

# **COMBUSTION Y COMBUSTIBLES**

Ricardo García San José.  
Ingeniero Industrial.  
(Noviembre 2.001)

---

## **INDICE**

1.- DEFINICION.....	3
2.- ESTEQUIOMETRIA DE LAS COMBUSTIONES.....	4
2.1.- COMBUSTION COMPLETA.....	4
2.2.- COMBUSTION INCOMPLETA.....	4
2.3.- COMBUSTION ESTEQUIOMETRICA.....	4
2.3.1.- PODER COMBURIVORO.....	5
2.3.2.- PODER FUMIGENO.....	5
2.3.3.- COEFICIENTE DE EXCESO DE AIRE.....	5
3.- PODERES CALORIFICOS.....	7
3.1.- PODER CALORIFICO INFERIOR (PCI).....	7
3.2.- PODER CALORIFICO SUPERIOR (PCS).....	7
4.- RENDIMIENTO DE LA COMBUSTION.....	8
5.- COMBUSTION Y CONTAMINACION AMBIENTAL.....	9
5.1.- CONTAMINACION DEBIDA AL CARBONO.....	9
5.2.- CONTAMINACION DEBIDA AL AZUFRE.....	9
5.3.- CONTAMINACION DEBIDA AL NITROGENO.....	10
5.4.- LIMITES ADMISIBLES.....	11
5.4.1.- LIMITES DE EMISION.....	11
5.4.2.- LIMITES DE INMISION.....	11
6.- CLASIFICACION DE LOS COMBUSTIBLES.....	12
7.- ANALIZADORES DE COMBUSTION.....	15

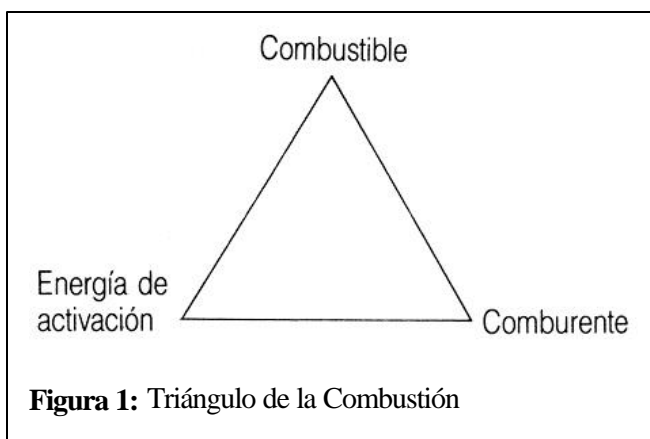
## **BIBLIOGRAFIA**

## 1.- DEFINICION

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

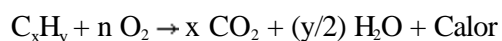
79% Nitrógeno (N<sub>2</sub>); únicamente en casos especiales se utilizan atmósferas enriquecidas en oxígeno e incluso oxígeno puro (por ejemplo en soldadura). La energía de activación es el elemento desencadenante de la reacción de combustión; en los quemadores habitualmente suele obtenerse mediante una chispa eléctrica entre dos electrodos, en las calderas individuales de gas se obtiene por llama piloto, tren de chispas, 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:



---

## **2.- ESTEQUIMETRIA 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.

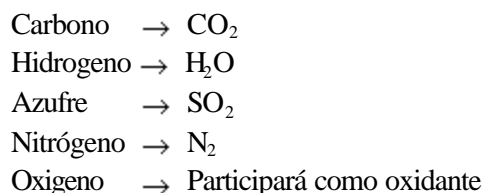
La estequiometría de la combustión se ocupa de las relaciones másicas y volumétricas entre reactivos y productos. Los aspectos a determinar son principalmente:

- 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:

### **2.1.- COMBUSTION COMPLETA**

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



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%).

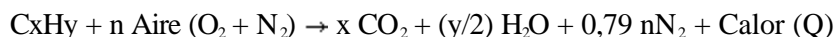
### **2.2.- COMBUSTION INCOMPLETA**

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.

### **2.3.- COMBUSTION ESTEQUIOMETRICA**

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 es el correspondiente a la combustión completa.

---

La combustión estequiométrica permite definir los parámetros característicos de los combustibles:

### **2.3.1.- PODER COMBURIVORO**

Es la cantidad de aire seco, medida en condiciones normales ( $T^a = 0^\circ\text{C}$  y  $P=1\text{atm}$ ), mínima necesaria para la combustión completa y estequiométrica de la unidad de combustible.

Unidades habituales:  $\text{Nm}^3/\text{kgCombustible}$ ,  $\text{Nm}^3/\text{Nm}^3\text{Combustible}$ .

Es un parámetro característico únicamente de la composición del combustible y puede tabularse con facilidad.

### **2.3.2.- PODER FUMIGENO**

Es la cantidad de productos de la combustión ( $\text{Nm}^3$ ) 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.

### **2.3.3.- COEFICIENTE 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

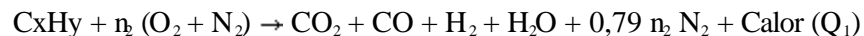
$n < 1$  : Defecto de aire, se dice que la mezcla es rica

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

Así la combustión puede ser clasificada en:

#### **\* 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 ( $\text{CO}_2$ ) y Agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), se producen inquemados como el Monóxido de Carbono ( $\text{CO}$ ) e Hidrógeno ( $\text{H}_2$ ); 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 ( $Q_1 < Q$ ).

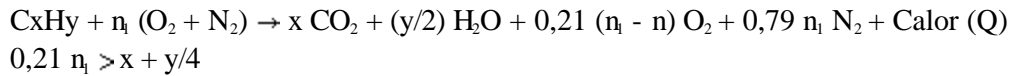
---

**\* 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**

Su expresión es:

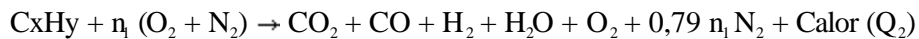


Al emplearse más aire que el estrictamente necesario, en los humos se da la presencia de oxígeno.

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.

El calor producido en la combustión completa es independiente del exceso de aire, pero el aprovechamiento de este calor es tanto menor cuanto mayor es el exceso de aire con el que se trabaja, ya que una parte del calor de la combustión se utiliza en calentar a los humos y éstos aumentan con el exceso de aire; por todo ello, en la práctica se buscan combustiones completas con los menores excesos de aire posibles; esto se consigue con una adecuada puesta a punto de los elementos que intervienen en la combustión (líneas de combustible, quemadores, calderas y chimeneas) y un correcto mantenimiento.

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.

---

### **3.- PODERES CALORIFICOS**

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>. (\*)

(\*) 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.

A veces se utiliza Sm<sup>3</sup> (Estándar m<sup>3</sup>) que es el gas contenido en 1 m<sup>3</sup> a 15 °C y presión atmosférica.

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:

#### **3.1.- 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.

#### **3.2.- 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.

---

#### **4.- 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.

Unicamente 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.

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

$$\eta_c = 1 - Q_i/PCI - Q_{hs}/PCI = 1 - q_i - q_{hs}$$

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.



---

## **5.- COMBUSTION Y CONTAMINACION AMBIENTAL**

A la hora de seleccionar el combustible y de optimizar el proceso de combustión se deben considerar aspectos relacionados con la emisión de agentes polucionantes. Las normas actuales restringen estas emisiones, y de hecho uno de los factores mas importantes en el diseño de dispositivos de combustión en la actualidad reside en el control de emisiones contaminantes.

Estas emisiones tienen diversos efectos perniciosos:

- Afectan al equilibrio de la atmósfera terrestre: efecto invernadero, desaparición de la capa de ozono, alteración de la meteorología, etc.
- Afectan a la salud humana
- Afectan a la vida animal y vegetal
- Ensucian y deterioran los materiales: edificios, vehículos, etc.

Con relación a los hidrocarburos como combustibles, las principales causas de contaminación son:

### **5.1.- CONTAMINACION DEBIDA AL CARBONO**

La combustión completa del carbono produce  $\text{CO}_2$  que es el principal contribuyente al efecto invernadero. Este componente es una consecuencia inevitable de la combustión.

Si la combustión del carbono no es completa se produce  $\text{CO}$ , gas tóxico que en concentraciones elevadas puede provocar incluso la muerte, por lo que se debe evitar al máximo.

La mejor forma de reducir el efecto de estos agentes es la de tratar de conseguir combustiones completas que no produzcan  $\text{CO}$ , y la de obtener los mayores rendimientos de combustión de modo que se consuma el mínimo combustible necesario, produciendo así la menor cantidad de  $\text{CO}_2$ ; otra manera es seleccionar combustibles con menor producción de  $\text{CO}_2$  para la misma energía, el mejor en este aspecto es el Gas Natural.

### **5.2.- CONTAMINACION DEBIDA AL AZUFRE**

El azufre está presente en los combustibles en proporciones variables; la oxidación del azufre puede producir  $\text{SO}_3$ , este en contacto con el agua de la combustión o de la atmósfera puede dar lugar a ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) condensado que acompaña a las gotas de lluvia, dando lugar a lo que se conoce como "Lluvia ácida".

Para combatir este problema debe tratarse de utilizarse combustibles con mínima presencia de azufre; en este sentido la normativa de combustibles fija la cantidad máxima de Azufre que los mismos pueden contener.

Otro efecto pernicioso a tener en cuenta es la posibilidad de condensaciones ácidas en los dispositivos de combustión (calderas, chimeneas) si las temperaturas son suficientemente bajas, esto limita la temperatura de expulsión de los gases de la combustión. A presión atmosférica, las

---

temperaturas de condensación ácida son del orden de 160°C, variando con la composición de los humos.

### **5.3.- CONTAMINACIÓN DEBIDA AL NITROGENO**

A las elevadas temperaturas de la llama, el nitrógeno que forma parte del combustible y el nitrógeno del aire comburente pueden combinarse con el oxígeno para formar NO, este producto en la atmósfera se combina lentamente con el oxígeno del aire para formar NO<sub>2</sub>.

Entre los diferentes efectos perniciosos de estos óxidos (NO y NO<sub>2</sub>, denominados conjuntamente como NO<sub>x</sub>) se pueden citar:

- Colaboran en la destrucción de la capa de ozono de forma importante
- En combinación con el agua de la atmósfera pueden dar lugar a condensaciones ácidas lo que incrementa la "Lluvia ácida".
- El NO<sub>2</sub> es un gas venenoso.

La formación del NO se potencia a elevadas temperaturas, a temperaturas inferiores a unos 1.300°C apenas es considerable. El exceso de aire en la combustión también favorece su formación aunque en menor medida que la temperatura. Así las diferentes soluciones que se han propuesto para minimizar estas emisiones en lo posible tratan de disminuir las temperaturas de llama; en principio esto afectaría negativamente al rendimiento de la combustión, por lo que se trata de buscar soluciones que compensen la pérdida de rendimiento. El problema no es sencillo y está lejos de resolverse definitivamente.

## **5.4.- LIMITES ADMISIBLES**

Las instalaciones de combustión pueden provocar problemas de contaminación, por una parte por los humos que salen por las chimeneas, pero por otra también pueden deteriorar la calidad del aire ambiente, debido a escapes de humos hacia los locales; esta última situación es mas peligrosa cuando se utilizan calderas atmosféricas con cortatiros, o aparatos a gas No Conectados a conducto de evacuación de humos.

Evidentemente los niveles máximos permitidos son diferentes para las emisiones al exterior que para las inmisiones a los locales; ya que las primeras se dispersan en la atmósfera diluyéndose en la misma y las segundas afectan directamente a las personas.

### **5.4.1.- LIMITES DE EMISION**

En las instalaciones de climatización los límites de emisión, actualmente solo están reglamentados para el CO; los mismos son:

- RITE  $\leq 1.000$  ppm. (ppm = partes por millón).
- País Vasco: para Gas  $\leq 800$  ppm, para valores entre 400 y 800 ppm se debe revisar el equipo.

Deben ser No Diluidos, o Corregidos, es decir referidos a la combustión estequimétrica (sin exceso de aire); la unidad ppm no resulta suficientemente significativa ya que no considera el exceso de aire y, por ejemplo, en una caldera atmosférica la medición es totalmente diferente que se realice antes o después del cortatiros y sin embargo la contaminación es la misma. Sería mas adecuado que el nivel se fijase en mg/kWh, de manera que todos los combustibles serían comparables.

### **5.4.2.- LIMITES DE INMISION**

En la tabla siguiente se muestran las concentraciones máximas admisibles en el **aire interior**; desde el punto de vista sanitario, de las sustancias contaminantes procedentes de la combustión; estos datos se refieren a periodos de exposición de 8 horas y han sido obtenidos a partir de resultados publicados por organismos internacionales como WHO, EPA, ASHRAE; si bien no están recogidos en la normativa aplicable vigente. Para periodos de exposición mas cortos se pueden admitir concentraciones superiores.

<b>CONCENTRACIONES MAXIMAS (Periodo de estancia 8 horas)</b>		
<b>SUSTANCIA</b>		<b>CONCENTRACION</b>
<b>DIOXIDO DE CARBONO</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	800 ppm
<b>MONOXIDO DE CARBONO</b>	<b>CO</b>	9 ppm
<b>OXIDOS DE NITROGENO</b>	<b>NO<sub>x</sub></b>	0,15 mg/m <sup>3</sup>
<b>DIOXIDO DE AZUFRE</b>	<b>SO<sub>2</sub></b>	0,80 mg/m <sup>3</sup>

Respecto al CO ambiente los límites en el País Vasco son  $\leq 15$  ppm; entre 5 y 15 ppm se deben revisar los aparatos de combustión.

## 6.- CLASIFICACION DE LOS COMBUSTIBLES

Todos los combustibles industriales se caracterizan por estar constituidos por mezclas o combinaciones de pocos elementos. La mayor proporción (en peso) corresponde a Carbono, Hidrogeno y en muchos casos algo de Azufre, elementos cuyas reacciones de combustión son exotérmicas.

El resto, mucho mas reducido cuantitativamente, esta constituido por Oxigeno, Nitrógeno, agua, y cenizas (sílices, compuestos organometálicos de vanadio y otros, arcillas, sales de sodio y otros, óxidos de hierro, etc), su presencia representa problemas tecnológicos específicos de cada combustible.

La clasificación de los combustibles convencionales puede realizarse de diferentes formas. Atendiendo a su origen, pueden ser fósiles o no fósiles, según procedan o no de restos fermentados de seres vivos, sepultados en la era secundaria. Según su grado de preparación se clasifican en naturales, su utilización es directa tal y como aparecen en origen, y elaborados o manufacturados, que deben ser sometidos a complejos tratamientos o incluso a preparación química específica.

Dependiendo de la fase en que se presenten: combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. La fase es uno de los factores determinantes en el diseño de los dispositivos de combustión así como en el de las instalaciones de preparación y manejo del combustible.

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

En los cuadros siguientes se dan las características de los combustibles comercializados en España; los contenidos de azufre máximos están regulados por las normativas vigentes; de entre ellos los más utilizados en las instalaciones de Climatización son: Gasóleo-C, Gas Natural y Gas Propano.

<b>CUADRO RESUMEN CARACTERISTICAS DE FUEL OIL</b>			
<b>COMBUSTIBLE</b>	<b>FUEL OIL BIA</b>	<b>FUEL OIL 1</b>	<b>FUEL OIL 2</b>
<b>UNIDAD</b>	<b>kg</b>	<b>kg</b>	<b>kg</b>
<b>DENSIDAD</b>	960 kg/m <sup>3</sup>	960 kg/m <sup>3</sup>	980 kg/m <sup>3</sup>
<b>PCI (PODER CALORIFICO INFERIOR)</b>	9.588 kcal/kg	9.465 kcal/kg	9.271 kcal/kg
	11.15 kWh/kg	11.01 kWh/kg	10.78 kWh/kg
<b>PCS (PODER CALORIFICO SUPERIOR)</b>	10.116 kcal/kg	9.985 kcal/kg	9.767 kcal/kg
	11.76 kWh/kg	11.61 kWh/kg	11.36 kWh/kg
<b>PCI/PCS</b>	0.948	0.948	0.949
<b>PODER COMBURIVORO</b>	10,29 Nm <sup>3</sup> /kg	10,18 Nm <sup>3</sup> /kg	9,99 Nm <sup>3</sup> /kg
	0,92 Nm <sup>3</sup> /kWhPCI	0,92 Nm <sup>3</sup> /kWhPCI	0,93 Nm <sup>3</sup> /kWhPCI
<b>PODER FUMIGENO SECO</b>	9,75 Nm <sup>3</sup> /kg	9,64 Nm <sup>3</sup> /kg	9,49 Nm <sup>3</sup> /kg
	0,87 Nm <sup>3</sup> /kWhPCI	0,88 Nm <sup>3</sup> /kWhPCI	0,88 Nm <sup>3</sup> /kWhPCI
<b>PODER FUMIGENO HUMEDO</b>	10,87 Nm <sup>3</sup> /kg	10,74 Nm <sup>3</sup> /kg	10,54 Nm <sup>3</sup> /kg
	0,97 Nm <sup>3</sup> /kWhPCI	0,98 Nm <sup>3</sup> /kWhPCI	0,98 Nm <sup>3</sup> /kWhPCI
<b>PES/PC</b>	0.947	0.948	0.950
<b>CO<sub>2</sub> PRODUCIDO EN COMBUSTION</b>	3,15 kg/kg	3,10 kg/kg	3,07 kg/kg
	283 gr/kWhPCI	282 gr/kWhPCI	284 gr/kWhPCI
<b>H<sub>2</sub>O PRODUCIDO EN COMBUSTION</b>	1,53 kg/kg	1,50 kg/kg	2,00 kg/kg
	137 gr/kWhPCI	136 gr/kWhPCI	185 gr/kWhPCI
<b>CO<sub>2</sub> maximo (%)</b>	16,47%	16,37%	16,46%
<b>CONTENIDO AZUFRE</b>	< 1 %	< 2,7 %	< 3,5 %

<b>CUADRO RESUMEN CARACTERISTICAS DE LOS COMBUSTIBLES</b>			
<b>COMBUSTIBLE</b>	<b>GASOLEO C</b>	<b>GAS NATURAL</b>	<b>GAS PROPANO</b>
<b>UNIDAD</b>	<b>l kg</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>	<b>kg Nm<sup>3</sup></b>
<b>DENSIDAD</b>	890 kg/m <sup>3</sup>	0,828 kg/Nm <sup>3</sup>	2,038 kg/Nm <sup>3</sup>
<b>DENSIDAD RELATIVA</b>		0,643	1,583
<b>PCI (PODER CALORIFICO INFERIOR)</b>	8.842 kcal/l	9,314 kcal/Nm <sup>3</sup>	22.529 kcal/Nm <sup>3</sup>
	10,28 kWh/l		26,20 kWh/Nm <sup>3</sup>
	9.934 kcal/kg	10,83 kWh/Nm <sup>3</sup>	11.055 kcal/kg
	11,55 kWh/kg		12,86 kWh/kg
<b>PCS (PODER CALORIFICO SUPERIOR)</b>	9.367 kcal/l	10,304 kcal/Nm <sup>3</sup>	24.475 kcal/Nm <sup>3</sup>
	10,89 kWh/l		28,46 kWh/Nm <sup>3</sup>
	10.524 kcal/kg	11,98 kWh/Nm <sup>3</sup>	12.011 kcal/kg
	12,24 kWh/kg		13,97 kWh/kg
<b>PCI/PCS</b>	0,944	0,904	0,920
<b>(PC) PODER COMBURIVORO</b>	9,44 Nm <sup>3</sup> /l	10,34 Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup>	24,61 Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup>
	10,61 Nm <sup>3</sup> /kg		12,08 Nm <sup>3</sup> /kg
	0,92 Nm <sup>3</sup> /kWhPCI		0,94 Nm <sup>3</sup> /kWhPCI
<b>(PFS) PODER FUMIGENO SECO</b>	8,90 Nm <sup>3</sup> /l	9,32 Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup>	22,56 Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup>
	10,00 Nm <sup>3</sup> /kg		11,07 Nm <sup>3</sup> /kg
	0,87 Nm <sup>3</sup> /kWhPCI		0,86 Nm <sup>3</sup> /kWhPCI
<b>(PFH) PODER FUMIGENO HUMEDO</b>	10,01 Nm <sup>3</sup> /l	11,42 Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup>	26,67 Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup>
	11,24 Nm <sup>3</sup> /kg		13,09 Nm <sup>3</sup> /kg
	0,97 Nm <sup>3</sup> /kWhPCI		1,02 Nm <sup>3</sup> /kWhPCI
<b>PFS/PC</b>	0,943	0,902	0,916
<b>CO<sub>2</sub> PRODUCIDO EN COMBUSTION</b>	2,80 kg/l	2,21 kg/Nm <sup>3</sup>	6,11 kg/Nm <sup>3</sup>
	3,15 kg/kg		3,00 kg/kg
	273 g/kWhPCI		233 g/kWhPCI
<b>H<sub>2</sub>O PRODUCIDO EN COMBUSTION</b>	0,89 kg/l	1,68 kg/Nm <sup>3</sup>	3,31 kg/Nm <sup>3</sup>
	1,00 kg/kg		1,62 kg/kg
	87 g/kWhPCI		126 g/kWhPCI
<b>CO<sub>2</sub> maximo (%)</b>	16,05%	12,06%	14,03%
<b>CONTENIDO DE AZUFRE</b>	< 0,2 %	NULO	< 0,05 %

---

## **7.- 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  $O_2$ ; resultado en %
- Medidor de  $CO$ , indicación en ppm.
- Temperatura Ambiente ( $^{\circ}C$ ).
- Temperatura de Humos ( $^{\circ}C$ ).
- Medición de tiro (Pa, mmCA, mbar, etc).

Con la medición de  $O_2$ , indicando previamente el combustible que se está analizando, el aparato calcula el exceso de aire y el  $CO_2$  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  $CO_2$  y rendimiento, al ser calculados por el equipo, dependen de que al mismo se la haya indicado correctamente dicho combustible.

---

## **BIBLIOGRAFIA**

- LA COMBUSTION.  
Edelmira Valero Ruiz.
  
- MANUAL DEL GAS Y SUS APLICACIONES.  
SEDIGAS. 1.991.
  
- MANUAL DE EFICIENCIA ENERGETICA TERMICA EN LA INDUSTRIA.  
Luis Alfonso Molina Igartua, Gonzalo Molina Igartua.  
CADEM 1.984.
  
- LA COMBUSTION DEL GAS NATURAL EN LAS CALDERAS DE VAPOR.  
Virgilio Martínez Lombardo.  
ENAGAS 1.990.
  
- LES OXIDES D'AZOTE (HORS CARBURATION). NUISANCES, FORMATION,  
REDUCTION, MESURES, REGLAMENTATION.  
Revue générale de Thermique. 1.989.
  
- FLAME & COMBUSTION.  
J.A. Barnard - J.N. Bradley.  
Chapman and Hall 1.985.
  
- SULPHUR DIOXIDE & NITROGEN OXIDES IN INDUSTRIAL WASTE GASES:  
EMISSION, LEGISLATION & ABATEMENT.  
Edited by Daniel Van Velzen.  
EURO COURSES. Chemical & environmental science. Vol. 3.



---

**ANEXOS:**

---

### CALCULO DEL EXCESO DE AIRE

Volumen de Humos secos:  $V_{HS} = P_{FS} + (n-1) \cdot P_C$

$P_{FS}$ : Poder Fumígeno Seco

$P_C$ : Poder Combustivo

$O_2$  en Humos Secos:  $O_2 (\%) = 0,21 \cdot (n-1) \cdot P_C / V_{HS}$

$O_2 \cdot V_{HS} = O_2 \cdot P_{FS} + O_2 \cdot (n-1) \cdot P_C = 0,21 \cdot (n-1) \cdot P_C$

$O_2 \cdot P_{FS} + O_2 \cdot n \cdot P_C - O_2 \cdot P_C = 0,21 \cdot n \cdot P_C - 0,21 \cdot P_C$

$O_2 \cdot P_{FS} - O_2 \cdot P_C + 0,21 \cdot P_C = 0,21 \cdot n \cdot P_C - O_2 \cdot n \cdot P_C$

$O_2 \cdot P_{FS} + P_C \cdot (0,21 - O_2) = n \cdot P_C \cdot (0,21 - O_2)$

$n = [O_2 \cdot P_{FS} + P_C \cdot (0,21 - O_2)] / [P_C \cdot (0,21 - O_2)] = (O_2 \cdot P_{FS}) / [P_C \cdot (0,21 - O_2)] + 1$

$n = 1 + (P_{FS}/P_C) \cdot O_2 / (0,21 - O_2)$  ( $O_2$  en %)

$n = 1 + (P_{FS}/P_C) \cdot O_2 / (21 - O_2)$  ( $O_2$  en %)

$P_{FS}/P_C$  para gases aproximadamente 0,9

### PORCENTAJE DE CO<sub>2</sub> EN FUNCION DE LA MEDICION DE O<sub>2</sub>

$CO_2 = (P_{FS} \cdot CO_{2max}) / (P_{FS} + P_C \cdot (n-1))$

$CO_2$ : Contenido en  $CO_2$  de los humos secos (%).

$CO_{2max}$ : Contenido Máximo en  $CO_2$  de los humos secos (%).

---

## TRANSFORMACION MEDICIONES

ppm = Partes por millón =  $\text{cm}^3$  compuesto /  $\text{m}^3$  de Humos Secos

1 mol = Masa Molecular (g) = 22,4 l =  $22,4 \cdot 10^3 \text{ cm}^3$

Por tanto  $\text{g} = \text{ppm} \cdot \text{PM} / (22,4 \cdot 10^3 \text{ cm}^3)$

$\text{mg/Nm}^3$  Humos Secos =  $\text{ppm} \cdot \text{PM} / 22,4$

$\text{ppm}_{\text{corregido}} = \text{ppm}_{\text{medido}} \cdot 21 / (21 - \text{O}_{2\text{medido}})$

**$\text{mg/kWh} = \text{ppm}_{\text{medido}} \cdot \text{PM}/22,4 \cdot 21/(21-\text{O}_{2\text{medido}}) \cdot P_{\text{FS}}/\text{PCI}$**

**$\text{g/kWh} = \%_{\text{medido}} \cdot 10 \cdot \text{PM}/22,4 \cdot 21/(21-\text{O}_{2\text{medido}}) \cdot P_{\text{FS}}/\text{PCI}$**

---

## CALCULO DEL PUNTO DE ROCIO DE LOS HUMOS

Cambio de fase en sustancias puras: Ecuación de CLAPEYRON  $f(P,T) = 0$ .

- Caso: Vapor  $\rightarrow$  Líquido.

- Aproximaciones:  $V_{liq} \lll V_{vapor}$   
 $V_{vapor} \rightarrow$  Modelo GAS PERFECTO.  
Calor latente de vaporización: cte con la temperatura.

**Temperatura en K; Presión en bar.**

$$\begin{aligned} \text{De } 10 \text{ a } 30^\circ\text{C} \quad \text{LnPv} &= -2.454,12/0,4612 \cdot T + 14,4051 \\ T &= -2.454,12/((\text{LnPv} - 14,4051) \cdot 0,4612) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{De } 30 \text{ a } 70^\circ\text{C} \quad \text{LnPv} &= -2.382,6/0,4612 \cdot T + 13,9015 \\ T &= -2.382,6/((\text{LnPv} - 13,9015) \cdot 0,4612) \end{aligned}$$

$$x = 0,622 \cdot \text{Pv}(t)/(P/p - \text{Pv}(t))$$

Donde:  $\text{Pv}(t)$ : Presión de vapor del agua a la temperatura  $t$ .

$P$ : Presión total (atmosférica).

$p$ : Humedad relativa (%).

$x$ : Humedad absoluta (gr/kg aire seco)

$$((\text{H}_2\text{O}(\text{cble}) + \text{PC} \cdot (1 + \text{exceso aire}) \cdot x)/18) \cdot 8.31441 \cdot 273 / (\text{PF} + \text{PC} \cdot \text{exceso de aire})$$

$\text{PC}$ : Poder comburivoro.

$\text{PF}$ : Poder fumígeno.

$(\text{H}_2\text{O}(\text{cble}) + \text{PC} \cdot (1 + \text{exceso aire}) \cdot x)/18$  : Moles de  $\text{H}_2\text{O}$  en los humos.

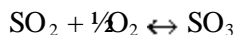
$\text{PF} + \text{PC} \cdot \text{exceso de aire}$  : Volumen de humos.

$$x = 0,62198 \cdot (\text{Ps}(\text{aire comburente})/(\text{Pat}/\text{HR} - \text{Ps})) \cdot p_{\text{aire}}$$

## CONDENSACION DEL $\text{SO}_4\text{H}_2$ EN LOS HUMOS

$$\text{TRS} = 1.000 / (1,7842 + 0,0269 \cdot \text{LgPH}_2\text{O} - 0,1029 \cdot \text{LgPSO}_3 + 0,0329 \cdot \text{LgPH}_2\text{O} \cdot \text{LgPSO}_3)$$

Para calcular la presión parcial del  $\text{SO}_3$  debe conocerse la constante de equilibrio de la reacción:



1° Calcular los moles de  $\text{SO}_2$  que se producen por unidad de combustible.

% en peso S  $\rightarrow$  Moles S  $\rightarrow$  Moles  $\text{SO}_2$   $\rightarrow$  Moles  $\text{SO}_3$

2° Presión parcial del  $\text{SO}_3$   $\rightarrow$  Presión parcial del  $\text{SO}_2$   $\cdot$  %  $\text{SO}_3/\text{SO}_2$

3° TRS  $\rightarrow$  T rocío del  $\text{SO}_4\text{H}_2$

<b>TEMPERATURA DE CONDENSACION DE LOS HUMOS (°C) EN FUNCION DE LA HUMEDAD RELATIVA Y DEL EXCESO DE AIRE COMBURENTE</b>											
COMBUSTIBLE.....										<b>GAS NATURAL</b>	
PODER COMBURIVORO.....										10,37 Nm3/Nm3	
PODER FUMIGENO HUMEDO.....										11,48 Nm3/Nm3	
CONTENIDO EN AGUA DE LOS HUMOS.....										1680 gr/Nm3	
AGUA PRODUCIDA EN LA COMBUSTION.....										<b>158</b> gr/kWh	
EXCESO DE AIRE (%)	HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE COMBURENTE (%)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	58	59	59	59	59	60	60	60	60	60	61
10	57	57	57	57	58	58	58	58	59	59	59
20	55	55	55	56	56	56	57	57	57	57	58
30	53	54	54	54	55	55	55	55	56	56	56
40	52	52	53	53	53	54	54	54	54	55	55
50	51	51	51	52	52	52	53	53	53	54	54
60	49	50	50	50	51	51	52	52	52	53	53
70	48	49	49	49	50	50	50	51	51	52	52
80	47	48	48	48	49	49	50	50	50	51	51
90	46	47	47	47	48	48	49	49	49	50	50
100	45	46	46	47	47	47	48	48	49	49	49
120	43	44	44	45	45	46	46	47	47	48	48
140	42	42	43	43	44	44	45	45	46	46	47
160	40	41	41	42	43	43	44	44	45	45	46
180	39	40	40	41	41	42	42	43	43	44	44
200	38	38	39	40	40	41	41	42	42	43	44
250	35	36	36	37	38	38	39	40	40	41	41
300	33	33	34	35	36	36	37	38	38	39	40
350	31	31	32	33	34	35	36	36	37	38	38
400	29	30	31	32	32	33	34	35	36	36	37

<b>TEMPERATURA DE CONDENSACION DE LOS HUMOS (°C) EN FUNCION DE LA HUMEDAD RELATIVA Y DEL EXCESO DE AIRE COMBURENTE</b>											
COMBUSTIBLE.....											<b>GASOLEO-C</b>
PODER COMBURIVORO.....											9,46 Nm3/l
PODER FUMIGENO HUMEDO.....											10,06 Nm3/l
CONTENIDO EN AGUA DE LOS HUMOS.....											890 gr/l
AGUA PRODUCIDA EN LA COMBUSTION.....											<b>83</b> gr/kWh
EXCESO DE AIRE (%)	HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE COMBURENTE (%)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	48	48	49	49	50	50	50	51	51	51	52
10	46	47	47	47	48	48	49	49	49	50	50
20	45	45	45	46	46	47	47	48	48	48	49
30	43	44	44	45	45	45	46	46	47	47	48
40	42	42	43	43	44	44	45	45	46	46	47
50	40	41	42	42	43	43	44	44	45	45	46
60	39	40	40	41	42	42	43	43	44	44	45
70	38	39	39	40	41	41	42	42	43	43	44
80	37	38	38	39	40	40	41	41	42	43	43
90	36	37	38	38	39	39	40	41	41	42	42
100	35	36	37	37	38	39	39	40	40	41	42
120	34	34	35	36	37	37	38	39	39	40	40
140	32	33	34	34	35	36	37	37	38	39	39
160	31	32	32	33	34	35	36	36	37	38	38
180	29	30	31	32	33	34	35	35	36	37	38
200	28	29	30	31	32	33	34	34	35	36	37
250	26	27	28	29	30	31	32	33	33	34	35
300	23	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
350	21	23	24	25	27	28	29	30	31	32	33
400	20	21	23	24	25	26	28	29	30	31	32

<b>TEMPERATURA DE CONDENSACION ACIDA DE LOS HUMOS (°C) EN FUNCION DE LA HUMEDAD RELATIVA Y DEL EXCESO DE AIRE COMBURENTE</b>											
COMBUSTIBLE.....											<b>GASOLEO-C</b>
PODER COMBURIVORO.....											9,46 Nm3/l
PODER FUMIGENO HUMEDO.....											10,06 Nm3/l
CONTENIDO EN AGUA DE LOS HUMOS.....											890 gr/l
CONTENIDO DE AZUFRE DEL COMBUSTIBLE.....											0,2 % en Peso
DENSIDAD DEL COMBUSTIBLE.....											890 gr/l
<b>EXCESO DE AIRE (%)</b>	<b>HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE COMBURENTE (%)</b>										
	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>60</b>	<b>70</b>	<b>80</b>	<b>90</b>	<b>100</b>
<b>0</b>	141	141	141	141	142	142	142	142	142	142	143
<b>10</b>	139	139	139	140	140	140	140	140	141	141	141
<b>20</b>	137	138	138	138	138	139	139	139	139	139	140
<b>30</b>	136	136	136	137	137	137	137	138	138	138	138
<b>40</b>	134	135	135	135	135	136	136	136	136	137	137
<b>50</b>	133	133	134	134	134	135	135	135	135	136	136
<b>60</b>	132	132	132	133	133	133	134	134	134	134	135
<b>70</b>	131	131	131	132	132	132	133	133	133	133	134
<b>80</b>	130	130	130	131	131	131	132	132	132	132	133
<b>90</b>	129	129	129	130	130	130	131	131	131	132	132
<b>100</b>	128	128	128	129	129	129	130	130	130	131	131
<b>120</b>	126	126	127	127	127	128	128	128	129	129	129
<b>140</b>	124	124	125	125	126	126	127	127	127	128	128
<b>160</b>	122	123	123	124	124	125	125	126	126	126	127
<b>180</b>	121	122	122	123	123	123	124	124	125	125	126
<b>200</b>	120	120	121	121	122	122	123	123	124	124	124
<b>250</b>	117	117	118	119	119	120	120	121	121	122	122
<b>300</b>	114	115	115	116	117	117	118	118	119	120	120
<b>350</b>	112	113	113	114	115	115	116	117	117	118	118
<b>400</b>	110	111	111	112	113	114	114	115	116	116	117