

COMBUSTIÓN

1. La combustión. Tipos de combustión

La combustión es una reacción química de oxidación, que se produce de forma rápida, entre dos sustancias, combustible y comburente, en la que se libera energía, en forma de luz y calor principalmente. Además se producen los (PDC) humos y gases.



Los componentes del combustible susceptibles de ser quemados (carbono, hidrógeno, azufre y nitrógeno) se oxidan al combinarse con el oxígeno que aporta el comburente.

Generalmente se utiliza el aire como comburente, que además de oxígeno (21%), aporta a la reacción otros elementos, como el nitrógeno (78%), vapor de agua, dióxido de carbono y gases nobles en pequeñas proporciones (1% restante).

El proceso de combustión se inicia con la aplicación de una fuente de calor a una mezcla lo suficientemente rica de combustible y comburente, produciéndose una reacción rápida de oxidación del combustible, que se manifiesta en forma de llama.

| ELEMENTO | REACCIÓN DE COMBUSTIÓN | ENERGÍA LIBERADA | TIPO REACCIÓN |
|-----------------------------|-------------------------------|------------------|--|
| CARBONO (C) | $C + O_2 \rightarrow CO_2$ | 33.950 kJ/kg | REACCIÓN COMPLETA, CON EXCESO DE OXÍGENO |
| CARBONO (C) | $2C + O_2 \rightarrow 2CO$ | 10.204 kJ/kg | REACCIÓN INCOMPLETA, CON FALTA OXÍGENO |
| HIDRÓGENO (H ₂) | $H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$ | 144.200 kJ/kg | |
| AZUFRE (S) | $S + O_2 \rightarrow SO_2$ | 9.080 kJ/kg | |
| NITRÓGENO (N) | $N + O_2 \rightarrow NO_x$ | | |

Tabla con las reacciones básicas de oxidación de los componentes del combustible

El SO₂ resultante de la combustión del azufre forma ácido sulfuroso o sulfúrico al combinarse con agua H₂O. Los ácidos resultantes son responsables de la corrosión ácida al descender la temperatura de los 137 °C (temperatura rocío del ácido).



La combustión del nitrógeno (N), da como resultado gases nocivos tipo (NO_x), como el **óxido nítrico (NO)** y el **dióxido de nitrógeno (NO₂)** que contienen nitrógeno y oxígeno en diversas proporciones. Contribuyen al calentamiento global y pueden provocar lluvia ácida.

Por todo ello estas emisiones están restringidas por las diferentes normativas de emisión de gases contaminantes (ERP).

Por ello las calderas y calentadores de bajo NO_x utilizan tecnologías para rebajar la temperatura de los humos y así el nivel de contaminación, mediante la refrigeración del quemador, rebajando la temperatura de los humos y rebajando el nivel de contaminación.

Dependiendo de las proporciones en que intervienen el combustible y el comburente en la reacción de combustión, podemos definir tres tipos de combustiones:

- **Combustión incompleta:** es la que se produce con defecto de oxígeno, al aportarse a la reacción de combustión una cantidad de aire menor a la necesaria para quemar completamente el combustible disponible.

Este tipo de combustión favorece la formación de monóxido de carbono (CO), en lugar del dióxido de carbono (CO₂) que se produce en las combustiones completas.

Además de producir un gas altamente tóxico, resulta antieconómica al quedar restos de combustible sin quemar que se eliminan con los humos.

- **Combustión completa o limpia:** la reacción de combustión completa es la que se produce con un exceso de oxígeno, lo que garantiza la combustión total del combustible.

De esta forma se aprovecha al máximo el combustible disponible, pero se generan pérdidas de calor, al eliminarse mayor cantidad de gases junto con los humos, calentados en la combustión, bajando el rendimiento.

- **Combustión neutra (o estequiométrica):** en este tipo de combustión se aporta a la reacción la cantidad de aire estrictamente necesaria para quemar completamente todo el

combustible disponible (aire estequiométrico).

En la práctica, se trata de conseguir combustiones completas, que se aproximen a la combustión neutra. Hay que tener en cuenta que para favorecer la reacción de combustión, debe mezclarse lo mejor posible el combustible con el comburente. Esto resulta más fácil aumentando la cantidad de aire que se aporta a la combustión, para que no falte oxígeno en la misma.

Para determinar el exceso de aire que se aporta a la combustión se utiliza el coeficiente de exceso de aire, que se define como la relación entre la cantidad de aire introducida y la estrictamente necesaria para llevar a cabo la combustión.

$$n = \frac{A_{\text{introducido}}}{A_{\text{mínimo}}}$$

Dependiendo del tipo de combustible, se recomienda un valor para el coeficiente o índice de exceso de aire:

| COMBUSTIBLE | EXCESO DE AIRE | ÍNDICE DE EXCESO DE AIRE |
|-------------|----------------|--------------------------|
| LÍQUIDO | 15 ÷ 25% | 1,15 ÷ 1,25 |
| GASES | 5 ÷ 15% | 1,05 ÷ 1,15 |
| CARBÓN | 30 ÷ 50% | 1,30 ÷ 1,50 |
| MADERA | 10 ÷ 40% | 1,10 ÷ 1,40 |

Según la velocidad de la combustión podremos establecer la siguiente clasificación de la combustión:

-Si la reacción es lenta, es OXIDACIÓN; no hay aumento de la temperatura (oxidación del hierro, amarilleo del papel). Se produce sin emisión de luz y poca emisión de calor que se disipa en el ambiente.

-Si la reacción es normal, es COMBUSTIÓN ESTACIONARIA; se produce con emisión de luz (llama) y calor, que es perceptible por el ser humano. El frente de llama tiene unos valores de varios centímetros por segundo. La velocidad de la combustión es estable a temperatura constante baja y velocidad pequeña.

-Si la reacción es rápida, es COMBUSTIÓN EXPLOSIVA O DEFLAGRANTE; combustión que se produce cuando la velocidad de propagación del frente de llama es menor que la del sonido; su valor se sitúa en el orden de metros por segundo. Ondas de presión 1 a 10 veces la presión inicial.

-Si la reacción es muy rápida, es COMBUSTIÓN DETONANTE; combustión que se produce cuando la velocidad de la propagación del frente de llama es mayor que la del sonido; se alcanzan velocidades de kilómetros por segundo. Ondas de

presión de hasta 100 veces la presión inicial. la mezcla de combustible mas comburente no arde completamente.

Todo proceso de combustión se caracteriza por los siguientes parámetros:

1) Temperatura de ignición. En °C y medida a 1 atmósfera, es la temperatura a la que los vapores de un combustible arden espontáneamente. Depende de las condiciones en que se encuentra el combustible (naturaleza, cantidad y estado de las superficies en contacto.)

2) Temperatura de inflamación. En °C y medida a 1 atmósfera, es aquella que, una vez encendidos los vapores del combustible, éstos continúan por sí mismos el proceso de combustión.

3) Velocidad de combustión. Es la velocidad con la que se produce la reacción química entre combustible y comburente.

2. Productos de la combustión. El triángulo de la combustión (diagrama de Ostwald).

Productos de la combustión

Como resultado de la combustión se genera, además de energía, una serie de residuos o productos contaminantes, que se eliminan en forma de humo y cenizas, y que pueden ser:

- Restos de combustibles no quemados (Hidrocarburos, H_2O_2 ,...) o parcialmente quemados (CO y partículas de carbono sólidas no quemadas) resultado de combustiones incompletas.
- Impurezas presentes en el combustible, quemadas o no (SO_2 , cenizas,...).
- Componentes del aire, quemados o no (NO, NO_2 , O_2 , N_2 ...).
- Componentes del combustible quemados (CO_2 y H_2O).

Cada uno de estos productos tiene unas propiedades distintas, que lo hacen más o menos perjudiciales para el entorno (contaminación atmosférica) o para la propia instalación de producción de calor:

- Dióxido de Carbono (CO_2): gas responsable del efecto invernadero.
- Monóxido de Carbono (CO): gas muy tóxico procedente de combustiones incompletas.
- Dióxido de azufre (SO_2): resultado de la oxidación del azufre presente como impureza en el combustible, que en contacto con el agua procedente de las condensaciones o con la humedad ambiental puede formar ácido sulfúrico, que puede dañar gravemente los componentes de la instalación. Es el responsable de la lluvia ácida.

Diagrama de Ostwald

Si se analiza la composición porcentual de los humos resultantes de la combustión, es posible representar gráficamente el resultado obtenido y dibujar así el denominado diagrama de OSTWALD, que resultará distinto para cada combustible.

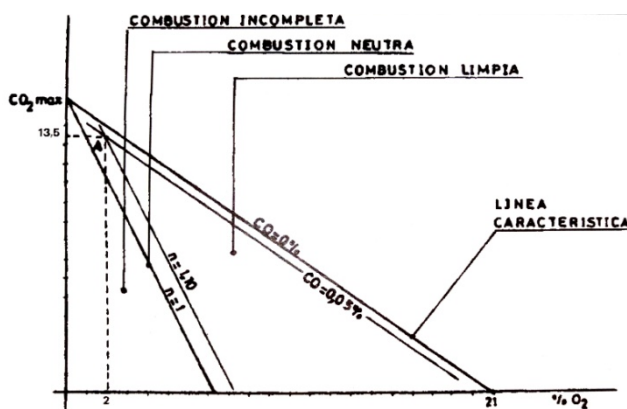
En el diagrama podemos definir los siguientes elementos:

- Eje horizontal de accisas: En el representamos el valor medido de O_2 (en %)
- Eje vertical de ordenadas: En el representamos el valor medido de CO_2 (en %)
- Recta de combustión completa o perfecta: representa la línea en la que todo el carbono se quema y se transforma en CO_2 .

- Rectas de igual contenido de "CO" (menos inclinadas): son líneas paralelas a la recta de combustión completa que permiten determinar la cantidad de CO que se produce.
- Rectas de igual exceso de aire "n" (mas inclinadas): nos indican el coeficiente de exceso de aire de la combustión, siendo la más importante de todas ellas la línea de aire "n=1", que divide la gráfica en dos zonas, la que corresponde a combustiones con exceso de aire (combustión limpia) y la que corresponde a combustiones con defecto de aire (combustión incompleta).

A partir de esta gráfica se puede determinar la calidad de la combustión que se está realizando y nos permitirá tomar las medidas necesarias para mejorarla en caso de que sea necesario.

Para utilizar el diagrama de Ostwald es necesario conocer el combustible que se está quemando y los porcentajes de CO_2 y de O_2 presentes en el humo resultante de la combustión.



Líneas del Diagrama de Ostwald

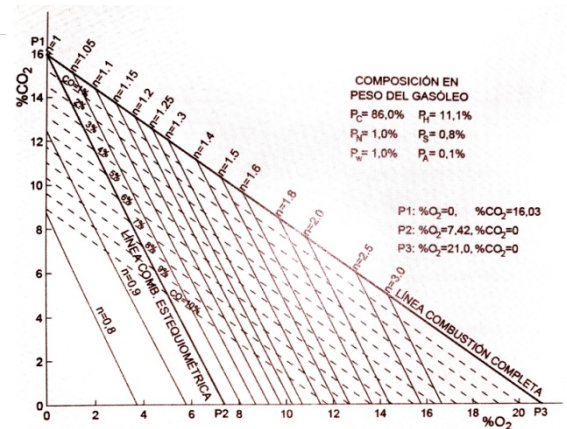


Diagrama de Ostwald para el gasóleo C

De un punto cualquiera del diagrama, podemos obtener los datos siguientes:

- Porcentaje de dióxido de carbono y de oxígeno presente en el humo.
- Coeficiente de exceso de aire.
- Porcentaje de monóxido de carbono presente en el humo.

No toda la energía liberada en la combustión puede ser aprovechada, ya que se producen unas pérdidas derivadas del mismo proceso. Estas pérdidas son las siguientes:

- Calor disipado con los gases que intervienen en la reacción de combustión y que se eliminan a mayor temperatura que la que tenían cuando se han introducido, junto con los humos resultantes.



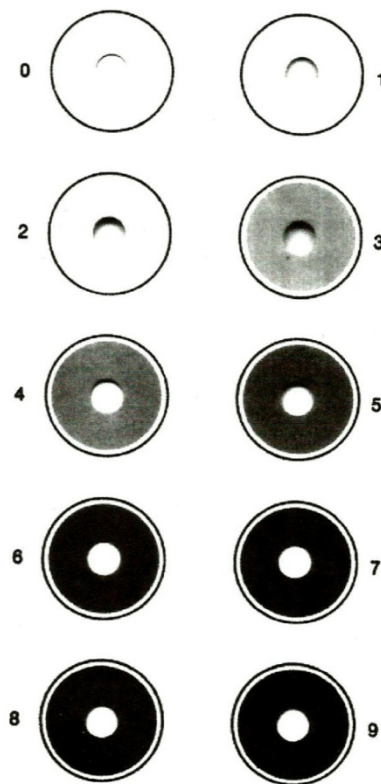
- Pérdidas de calor por la humedad contenida en el aire y en el combustible utilizado.
- Pérdidas por la presencia de combustible no quemado en los humos.
- Pérdidas por la presencia de partículas de carbono no quemadas que se eliminan en el humo o en forma de cenizas.

Todas estas pérdidas no se pueden eliminar totalmente pero se pueden reducir si se mejora la calidad de la combustión, aportando las cantidades de aire necesarias, realizando una buena mezcla entre comburente y combustible y cuidando la calidad de este último.

3. Índice opacimétrico. Escala o índice de Bacharach

Mide el contenido de inquemados en los humos, mediante la comparación con una escala preestablecida de grises, de las manchas dejadas por los humos al atravesar el papel blanco.

Para ello se realiza una extracción de humos y se inyecta en un filtro de papel que comparamos con la escala de grises de bacharach



El índice de opacidad máximo aconsejado de la escala de Bacharach para combustibles líquidos son "2" para el gasóleo C y "3" para un fuel medio.

4. Poder calorífico de los Combustibles

- **Poder calorífico:** calor producido por la combustión completa de la unidad de masa del combustible; se expresa en Julios/kilogramo o kcal/kg.
- **Poder calorífico superior:** calor cedido en la combustión completa de la unidad de peso del combustible, en oxígeno, enfriando los productos resultantes de la combustión hasta la temperatura inicial de suministro del oxígeno (15° C). Incluye por tanto el calor cedido por la condensación del agua contenida en los productos de la combustión (597,2 kcal/kg).
- **Poder calorífico inferior:** calor que se obtiene de la combustión completa de la unidad de peso del combustible, en oxígeno, enfriando los productos resultantes de la combustión hasta 100° C y sin condensar el vapor. No hay condensación y por ello todo el agua formada en la combustión esta en forma de vapor en los productos de combustión. El PCI es menor que el PCS.

El PCI (poder calorífico inferior) es el calor de la combustión que no aprovecha la energía de condensación del agua. El PCS (poder calorífico superior) aprovecha esta energía y por tanto, con la misma cantidad de combustible, se genera más calor.

Para aprovechar el PCS son necesarias calderas específicamente diseñadas para ello, son lo que se denomina, calderas de condensación. Una caldera que no sea de condensación, se debe calcular con el PCI.

| COMBUSTIBLE | P.C.I | | P.C.S | |
|--------------------|--------|---------------------|--------|---------------------|
| | kWh/kg | kWh/Nm ³ | kWh/kg | kWh/Nm ³ |
| GAS NATURAL | 13,05 | 10,83 | 14,43 | 11,98 |
| PROPANO | 12,82 | 26,2 | 13,92 | 28,46 |
| BUTANO | 12,69 | 32,2 | 13,74 | 34,9 |
| GASOLEO C | 11,56 | - | 12,23 | - |

5. El índice de Wobbe del combustible

El índice de wobbe se define como el cociente entre su PCS y la raíz cuadrada de la densidad relativa del gas. $W = PCS/\sqrt{GE}$.

El índice de Wobbe de un gas es un parámetro importante cuando se quiere mezclar gases combustibles y el aire. Dos gases con el mismo índice de wobbe, a igualdad de presión y temperatura de suministro serán intercambiables y se podrán mezclar.

El índice de wobbe sirve para clasificar los gases combustibles familias:

- 1ª familia: Gases manufacturados (bajo índice de wobbe)
- 2ª familia: Gas natural (índice de wobbe medio)
- 3ª familia: GLP, Gas propano o butano (alto índice de wobbe)

6. Rendimiento de la combustión

En el proceso de combustión, no toda la energía química del combustible se transforma en agua caliente utilizable, ya que se producen diferentes tipos de pérdidas como son:

- 1) Pérdidas por calor sensible en los humos (suponen un % alto).** Dependen de la temperatura de los humos, del volumen de los humos y del calor específico de los humos.
- 2) Pérdidas por inquemados. (suponen un % pequeño, menos del 1%).** Son debidas a la combustión incompleta del C, produciéndose CO.
- 3) Pérdidas por radiación y convección a través de la carcasa de la caldera(suponen un 5 % aproximadamente) .**

Por todo ello no toda la potencia nominal consumida P_n , que está en el combustible se convierte en potencia útil P_u , aprovechable para calentar agua.

Se define el rendimiento como la relación entre la potencia útil y la potencia consumida en %:

$$Re = (P_u / P_n) \times 100$$

7. Análisis de la combustión

El análisis de los productos de combustión se realiza mediante analizadores de gases. El equipo de medida debe encontrarse en **el periodo de validez de su calibración de 12 meses**.

La caldera deberá estar funcionando a máxima potencia varios minutos (poniendo el termostato al máximo) hasta llegar a un funcionamiento estable (**régimen permanente**).

En ese momento se introduce la varilla del analizador (con un orificio en el extremo) en el punto de toma del conducto de humos de la caldera. A continuación se realiza una aspiración, extrayéndose mediante una bomba una muestra de gases.

Unos sensores electroquímicos y una sonda de temperatura analizan y miden la temperatura de los gases y del ambiente.

Los datos obtenidos son mostrados en una pantalla o impresos mediante una impresora.

Los resultados obtenidos son:

CO₂: % en volumen

O₂: % en volumen

CO: ppm (partes por millón). El exceso de CO es perjudicial para las personas y el medio ambiente

Exceso de aire: %

Rendimiento de la combustión: %

NO_x

[ENLAZAR CON LA NORMA UNE 60670:2014 PARA VER LOS VALORES LÍMITE](#)

<https://www.onagas.es/analisis-de-combustion/>