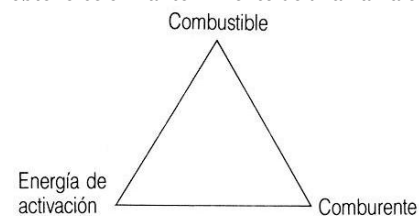


## Tema 2: Combustión y Combustibles

La combustión es un conjunto de reacciones de oxidación con desprendimiento de calor, que se producen entre dos elementos: el **COMBUSTIBLE**, que puede ser un sólido (Carbón, Madera, etc.), un líquido ( Gasóleo, Fuel-Oil, etc.) o un gas (Natural, Propano, etc.) y el **COMBURENTE**, Oxígeno.

La combustión se distingue de otros procesos de oxidación lenta, por ser un proceso de oxidación rápida y con presencia de llama; a su vez también se diferencia de otros procesos de oxidación muy rápida (detonaciones, deflagraciones y explosiones) por obtenerse el mantenimiento de una llama estable.



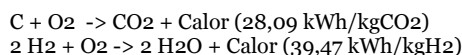
Para que la combustión tenga lugar han de coexistir tres factores:

- COMBUSTIBLE.
- COMBURENTE.
- ENERGIA DE ACTIVACION.

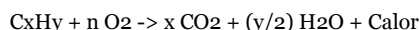
Estos tres factores se representan en el denominado triángulo de combustión, en el cual si falta alguno de los vértices la combustión no puede llevarse a cabo. El comburente universal es el oxígeno, por lo que en la práctica se utiliza el aire como comburente, ya que está compuesto, prácticamente, por 21% Oxígeno (O<sub>2</sub>) y 79% Nitrógeno (N<sub>2</sub>); únicamente en casos especiales se utilizan atmósferas enriquecidas en oxígeno e incluso oxígeno puro (por ejemplo en soldadura). La energía de activación es el elemento desencadenante de la reacción de combustión; en los quemadores habitualmente suele obtenerse mediante una chispa eléctrica entre dos electrodos, en las calderas individuales de gas se obtiene por llama piloto, etc.

La mayoría de los combustibles, al margen de que sean sólidos, líquidos o gaseosos, están compuestos, básicamente, por Carbono (C) e Hidrógeno (H); además de estos componentes principales tienen otros como Azufre (S), Humedad (H<sub>2</sub>O), Cenizas, etc.

En primer lugar se analiza la combustión desde el punto de vista de sus componentes fundamentales (C, H); posteriormente se comentará la influencia de los restantes elementos. Las reacciones de combustión son:



En la práctica los combustibles pueden definirse de la forma **C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>**, dando lugar a las siguientes reacciones:



### ESTEQUIOMETRIA DE LAS COMBUSTIONES

Las consideraciones siguientes se refieren al uso de aire como comburente, ya que es el utilizado en la práctica totalidad de las instalaciones de calderas.

La estequiometría de la combustión se ocupa de las relaciones máxicas y volumétricas entre reactivos y productos. Los aspectos a determinar son principalmente:

- Aire necesario para la combustión
- Productos de la combustión y su composición

Para predecir estas cantidades es preciso referirse a un proceso ideal que dependa de unos pocos parámetros, básicamente la naturaleza del combustible. Para definir este proceso ideal se consideran los tipos de combustión que pueden darse:

**Combustión completa:** Conduce a la **oxidación total** de todos los elementos que constituyen el combustible. En el caso de hidrocarburos:

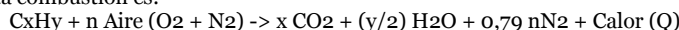
Carbono → CO<sub>2</sub>  
Hidrogeno → H<sub>2</sub>O  
Azufre → SO<sub>2</sub>  
Nitrógeno → N<sub>2</sub>  
Oxígeno → Participará como oxidante

El Nitrógeno se considera como masa inerte, si bien a las altas temperaturas de los humos pueden formarse óxidos de nitrógeno en pequeñas proporciones (del orden de 0,01%).

**Combustión incompleta:** Los componentes del combustible no se oxidan totalmente por lo que aparecen los denominados **inquemados**, los mas importantes son CO y H<sub>2</sub>; otros posibles inquemados son carbono, restos de combustible, etc.

**Combustión estequiométrica:** Es la Combustión Completa realizada con la cantidad estricta de oxígeno; es decir, el aire empleado en la combustión es el mínimo necesario para contener la cantidad de oxígeno correspondiente a la oxidación completa de todos los componentes del combustible.

La expresión de esta combustión es:



En este caso  $0,21 \cdot n = x + (y/4)$ , siendo el calor generado al correspondiente a la combustión completa.

**Poder comburívoro:** Es la cantidad de aire seco, medida en condiciones normales (T<sup>a</sup> = 0°C y P=1atm), mínima necesaria para la combustión completa y estequiométrica de la unidad de combustible. Unidades habituales: Nm<sup>3</sup>/kgCombustible, Nm<sup>3</sup>/Nm<sup>3</sup>Combustible. Es un parámetro característico únicamente de la composición del combustible y puede tabularse con facilidad.

(\* Nm<sup>3</sup> (Normal m<sup>3</sup>) es el gas contenido en 1 m<sup>3</sup> a 0 °C y presión atmosférica.

**Poder fumígeno:** Es la cantidad de productos de la combustión (Nm<sup>3</sup>) que se producen en la combustión estequiométrica de la unidad de combustible. En función de considerar o no el vapor de agua existente en los productos de la combustión, se tienen **Poderes Fumígenos Húmedo y Seco**, respectivamente.

**Coefficiente de exceso de aire:** La mayor parte de las combustiones no transcurren en estas condiciones ideales (completa y estequiométrica), el principal aspecto a considerar será la posibilidad de que la combustión transcurra con exceso o defecto de aire, para caracterizar la proporción de oxígeno se define el parámetro “coeficiente de exceso de aire”:

$n = \text{volumen aire por unidad de combustible} / \text{Poder Comburívoro}$

$n = 1$  : Combustión Estequiométrica

$n < 1$  : Defecto de aire, se dice que la mezcla es rica

$n > 1$  : Exceso de aire, se dice que la mezcla es pobre

### COMBUSTION CON DEFECTO DE AIRE

La cantidad de aire utilizada no contiene el oxígeno necesario para oxidar completamente a los componentes del combustible.

Además de los productos normales de la combustión, Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y Agua (H<sub>2</sub>O), se producen inquemados como el Monóxido de Carbono (CO) e Hidrógeno (H<sub>2</sub>); en algunos casos con mucho defecto de aire puede haber incluso carbono y combustible sin quemar, en los humos.

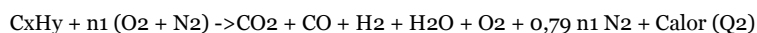
El calor producido es inferior al de la combustión completa ( $Q_1 < Q$ ).

### COMBUSTION CON EXCESO DE AIRE

En este caso la cantidad de aire aportada es superior a la correspondiente a la combustión estequiométrica; la combustión en estas condiciones puede ser completa o incompleta.

- **COMPLETA:** Al emplearse más aire que el estrictamente necesario, en los humos se da la presencia de oxígeno. El calor generado (Q) es el correspondiente a la combustión completa.

- **INCOMPLETA:** La cantidad de aire utilizada es superior a la correspondiente a la combustión estequiométrica, pero a pesar de ello, debido fundamentalmente a que no se ha logrado una buena mezcla entre el combustible y el aire, los componentes del combustible no se oxidan totalmente.



Respecto a la combustión incompleta con defecto de aire, en los productos de la combustión también se tiene oxígeno; en casos extremos en los humos puede haber carbono y combustible sin quemar. El calor producido es inferior al de la combustión completa ( $Q_2 < Q$ ).

La combustión estequiométrica prácticamente es irrealizable, lo que obliga a operar con excesos de aire con el fin de lograr combustiones completas.

Para obtener una buena eficiencia de la caldera es necesario controlar, con bastante precisión, la cantidad de aire que se suministra al proceso de combustión:

- Demasiado aire reducirá la temperatura del hogar y arrastrará una buena parte del calor útil.
- Poco aire producirá una combustión incompleta, se escapará por la chimenea mucho combustible sin quemar y se producirá humo.

Sin embargo, en la práctica, existe un buen número de obstáculos para obtener una combustión completa (estequiométrica):

- Las condiciones en que opera el quemador no son perfectas y es imposible asegurar la mezcla de las moléculas de carbón, hidrógeno y oxígeno.
- Algunas de las moléculas de oxígeno se combinarán con moléculas de nitrógeno para formar óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>).

Para asegurar una combustión completa, se necesita suministrar una cantidad extra de aire o “exceso de aire”. Esto tiene su efecto sobre la eficiencia de la caldera.

Para obtener una correcta combustión debe lograrse una buena mezcla del combustible con el aire; en este sentido los combustibles gaseosos presentan mayor facilidad de mezcla que los líquidos y éstos a su vez más que los sólidos; por este motivo pueden obtenerse menores excesos de aire con los combustibles gaseosos.

## COMBUSTIBLES

Los principales combustibles utilizados en instalaciones térmicas son:

1. **Gas natural:** es una fuente primaria de energía, es decir, no necesita ser procesada desde su obtención. Su composición no es homogénea y depende de cada compañía aunque, en general, está compuesto como mínimo por un 90% por metano (CH<sub>4</sub>). El gas natural contratado debe indicar en el contrato la energía contenida en kWh/m<sup>3</sup>. El suministrador proporcionará el PCS del combustible. Para obtener el PCI basta la siguiente relación:

$$PCI = PCS/1,11$$

2. **Gasóleo:** es un combustible líquido derivado del petróleo. Suele presentar una energía calorífica de unas 10.000 kcal/kg. Otra conversión más utilizada en el estudio energético de instalaciones es considerar **10,14 kWh/litro**.

3. **Gases licuados del petróleo (GPL):** generalmente son butano y propano. Suelen estar implantados en instalaciones aisladas de cierta importancia, contenidos en depósitos especiales ubicados en el exterior de las salas de calderas.

4. **Carbón:** es otra fuente de energía primaria que está prácticamente en desuso, ya que las calderas de este tipo están prohibidas por normativa. Se caracteriza por tener un alto poder calorífico, pero también por emitir una alta concentración de dióxido de carbono y, en muchos casos, compuestos de azufre. En estos momentos está limitado solamente al ámbito industrial y de la producción eléctrica.

5. **Biomasa:** son residuos y derivados de la industria agropecuaria y forestal. Las calderas adaptadas con quemadores de biomasa están en pleno auge y tienen un gran futuro pero, de momento, su implantación todavía es minoritaria. El suministrador debe proporcionar el PCI del combustible entregado

CLASIFICACION DE COMBUSTIBLES INDUSTRIALES				
SOLIDOS	NATURALES	Maderas y Residuos Vegetales	Turbas	
			Lignitos	
	ARTIFICIALES		Carbón	Hullas
				Antracita
LIQUIDOS	ALCOHOLES		Naturales (Fermentación s Hidrólisis)	
	RESIDUALES		Artificiales	
	DERIVADOS DEL PETROLEO		Lejías Negras	
			Gasóleos	
GASEOSOS	RESIDUALES		Fuel-Gas	
	GSA NATURAL		Diferentes Familias	
	GASES LICUADOS DEL PETROLEO (GLP)		Propanos y Butanos	
	ARTIFICIALES o ELABORADOS		Gas de Alto Horno	
			Gas de Coque	
			Gas Pobre	
			Gas de Agua	
BIOGAS		Gas Ciudad		

### PODERES CALORIFICOS DE LOS COMBUSTIBLES

Se define como Poder Calorífico de un combustible, a la cantidad de calor que se obtiene de la oxidación completa, a presión atmosférica, de los componentes de la unidad de masa (o volumen) de dicho combustible.

Habitualmente se expresa en las siguientes unidades

- Combustibles sólidos: kWh/kg.
- Combustibles líquidos: kWh/kg ó kWh/l.
- Combustibles gaseosos: kWh/kg ó kWh/Nm<sup>3</sup>. (\*)

En la combustión, por la oxidación del hidrógeno, se forma agua; además, los combustibles pueden tener un cierto grado de humedad en su composición; dependiendo del estado en que aparezca el agua en los humos, se distinguen dos tipos de poderes caloríficos:

**PODER CALORIFICO INFERIOR (PCI):** Es la cantidad de calor que puede obtenerse en la combustión completa de la unidad de combustible, si en los productos de la combustión el agua está en forma de vapor. En este caso una parte del calor generado en las oxidaciones se utiliza para evaporar el agua, por tanto esta parte del calor no se aprovecha.

**PODER CALORIFICO SUPERIOR (PCS):** En los productos de la combustión el agua aparece en forma líquida, por lo que se aprovecha todo el calor de oxidación de los componentes del combustible. Habitualmente el agua se evacua con los humos en fase vapor, por lo que el poder calorífico más comúnmente utilizado es el inferior.

Combustible	Unidad	Hi	Hs
Gas natural	(kWh/kg)	13,05	14,43
Propano comercial	(kWh/kg)	12,82	13,92
Butano comercial	(kWh/kg)	12,69	13,74
Gasóleo C	(kWh/kg)	11,56	12,23

### RENDIMIENTO DE LA COMBUSTION

El calor que puede obtenerse en una combustión es el correspondiente al Poder Calorífico del combustible (PCI ó PCS), habitualmente referido al PCI. Al realizar la combustión, una parte del calor producido se pierde, asociado a los productos de la combustión; estas pérdidas se pueden agrupar en dos tipos:

- **Pérdidas por Inquemados (Qi):** Corresponden al poder calorífico de los productos de la combustión que no han sido totalmente oxidados. Únicamente se presentan en el caso de combustiones incompletas, siendo más altas cuanto mayor sea la cantidad de inquemados.

- **Entalpía de los productos de la combustión (Qhs):** Corresponde al calor utilizado en calentar los humos hasta la temperatura a la cual escapan por la chimenea, ya que a partir de ese punto el calor que llevan no se recupera. Estas pérdidas son mayores cuanto más altas sean las temperaturas de humos. También aumentan con el exceso de aire, ya que con el mismo aumenta el volumen de humos, transportando mayor cantidad de calor.

$$\mu = \frac{PCI - Q_i - Q_{hs}}{PCI}$$

$$\mu = 1 - \frac{Q_i}{PCI} - \frac{Q_{hs}}{PCI} = 1 - q_i - q_{hs}$$

Con el fin de obtener el máximo rendimiento de combustión posible, ésta debe ajustarse de modo que se logre la combustión completa con el menor exceso de aire posible. Además, el gasto de combustible debe ajustarse de modo que se obtengan las temperaturas de humos más bajas posibles, produciendo la potencia necesaria para el servicio.

### **ANALIZADORES DE COMBUSTION**

Son equipos que analizan los parámetros de la combustión; siempre analizan Humos Secos, ya que en caso contrario la humedad de los humos podría estropear los mecanismos interiores de los analizadores; por ello en primer lugar “secan” los humos pasándolos por un filtro.

Habitualmente incorporan:

- Medidor de O<sub>2</sub>; resultado en %
- Medidor de CO, indicación en ppm.
- Temperatura Ambiente (°C).
- Temperatura de Humos (°C).
- Medición de tiro (Pa, mmCA, mbar, etc).

Con la medición de O<sub>2</sub>, indicando previamente el combustible que se está analizando, el aparato calcula el exceso de aire y el CO<sub>2</sub> correspondiente, con todos estos datos proporciona el rendimiento de la combustión.

Las mediciones realizadas directamente por el analizador son válidas sea cual sea el combustible; sin embargo los datos de exceso de aire CO<sub>2</sub> y rendimiento, al ser calculados por el equipo, dependen de que al mismo se la haya indicado correctamente dicho combustible.

#### ***Oxígeno (O<sub>2</sub>)***

El oxígeno restante no utilizado en la combustión en el caso de utilizar aire en exceso aparece como componente de los gases de combustión y se utiliza para medir el rendimiento de la combustión. Se utiliza para determinar las pérdidas por chimenea y el contenido de dióxido de carbono.

*Valores típicos en los gases de combustión:*

*Calderas de gasoil: 2% - 5%*

*Calderas de gas: 2% - 6%*

#### ***Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)***

El dióxido de carbono es un gas incoloro e inodoro con un ligero sabor agrio. Bajo la influencia de la luz solar y el verde de las hojas, la clorofila, las plantas convierten el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en oxígeno (O<sub>2</sub>). La respiración humana y animal convierte el oxígeno (O<sub>2</sub>) otra vez en dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Esto crea un equilibrio que los productos gaseosos de la combustión distorcionan. Esta distorsión acelera el efecto invernadero. El valor límite de efecto es de 5000 ppm. A concentraciones superiores al 15% en volumen (150.000 ppm) en la respiración, se produce una inmediata pérdida de consciencia.

El anhídrido carbónico CO<sub>2</sub> es el resultado de una combustión completa del carbono. Gas más pesado que el aire, inofensivo salvo que sustituya al mismo en el porcentaje suficiente que pueda producir la asfixia.

Al CO<sub>2</sub> se le atribuye gran parte del fenómeno de calentamiento de la tierra (efecto invernadero) al igual que hacen el vapor de agua, el ozono, el metano, los óxidos de nitrógeno y los derivados halogenados de los hidrocarburos saturados (CFCs, HCFCs y HFCs), al impedir que la radiación infrarroja emitida por la Tierra durante la noche atraviese la atmósfera hacia el espacio exterior, impidiendo su enfriamiento.

El incremento de la producción de CO<sub>2</sub> por los distintos procesos de combustión (edificios, industria, transporte, etc.) no ha sido compensado, ni puede compensarse, con una mayor absorción por la acción clorofílica de las plantas, o por la disolución en el agua del mar, lo que ha provocado que en el siglo anterior la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera haya aumentado en 100 ppm, pasando de un valor de 250 a los actuales 350 ppm.

*Valores típicos en los gases de combustión:*

*Calderas de gasoil: 12,5 % - 14 %*

*Calderas de gas: 8 % - 11 %*

#### ***Monóxido de carbono (CO)***

El monóxido de carbono es un gas venenoso al respirar, incoloro, inodoro y es el producto de una combustión incompleta. En concentración demasiado alta, no permite que la sangre absorba oxígeno. Si, por ejemplo, el aire de una habitación es de 700 ppm de CO, una persona respirándolo durante 3 horas morirá. El valor límite es de 50 ppm.

Su presencia en los productos de la combustión es prácticamente nula cuando la combustión tiene lugar con exceso de aire. Cantidades importantes de CO pueden formarse solamente en caso de combustión con defecto de aire, de ahí la importantísima necesidad de que las calderas atmosféricas se instalen siempre en zonas exteriores o en locales específicos para ello, de manera que se pueda garantizar la presencia permanente del suficiente caudal de aire en el ambiente donde se encuentren instaladas mediante rejillas, ventanucos o respiraderos de aire de sección suficiente.

*Valores típicos en los gases de combustión:*

*Calderas de gasoil: 80 ppm - 150 ppm*

*Calderas de gas: 80 ppm - 100 ppm*

## Nitrógeno (N<sub>2</sub>)

El nitrógeno (N<sub>2</sub>) es el principal componente (79% en vol.) del aire que respiramos. Este gas incoloro, inodoro, y sin sabor no interviene en la combustión. Entra en la caldera como un lastre, se calienta y sale por la chimenea.

Valores típicos en los gases de combustión:  
Calderas de gasoil/gas: 78 % - 80 %

## Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)

A altas temperaturas (combustión), el nitrógeno (N<sub>2</sub>) presente en el combustible y en el aire ambiente se combina con el oxígeno del aire (O<sub>2</sub>) y forma el monóxido de nitrógeno (NO). Después de algún tiempo, este gas incoloro se oxida en combinación con el oxígeno (O<sub>2</sub>) para formar dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>). El NO<sub>2</sub> es soluble en agua, tóxico si se respira (produce daños reversibles en el pulmón) y contribuye a la formación del ozono en combinación con la radiación ultravioleta (luz solar). El NO y NO<sub>2</sub> en conjunto se llama óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>).

La formación de los óxidos de nitrógeno NO<sub>x</sub>, obtenidos por la combinación de los compuestos presentes en el aire (20,99% de oxígeno y 78,03% de nitrógeno en volumen), es una función exponencial de la temperatura que se alcanza en la cámara de combustión, del tiempo de permanencia de los humos en esa zona y del porcentaje de oxígeno presente en la misma. El NO<sub>2</sub> es el representante más significativo de todos los óxidos de nitrógeno, en cuanto que los otros (NO, N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) tienden a transformarse en el primero por reacciones químicas que tienen lugar en la atmósfera y por acción principal del ozono. No obstante, la contribución de las instalaciones térmicas a la formación del NO<sub>x</sub> global atmosférico es muy inferior a la que se atribuye al tráfico y a procesos industriales. Sus efectos para la salud, a las concentraciones usuales presentes en las ciudades, se limitan a la irritación de las mucosas. Valores a partir de 50 mg/m<sup>3</sup> provocan bronquitis y por encima de 280 mg/m<sup>3</sup> neumonía. La absorción de la luz solar por parte del NO<sub>2</sub> conduce al enturbiamiento del aire.

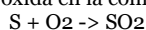
La forma de reducir la producción de NO<sub>x</sub> en calderas es mediante el empleo de quemadores catalíticos y radiantes, que persiguen una mayor combinación combustible/comburente, lo que posibilita un menor tiempo de presencia de los productos en la cámara de combustión para obtener un mismo resultado. Para ello existen distintas soluciones, desde quemadores de premezcla que alcanzan esa combinación íntima entre el combustible y el comburente momentos antes de la combustión, hasta quemadores que evitan o minimizan la formación de llama en la combustión mediante, por ejemplo, una malla metálica, lo que hace que se libere y emita toda la energía de la reacción de combustión en forma radiante hacia una cámara de combustión diseñada específicamente al efecto para aprovechar al máximo esta forma de transmisión de calor.

Valores típicos en los gases de combustión:  
Calderas de gasoil/gas: 50 ppm - 100 ppm

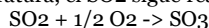
## Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)

El dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) es un gas tóxico incoloro con un olor fuerte. Se forma a partir del azufre del combustible. El valor límite es de 5 ppm. El ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) se forma en combinación con agua (H<sub>2</sub>O) ó condensados.

El azufre presente en el combustible se oxida en la combustión según la reacción:



En presencia de oxígeno y a alta temperatura, el SO<sub>2</sub> sigue reaccionando:



El trióxido de azufre reacciona a su vez con el vapor de agua formado en la combustión, cuya mezcla gaseosa, cuando se enfría por debajo de su punto de rocío (punto de rocío ácido), se condensa a ácido sulfúrico dando lugar a la corrosión acelerada de las superficies más frías de la caldera.

El conocimiento del punto de rocío de los productos de la combustión es muy importante. En las calderas estándar y en las de baja temperatura, así como en los conductos de humos, se persigue evitar la condensación del vapor de agua por los daños que puede provocar. Por el contrario, en las calderas de condensación se recupera una parte importante de la diferencia entre PCS y PCI del combustible, condensando una parte del vapor de agua con el fin de aumentar el rendimiento de la caldera.

El vapor de agua en los humos empieza a condensar a la temperatura de rocío de la mezcla de gases, la cual depende de su presión parcial, que a su vez depende del contenido de vapor de agua en su mezcla.

	Exceso de aire %				
	0	25	50	75	100
Gasóleo	50 °C	47 °C	44 °C	41 °C	39 °C
Gas natural	60 °C	56 °C	53 °C	50 °C	48 °C

Se aprecia que, por un lado, la temperatura de punto de rocío crece cuando el combustible va siendo más ligero (con mayor contenido de H<sub>2</sub> > mayor concentración de vapor de agua) pero, por otro, disminuye con el aumento del exceso de aire (menor concentración de vapor de agua en los gases resultantes por el incremento de aire).

La forma de evitar los efectos nocivos (corrosivos) sobre las paredes de los tubos y otras superficies de la caldera, y descartada la opción de elevar el exceso de aire para reducir la temperatura de rocío por razones obvias de eficiencia energética, es la de mantener la temperatura del agua de retorno por encima de un cierto valor mínimo, que depende del tipo de combustible.

Sin embargo, en las calderas de baja temperatura el tema se ha resuelto con el diseño específico de las superficies de intercambio térmico entre humos y el agua para soslayar este fenómeno de la condensación, y en las calderas de condensación este fenómeno se persigue y provoca dentro de la caldera, lo que hace que sus superficies de intercambio deban estar construidas con materiales resistentes a la corrosión.

Valores típicos en los gases de combustión:  
Calderas de gasoil: 180 ppm - 220 ppm

### **Inquemados sólidos**

Los quemados sólidos sólo se producen a partir de combustibles sólidos o líquidos. Están formados mayoritariamente por partículas de carbono e hidrocarburos fraccionados. La formación de quemados puede deberse a dos causas fundamentales: 1 Mal funcionamiento del quemador, lo cual se traduce en:

- No se consigue la adecuada uniformidad de la mezcla del combustible y el aire.
  - No se atomiza el combustible lo suficiente.
  - La viscosidad del combustible líquido es incorrecta.
  - La intensidad de fuego y las dimensiones de la llama no son adecuadas a la cámara de combustión.
- 2 Aire de combustión insuficiente, debido a lo cual no se puede completar la reacción de combustión.

Los quemados sólidos son visualmente apreciables por el ensuciamiento de los conductos de humo (hollín) y la aparición de humos oscuros en la chimenea. Su aparición produce dos efectos perjudiciales:

- Representa una pérdida de potencia calorífica del combustible, ya que en la combustión completa del carbono se producen 32 MJ/kg y si la operación es parcial o no se lleva a cabo no se obtienen.
- Las partículas sólidas en forma de hollín se irán depositando en las superficies de intercambio de la caldera, dificultando la transmisión de calor de los gases al agua, lo que provocará un aumento de las pérdidas de calor por aumento de la temperatura de los gases en el conducto de evacuación y chimenea.

### **Inquemados gaseosos**

Están formados por CO e hidrocarburos ligeros. Las causas de su formación suelen ser:

- Insuficiente aire de combustión.
- Mal funcionamiento del quemador.
- Quemador inadecuado.

Cuando el combustible es un gas, su combustión incompleta puede producir elevadas concentraciones de CO y otros hidrocarburos, siendo el CO el mejor indicador de la mala combustión. Los hidrocarburos ligeros, principalmente metano, a partir de concentraciones elevadas pueden provocar explosiones en el conducto de evacuación o en la chimenea por inflamación espontánea, lo cual resulta peligroso.