del hogar; mediante un control efectivo del combustible y del $aire_{comburente}$, cuando se queman fuelóleos residuales, se puede llegar a emisiones de NO_x bajas, del orden de $40 \div 60$ ppm, y aún menores si se quema gas natural.

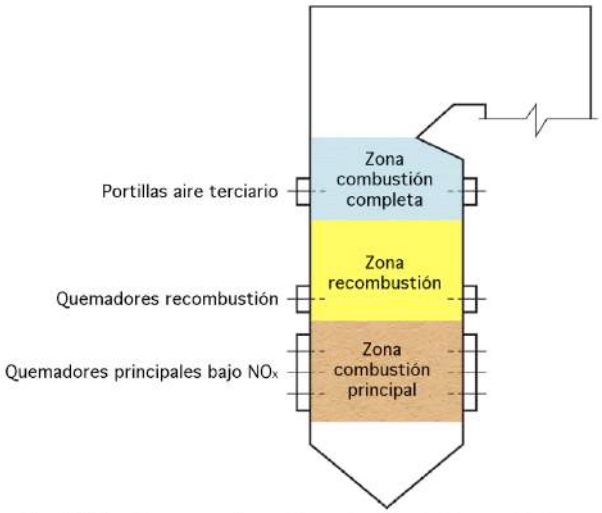

Fig XII.4.- Esquema de caldera de planta termoeléctrica mostrando zonas de combustión y recombustión

Para alcanzar una reducción óptima de los NO_x, Fig XII.4, el aporte de calor se distribuye sobre una porción mayor del hogar, regulando cuidadosamente el $aire_{comburente}$ hacia diversas zonas. En la recombustión, la parte inferior del hogar (zona de quemadores principales) facilita el mayor aporte de calor al hogar; en la zona baja del hogar se introduce menos aire que el estequiométrico.

Los gases de combustión producidos en la zona de quemadores principales pasan a través de una segunda zona de combustión dispuesta por encima de la anterior, (zona de recombustión), en la que a través de otros quemadores, tiene lugar el resto del aporte de calor al hogar, para alcanzar la operación a plena potencia, con una estequiometría notablemente inferior.

Inyectando combustible en un nivel por encima de la zona de quemadores principales, se crea en esa zona del hogar una región de reducción de los NO_x, donde los radicales de hidrocarburos del combustible que se quema roban el O_2 de las moléculas de los NO_x, con lo que se libera $N_{atómico}$ que finalmente pasa a formar N_2.

Las lumbreras de $aire_{terciario}$ se instalan por encima de la zona de recombustión y, a través de ellas se introduce el resto del aire requerido para completar la combustión, en una atmósfera que no puede conducir, ni química ni técnicamente, a la formación de los NO_x. La aplicación de la tecnología de recombustión tiene en cuenta un determinado número de parámetros, que comprenden:

- El reparto del combustible a utilizar, entre la zona principal de combustión y la de recombustión

- La estequiometría en los quemadores $\begin{cases} principales \\ de\ recombustión \end{cases}$

- La estequiometría global en la zona de recombustión

- El tiempo de residencia en la zona de recombustión

- El tiempo de residencia necesario, por encima de las portillas de $aire_{terciario}$*, para llegar a una combustión completa*

El valor óptimo de cada uno de estos parámetros depende del combustible a quemar.

La puesta en práctica de la tecnología de la recombustión añade complejidad, al funcionamiento y al mantenimiento de los sistemas de combustión; el coste inicial puede resultar prohibitivo cuando se trata de reformas y remodelaciones de equipos obsoletos.

ÓXIDOS DE S.- El contenido en S de los fuelóleos puede variar desde menos de un 1% en los fuelóleos ligeros, hasta un 3,5% en los fuelóleos residuales y pesados.

Durante el proceso de combustión, todo el S contenido en el combustible se convierte en SO_2 o en SO_3 que, en conjunto, producen las emisiones contaminantes SO_x y cuyo control es objeto de preocupación medioambiental, aparte de que los compuestos sulfurosos presentes en los humos pueden provocar problemas de corrosión en la caldera y en los equipos ubicados aguas abajo dentro del circuito de humos.

Cuando el SO_3 se enfría se forma ácido sulfúrico, SO_4H_2, en presencia de vapor de agua; el SO_3 puede conducir a $\begin{cases} \text{- } \textit{emisiones de hollín ácido} \\ \text{- } \textit{opacidad visible del penacho que sale de la chimenea} \end{cases}$. La mejor forma de controlar las emisiones de SO_3 es $\begin{cases} \textit{con un bajo aire}_{exceso}\textit{ , ó} \\ \textit{añadiendo al combustible productos que contengan Mg} \end{cases}$

MATERIAS SÓLIDAS.- Las materias sólidas son partículas de hollín o coque, subproductos del proceso de combustión que constituyen el residuo propio de la combustión incompleta. En las unidades que queman fuelóleos, estas partículas sólidas se generan cuando las gotitas de combustible atomizado sufren una destilación fraccionada parcial durante las diversas fases del proceso de combustión, liberando partículas relativamente grandes huecas ricas en C, llamadas *cenosferas,* que se configuran en la primera fase del proceso de combustión, y no resultan afectadas por la combustión posterior en la atmósfera medioambiental de un hogar convencional; pueden absorber los SO_x en fase gaseosa y, por tanto, contribuyen a la formación del hollín ácido.

Las partículas sólidas procedentes de la combustión de fuelóleos son función de las propiedades del combustible. El contenido en ceniza del fuelóleo juega un papel significativo en la formación de emisiones de partículas ultrafinas, que son potencialmente más peligrosas para el medio ambiente que las partículas mayores, porque tienden a mantenerse en suspensión en la atmósfera.

Una característica del fuelóleo relacionada con la formación de cenosferas es el contenido en asfaltenos del combustible, que son hidrocarburos de alto peso molecular, que no vaporizan cuando se calientan. La combustión de fuelóleos con elevado contenido en asfaltenos produce una mayor cantidad de emisiones de partículas con tamaños grandes e intermedios.

El residuo de C que deja un fuelóleo se determina mediante el ensayo Conradson, que evalúa

la tendencia a formar partículas sólidas volantes durante la combustión. La mejor forma de controlar las emisiones de partículas, para asegurar una mezcla perfecta y completa entre el combustible y el aire, radica en $\begin{cases} \textit{Una adecuada atomización del fuelóleo} \\ \textit{Un cuidadoso diseño de} \begin{cases} \textit{los quemadores} \\ \textit{el sistema de control de la combustión} \end{cases} \end{cases}$

En un medio a alta temperatura, un tiempo grande de permanencia:

- *Favorece la combustión completa del combustible*
- *Favorece bajas emisiones de partículas*
- *No reduce las emisiones de* NO_x

La emulsión de fuelóleos con agua, influye favorablemente en la reducción de la emisión de partículas, ya que cuando el agua de la emulsión vaporiza durante el proceso de combustión, se facilita la rotura de las gotitas individuales del fuelóleo atomizado.

Existen aditivos para fuelóleos que facilitan la combustión del C contenido en el combustible, como el Fe, Mg, Co y Ni, que actúan como catalizadores para lograr una mayor y más rápida oxidación de las partículas de C.

OPACIDAD.- Un penacho visible que sale de una chimenea no es deseable ni conveniente; la opacidad del penacho en la chimenea se controla de la misma forma que las emisiones de partículas sólidas volantes.

La visibilidad del penacho a la salida de la chimenea se minimiza con:

- *Una cuidadosa selección de los combustibles*
- *La consecución de una combustión completa*

Los *penachos oscuros* suelen ser consecuencia de una combustión incompleta y se controlan:

- *Mediante una cuidadosa atención del proceso de combustión*
- *Utilizando aditivos catalizadores basados en metales como el Fe, Mg, Co y Ni*

Los *penachos blancos* revelan la presencia de ácido sulfúrico en los humos; se controlan operando con: $\begin{cases} \textit{Bajo aire}_{exceso} \\ \textit{Aditivos de base alcalina que neutralizan el ácido} \end{cases}$

Las técnicas operativas efectivas para reducir una determinada forma de contaminación atmosférica, no son, a la vez, las más adecuadas para controlar otras formas de contaminación, por lo que cada vez se hace más complejo el diseño de los componentes físicos del equipo y de los sistemas de control de la combustión. Las modernas calderas generadores de vapor deben contar con:

- *La suficiente flexibilidad para optimizar el rendimiento térmico y las características operativas del proceso de combustión*
- *Los dispositivos que se requieren para proteger el medio ambiente*

XII.5.- SELECCIÓN Y DISEÑO DE QUEMADORES

Las técnicas de control que se utilizan para reducir las emisiones de NO_x entran en colisión con otros métodos operativos, como $\begin{cases} \text{- } \textit{número de quemadores en servicio} \\ \text{- } \textit{calibre de los orificios de las placas atomizadoras} \end{cases}$

Esto implica el que los quemadores tienen que disponer de la capacidad de mantener una continuada operación mecánica, segura, fiable y flexible, para poder alcanzar la optimización del proceso de combustión, cubriendo toda la gama de condiciones operativas que se puedan presentar.

Quemador circular.- El quemador circular se ha utilizado durante años en las aplicaciones en las que se quemaban fuelóleos y gases, Fig XII.5.

Los deflectores van dispuestos tangencialmente en el cortatiros del quemador, facilitando la turbulencia para mezclar el combustible y el aire, y conseguir unas llamas cortas y compactas.

Opera normalmente con una elevada velocidad de $aire_{secundario}$, por lo que se puede obtener una combustión rápida, turbulenta y de elevada eficiencia.

El combustible se introduce en el quemador por el centro del mismo, en forma de mezcla densa.

La dirección y velocidad del $aire_{comburente}$ y la dispersión del combustible, consiguen una mezcla *combustible-aire* compleja y perfecta.

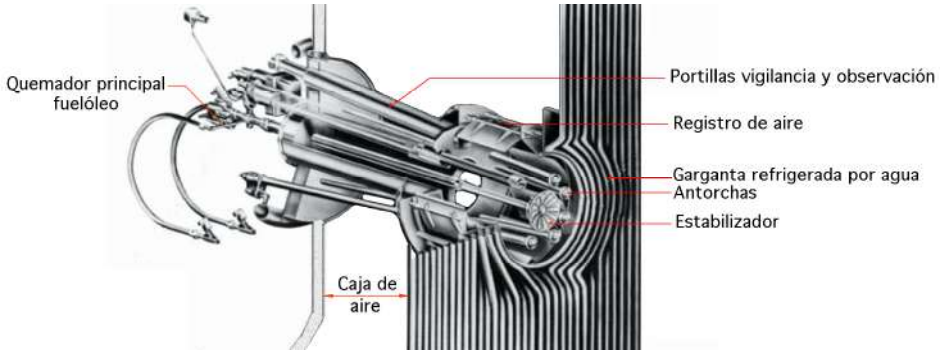

Fig XII.5.- Quemador circular con cortatiros, y garganta refrigerada por agua para quemar fuelóleo y gas

Quemador tipo S.- Es un quemador que combina la combustión de fuelóleos y gases, y se ha desarrollado para sustituir al quemador circular, Fig XII.6. Con el fin de mejorar la flexibilidad y el control en el flujo de $aire_{comburente}$, este quemador incorpora algunas peculiaridades de diseño, de las que carece el cortatiros del quemador circular; el quemador tipo S tiene dos zonas de aire, independientes entre sí $\begin{cases} \text{- } \textit{de núcleo (interior)} \\ \text{- } \textit{periférica (exterior)} \end{cases}$

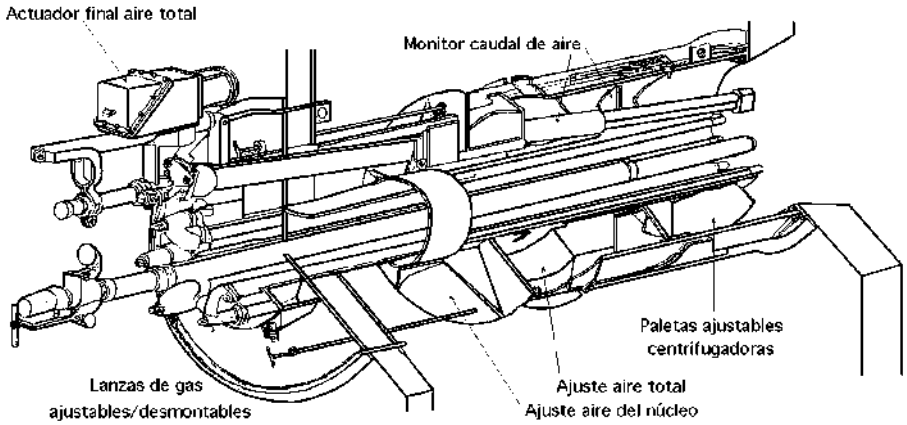

Fig XII.6.- Quemador tipo S, para fuelóleo y gas

Cuando en el quemador tipo S se quema gas natural o fuelóleo, el $aire_{secundario}$ se introduce parcialmente por la zona central a través de unas ranuras ubicadas en la periferia de la envolvente interna; en este quemador no se necesita un estabilizador como el que tienen los quemadores circulares, porque el control del flujo que entra por la zona central asegura una ignición estable.

En la zona del núcleo se alojan: $\begin{cases} \textit{Las antorchas para quemar el gas combustible principal} \\ \textit{El mechero para quemar el fuelóleo con su sistema atomizador} \end{cases}$

La mayor parte del $aire_{comburente}$ entra en el quemador por la zona periférica entre las envolventes de las zonas exterior e interior. La turbulencia en el $aire_{comburente}$ se provoca mediante deflectores orientables, dispuestos axialmente y ubicados en la carcasa del recinto exterior; un manguito deslizante controla el $aire_{total}$ al quemador, independientemente de la turbulencia comunicada al fluido.

El quemador tipo S está dotado con un dispositivo de medida del gasto de aire, situado en la zona exterior aguas arriba de los deflectores, que indica el flujo de aire correspondiente a cada quemador; para aplicaciones con quemadores múltiples, permite modificar el flujo de aire a cada uno de los quemadores integrados en la unidad.

La zona exterior aloja el $\begin{cases} \textit{- ignitor para el conjunto del quemador (antorchas y mechero)} \\ \textit{- equipo de detección de la llama} \end{cases}$

El quemador tipo S facilita la flexibilidad precisa en las técnicas de control de combustión para reducir las emisiones de NO_x ya que mide y regula el flujo de aire individualmente para cada quemador, independientemente de la turbulencia; también se ha configurado como una mejora de los quemadores circulares, ya que con él se evita la modificación de las partes presurizadas relacionadas con la garganta de los quemadores.

Quemador tipo XCL-S .- El *quemador tipo XCL-S* para fuelóleo y gas natural y bajos NO_x que

se presenta en la figura XII.7, fue desarrollado para lograr un rendimiento superior en aplicaciones de quemadores NO_x y en aplicaciones que utilizan aire sobre el fuego (OFA) y recirculación de gases de combustión (FGR); el aporte de calor se estima en $\begin{cases} 1{,}3 \times 10^8 \, Btu/h \, (38 \, MWt) \text{ para el gas natural} \\ 1{,}18 \times 10^8 \, Btu/h \, (35 \, MWt) \text{ para el fuelóleo pesado} \end{cases}$

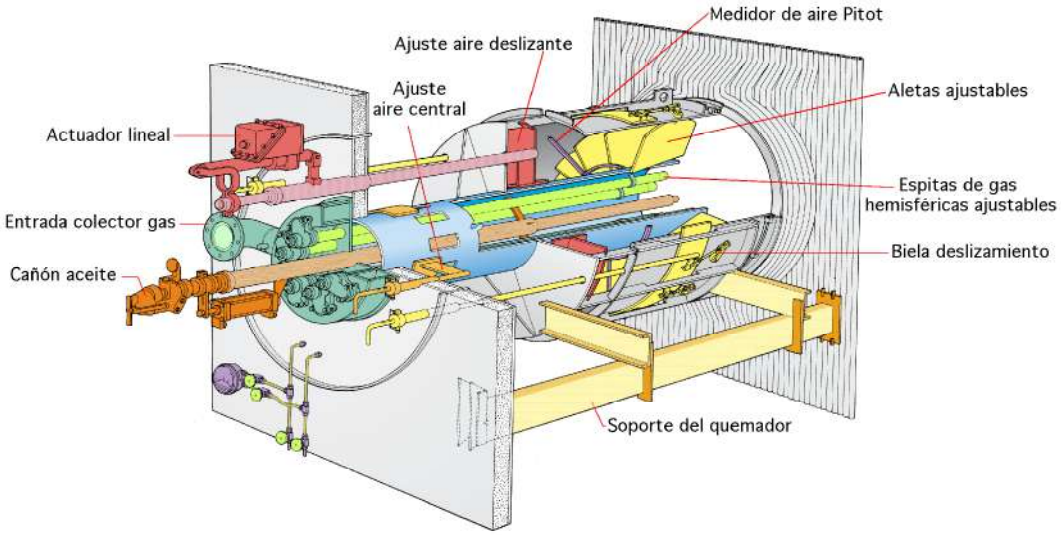

Fig XII.7.- Quemador tipo XCL-S, para fuelóleo y gas natural

- El cañón de aceite produce un spray de aceite fino, reduce las emisiones de partículas y la opacidad, y minimiza el taponamiento del atomizador

- El actuador o módulo lineal, ajusta el aire principal de deslizamiento por la posición de la compuerta a plena carga y con la refrigeración fuera de servicio

- El amortiguador de aire ajusta el flujo de aire central al cañón de fuelóleo o a las espitas de gas para optimizar la combustión

- La compuerta de aire deslizante ajusta la mayor parte del flujo de aire secundario a la zona exterior de aire, independiente de remolino, para equilibrar el flujo de aire entre los quemadores durante la puesta en marcha

- La rejilla de medida de aire Pitot proporciona el flujo de aire respecto al dispositivo de succión

- Las paletas de giro ajustables externamente proporcionan una mezcla adecuada del combustible y el aire secundario (hasta el final de la llama), optimizando la posición de los álabes que se fija durante la puesta en marcha

- Las espitas de gas hemisféricas ajustables se pueden girar para optimizar la reducción de NO_x y extraer mientras la caldera está en servicio

Quemador tipo DRB-XCL.- Este quemador para fuelóleo y gas, se ha desarrollado para reducir los NO_x e incorpora en su diseño un escalonamiento interno en el aire y en el combustible. *El quemador atomizador de fuelóleo (mechero) y los quemadores de gas (antorchas),* se colocan centra-

dos en el recinto del conjunto del quemador, para limitar la interacción del aire y el combustible en la base de la llama, Fig XII.8.

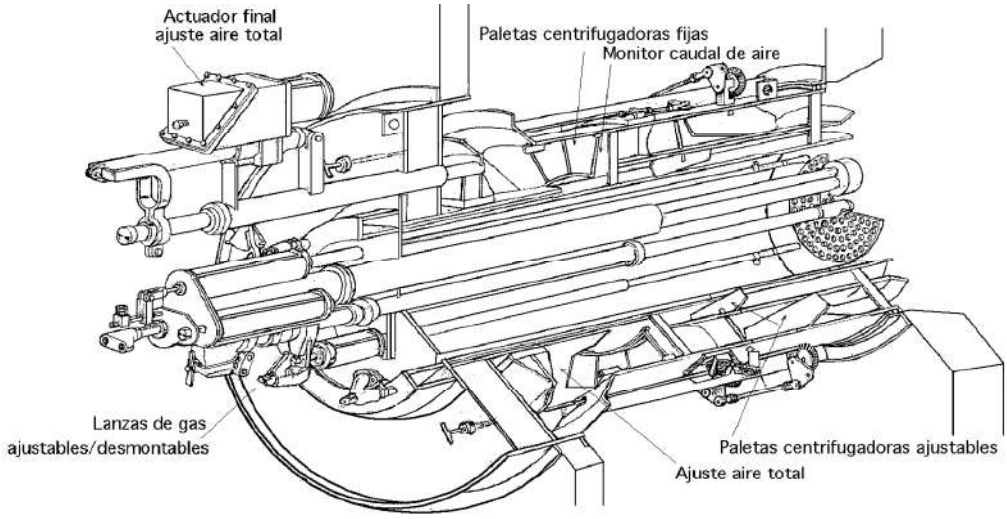

Fig XII.8.- Quemador tipo DRB-XCL, para emisiones reducidas de No

El mechero y las antorchas se alojan con un único estabilizador central, que mejora el retorno y la estabilidad de la llama, mientras se produce la separación de los elementos inflamables del combustible y del aire comburente. La punta de formación de los NO_x se reduce controlando la velocidad de régimen de la combustión y la estequiometría.



Fig XII.9.- Fotos de la llama de un quemador de fuel y otro de gas

El $aire_{comburente}$ se regula mediante dos zonas de aire:

- La interior incorpora unos deflectores ciclónicos ajustables multiescalonados, ubicados en la zona interior de aire, que optimizan la estabilidad y reducen los NO_x

- La exterior aloja unos deflectores centrifugadores fijos, que mejoran la distribución periférica del aire, y cuyo flujo total se controla independientemente de la turbulencia mediante un manguito ajustable deslizante

El quemador va equipado también con un dispositivo para la medida del flujo de aire aguas arriba de los deflectores centrifugadores, con el fin de facilitar el ajuste individualizado del aire en cada quemador. Las velocidades de diseño para el $aire_{comburente}$ son mucho menores que las de los quemadores circulares y tipo S, lo que implica que en caso de remodelado de equipos, resulten necesarias algunas modificaciones de las partes a presión que afectan a la garganta del quemador.

XII.6.- ATOMIZADORES

Para quemar fuelóleos hay que atomizarlos hacia el hogar, en forma de niebla fina dispersa en el flujo de $aire_{comburente}$; la atomización constituye la clave para lograr una combustión eficiente y reducidas emisiones de materias sólidas a la atmósfera.

La calidad de la atomización depende de $\begin{cases} - \textit{ el tamaño de las gotas} \\ - \textit{ la distribución de las gotas entre diversos tamaños} \end{cases}$

Una atomización de alta calidad se produce cuando las gotas de aceite son pequeñas y presentan altas relaciones $\frac{Superficie}{Volumen}$ por lo que exponen más superficie al $aire_{comburente}$. Uno de los parámetros de comparación de la calidad de la atomización producida por los diferentes diseños de sistemas atomizadores, es el denominado diámetro medio de Sauter D_{sm} que se define en la forma:

$$D_{sm} = \frac{Volumen\ medio}{Superficie})_{gotas\ fuelóleo}$$

siendo la atomización tanto mejor cuanto menor sea D_{sm}

Para una adecuada atomización, cualquier fuelóleo que tenga una viscosidad superior a la del nº 2, se debe calentar con vapor o eléctricamente, a fin de reducir su viscosidad y situarla en un campo comprendido entre 100÷ 150 sSU (Segundos Saybold Universal).

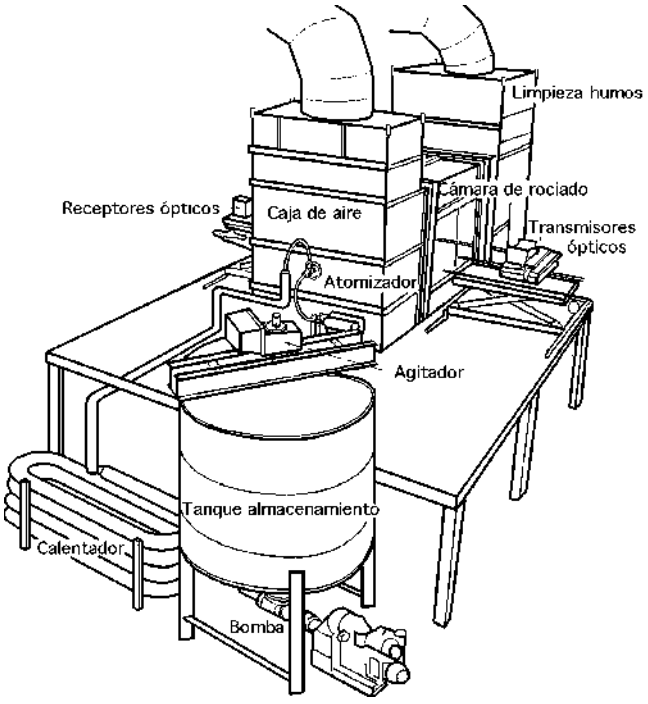

Fig XII.10.- Esquema de una instalación de atomización

Cuando los fuelóleos se calientan hay que tomar precauciones para asegurar que las temperaturas no sobrepasen el punto en que se pueda presentar una obstrucción por burbujas, que aparece

cuando las fracciones volátiles del combustible desprendidas en el interior del sistema colapsan el flujo, interrumpiendo la $\begin{cases} circulación\ del\ combustible \\ pérdida\ de\ ignición\ en\ el\ quemador \end{cases}$

El fuelóleo que llega a los mecheros debe carecer de materias ácidas, arenosas y fibrosas, y de otros materiales extraños que puedan producir atascos o dañar los componentes de los equipos del sistema.

El fuelóleo se atomiza por dos vías diferentes: $\begin{cases} Mecánicamente \\ Por\ fluidos\ atomizadores\ como\ el \begin{cases} vapor\ de\ agua \\ aire\ comprimido \end{cases} \end{cases}$

La elección del método se define con el diseño de la caldera y sus normas de funcionamiento.

En general, el vapor ayuda a que los atomizadores produzcan una pulverización adecuada y de más calidad para las aplicaciones requeridas con bajo NO_x o con restricciones en la emisión de partículas y en la opacidad de los penachos de las chimeneas.

ATOMIZADORES MECÁNICOS.- En el caso de un mechero con atomización mecánica, la alta presión del fuelóleo facilita la energía necesaria para la atomización y para conseguir las características adecuadas de operación.

Hay tres tipos de mecheros con atomización mecánica que se utilizan en la generación de vapor, el mecánico $\begin{cases} -\ uniflujo \\ -\ con\ retroflujo \\ -\ con\ vapor \end{cases}$

Mechero con atomizador mecánico uniflujo.- Se utiliza en plantas de generación de energía de pequeño y mediano tamaño, y en calderas navales; es de gran sencillez y fácil de operar. El combustible se introduce por unas boquillas que descargan tangencialmente en una cámara ciclónica y sale por un orificio rotacionalmente hacia la cámara de combustión, como un rociado cónico muy atomizado. La presión del fuelóleo requerida en el dispositivo atomizador es superior a 300 psig (2,07 MPa), para aportes de calor del orden de $\begin{cases} (70 \div 80).10^6\ Btu/h \\ 20{,}5 \div 23{,}4\ MW_t \end{cases}$

Mechero con atomizador mecánico con retroflujo.- Se utiliza en calderas estacionarias y navales que necesitan amplios rangos de potencia, Fig XII.11. El elemento atomizador se diseña para eliminar la necesidad de cambiar $\begin{cases} las\ placas\ de\ atomización \\ el\ número\ de\ quemadores\ en\ servicio \end{cases}$ durante la operación normal. Con este atomizador es posible un amplio rango operativo, ya que mantiene un elevado flujo de fuelóleo a través de las ranuras de la placa atomizadora, incluso para reducidos regímenes de combustión, (bajas potencias). Como en regímenes bajos la cantidad de fuelóleo suministrado al quemador es mayor que la requerida por el régimen de combustión demandado por la carga, el exceso de fuelóleo retorna a un punto del sistema de tuberías de menor presión.

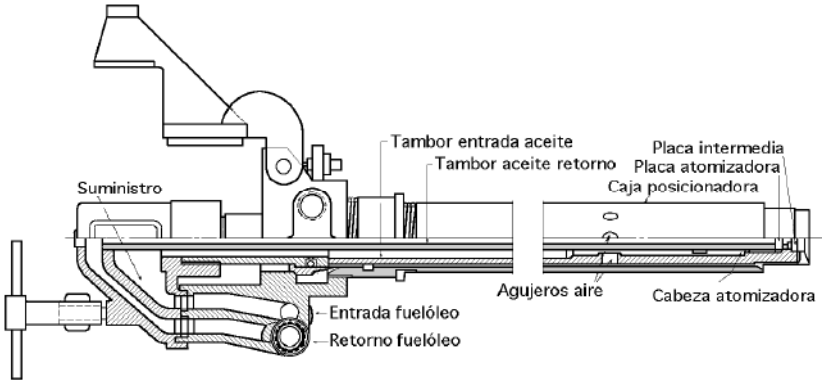

Fig XII.11.- Conjunto de atomizador mecánico con retroflujo

La presión requerida por el fuelóleo en el dispositivo atomizador es de $\begin{cases} 600 \div 1000\ psig \\ 4{,}14 \div 6{,}90\ MPa \end{cases}$ en función de la cantidad de combustible, potencia y campo de cargas.

El aporte de calor es del orden de 2.10^8 Btu/h (58,6 MW_t).

Mechero combinado con atomizador mecánico y con vapor.- Combina los dos sistemas de atomización y facilita campos operativos mucho más amplios, incluso a potencias bajas y con hogares fríos; para potencias $\begin{cases} altas, el\ atomizador\ opera\ sólo\ con\ atomización\ mecánica \\ bajas, la\ atomización\ se\ aumenta\ con\ vapor \end{cases}$

La presión de fuelóleo requerida en este atomizador es del orden de $\begin{cases} 200 \div 300\ psig \\ 1{,}38 \div 2{,}07\ MPa \end{cases}$, en función de la potencia a alcanzar.

Su presión de vapor debe ser de $\begin{cases} 10 \div 15\ psig \\ 0{,}07 \div 0{,}10\ MPa \end{cases}$ por encima de la del fuelóleo, que no sobrepasará los 125 psig (0,86 MPa)

Su potencia máxima es del orden de $\begin{cases} (80 \div 90).10^6\ Btu/h \\ 23{,}4 \div 26{,}4\ MW_t \end{cases}$

Los fuelóleos residuales contienen restos de fracciones pesadas del petróleo, que pueden condensar sobre las superficies frías de la unidad, creando condiciones de peligro. Para evitarlo se suele disponer de un cierto número de mecheros con atomizadores por vapor (no mecánicos), que facilitan una operación satisfactoria durante el proceso de secado de la unidad.

ATOMIZADORES POR VAPOR.- En general, se prefiere una atomización fina asistida por vapor, debido a que ofrece mejores características de operación y seguridad. Como fluido de atomización se usa vapor saturado seco, con el fin de evitar posibles pulsaciones del quemador.

La emulsión *vapor+fuelóleo*, producida en el atomizador reduce el tamaño de las gotas de fuelóleo cuando entran en el hogar, gracias a la rápida expansión del vapor.

Hay disponibles diseños de atomizadores por vapor con capacidad de 3.10^8Btu/h (87,9 MW_t), lo

que representa del orden de 16.500 lb/h (2,08 kg/seg) de fuelóleo. La presión requerida en el fuelóleo es mucho menor que la requerida por atomización mecánica, dependiendo del diseño del atomizador; la máxima presión del fuelóleo puede llegar a los 300 psig (2,07 MPa), con presiones de vapor que alcanzan hasta 150 psig (1,03 MPa).

Los cuatro atomizadores por vapor más comunes se identifican como Chorro-Y, Racer, Chorro-T y Chorro-I, estando caracterizados cada uno por diferentes $\begin{cases} campos\ operativos \\ consumos\ de\ vapor \\ calidades\ de\ atomización \end{cases}$

Atomizador chorro-Y.- Está diseñado para un amplio campo de combustión, sin tener que modificar el $\begin{cases} número\ de\ quemadores\ en\ servicio \\ calibre\ de\ los\ orificios\ de\ las\ placas\ atomizadoras. \end{cases}$. Se puede utilizar en cualquier tipo de caldera y admite atomización por vapor o por aire comprimido.

El fuelóleo y el fluido atomizador discurren por conductos separados, hasta llegar a la placa atomizadora, en donde se mezclan antes de su descarga en el hogar. La presión de fuelóleo requerida en el atomizador en condiciones de potencia máxima, es de $\begin{cases} 65 \div 90\ psig \\ 0{,}45 \div 0{,}62\ MPa \end{cases}$.

Este atomizador funciona con presión diferencial constante y requiere, en todo el rango operativo normal, vapor a 40 psig (0,28 MPa) por encima de la presión del fuelóleo.

El consumo de vapor es del orden de 0,1 $\frac{kg_{vapor}}{kg_{fuelóleo}}$

Atomizador Racer.- Es una variante del anterior y se desarrolló para aquellos casos en que se requieren grandes bajadas de carga en los quemadores y un bajo consumo de vapor. La presión de fuelóleo requerida por el diseño a potencia máxima es de 300 psig (2,07 MPa)

La presión de vapor se mantiene constante, 150 psig (1,03 MPa), para todo el rango de cargas.

El consumo de vapor atomizador a plena carga es del orden de 0,02 $\frac{kg_{vapor}}{kg_{fuelóleo}}$

Atomizadores Chorro-T y ***Chorro-I***.- Permiten un amplio margen de operación, sin necesidad de una excesiva presión de fuelóleo; son los únicos en los que el vapor y el fuelóleo se mezclan convenientemente en una cámara apropiada, antes de su descarga en el hogar a través de la placa atomizadora. La presión del fuelóleo varía de $\begin{cases} 90 \div 110\ psig \\ 0{,}62 \div 0{,}76\ MPa \end{cases}$ según sean las necesidades de potencia y tipo de combustible.

Por lo que respecta a la presión diferencial, el Chorro-T y el Chorro-I requieren una presión de vapor de $\begin{cases} 20 \div 40\ psig \\ 0{,}14 \div 0{,}28\ MPa \end{cases}$ por encima de la presión del fuelóleo.

El consumo de vapor puede llegar a 0,2 $\frac{kg_{vapor}}{kg_{fuelóleo}}$

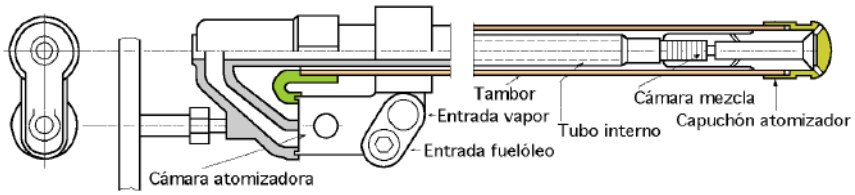

Fig XII.12.- Atomizador Chorro-I

En general, cuanto más se mejore la calidad de la atomización, tanto mayor es el consumo de vapor que, para una unidad de gran potencia, puede ser grande y, por tanto, también lo serán las pérdidas de calor en la chimenea; en el caso de calderas de unidades termoeléctricas, el uso de vapor atomizador tiene una importante repercusión en la eficiencia global de la planta.

XII.7.- EQUIPAMIENTO PARA GAS NATURAL

Los tipos de antorchas para quemar gas, aptos para elevados aportes de Btu y que están disponibles para las aplicaciones comerciales del gas natural, son la lanza $\begin{cases} \text{- } \textit{múltiple de mezcla variable} \\ \text{- } \textit{hemisférica} \\ \text{- } \textit{radial} \end{cases}$

Antorcha multilanza de mezcla variable.- Se desarrolló para su utilización en el *quemador circular*; tiene un colector exterior a la caldera, con un determinado número de lanzas que traspasan la caja de aire y llegan a la garganta del recinto quemador; el objetivo era optimizar la combustión mejorando la estabilidad de la ignición cuando se empleaba la:

- Recirculación de humos

- Combustión en dos etapas, para el control de los NO_x

Su diseño aporta la flexibilidad precisa en una amplia gama de condiciones funcionales operativas, siendo sus características constructivas las siguientes:

a) La antorcha de gas se puede desmontar con la caldera en servicio, para su limpieza o para modificar los orificios de la boquilla de descarga cuando sea necesario

b) Para optimizar las condiciones de la combustión:

- La antorcha puede girar orientando los orificios de la boquilla de descarga, con el recinto quemador en servicio

- La extremidad de la antorcha se puede orientar, dentro de ciertos límites, con relación a la garganta del recinto quemador

c) Los retenedores de llama de las antorchas individuales dan más estabilidad lo que las hace más propicias para menores emisiones de NO_x

Con una adecuada selección del equipo de control se puede cambiar de combustible, sin que se produzcan caídas de potencia y pérdidas de presión en la caldera. La combustión simultánea de gas

natural y fuelóleo en un mismo generador de vapor, se acepta si éste está equipado con quemadores que tengan esta disposición de antorcha multilanza de mezcla variable.

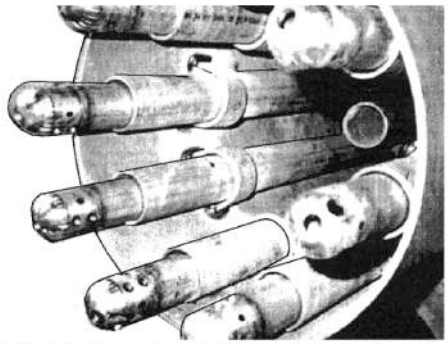

Fig XII.13.- Lanza hemisférica vista desde el hogar

Antorcha de lanza hemisférica.- Se desarrolló para su empleo con el quemador de fuelóleo tipo DRB-XCL, ideal para bajo NO_x y también con el quemador tipo S, Fig XII.13; con excepción de los retenedores de llama, la lanza hemisférica ofrece prácticamente las mismas características constructivas que el diseño multilanza de mezcla variable, ya que facilita bajos NO_x debido:

- Al perfil de su extremidad

- A la configuración de sus orificios

- A la ubicación que tiene dentro del conjunto del recinto quemador

Antorcha de lanza radial.- Dispone de un colector que se sitúa en el interior de la caja de aire, del que parten lanzas individuales que se prolongan hasta la garganta del quemador principal. A diferencia de los diseños anteriores, multilanza y lanza hemisférica, la antorcha de lanza radial no es adecuada para conseguir bajas emisiones de NO_x.

El uso de la antorcha de lanza radial se reserva para aquellas aplicaciones en las que coexisten combustiones de carbón y de gas en el mismo recinto quemador

Las antorchas de lanza radial son menos perturbadoras para el flujo de $aire_{comburente}$ cuando se quema carbón pulverizado, con lo que se elimina una de las características de flujo más indeseable. El límite práctico máximo de aporte de calor al recinto quemador, bajo la forma de gas natural, es del orden de 2.10^8 Btu/h (58,6 MWt)

En todos los tipos de antorcha, el tamaño de los orificios del extremo de las lanzas se determina de forma que se elimine una posible pulsación en el quemador. La velocidad en la descarga del gas a lo largo de la antorcha y la presión requerida en el colector, se calculan por métodos convencionales.

La presión del gas en el colector, a plena potencia del quemador, es del orden de $\begin{cases} 8 \div 12\ psig \\ 60 \div 80\ kPa \end{cases}$.

En muchos aspectos, el gas natural es un combustible ideal, por cuanto no requiere preparación alguna para conseguir una mezcla rápida e íntima con el $aire_{comburente}$. Sin embargo, esta característica de fácil ignición y combustión puede conducir al operador a situaciones de descuido y de explosiones peligrosas. Para garantizar una operación segura en todo el intervalo de presiones del gas y en condiciones del flujo de $aire_{comburente}$, las llamas de gas deben permanecer ligadas a la bo-

quilla de descarga del gas. La ignición estable tiene que ser posible con un mínimo de $aire_{exceso}$ del 25% para que no se apague la llama, ni siquiera momentáneamente, durante condiciones perturbadas.

XII.8.- GASES SUBPRODUCTOS

Muchas aplicaciones industriales que producen vapor de agua para su consumo, utilizan como combustible algunos de los gases siguientes: gas de batería de coque, gas de horno alto, gas de refinería y otros gases.

En las plantas productoras de coque se obtiene el *gas de batería de coque*, que es un excelente combustible que se quema rápidamente por su elevado contenido en hidrógeno libre; para este gas, las boquillas se construyen para facilitar la combustión y el mantenimiento de las mismas. Los depósitos de polvo, no son tan severos como en el caso del gas de horno alto, se eliminan mediante portillas adecuadas.

Los hornos altos de las instalaciones siderúrgicas generan el *gas de horno alto*, que contiene aproximadamente un 25% de CO en volumen. El gas de horno alto se puede quemar para producir vapor destinado a calentamientos en la propia factoría siderúrgica o para la generación de energía eléctrica.

En los gases de horno alto y de batería de coque, el calor desprendido por unidad de volumen puede ser muy diferente del obtenido a partir de igual volumen de gas natural, por lo que las antorchas se deben diseñar de acuerdo con las características particulares del gas a quemar.

Para hacer frente a las impurezas que conlleva el gas de horno alto, los quemadores se diseñan de forma que a la entrada de la boquilla de la antorcha del quemador se depositen la mayor parte de las materias extrañas que contiene el gas en las paredes relativamente frías, depósitos que se retiran a través de las puertas de limpieza. Para que la potencia y capacidad del quemador no resulten afectadas por una obstrucción parcial, la boquilla tiene una sección bastante amplia.

En la industria del petróleo, las unidades de craquización catalítica producen CO; para quemar este gas se han desarrollado calderas que cuentan con quemadores suplementarios de fuelóleo y gas natural, con el fin de poder iniciar el suministro del vapor que requiere la puesta en servicio de las unidades de craquización; estos quemadores suplementarios son necesarios para:

- *Elevar la temperatura del CO hasta su punto de ignición*
- *Asegurar la combustión completa de los elementos combustibles dentro del flujo de CO*

Los quemadores del combustible suplementario y las boquillas de CO se disponen radialmente en un hogar cilíndrico imprimiendo un movimiento ciclónico a los gases, lo que asegura la mezcla y permite alcanzar una rápida combustión completa.

XII.9.- PUESTA EN SERVICIO DE CALDERAS DESDE EL ESTADO FRÍO

La puesta en servicio de una caldera que se encuentra en estado frío, requiere un fuego de bajo aporte de calor durante un período de tiempo relativamente largo, para evitar los problemas derivados de dilataciones anómalas y de recalentamientos en algunos sobrecalentadores y recalentadores.

Las calderas de baja presión, del orden de 200 psig (1,38 MPa), que no tienen sobrecalentadores de vapor, precisan de una hora de operación a baja carga para completar su puesta en servicio, mientras que las calderas de alta presión pueden necesitar entre 4÷ 6 horas. Durante la puesta en servicio la eficiencia de la combustión es prácticamente nula, especialmente en el caso de usar fuelóleos residuales, debido a las bajas temperaturas del hogar y del $aire_{comburente}$.

El operar a baja presión puede conducir a una mala distribución del $aire_{comburente}$ hacia los quemadores, especialmente en el caso de disponer de una única caja de aire. Un flujo reducido de aire y una escasa presión diferencial entre la caja de aire y el hogar, dan lugar a una estratificación del $aire_{comburente}$ en la propia caja de aire, con el consiguiente efecto negativo en la combustión.

Cuando se queman fuelóleo o gases a baja presión, el sistema de tuberías de estos combustibles puede provocar una mala distribución y afectar a los quemadores, ya que para una presión determinada en el suministro de combustible, algunos quemadores pueden recibir la cantidad exacta para una correcta operación sostenida y continuada, mientras que otros no reciben la suficiente. La baja temperatura de ignición y las características de combustión propias del gas natural, hacen que éste resulte idóneo para la puesta en servicio y para operar a baja carga, pero hay que tener cuidado en evitar cualquier interrupción momentánea de la llama.

En la combustión de un gas que tenga en su composición un elevado porcentaje de H_2 se producen enormes cantidades de agua. Cuando las unidades cuentan con calentadores de aire de tipo regenerativo, estos termointercambiadores no se deben poner nunca en servicio hasta que la temperatura de los humos a la entrada de los calentadores de aire supere los 400ºF (204ºC). De esta forma se evita la condensación del vapor de agua contenido en los humos, sobre la superficie del calentador de aire y su posterior transporte con el aire comburente hacia los quemadores; este agua presente en el $aire_{comburente}$ puede provocar la pérdida de la llama en el quemador afectado.

Para la puesta en servicio y para operar a baja carga, cualquier fuelóleo es más peligroso que el gas natural; aunque la estabilidad de la ignición no es un problema, la baja temperatura del hogar facilita la acumulación de hollín y partículas de C en las superficies del calentador de aire y del economizador, y pueden ser la causa de la aparición de penachos visibles en la chimenea; si estas deposiciones se acumulan durante un período de tiempo prolongado, se pueden producir incendios en las superficies afectadas; para reducir la probabilidad de incendio se utilizan *sopladores de vapor*

sobre la superficie de los calentadores de aire.

Si se utiliza fuelóleo para la puesta en servicio, conviene emplear atomizadores con dos fluidos en el siguiente orden preferencial:

- Fuelóleo y agente atomizador vapor o aire comprimido; el fuelóleo debe ser ligero, del nº 1 ó nº 2, lo que permite tener una chimenea limpia y limitar el residuo carbonoso depositado en las superficies de humos en el lado de salida de la caldera

- Fuelóleo no más pesado que el nº 6 y vapor de atomización; el fuelóleo se calienta para reducir su viscosidad y facilitar la atomización adecuada

- Fuelóleo menos pesado que el nº 6 y aire comprimido como atomizador; el fuelóleo se debe calentar

La operación de puesta en servicio utilizando atomizadores mecánicos no es recomendable en ningún caso, debido a la baja calidad de su sistema atomizador; las calderas para la combustión de fuelóleos equipadas con atomizadores mecánicos, con cargas entre el 25÷ 100%, se ponen en servicio con gas natural o por alguno de los métodos precedentes, siempre en el orden indicado.

Ignitores y pilotos.- El encendido de un quemador requiere de una fuente independiente de ignición, que puede ser de dos tipos, ignitor y piloto.

a) El ignitor es un quemador de pequeña potencia, que se utiliza exclusivamente en operaciones esporádicas, con combustibles de alta calidad y capaz de encenderse con chispa de bujía eléctrica

b) El piloto es un quemador de potencia media que se utiliza en operaciones continuadas, con combustibles de coste moderado, y encendido mediante un ignitor como el precedente

Los ignitores pueden ser estacionarios FPS, Fig XII.14 a 18, ó estar equipados con mecanismos que los hagan retráctiles, Fig XII.19, para protegerlos de la radiación procedente del hogar. Para efectuar una puesta en servicio segura, cada quemador se debe encender utilizando un ignitor de gas natural o de fuelóleo ligero debidamente atomizado.

La capacidad y potencia del ignitor se dimensionan para un aporte máximo de calor de $2{,}5.10^7$ Btu/h (7,3 MWt) para cumplir con los requisitos del: $\begin{cases} \text{- quemador al que sirve} \\ \text{- sistema de seguridad de la llama} \end{cases}$

El quemador principal aplica la llama del ignitor sobre el combustible hasta que la ignición se mantenga estable. Para garantizar el encendido del quemador principal, el ignitor estabiliza la combustión de los combustibles difíciles de quemar. Para conseguir la estabilidad del ignitor se precisa una temperatura de aire mínima del orden de 70ºF (21ºC). Cuando el ignitor tiene que operar en la puesta en servicio de la caldera durante prolongados períodos de tiempo, se utilizan precalentadores de aire (serpentines de vapor o agua) para elevar la temperatura del $aire_{secundario}$ hasta 150ºF(66ºC), a fin de asegurar una combustión completa y un aspecto aceptable en el penacho de la chimenea.

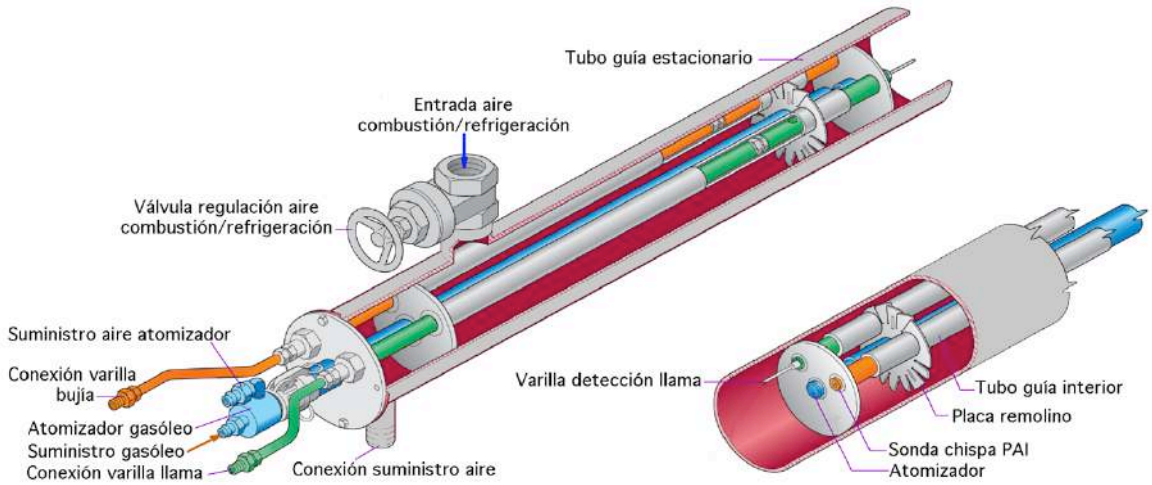

Fig XII.14.- Ignitor estacionario FPS, para gasóleo atomizado por aire comprimido

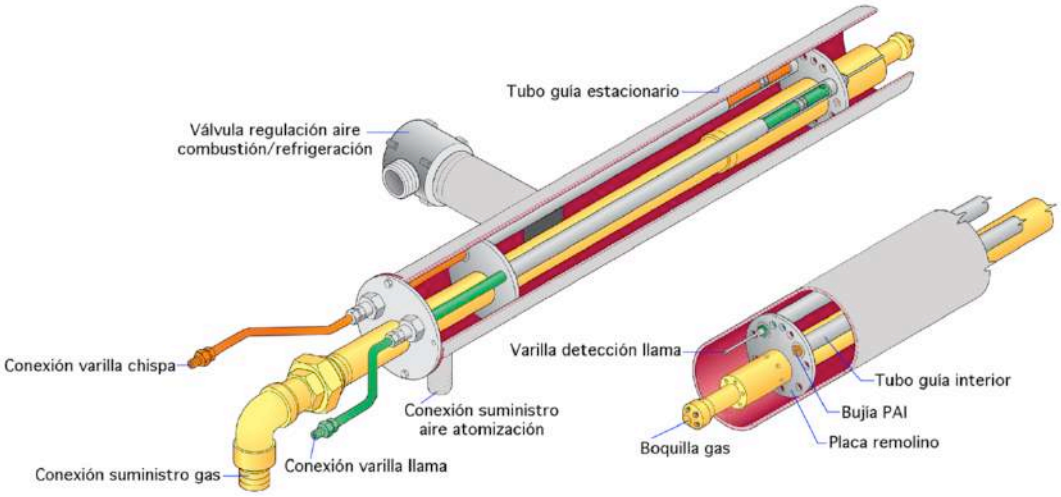

Fig XII.15.- Ignitor estacionario FPS, para gas natural

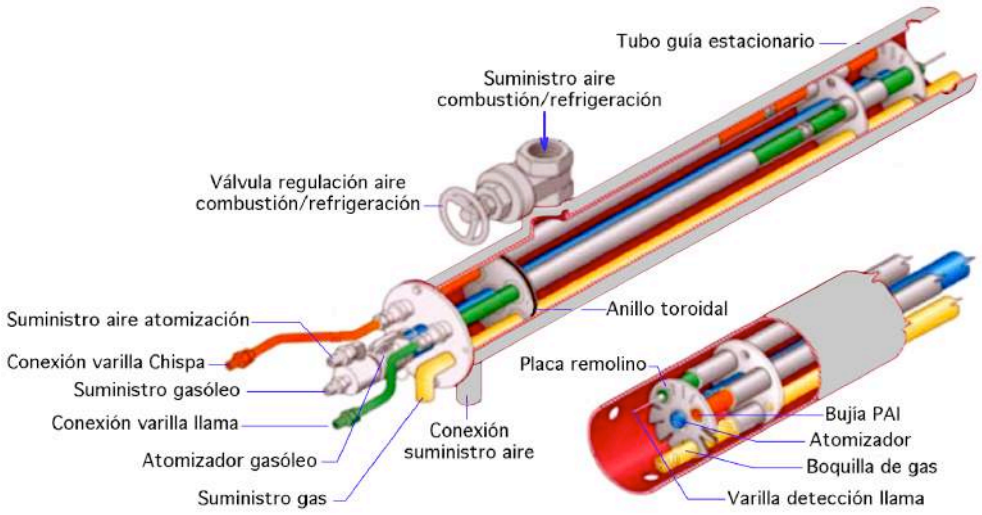

Fig XII.16.- Ignitor de combustible dual, diseñado para quemar propano o gas natural y fuelóleo con aire atomizado

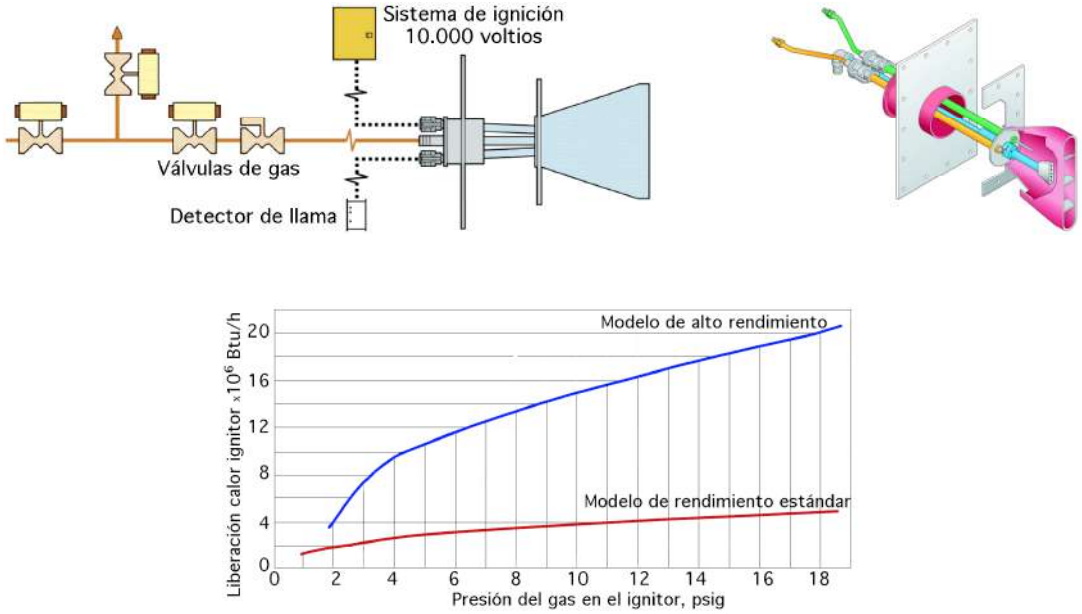

Fig XII.17.- Quemador FPS de gas en la esquina de una caldera

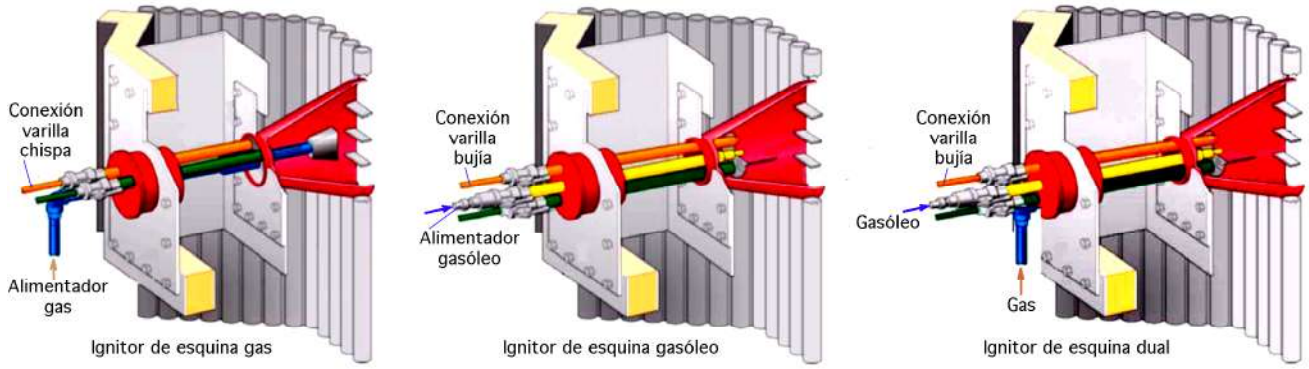

Fig XII.18.- Quemadores FPS de gas, fuel y dual, en la esquina de una caldera

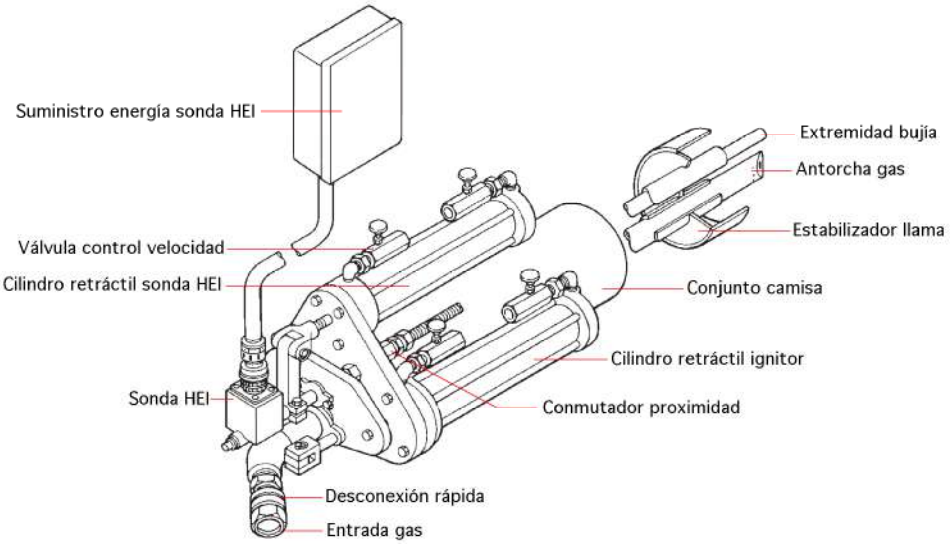

Fig XII.19.- Ignitor retráctil CFS de gas natural, con encendido por bujía de alta energía

El ignitor consta de: { *- una boquilla o tobera de combustible*
- un dispositivo productor de chispa
- una fuente energética capaz de producirla

Existen ignitores programables que secuencian todas sus funciones, incluyendo:

- El control de (conexión / desconexión) del combustible y de los fluidos atomizador y purgador

- La (inserción / retracción) de las lanzas del ignitor y de la bujía

- Los períodos de tiempo necesarios para las condiciones de ignición detectadas, purga de condensado y barrido del atomizador

En algunas aplicaciones, los ignitores tienen que funcionar en forma continuada, como es el caso de las unidades que queman combustibles subproductos, cuya presión de suministro puede quedar fuera del margen correspondiente a la estabilidad del quemador principal, e incluso, puede variar el contenido de combustible del subproducto; para mantener la combustión del subproducto principal durante períodos transitorios anómalos, estas circunstancias pueden obligar a operar continuamente con un piloto con un combustible complementario.

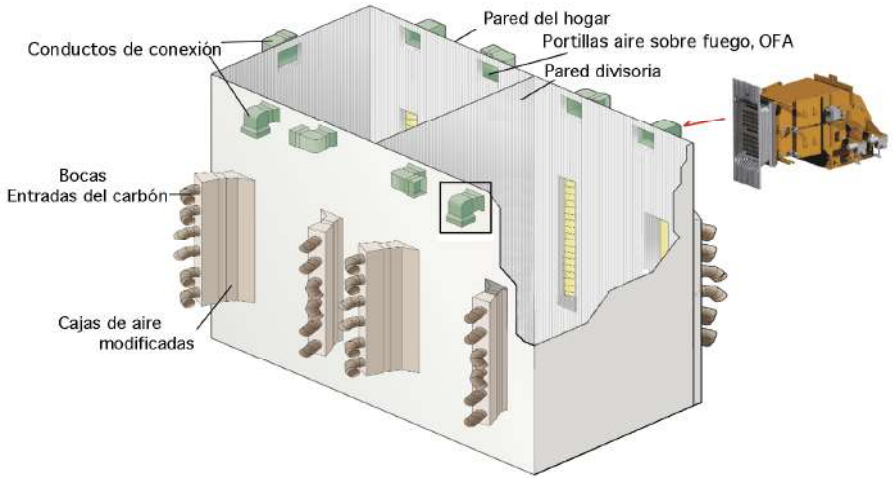

Fig XII.19.- Disposición de quemadores en las 8 esquinas de una caldera

XII.10.- PRECAUCIONES DE SEGURIDAD

La Asociación Nacional de Protección contra Incendios, USA, tiene una serie de normas estandarizadas para los procesos de combustión de gases y fuelóleos:

a) No permitir nunca la acumulación de combustible en ningún lugar fuera del tanque o tuberías que conforman el sistema del suministro del combustible; el más ligero olor a combustible debe ser causa de alarma; tras su detección se deben dar los pasos necesarios para ventilar la zona y localizar y subsanar la eventual fuga

b) Efectuar constantemente un barrido del hogar durante los períodos de operación de la caldera, con un flujo de aire no inferior al 25% del flujo a plena presión, que incluye un barrido inicial previo a la inserción y

encendido de los ignitores, hasta que el gasto de aire exceda del flujo mínimo señalado

c) En la puesta en servicio, en la retirada de servicio o en las operaciones a baja carga inferiores a las que requieran menos del 25% del flujo de aire a plena carga, el flujo mínimo se debe mantener siempre como un barrido continuo del hogar

d) Antes de iniciar la introducción de cualquier combustible en el hogar, hay que tener operativo un dispositivo productor de chispas o una llama. La fuente de ignición se coloca adecuadamente respecto al quemador y debe facilitar la energía de ignición en forma de chispa o llama de tamaño apropiado, hasta que la combustión del combustible principal sea estable y se automantenga

e) En todo momento debe existir un flujo de aire a través de los quemadores que será siempre en el sentido del hogar a la chimenea

f) Para el funcionamiento correcto del quemador hay que mantener continuamente la presión adecuada del combustible; en el caso de quemar fuelóleos hay que mantener la presión y la temperatura del combustible necesarias para una buena atomización

g) En las aplicaciones de mecheros con atomizadores de dos fluidos hay que mantener la presión de vapor o de aire exigible en el quemador

h) Los requisitos de equipamiento, secuencia de operaciones, y sistemas de enclavamientos y alarmas son importantes cuando se ejecutan técnicas de control de combustión para reducir las emisiones de NO_x

En cumplimiento de la normativa anterior, cualquier sistema de control automático debe incluir unos requisitos mínimos, como:

- Un enclavamiento de barrido para un mínimo flujo de aire y tiempo de barrido, con vistas a la limpieza de toda la fumistería antes de abrir la válvula del combustible

- En caso de pérdida de llama en el quemador, se colocan detectores de llama para cada quemador conectados a una alarma, con enclavamiento para el disparo o cierre de la válvula de combustible del quemador

- Un interruptor de fin de carrera en posición de cierre para las válvulas de corte del quemador, de forma que todas las válvulas estén cerradas para permitir la apertura de la válvula de disparo del combustible

- Corte del combustible en caso de
- *fallo de los ventiladores de tiro forzado o inducido*
- *que éste o el aire atomizador del fuelóleo estén a baja presión*
- *baja temperatura del fuelóleo*

- Corte del combustible en unidades que quemen gas en el supuesto de una excesiva presión del combustible

Cualquier combustible de los utilizados habitualmente se puede quemar con seguridad cuando se emplea el equipo apropiado.

REFERENCIAS CAP XII.- COMBUSTIÓN DE GASES Y FUELÓLEOS

B&W.- STEAM: ITS GENERATION AND USE.- 40th Edition, Chapter 10.- The Babcock & Wilcox Company, Barberton, Ohio, USA (1992)

Cato G. A.,- FIELD TESTING: APPLICATION OF COMBUSTION MODIFICATIONS TO CONTROL POLLUTANT.- EMISSIONS FROM INDUSTRIAL BOILERS—Phase II, EPA-600/ 2-76-086a, U. S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, April 1976.

LaRue A.D., Costanzo M.A., FulmeR J.A. Wohlwend K.J.- UPDATE OF B&W's LOW NO_x BURNER EXPERIENCE.- Presented to: ASME International Joint Power Generation Conference, July 24-25, 2000, Miami, Florida, U.S.A.

PARTICULATE EMISSION CONTROL SYSTEMS FOR OIL FIRED BOILERS, EPA-450/3-74-063, U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, December 1974.

FIELD CHEMICAL EMISSIONS MONITORING PROJECT, Site 112 Emissions Report, Preliminary Draft, Carnot, Tustin, California, February 24, 1994. (EPRI Report)

SUSTAINABLE DEVELOPMENT BUSINESS CASE REPORT.- Clean Conventional Fuel.- Oil and Gas.- SD Busines Case TM, versión 1.- Noviembre 2006. www.sdtc.ca

Makarov V. V., Ksandopulo G. I., Potekhin. V. M.- FUEL OIL PYROLYSIS INITIATED BY PROPANE-BUTANE-OXYGEN FLAME.- St. Petersburg State Technological Institute, St. Petersburg, Russia , 2002

Coles D.G., Rahaini R.C., Ondov J.M., Fisher G.L., Silberman D., Prentice B.A.- CHEMICAL STUDIES OF STACK FLY ASH FROM COAL-FIRED POWER PLANT.- Environmental Science and Technolow, Vol 13, 4, April 1979.

Evans J.C., Abel K.H., Olsen K.B., Lepell E.A., Sanders R.W., Wilkerson C.L., Hayes D.J.- CHARACTERIZATION OF TRACE CONSTITUENTS AT CANADIAN COAL-FIRED PLANTS.- Phase I, Contract Number 0016194, Canadian Electrical Association, January. 1985.

Crawford A. R.- FIELD TESTING: APPLICATION OF COMBUSTION MODIFICATION TO CONTROL NOx

EMISSIONS FROM UTILITY BOILERS, EPA-650/2-74-066, U. S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, June 1974.

Bryk S.A., Maringo G.J., Shah A.I.- LOW NO_x COMBUSTION SYSTEM WITH DSVS™ ROTATING.- Classifier Retrofit for a 630 MWe Cell Burner Unit.- Presented to: International Joint Power Generation Conference, October 14-16, 1996, Houston, Texas, U.S.A.

NITROGEN OXIDES EMISSION MEASUREMENTS FOR THREE LIGNITE FIRED POWER PLANTS.- Contract nº. 68-02-1401 And 68-02-1404, Office Of Air Quality Planning And Standards, U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, 1974.

B&W QUALITY PRODUCTS FOR THE POWER GENERATION INDUSTRY.- Boilers and Steam Generating Equipment, Environmental Equipment. Auxiliary Equipment