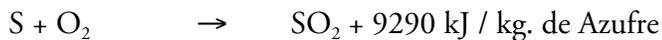
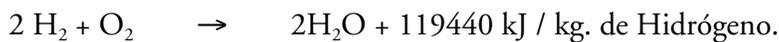
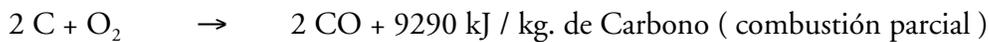
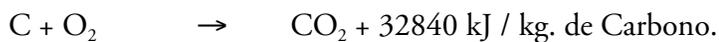


Combustión

Definición

La combustión (quemado) consiste en una reacción química de oxidación en la unos elementos combustibles, principalmente carbono (C), hidrógeno (H), y azufre (S), se combinan con oxígeno. La reacción se verifica con un gran desprendimiento de energía, en forma de calor y luz. A continuación se presentan las reacciones principales que se producen en el quemado de un combustible, apareciendo reflejados reactantes y productos, además del calor desprendido en la misma.



Como podemos ver los productos principales de la combustión son el dióxido de carbono (CO_2) y el agua (H_2O).

Combustibles

La reacción de combustión como hemos visto requiere de la presencia de unos elementos combustibles (C, H, S, ...) que reaccionen con el oxígeno, que será denominado elemento comburente.

Se denominará combustible a toda aquella sustancia que por su composición haga posible la combustión de la misma, verificándose un desprendimiento de energía.

La práctica totalidad de los combustibles usados hoy en día industrialmente son del tipo orgánico, donde el Carbono e Hidrógeno son los elementos predominantes en su composición.

Los combustibles se clasifican en función del estado físico que presentan habitualmente. La razón de esta clasificación se debe a que las técnicas y equipos a utilizar en la combustión dependerán del estado físico del combustible.

CLASIFICACION DE LOS COMBUSTIBLES INDUSTRIALES

Sólidos	Naturales	Madera y residuos	Turbas Lignitos Hullas Antracita
	Artificiales	Carbón	
Líquidos	Alcoholes	Naturales (fermentación e hidrólisis).	Artificiales
	Residuales	Por ejemplo, legías negras.	
	Derivados del petróleo	Gasóleos	Fuelóleos
Gaseosos	Residuales	Fuel-gas	
	Gas natural	Diferentes familias	
	Gases líquidos del petróleo (GLP)	Propano y butanos	
	Artificiales o elaborados	Gas de horno alto Gas de coquería Gas pobre Gas de agua GNS Gases de gasógeno Gas ciudad	
	Biogas		

En los hornos y calderas industriales se pueden utilizar un amplio abanico de combustibles líquidos y gaseosos. Los combustibles líquidos van desde hidrocarburos ligeros hasta corrientes de residuos pesados de la torre de vacío. Los combustibles gaseosos contienen un mezcla de componentes que pueden ir desde el hidrógeno hasta el butano.

La mayoría de los quemadores utilizados en plantas industriales son del tipo combinado, quemando simultáneamente gas y fuel-oil, pudiendo trabajar también alimentado con un sólo combustible.

Mecanismo de la combustión

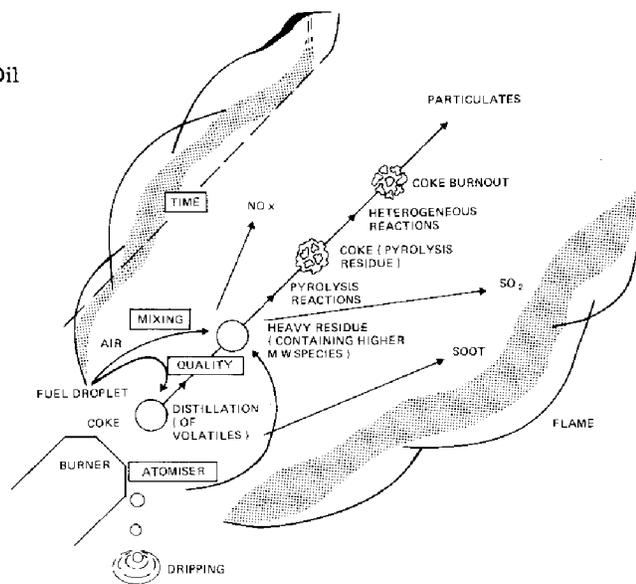
El mecanismo de combustión varía según el tipo de combustible que se desea quemar. Así podremos distinguir entre combustión homogénea en la que el combustible a quemar es gaseoso, y combustión heterogénea en el caso de combustibles sólidos y líquidos.

En la combustión homogénea, la reacción química comienza tan pronto como la mezcla de combustible y aire tiene lugar. La mezcla del combustible con el aire se produce a consecuencia de la turbulencia que se induce en la corriente aire/gas a la salida del quemador y las diferencias de densidad entre la llama y los alrededores.

La combustión heterogénea necesita un mayor tiempo de ignición, requiriendo los combustibles líquido una atomización previa a la combustión.

Para comprender mejor el mecanismo de combustión heterogénea presentamos el caso de la combustión del fuel-oil.

Combustion of a Fuel Oil



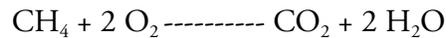
La combustión del fuel-oil comienza por los componentes más ligeros que se vaporizan tan pronto como las gotas de combustible salen del atomizador y entran en la zona de combustión. El residuo pesado que queda sufre una pirólisis debido a la alta temperatura de la combustión causando la formación de humo. Una atomización insuficiente del fuel-oil resulta en un goteo de combustible que no se quema. El carbón residual o coque que queda tras la pirólisis es arrastrado al exterior en forma de partículas sólidas. Idealmente, la materia carbonosa debería quemarse completamente con objeto de reducir al mínimo posible las partículas sólidas arrastradas por los gases de combustión. En la práctica, en el caso de un horno de refinería las partículas sólidas arrastradas por los gases de combustión contienen habitualmente más de un 90% o más de material carbonoso.

Aire de combustión

El Oxígeno necesario para la combustión, normalmente, es suministrado a través de una corriente de aire.

Para conseguir la combustión completa del combustible tenemos que garantizar que existe el suficiente Oxígeno para ello. Para conocer la cantidad de oxígeno necesario recurriremos a estudiar la estequiometría de las reacciones de combustión.

Por ejemplo, la reacción química que se produce en la combustión de un hidrocarburo simple como el metano se puede expresar como:



En la ecuación vemos que para quemar un mol de metano es necesario suministrar 2 moles de O_2 , o lo que es lo mismo para quemar un metro cúbico normal de metano necesitaremos dos metros cúbicos normales de Oxígeno.

A efectos prácticos consideraremos el aire compuesto, en volumen, por un 21% de Oxígeno y un 79 % de Nitrógeno (gas inerte que no contribuye a la combustión). Por ello el volumen de aire a aportar al sistema es aproximadamente cinco veces el volumen de Oxígeno necesario.

Una operación de combustión como ésta se llamaría completa y perfecta. La operación sería completa porque todo el carbono se habría convertido en dióxido de carbono (CO_2) y todo el hidrógeno en agua (H_2O). También sería perfecta por haber cantidad suficiente de oxígeno para quemar todo el carbono y el hidrógeno sin que quedase oxígeno o aire.

Un ejemplo de combustión completa, pero no perfecta, sería la siguiente:



Aquí tenemos más oxígeno del necesario, el horno trabaja con un exceso de aire.

En la combustión es crítica la relación combustible-oxígeno (aire). Si esta relación es muy pequeña, el combustible será muy pobre para quemarse y si es excesivamente grande, la mezcla será excesivamente rica para arder. El límite de la relación combustible-oxígeno se llama límite de inflamabilidad del combustible.

Factores de los que depende una correcta combustión

En la práctica no nos interesará tener una combustión perfecta, sino tener la máxima eficiencia de la combustión posible.

En cualquier proceso de combustión se debe presentar atención a los siguientes tres puntos:

1. Hay que preparar el combustible para su combustión; si es líquido hay que atomizarlo previamente.

2. Hay que asociar el combustible y el aire en las proporciones adecuadas, en el momento y a la temperatura correctos para el encendido y la combustión.

3. Se debe procurar mantener una cantidad suficiente de calor en la zona de combustión, con el objeto de mantener una temperatura en el hogar que me permita una adecuada vaporización del combustible.

Los quemadores de gas sólo necesitan establecer la proporción de los volúmenes de aire y gas, y asegurar su íntima mezcla. Pero los quemadores de fuel-oil tienen que preparar el combustible fragmentándolo en pequeñas partículas para dejar expuesta la máxima superficie posible a fin de que el calor del horno lo convierta rápidamente en vapor.

Las operaciones de mezcla, encendido y combustión se producen en el pequeño intervalo de tiempo que emplean el combustible y el aire en trasladarse desde el quemador hasta la entrada a la chimenea. Este intervalo de tiempo depende de la distancia recorrida y de la velocidad y grado de turbulencia.

La turbulencia describe aquella condición en que el combustible y el aire giran en remolinos siguiendo vías irregulares desde el quemador hasta la entrada de la chimenea. Es deseable una corriente turbulenta, porque la distancia total que recorre el vapor aumenta al seguir un camino irregular, con lo cual aumenta el tiempo disponible para la combustión.

Hemos resumido la combustión como dependiente de “tres T” : tiempo, temperatura y turbulencia.

Quemadores

Para poder utilizar el calor liberado en la combustión es necesario controlarlo. El quemador es un dispositivo mecánico diseñado para producir una llama estable, con una forma y tamaño predeterminados. Los combustibles líquidos se rompen en pequeñas gotas por medio de un atomizador. Fuel-oil y gas se introducen dentro de la corriente de aire de combustión para asegurar una buena mezcla y estabilizar la base de la llama.

La gama de combustibles, líquidos y gaseosos, que se queman en este tipo de elementos es tremendamente amplia. El diseño del quemador varía dependiendo de la clase de combustible a usar, ya que el tratamiento del mismo para conseguir una buena combustión es diferente. Así podemos establecer una distinción entre quemadores dependiendo del combustible de alimentación. Así tendremos quemadores de gas, quemadores de combustibles líquidos, y quemadores combinados, donde se queman conjuntamente combustibles gaseosos y líquidos.

Existen muchos tipos de quemadores según su diseño variando desde un simple mechero bunsen hasta los quemadores gigantes de un horno de cemento. Por ello, deberemos seleccionar el tipo que más se adapte a nuestras necesidades.

En las plantas industriales se utilizan principalmente dos tipos de quemadores: el de tiro natural, y el de tiro forzado.

Existe abundante documentación sobre quemadores de tiro forzado, por lo que nos centramos en los de tiro natural.

Quemadores: Descripción

El quemador se dimensiona de acuerdo con el tiro disponible e invierte la presión de tiro disponible en inducir velocidad a la corriente de aire que circula por él. Debido al reducido valor de presión del tiro la velocidad adquirida por el aire de admisión será reducida, lo que implica que no exista un gran poder de mezcla al unirse la corriente de aire con el combustible. Esto se traduce en un mayor tiempo de combustión por lo que la llama será larga, y en un mayor exceso de aire para tener una combustión completa.

La ventaja de los quemadores de tiro natural es su reducido coste inicial de instalación. Los quemadores son relativamente baratos y no hay necesidad de ventiladores que impulsen el aire de combustión.

Elementos básicos de un quemador de tiro natural

Los componentes más importantes de un quemador de tiro natural son los siguientes:

1. Registro de aire (Air Register): El aire de combustión entra en un mechero de tiro natural a través de unas aberturas regulables en área y que aseguran una distribución uniforme del aire en la mufla de refractario del mechero.

El área de apertura de los registros se utiliza para regular el caudal de aire de combustión que entra en el mechero. Algunos mecheros tienen dos conjuntos de áreas de regulación, para dar un control más ajustado de la cantidad de aire (registros primario y secundario).

2. Atomizador de combustible líquido (Oil Atomiser): En este elemento la masa de combustible líquido se rompe en pequeñas gotitas al actuar sobre él un chorro de vapor de agua. Ambos, vapor y combustible líquido pulverizado, se inyectarán en la corriente de aire de combustión a través de la boquilla de la caña de fuel.

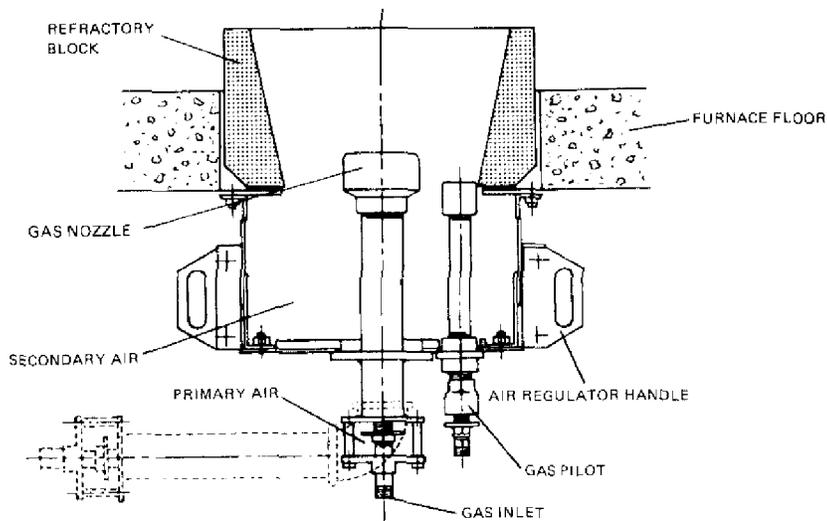
3. Mufla primaria (Primary Block): En la mayoría de mecheros de tiro natural existe una pieza cilíndrica alrededor de la punta del mechero cuyo objetivo es estabilizar la llama de éste. Entre un 15 % y un 20% del aire de combustión entra a través de esta pieza, la cual debe tener la forma interna adecuada para permitir la recirculación de aire y gotas de combustible hacia la raíz de la llama. Esto se usa normalmente en los mecheros que queman fuel-oil.

4. Cañas de Gas (Gas Guns): El gas se introduce en el horno a través de una serie de tubos verticales con multitud de pequeños agujeros por los que entra el aire de combustión. El número de agujeros es tal que permite una mezcla eficiente entre el aire de combustión y el gas.

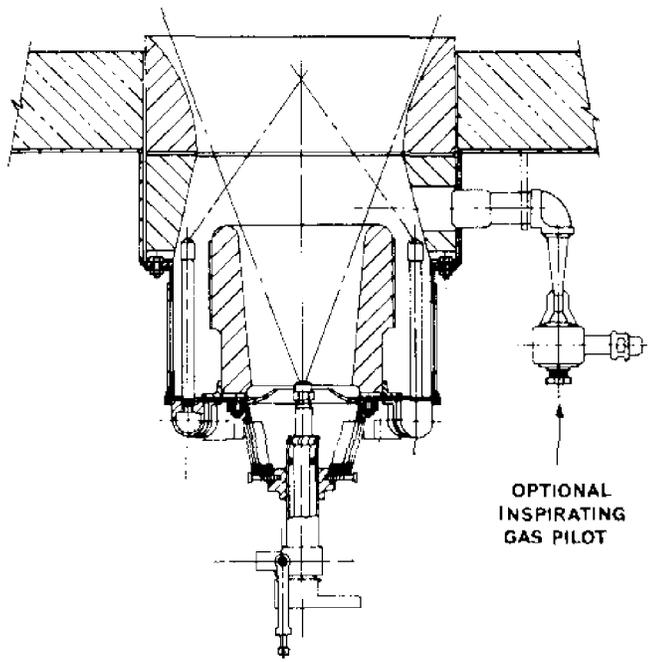
5. Mufla de refractario (Refractory Quarl): Es una pieza de refractario de forma normalmente cilíndrica o cónica que se monta en el suelo del hogar. Su forma interna determina el tamaño de llama y juega un papel muy importante en proporcionar estabilidad a la llama del mechero.

6. Piloto de Gas (Gas Pilot): El piloto de gas se añade al mechero para proporcionar una fuente de ignición en las puestas en marcha y como medida de seguridad durante la operación normal del horno. Tiene un aspecto parecido a los mecheros de gas, con la diferencia de que está diseñado para producir una llama más pequeña. Normalmente su funcionamiento se basa en que el flujo de gas provoca una pequeña succión de aire de combustión que pasa a través de los pequeños agujeros y provoca la combustión completa de la mezcla.

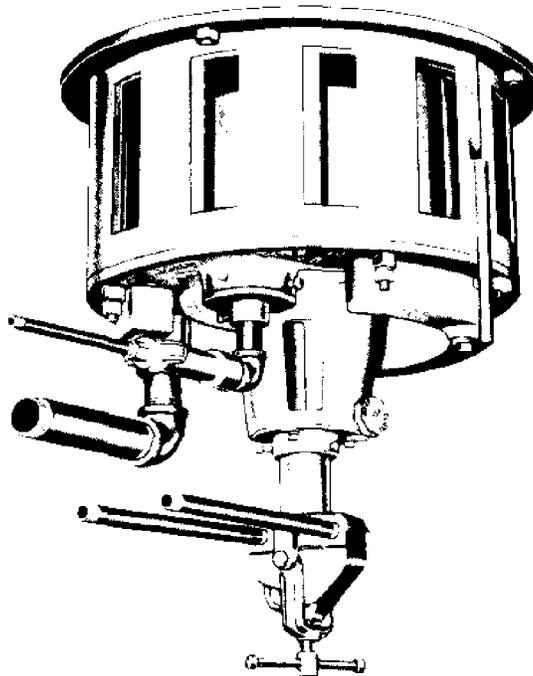
A continuación presentamos el esquema constructivo de diferentes quemadores de tiro natural.



Quemador de Gas de Tiro Natural



Quemador Combinado de Tiro Natural



Quemador de combinado de Tiro Natural

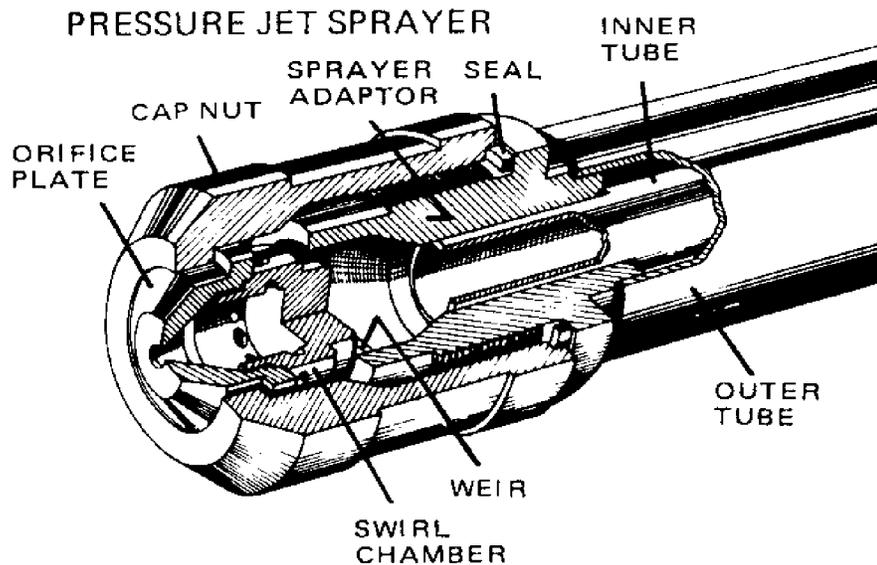
Quemadores de Fuel-Oil. Atomizador

Nota: Aunque existe una gran variedad de combustibles líquidos que pueden usarse para alimentar a los quemadores de un horno de proceso, el fuel-oil es quizá el más empleado, debido en parte a su reducido coste. Por esta circunstancia al estudiar los quemadores de combustible líquido nos referiremos a quemadores de fuel-oil, si bien lo explicado se puede extrapolar a otro tipo de combustible líquido, pudiendo variar las condiciones de operación debido a las características físicas del nuevo combustible.

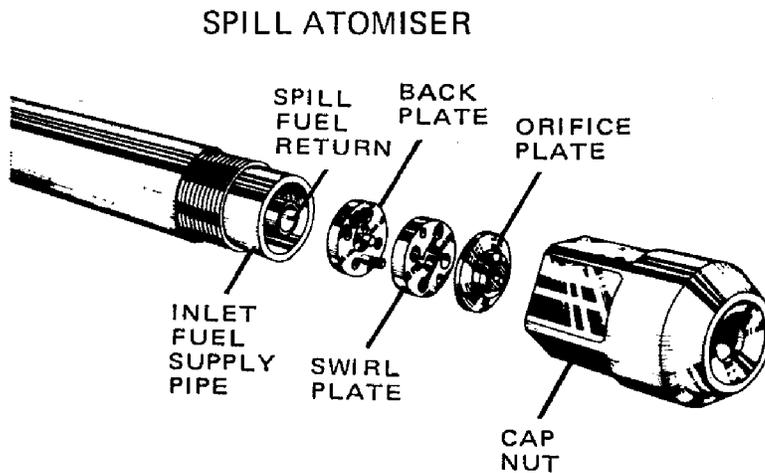
Como ya se ha dicho con anterioridad, para lograr una combustión eficiente y controlada de un fuel-oil es necesaria su atomización previa. Esto sólo ocurre con los combustibles líquidos, ya que los gaseosos se quemarán directamente. Debido a esta característica los quemadores de fuel-oil deberán ir dotados de un atomizador, elemento que no aparece en un quemador de gas.

El diseño del atomizador dependerá del método utilizado para llevar a cabo la atomización del combustible. Según esto, distinguiremos tres tipos de atomizadores:

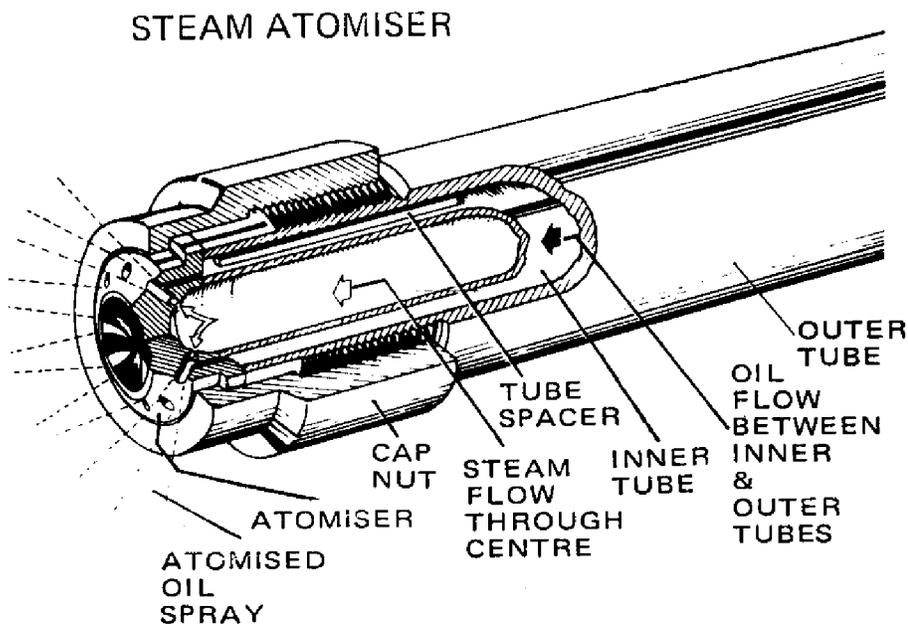
- Atomizador de chorro a presión. El combustible se atomiza a consecuencia únicamente de la alta presión a la que es expulsado por la boquilla de la caña.



- Atomizador de retorno lateral. La atomización se consigue fragmentando la película de fuel-oil en gotas por fuerza centrífuga.



- Atomizador de dos fluidos. El combustible se atomiza usando un segundo fluido (vapor o aire) a alta presión para romper el petróleo en gotitas.

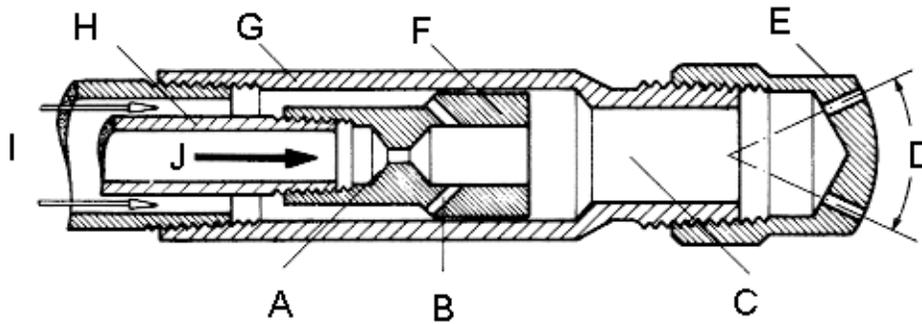


En la Refinería, la atomización del fuel-oil se realiza empleando atomizadores de dos fluidos, sirviendo como medio atomizador el vapor.

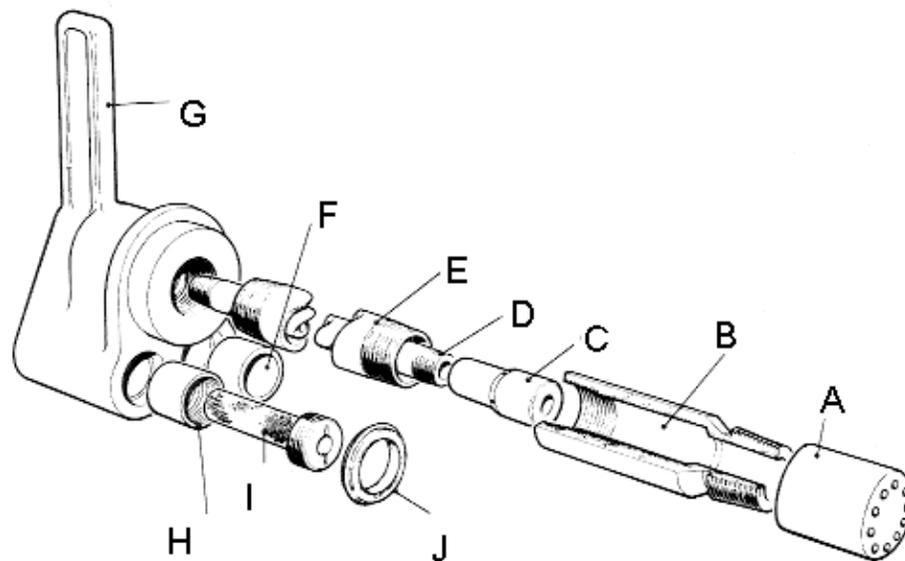
El atomizador va alojado en el interior de la caña de fuel-oil, situada ésta en el cuello del quemador. Así el fuel-oil una vez atomizado pasa a través de la boquilla de la caña introduciéndose a continuación en la corriente de aire de combustión, verificándose la mezcla con ésta previa a la combustión.

La calidad de la atomización depende del tamaño de gota alcanzado en el atomizado, y de la dispección de este a la salida de la boquilla de la caña. La intensidad de la atomización producida, en un mismo atomizador, depende de la cantidad de fluido atomizador empleado y de la presión del mismo. Así, cuando por las características de la alimentación la atomización sea insuficiente se puede conseguir una mayor intensidad en esta aumentando el flujo de vapor al quemador.

A continuación se presenta el esquema de una caña de fuel-oil y su atomizador, en el que se emplea vapor como medio atomizador.

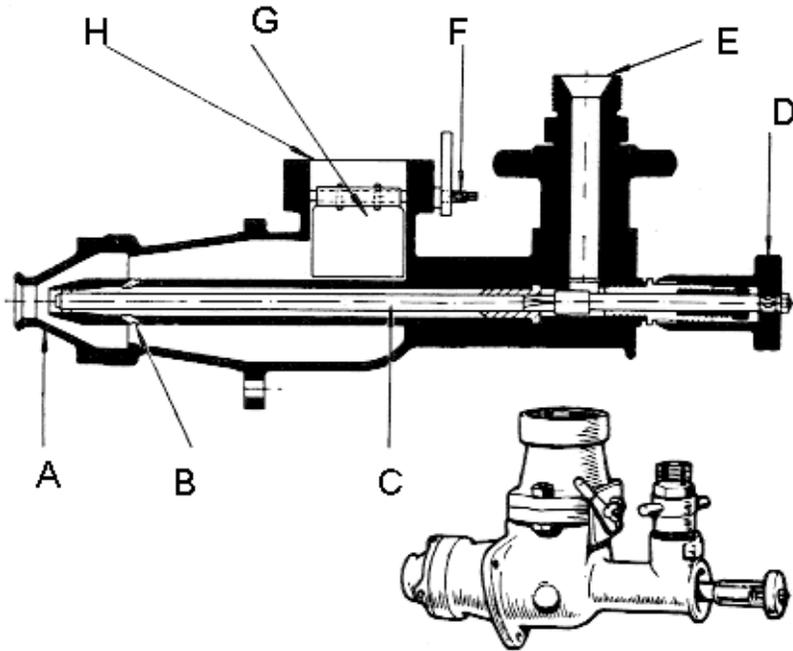


Orificio de gas - oil	Núcleo de mezcla
Orificio de vapor	Cubierta exterior
Cámara mezcladora	Tubería concéntrica
Ángulo de spray	Vapor
Cono de llama de la boquilla	J. Fuel-oil



Cone tip	Atomising medium inlet bush
Outer tip	Manilla
Core	Oil inlet bush
Tubo interior	Filtro (opcional)
Tubo exterior	Junta

Los atomizadores de aire a presión, toman éste del aire de combustión, elevan su presión, y lo usan como medio atomizante.



Boquilla	Entrada de fuel-oil i
Conductos de aire	Kug
Tubería de fuel-oil	Swirler
Regulador de fuel oil	Entrada de aire

Quemadores de gas. Cañas de gas.

El gas para su combustión no requiere de ninguna preparación previa, tal y como ocurría con los combustibles líquidos.

La función de la caña de gas es dirigir la corriente de gas dentro de la corriente de aire, de forma que se consiga una buena mezcla gas/aire y se obtengan una estabilidad en la llama.

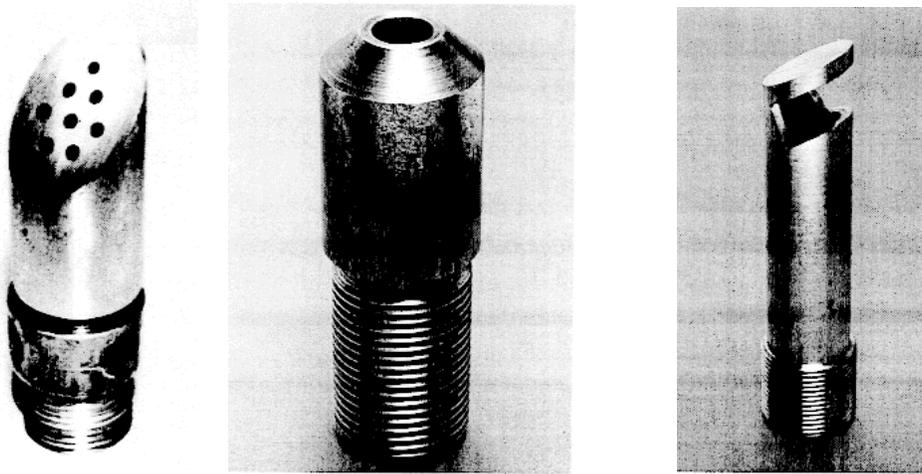
Una caña de gas consiste en una simple conducción en cuyo extremo final va adosada la boquilla de gas. La unión de esta a la caña puede ser bien roscada o embutida

En la boquilla de gas se disponen los orificios de inyección del chorro de gas en la corriente de aire de combustión.

Normalmente un quemador de gas de varias cañas, siendo el número y disposición de las mismas variable con el diseño.

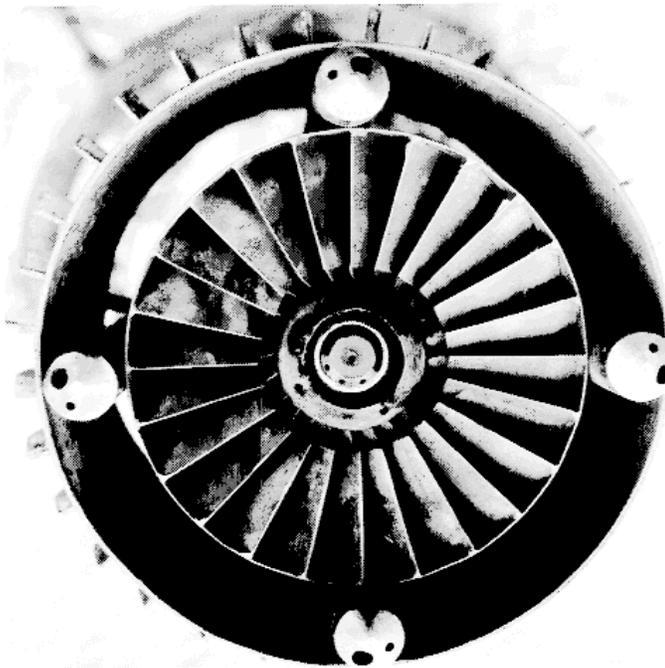
El diseño de la boquilla de gas me determinará en gran medida la calidad e velocidad de la mezcla aire/gas que se verifica en el quemador. La localización, número y dirección de los chorros de gas salientes de la boquilla me determinaran el rendimiento del quemador.

A continuación se presentan varios diseños de boquillas de gas.



Quemadores combinados

Los quemadores combinados consisten en una asociación de cañas fuel-oil y cañas gas para permitir la combustión combinada de ambos tipo de combustible. Con ellos se tiene una mayor flexibilidad de suministro de combustible al horno o caldera, al poder quemar uno u otro, o los dos simultáneamente.



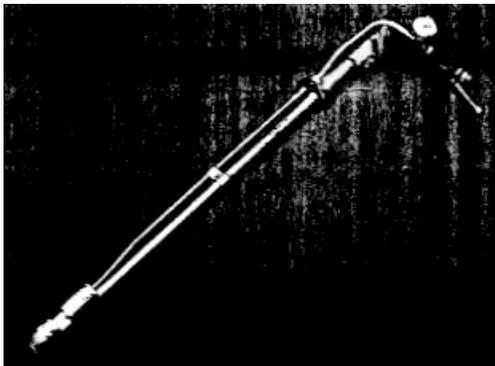
Quemador combinado. 1 boquilla Fuel-Oil central, 4 boquillas Fuel-Gas.

Normalmente, en operación el caudal de fuel-oil quemado será constante, respondiendo a las variaciones de demanda de calor del horno variando la cantidad de gas en la alimentación del quemador.

Pilotos de gas

Cada quemador va dotado de al menos un piloto de gas para asegurar el encendido de la llama principal.

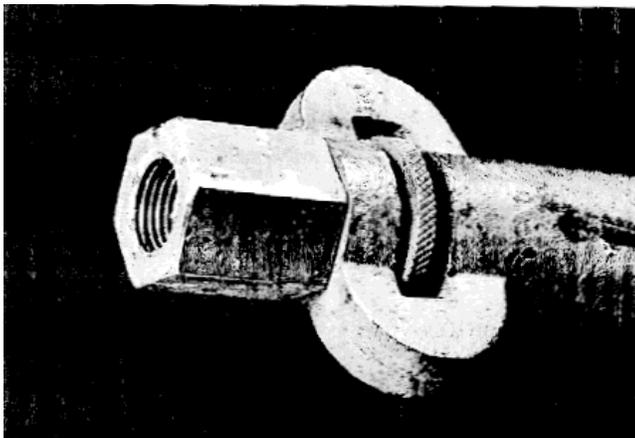
El piloto tiene su alimentación de gas independiente a la del quemador principal de forma que no se vea afectado por los posibles fallos que pudieran existir en la línea principal de alimentación de combustible al quemador. De este modo, se puede asegurar que una fluctuación repentina en el suministro de combustible al quemador que provoque la extinción instantánea de la llama, no afecte a la llama piloto, permitiendo el nuevo encendido de la llama.



Piloto de inspiración interna



Boquilla de retención del piloto



Entrada de Aire/Gas

Alineamiento del quemador

En un quemador se esencial que todos los componentes del mismo estén colocados en una posición relativa correcta unos de otros y concéntricos respecto al eje central del quemador. De otra forma, la estabilidad de la llama y la eficacia de la combustión se verían afectadas.

Anexo

Avería	Causa probable	Soluciones
Los quemadores se apagan.	1. Demasiado pobre la mezcla combustible-aire.	1. Ciérranse los registros y/o el paso del aire de combustión.
Contra llamas o contraexplosiones	Baja presión del combustible en el quemador. Bajo tiro del horno.	Redúzcase el tamaño de la lanza (punta) del quemador. Si se trabaja a bajo régimen, ciérrase el quemador y aumentese el régimen de encendido en otro. Auméntese la abertura del registro.
Insuficiente capacidad.	1. Bajo caudal de combustible. 2. Demasiado pequeña la punta del quemador.	1. Auméntese. 2. Cambiense por otra mayor.
Configuración errática de la llama	Falta de aire de combustión. Excesivo encendido.	Ajústese los registros de aire Redúzcase el régimen de encendido.
Fuego pulsatorio o “que respira”	1. Falta de tiro. 2. Caudal de combustible demasiado bajo.	1. La llama se enciende apaga alternativamente con fuerza casi explosiva. Redúzcase el régimen de encendido. Compruébense los registros de la chimenea. 2. Apáguese el quemador o aumentese el caudal de combustible.
Llama demasiado larga (quemador de fuel oil)	Poco aire de combustión. Poco vapor de atomización.	Ábranse las compuertas del aire secundario. Auméntese el vapor de agua.
Llama demasiado corta (quemador de fuel-oil)	Demasiado aire de combustión Demasiado vapor de atomización.	1. Ciérranse las compuertas del aire secundario. 2. Redúzcase el vapor de agua.
Temperatura de la chimenea demasiado alta	1. Demasiado aire de combustión.	1. Ajústese el registro para que el tiro sea el adecuado. Ajústense los orificios del aires primario y secundario.
Excesivo humo por la chimenea	Pérdida de vapor de atomización. Mayor caudal sin ajuste del aire	Compruébese la causa del fallo del vapor y pásese a combustión de gas. Ajústense las compuertas del aire y/o el registro.
Temperatura demasiado altas del metal de los tubos	1. Los tubos están sucios. 2. Las llamas inciden en los tubos.	1. Ajústese la disribución de la alimentación por los tubos. Redúzcase esta y el régimen de encendido. 2. Ajústese la configuración de la llama.

Posibles casos de mal funcionamiento en un horno