

LA COMBUSTIÓN

INDICE DE MATERIAS

1.-	INTRODUCCIÓN	1
2.-	CONCEPTOS FUNDAMENTALES	2
2.1-	CONCEPTO DE MOL	2
2.2-	LEYES FUNDAMENTALES	2
3.-	APLICACIÓN DE LAS LEYES FUNDAMENTALES	4
3.1.-	LA COMBUSTIÓN COMPLETA	4
3.2.-	LA COMBUSTIÓN INCOMPLETA	5
4.-	EL MOL EN LOS CÁLCULOS DE COMBUSTIÓN	7
5.-	CALOR DE COMBUSTIÓN	10
5.1.-	MEDIDA DEL CALOR DE COMBUSTIÓN	11
5.2.-	PODERES CALORÍFICOS SUPERIOR E INFERIOR	12
6.-	TEMPERATURAS DE IGNICIÓN	12
7.-	CALCULO DE AIRE Y GASES DE COMBUSTIÓN	13
8.-	LAS PERDIDAS DE LA COMBUSTIÓN	14
9.-	EL EXCESO DE AIRE MAS ECONÓMICO	16
10.-	LA TEMPERATURA TEÓRICA MÁXIMA	18
11.-	LA COMBUSTIÓN DE LOS COMBUSTIBLES SÓLIDOS	20
11.1.-	INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA EN EL TIEMPO DE COMBUSTIÓN	21
11.2.-	INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA EN LA POTENCIA DEL HOGAR	23
11.3.-	INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA EN LA POTENCIA ESPECÍFICA	26
11.4.-	LA COMBUSTIÓN DEL CARBÓN PULVERIZADO	28
11.5.-	LAS FASES DE LA COMBUSTIÓN DEL CARBÓN PULVERIZADO	28
11.6.-	DURACIÓN DE LA COMBUSTIÓN DEL CARBÓN PULVERIZADO	32

11.7.-	ESTABILIDAD DE LA LLAMA EN LA COMBUSTIÓN DEL CARBÓN PULVERIZADO	33
12.-	LA COMBUSTIÓN DE LOS COMBUSTIBLES LÍQUIDOS	34
12.1.-	LA COMBUSTIÓN DEL FUEL-OIL	35
12.2.-	LA COMBUSTIÓN DEL GASOLEO	35
13.-	LA COMBUSTIÓN DE LOS COMBUSTIBLES GASEOSOS	36
13.1.-	PROPIEDADES FUNDAMENTALES	37
14.-	EL CONTROL DE LA COMBUSTIÓN	38
15.-	LA FORMACIÓN DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO DURANTE LA COMBUSTIÓN	40

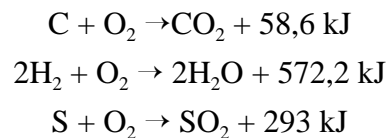
LA COMBUSTIÓN

1.- INTRODUCCIÓN

En sentido industrial, un combustible es una sustancia sólida líquida o gaseosa, que siendo rica en carbono, hidrógeno o ambos, es capaz de reaccionar con el oxígeno del aire a una velocidad tal que el calor producido la lleve a la incandescencia, resultando, además, aceptables las condiciones económicas.

Los elementos químicos que hacen que una sustancia sea combustible son el carbono, el hidrógeno y el azufre. Este último no es importante como fuente energética, pero debe de tenerse muy en cuenta porque origina productos altamente corrosivos y contaminantes.

Las reacciones de combustión son:



El aire es la fuente normal de oxígeno para la combustión

El objeto de una buena combustión es producir la máxima cantidad de calor, de acuerdo con las propiedades del combustible, minimizando las pérdidas por combustión imperfecta o exceso de aire.

Para que la combustión sea buena se requieren las siguientes condiciones:

- Temperatura suficientemente alta para que los constituyentes entren en ignición.
- Proporción adecuada aire/comburente.
- Grado de mezcla adecuado para que el aire y el combustible tengan un buen contacto superficial.
- Tiempo necesario para el desarrollo de una combustión completa

Una vez iniciada la inflamación, el proceso de combustión continua cuando la producción de calor es mayor que la difusión al medio que la rodea. En el caso del carbón y de los combustibles líquidos, su molécula se modifica antes de la inflamación debido al fenómeno de la pirolisis, por lo que el oxígeno no se pone en contacto con todo el combustible, sino solo con aquellos productos que desprende debido a la temperatura a la que está sometido. Así pues, las moléculas de carbón se rompen eliminándose en primer lugar, después del agua y de los gases ocluidos en los poros, aquellos radicales más débilmente ligados a las moléculas, después se rompen los anillos eterocíclicos, de tal manera que el oxígeno va reaccionando con compuestos hidrocarbonados relativamente sencillos. De estas reacciones no siempre resultan compuestos totalmente saturados de oxígeno, sino que, según las leyes de la química-física, para cada equilibrio entre distintos componentes, a temperaturas y presiones diferentes, se llega a productos también distintos. Solamente si el contacto superficial entre combustible y

comburente, es suficiente y si se aporta oxígeno en cantidad suficiente para una combustión total, se llegará a los productos finales correspondientes a combustión completa.

La combustión puede ser visible si existe llama luminosa. La llama se debe a la incandescencia de las partículas de carbono elemental resultante de la pirolisis de los hidrocarburos de las materias volátiles, así que su magnitud depende de la riqueza del combustible en estas materias.

2.- CONCEPTOS FUNDAMENTALES

2.1- CONCEPTO DE MOL

El número de kilogramos de una sustancia igual a su peso molecular, se llama molécula-kilogramo ó mol. Por ejemplo el carbono tiene un peso molecular de 12, por lo tanto el mol de carbono pesa 12 kg. En el caso de gases, el volumen ocupado por un mol en condiciones normales se llama volumen molar y es una constante igual a $22,4 \text{ m}^3$ a 0°C y una atmósfera de presión. Estos conceptos son instrumentos muy útiles en los cálculos de combustión.

2.2- LEYES FUNDAMENTALES

Las leyes físicas fundamentales, sobre las que se basan todos los cálculos de combustión, son las siete que se exponen a continuación.

LEY DE CONSERVACIÓN DE LA MATERIA: La materia ni se crea ni se destruye. Como consecuencia, en un proceso de combustión, puede establecerse una igualdad entre el peso total de sustancias entrantes y de sustancias salientes o productos. Si se combinan $A \text{ kg.}$ de una sustancia con $B \text{ kg.}$ de otra, siempre aparecerán $(A + B) \text{ kg.}$ de productos finales.

LEY DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA: La energía ni se crea ni se destruye. La suma de las energías entrantes (potencial, cinética, térmica, química, eléctrica, etc.) en un proceso cualquiera, es igual a la suma de las energías salientes, aunque las cuantías parciales de cada una de ellas pueda alterarse. En la combustión la energía química pasa a térmica. Las leyes de la conservación de la materia y la energía, tal como acaban de ser expresadas, no son rigurosas, pero son aptas para los cálculos de combustión. Cuando se quema totalmente un kilogramo de carbón, la cantidad de masa que se convierte en energía es solo de $3,5 \times 10^{-10} \text{ kg.}$ que constituye una pérdida demasiado pequeña para que pueda ser tenida en cuenta en los cálculos de combustión.

LEY DE LOS GASES PERFECTOS: El volumen de un gas es directamente proporcional a su temperatura absoluta e inversamente proporcional a su presión absoluta. La constante de proporcionalidad es la misma para cualquier gas perfecto y se denomina por la letra

R , esta ley puede expresarse de la forma:

$$PV = nRT$$

Siendo:

V = Volumen del gas en m^3/mol

T = Temperatura absoluta en K

P = Presión absoluta en Pa

R = constante universal de los gases, $8,314 J/mol.K$

Esta ecuación establece que un mol de cualquier gas perfecto en iguales condiciones de presión y temperatura, ocupa siempre el mismo volumen. Los experimentos demuestran que la mayoría de los gases se aproximan bastante a esta ley.

LEY DE LOS PESOS COMBINADOS: Todas las sustancias se combinan según unas relaciones, en peso, simples y bien definidas. Tales relaciones son exactamente proporcionales a los pesos moleculares de los componentes. Por ejemplo el carbono (peso molecular igual a 12) se combina con el oxígeno (peso molecular igual a 32) para formar anhídrido carbónico (peso molecular igual a 44) de modo que 12 kg. de carbono más 32 kg. oxígeno se unen para formar 44 kg de CO_2 .

LEY DE AVOGADRO: Volúmenes iguales de gases diferentes, a la misma presión y temperatura, contienen los mismos números de moléculas. Como un mol de cualquier gas en las mismas condiciones de presión y temperatura ocupa el mismo volumen, resulta que en un mol de cualquier gas hay el mismo número de moléculas.

LEY DE DALTON: La presión de una mezcla de gases es igual a la suma de las presiones parciales debidas a cada uno de los componentes si cada uno, solo, ocupase el volumen total que ocupa la mezcla. Por ejemplo cuando volúmenes iguales (V) de los gases A , B y C , todos a la misma temperatura (T), a las presiones P_A , P_B y P_C , se mezclan ocupando el volumen V , la presión resultante será $P = P_A + P_B + P_C$. Cada gas presente en una mezcla se comporta como si ocupara todo el volumen de la mezcla y contribuyera a la presión total con una presión parcial independiente de los otros gases.

LEY DE AMAGAT: El volumen total ocupado por una mezcla de gases es igual a la suma de los Volúmenes que ocuparían cada uno de los componentes cuando se encontrasen a igual presión y temperatura que la mezcla. Esta ley es similar a la de Dalton, aunque, considerando los efectos aditivos de los volúmenes en lugar de las presiones. Si tres gases A , B y C estando a la presión P y a la temperatura T , ocupan los Volúmenes V_A , V_B y V_C , cuando se mezclan, manteniendo las mismas presión y temperatura, el volumen que ocupan será $V_A + V_B + V_C$.

3.- APLICACIÓN DE LAS LEYES FUNDAMENTALES

3.1.- LA COMBUSTIÓN COMPLETA

En la tabla siguiente se muestran las relaciones moleculares y másicas entre el oxígeno y las sustancias combustibles más comunes, así como sus poderes caloríficos. La mayoría de las relaciones gravimétricas y volumétricas de los cálculos de combustión, se pueden determinar utilizando la información de esta tabla y las siete leyes fundamentales.

TABLA - 1: Relaciones moleculares y másicas de las principales reacciones de combustión

Combustible	Reacciones	Moles	Kilogramos	PCS (kJ/kg)
Carbono (a CO)	$2C + O_2 \rightarrow 2CO$	$2 + 1 = 2$	$24 + 32 = 56$	9216
Carbono (a CO ₂)	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	$1 + 1 = 1$	$12 + 32 = 44$	32793
Monóxido de carbono	$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$	$2 + 1 = 2$	$56 + 32 = 88$	10104
Hidrógeno	$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$	$2 + 1 = 2$	$4 + 32 = 36$	142103
Azufre (a SO ₂)	$S + O_2 \rightarrow SO_2$	$1 + 1 = 1$	$32 + 32 = 64$	9256
Metano	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	$1 + 2 = 1 + 2$	$16 + 64 = 80$	55527
Acetileno	$2C_2H_2 + 5O_2 \rightarrow 4CO_2 + 2H_2O$	$2 + 5 = 4 + 2$	$52 + 160 = 212$	50003
Etileno	$C_2H_4 + 3O_2 \rightarrow 2CO_2 + 2H_2O$	$1 + 3 = 2 + 2$	$28 + 96 = 124$	50317
Etano	$2C_2H_6 + 7O_2 \rightarrow 4CO_2 + 6H_2O$	$2 + 7 = 4 + 6$	$60 + 224 = 284$	51922
Sulfuro de Hidrógeno	$2H_2S + 3O_2 \rightarrow 2SO_2 + 2H_2O$	$2 + 3 = 2 + 2$	$68 + 96 = 164$	16513

Las relaciones para el carbono y el hidrógeno se pueden expresar como sigue:

C	+	O ₂	=	CO ₂
1 molécula	+	1 molécula	=	1 molécula
1 mol	+	1 mol	=	1 mol
*	+	1 m ³	=	1 m ³
12 kg	+	32 kg	=	44 kg
2H₂	+	O₂	=	2H₂O
2 molécula	+	1 molécula	=	2 moléculas
2 mol	+	1 mol	=	2 mol
2 m ³	+	1 m ³	=	2 m ³
4 kg	+	32 kg	=	36 kg

Cuando 1 m³ de oxígeno (O₂) se combina con carbono (C), se forma 1 m³ de anhídrido carbónico (CO₂). Si el carbono fuese un gas ideal en lugar de un sólido, se requeriría 1 m³ de carbono.

Mientras que en las ecuaciones precedentes existe un balance en peso, no hay tal balance en volumen o en forma molecular. Por ejemplo 2 m³ de H₂ se unen a 1 m³ de O₂ para formar solo

$2 m^3$ de agua. Estas relaciones se basan en la ley de Avogadro y en la ley de los pesos combinados.

En la practica, aunque la combustión se pueda considerar completa, de acuerdo con las reacciones de la *tabla 1*, siempre se realiza con un "exceso de oxígeno". Se llama "**oxígeno teórico necesario**" a la cantidad precisa para que se completen las reacciones de combustión. Se llama "**oxígeno total**", en tanto por ciento en volumen, a cien por la relación entre el oxígeno aportado y el oxígeno teórico necesario. Se llama "**oxígeno en exceso**", en tanto por ciento en volumen, al oxígeno total menos cien.

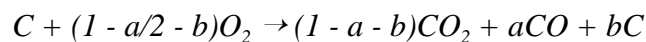
Como en la práctica el comburente es aire en lugar de oxígeno, es preferible utilizar la definiciones del párrafo anterior cambiando la palabra "oxígeno" por la palabra "aire" y teniendo en cuenta que en las reacciones de la *tabla 1* hay que añadir $3,76$ moles de N_2 a ambos miembros de cada ecuación, por cada mol de O_2 que intervenga.

Sobre la utilización de estos conceptos se volverá en el apartado de cálculos de combustión

3.2.- LA COMBUSTIÓN INCOMPLETA

Las reacciones expuestas en la *tabla 1* son aplicables cuando la combustión es completa, es decir, cuando el carbono, el hidrógeno y el azufre se oxidan en su totalidad. Esto en la práctica nunca ocurre y entre los productos de la combustión aparecen CO , C , H_2 y S , además de CO_2 , H_2O y SO_2 .

El carbono en lugar de quemar según la reacción $C + O_2 \rightarrow CO_2$, lo hace de la forma siguiente:



Donde " a " partes de carbono forman CO y " b " partes quedan sin quemar.

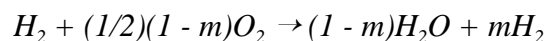
La cantidad de CO_2 formada disminuye en $(a + b)$ moles

El monóxido de carbono formado será " a " moles.

El consumo de oxígeno se reducirá en la cantidad $(a/2 + b)$ moles.

El aire utilizado en la combustión disminuirá en $(100/21)(a/2 + b)$ moles.

El hidrógeno e vez de quemar según la reacción $H_2 + (1/2)O_2 \rightarrow H_2O$, lo hace según



Donde " m " partes de H_2 permanecen sin oxidar. En los gases aparecen m moles de H_2 y la cantidad de agua quedará reducida en la misma cantidad. El consumo de oxígeno se reducirá en $m/2$ moles y el de aire en $(100/21)(m/2)$ moles.

El balance entre combustibles, comburente y productos de la combustión ya no será el que se deduce de la *tabla 1*. Ahora es necesario volver a definir los conceptos anteriores. Se llama "Aire teórico necesario" a la cantidad de aire precisa para que se completen las reacciones de combustión de las cantidades de los elementos combustibles que han reaccionado (por ejemplo se considera necesario el aire que se debería aportar para que todo el carbono que se queda en la forma de CO pase a la forma CO_2 y en cambio, no se considera necesario el aire para

quemar el carbono que queda inquemado. Se llama "aire total" a cien por la relación entre el realmente aportado y el teórico necesario. Se llama aire en exceso al aire total menos cien.

De acuerdo con las definiciones anteriores el aire teórico necesario no es el mismo si se trata una combustión incompleta que si se trata de una combustión completa.

Como se verá más adelante, el control de la combustión se hace valiéndose de las mediciones de los contenidos de CO_2 , CO y O_2 , en los gases producto de la combustión.

Hasta ahora se han dado las bases y definiciones para emprender los cálculos de combustión, tanto si ésta es completa como si es incompleta o si tiene lugar o no con exceso de aire, pero en la práctica los productos finales de la combustión son más de los considerados. El total de productos posibles son los que se listan a continuación:

- Anhídrido carbónico, CO_2
- Monóxido de carbono, CO
- Carbono gaseoso, C
- Carbono sólido, C
- Agua, H_2O
- Hidrógeno molecular, H_2
- Hidrógeno atómico, H
- Radicales, OH
- Oxígeno molecular, O_2
- Oxígeno atómico, O
- Nitrógeno molecular, N_2
- Nitrógeno atómico, N
- Óxidos de nitrógeno, NO_x

Estableciendo los balances de masas y las constantes de los distintos equilibrios, es posible plantear las trece ecuaciones necesarias para calcular las cantidades de los productos de la combustión en los gases.

Para los casos prácticos normales, las temperaturas de combustión son inferiores a 3000 °C y entonces se pueden despreciar las cantidades de la mayoría de los productos y considerar como reacción general de combustión la siguiente:



Mediante los balances de masa se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} a &= a_1 + b_1 \\ b &= 2c_1 + 2d_1 \\ c + 2X &= 2a_1 + b_1 + c_1 \\ d + 7,52X &= f_1 \end{aligned}$$

Mediante la constante de equilibrio, a la temperatura de combustión, de la reacción " $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$ " se obtiene la siguiente ecuación:

$$k = (b_1)(c_1)/(a_1)(d_1)$$

Así el problema se simplifica a cinco ecuaciones y cinco incógnitas.

TABLA 2: *Composición del aire*

Componente	Composición en volumen	Composición en peso
Nitrógeno	78,09 %	76,85 % (*)
Oxígeno	20,95 %	23,15 %
CO ₂	0,03 %	
Argón	0,93 %	
Neón		
Helio		
Kriptón		
Hidrógeno		
Xenón		
Ozono		
Radón		
NO _x		
<ul style="list-style-type: none"> • Los gases cuyas proporciones no se indican suponen, en conjunto un porcentaje inferior al 0,003 % • El peso molecular equivalente del aire a efectos prácticos es 28,97 • Para los cálculos conviene incluir los inertes como nitrógeno equivalente. • Para cálculos en calderas se utilizan las siguientes relaciones: <ul style="list-style-type: none"> • En ocasiones se toma el aire con una humedad del 1,3 % en peso (Estándar para la industria de calderas que corresponde a aire a 26,7 °C, 60 % de humedad relativa y presión de 1,013 bar - ABMA) • (Moles de aire)/(moles de O₂) = (volumen de aire)/(volumen de O₂) = 100/20,99 = 4,76 • (Moles de N₂)/(mol de O₂) = 79,01/20,99 = 3,76 • (Peso aire seco)/(peso O₂) = 100/23,15 = 4,32 • (Peso de N₂)/(peso de O₂) = 76,85/23,15 = 3,32 		

4.- EL MOL EN LOS CÁLCULOS DE COMBUSTIÓN

Los cálculos de combustión para materias gaseosas se pueden simplificar, mediante la utilización del *mol*. Como iguales Volúmenes de gases, a presión y temperatura dadas, contienen el mismo número de moléculas (Ley de Avogadro), los pesos de iguales volúmenes resultan proporcionales a sus pesos moleculares. Si M es el peso molecular del gas, un mol equivale a M kg. Los valores particulares se pueden obtener de cualquier tabla de pesos moleculares. Por ejemplo: $1 \text{ mol de } O_2 = 32 \text{ kg de } O_2$; $1 \text{ mol de } H_2 = 2 \text{ kg de } H_2$; $1 \text{ mol de } CH_4 = 16 \text{ kg de } CH_4$.

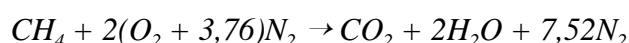
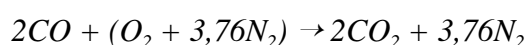
En una mezcla, la fracción molar de un componente es el número de moles de tal componente dividido por la suma del número de moles de cada uno de los componentes de la mezcla. Como el mol de cualquier gas ideal ocupa el mismo volumen, se deduce de la ley de

Avogadro que, para una mezcla de gases ideales, la fracción molar de un componente será exactamente igual a la fracción volumétrica del mismo.

Este es un concepto útil, ya que el análisis volumétrico de una mezcla de gases da automáticamente las fracciones molares de los componentes diversos.

Por otro lado, la combustión se ha considerado como un proceso en el que intervienen combustible y oxígeno. En las centrales térmicas, la fuente práctica de oxígeno es el aire, que incluye, además del oxígeno, una mezcla de nitrógeno, vapor de agua y pequeñas cantidades de gases inertes como argón, neón y helio. En la *tabla 2*, figura la composición del aire.

La información contenida en la *tabla 1* se puede utilizar también para el aire, en lugar del oxígeno, si se añaden 3,76 moles de N₂ a ambos miembros de las ecuaciones, por cada mol de O₂ que intervenga. Por ejemplo las combustiones del CO y del metano en aire se pueden escribir respectivamente:



Conforme se indica en el ejemplo siguiente, relativo a un combustible gaseoso, los cálculos "en moles" tienen una aplicación simple y directa para los combustibles gaseosos ya que sus análisis, normalmente, se facilitan en tanto por ciento en volumen.

El análisis de un combustible gaseoso en tanto por ciento en volumen puede ser:

Componente	Cantidad (% en volumen)
CH ₄	85,3
C ₂ H ₆	12,6
CO ₂	0,1
N ₂	1,7
O ₂	0,3
TOTAL	100

El análisis será exactamente el mismo si se expresa en moles por cada cien moles de combustible (% en moles).

El contenido de cada uno de los elementos químicos fundamentales de este combustible, también se puede expresar en moles por cada cien moles de combustible, conforme se detalla a continuación:

Componente	Cálculo	Contenido (moles)
C en CH ₄	85,3 x 1	85,3
C en C ₂ H ₆	12,6 x 2	25,2
C en CO ₂	0,1 x 1	0,1
C Total		110,6
H ₂ en CH ₄	85,3 x 2	170,6
H ₂ en C ₂ H ₆	12,6 x 3	37,8
H₂ Total		208,4
O ₂ en CO ₂	0,1 x 1	0,1
O ₂ en O ₂		0,3
O₂ Total		0,4
N₂ Total		1,7

Un análisis de los humos producidos en la combustión, del gas combustible cuya composición se detalló antes, podría ser el siguiente:

Componentes	% en volumen	% en moles
CO ₂	10,4	10,4
O ₂	2,8	2,8
N ₂	86,8	86,8
TOTAL	100 m ³	100 moles

Los análisis de gases suelen referirse a volumen de gases secos.

Por cada *mol* de carbono quemado se forma un mol de CO₂. El análisis del combustible utilizado indica que contiene *110,6 moles* de C por cada *100 moles* de combustible, a partir de los cuales se formarán *110,6 moles* de CO₂. Del análisis de humos se deduce que por cada mol de CO₂ hay $100/10,4 = 9,62$ moles de humo seco y por tanto, *100 moles* de combustible producirán $110,6 \times 9,62 = 1064$ moles de humo seco. De forma que la aplicación del método de cálculo "por moles" permite obtener rápidamente valores importantes, conociendo solo los análisis de humos y de combustible.

A partir del análisis de humos, se puede obtener fácilmente el peso molecular del humo seco, en la forma siguiente:

10,4 moles de CO ₂	pesan	10,4 x 44 = 457,6 kg.
2,8 moles de O ₂	pesan	2,8 x 32 = 89,6 kg
86,8 moles de N ₂	pesan	86,8 x 28 = 2340,4 kg.
100,0 moles de humos secos	pesan	TOTAL = 2977,6 kg.
1,0 moles de humos secos	pesan	29,8 kg
El peso molecular del humo seco es		29,8
El peso de los 1064 moles de humos secos que producen 100 moles de combustible es		1064 x 29,8 = 31700 kg
100 moles de combustible producen 31700 kg. de humo seco		

El peso de *100 moles* de combustible es la suma de los productos parciales resultantes de multiplicar el porcentaje en volumen de cada componente, por su respectivo peso molecular. Para el combustible estudiado será:

Compuesto	Moles x kg/mol	Peso total (kg)
CH ₄	85,3 x 16	1365
C ₂ H ₆	12,6 x 30	378
CO ₂	0,1 x 44	4,4
N ₂	1,7 x 28	47,6
O ₂	0,3 x 32	9,6
Combustible	100 moles	Pesan 1804,6 kg

En consecuencia, *1804,6 kg.* de combustible gaseoso producen *31700 kg.* de humo seco y cada kg. de combustible gaseoso genera $31700/1805 = 17,6$ kg. de humo seco.

5.- CALOR DE COMBUSTIÓN

Hasta ahora se ha tratado de las relaciones fundamentales en peso y volumen, que existen entre el combustible y el oxígeno del aire, dentro del proceso de combustión.

En el hogar de una caldera (donde no existe trabajo mecánico alguno), la energía calorífica liberada por la reacción de los componentes del combustible con el oxígeno, depende de los productos finales de combustión y no de las combinaciones intermedias que puedan presentarse, antes de la formación de los productos finales.

Una simple demostración de esta ley es la combinación de *1 kg.* de carbono con el oxígeno, para producir una cantidad específica de calor (unos *32793 kJ* según la *tabla 1*). Tal combinación puede producirse en un solo paso, para formar directamente CO₂; sin embargo, en ciertas condiciones, tal combinación puede producirse en dos etapas, la primera que culmina con

la formación de CO y un menor desprendimiento de calor (9210 kJ) y la segunda en la que el CO se combina con oxígeno para dar el CO_2 a la vez que se liberan 23583 kJ . Sin embargo, la suma de los calores liberados en estos dos pasos resulta igual a los 32793 kJ desprendidos cuando se quema el carbono, pasando directamente al estado CO_2 , en transformación directa.

El que el carbono pueda adoptar estas dos combinaciones con el oxígeno, es de la máxima importancia para el diseño del equipo de combustión. La tecnología de combustión debe asegurar una buena mezcla del combustible y el oxígeno, para estar seguros de que todo el carbono se quema pasando a CO_2 y no se queda nada en forma de CO . Si no se cumple este requisito, se presentarán pérdidas apreciables en el rendimiento de la combustión y en la cuantía del calor liberado del combustible, ya que sólo un 28 % del calor disponible en el carbono llega a liberarse si se forma CO en lugar de CO_2 .

5.1.- MEDIDA DEL CALOR DE COMBUSTIÓN

En la práctica de calderas, se considera calor de combustión de un combustible a la cantidad de calor, expresada en *Julios*, liberada por la combustión completa, de un kilogramo de combustible cuando éste es sólido o líquido, o de 1 m^3 cuando se trata de un combustible gaseoso. Se suele llamar también "poder calorífico".

La cantidad de calor producida por la combustión completa es una constante y no depende de la forma en que se realice la combustión, siempre y cuando ésta sea completa.

El poder calorífico se mide directamente del calor liberado durante la combustión, en un calorímetro. Los productos de la combustión, dentro del calorímetro, se refrigeran hasta la temperatura inicial y el calor de combustión se determina midiendo el calor absorbido por el medio refrigerante. De esta manera se obtiene el poder calorífico superior.

Para los combustibles sólidos y líquidos, se obtienen resultados satisfactorios con la bomba calorimétrica, que quema las sustancias combustibles en oxígeno a volumen constante, obteniéndose una combustión completa y midiéndose con buena precisión el calor desprendido.

Para combustibles gaseosos se aceptan como normalizados los calorímetros de flujo continuo o flujo constante. El principio de funcionamiento es el mismo que el de la bomba calorimétrica, excepto que el contenido de calor se determina a presión constante, en lugar de a volumen constante. Para la mayoría de los combustibles, la diferencia entre los poderes caloríficos, determinados a presión constante y a volumen constante es pequeña y suele despreciarse.

Si se conocen los porcentajes de cada uno de los gases que componen una mezcla, se puede calcular exactamente el calor de combustión de ésta, por medio de la suma de los productos parciales obtenidos al multiplicar el porcentaje en volumen, de cada componente, por su particular calor de combustión..

Aunque, para lograr cifras exactas de poderes caloríficos, en caso de combustibles sólidos y líquidos es preciso recurrir a la bomba calorimétrica, se pueden determinar valores aproximados de los poderes caloríficos, de la mayoría de los carbones, si se conoce su análisis químico elemental. La fórmula de Dulong facilita resultados razonablemente exactos, para la mayoría de los carbones, y suele usarse como comprobación rutinaria de los valores dados por el calorímetro:

$$\text{Poder calorífico (kJ/kg)} = 33825.C + 144260.(H_2 - O_2/8) + 9420.S$$

En esta fórmula los símbolos representan las fracciones en peso (tanto por uno) de los elementos correspondientes según el análisis elemental del combustible; los coeficientes son aproximadamente los poderes caloríficos de los constituyentes; el término $O_2/8$ es debido a que se considera que el oxígeno del combustible está combinado con hidrógeno y la cantidad correspondiente de éste ya no reacciona. En general, esta fórmula no es aplicable para calcular los poderes caloríficos de los combustibles gaseosos.

5.2.- PODERES CALORÍFICOS SUPERIOR E INFERIOR

El vapor de agua es uno de los productos de combustión, para cualquier combustible que contenga hidrógeno. El poder calorífico de un combustible depende de que tal vapor se condense o bien se quede en forma gaseosa. En la bomba calorimétrica los productos de la combustión se refrigeran hasta la temperatura inicial, y todo el vapor de agua formado durante la combustión se condensa al estado líquido. El obtenido de esta forma es el poder calorífico superior del combustible, que incluye el calor de vaporización. El poder calorífico inferior, corresponde a la hipótesis de que todos los productos de la combustión se mantengan en estado gaseoso.

Mientras el poder calorífico superior se puede determinar fácilmente, no ocurre lo mismo con el poder calorífico inferior que normalmente se determina mediante la siguiente fórmula:

$$PCI = PCS - 2419W$$

Siendo:

PCI = Poder calorífico inferior

PCS = Poder calorífico superior

W = $kg.$ de agua formados por cada $kg.$ de combustible

2419 = Factor de reducción del poder calorífico superior a volumen constante al poder calorífico inferior a presión constante.

6.- TEMPERATURAS DE IGNICIÓN

La temperatura de ignición puede definirse como la temperatura a la que se produce, durante la combustión una liberación de calor que es mayor que las pérdidas hacia el exterior, de modo que el proceso de combustión llega a ser automantenido. La expresión "temperatura de ignición" se aplica normalmente a una combustión rápida en aire a presión atmosférica.

TABLA 3:

TEMPERATURA DE IGNICIÓN A PRESIÓN ATMOSFÉRICA EN EL AIRE		
Combustibles	Fórmula	Temperatura (°C)
Azufre	S	243
Carbón de leña	C	343
Carbono fijo (de carbón bituminoso)	C	407
Carbono fijo (de carbón semibituminoso)	C	465
Carbono fijo (de antracita)	C	449 - 602
Acetileno	C ₂ H ₂	304 - 440
Etano	C ₂ H ₆	471 - 629
Etileno	C ₂ H ₄	482 - 549
Hidrógeno	H ₂	574 - 590
Metano	CH ₄	632 - 749
Monóxido de carbono	CO	610 - 657
Keroseno		254 - 293
Gasolina		260 - 427

Las temperaturas de ignición de las sustancias combustibles, varían mucho de unas a otras, según se puede ver en la *tabla 3*, que indica las temperaturas mínimas y los rangos de temperatura en aire, respectivamente para los elementos combustibles y los combustibles comerciales normalmente utilizados en la generación de calor. Sobre la temperatura de ignición influyen muchos factores, de modo que cualquier tabulación debe utilizarse sólo como guía aproximada. Algunas de esas variables son la presión, la velocidad, la configuración del recinto, los catalizadores, la uniformidad de la mezcla aire-combustible, la fuente de ignición, etc. Normalmente la temperatura de ignición decrece cuando aumenta la presión y aumenta con la elevación del contenido en humedad del aire.

Las temperaturas de ignición de los gases de un carbón varían considerablemente y son sensiblemente mayores que las temperaturas de ignición del carbono fijo, ya que los componentes gaseosos se destilan, pero no se inflaman antes de tal temperatura.

7.- CALCULO DE AIRE Y GASES DE COMBUSTIÓN

Los cálculos de aire y gases de la combustión se muestran a continuación, para tres combustibles distintos, uno sólido, uno líquido y otro gaseoso. Las explicaciones de los cálculos que pueden no quedar claros, de la simple lectura de las hojas, también se exponen a continuación de las hojas de cálculo.

8.- LAS PERDIDAS DE LA COMBUSTIÓN

En los cálculos de combustión ya se trató de las pérdidas en los humos. En este apartado se tratará de relacionar las pérdidas de una caldera, con las condiciones de la combustión, con objeto de definir la forma de calcular el exceso de aire más económico. De todos modos el cálculo completo de las pérdidas de la combustión, se hará al final del tema, donde se dedicará un apartado al cálculo del rendimiento simplificado según el código ASME.

En una caldera ni se aprovecha todo el calor que desprende el combustible, ni la combustión se realiza de manera óptima. Ello se debe a que siempre, en mayor o menor grado, existen pérdidas como las siguientes, algunas de las cuales ya se han tratado al hacer los cálculos de combustión:

- Pérdidas por calor sensible de los humos, que se obtienen mediante la suma de los productos de los calores específicos de los componentes de los humos por la cantidad de cada uno producida por unidad básica de combustible y por la diferencia de temperaturas entre la de los humos de salida y el ambiente. Estas pérdidas dependen del exceso de aire de combustión.
- Pérdidas por vaporización o calor latente (aproximadamente a la presión atmosférica) del

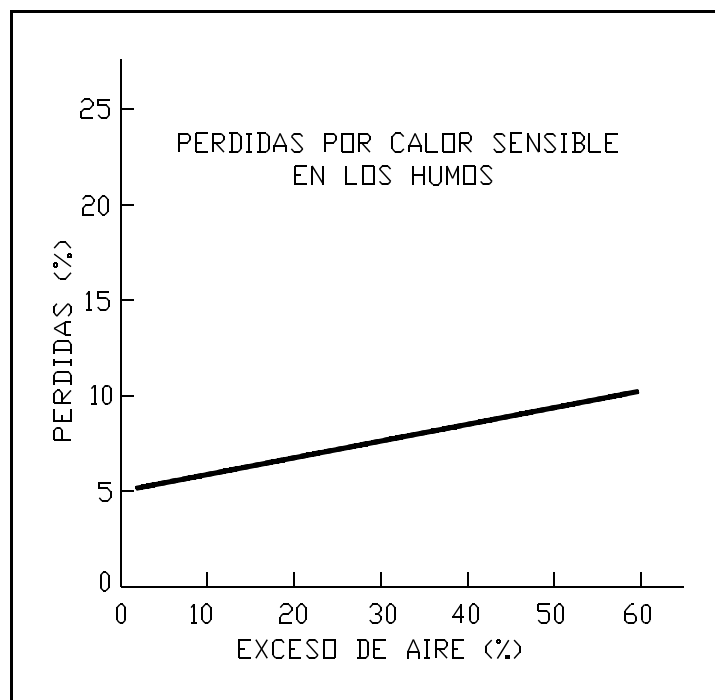


Figura 1: Pérdidas por calor sensible en los humos

agua que lleva el combustible más la que se forma por la combustión del hidrógeno. Estas pérdidas son independientes del exceso de aire de la combustión.

- Pérdidas por calor sensible de las cenizas, que será el producto de la cantidad de las mismas que produce la unidad básica de combustible, multiplicada por su calor específico y por la diferencia de temperatura entre las mismas y el ambiente. En el caso de que estas cenizas se extraigan fundidas, deberá añadirse el calor latente de fusión correspondiente. Estas pérdidas son relativamente pequeñas, no dependen del exceso de aire de combustión y no se suelen medir directamente, sino que se incluyen entre las pérdidas no medidas, como se verá en el cálculo del rendimiento de caldera.
- Pérdidas por inquemados sólidos en los humos (hollines) y en las cenizas. Se pueden considerar que son carbono puro. Estas pérdidas dependen del exceso de aire de combustión.
- Pérdidas por inquemados gaseosos ($\text{CO} + \text{H}_2$), que aparecen en los humos si la

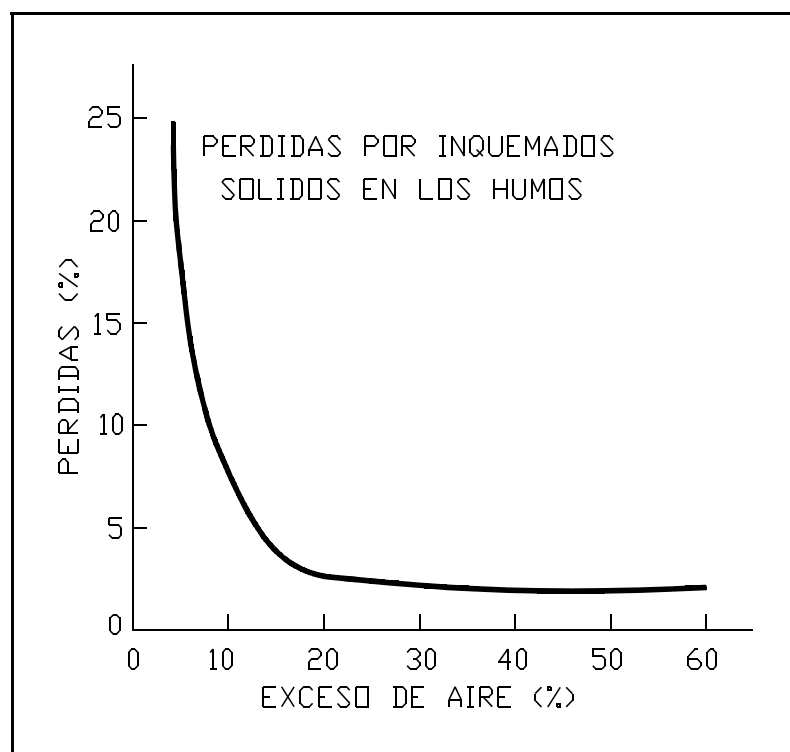


Figura 2: Pérdidas por inquemados sólidos

combustión no ha sido completa y que eventualmente pueden ir acompañados por algunos productos del craqueing (hidrocarburos ligeros; C_xH_y) que tampoco han sufrido combustión completa. Estas pérdidas dependen del exceso de aire de combustión.

- Pérdidas por radiación hacia el exterior, en las que interviene también la convección entre la pared exterior y el ambiente además de otras causas. No dependen del exceso de aire de combustión. Como se verá más adelante el código ASME establece un método empírico para su cálculo.
- Además, existen otras pérdidas derivadas de reacciones no conocidas (por ejemplo, en el seno de las cenizas) o no bien determinadas (disociación de carbonatos que forman

parte de las cenizas).

Todas las pérdidas enumeradas se pueden reunir en dos grupos:

Pérdidas dependientes del exceso de aire:

Pérdidas por calor sensible de los humos.

Pérdidas por inquemados sólidos.

Pérdidas por inquemados en los gaseosos.

Pérdidas independientes del exceso de aire:

Pérdidas por calor latente de los humos.

Pérdidas por el calor sensible de las cenizas

Pérdidas por radiación.

9.- EL EXCESO DE AIRE MAS ECONÓMICO

Considerando estos dos grupos de pérdidas y la relación que guardan con el exceso de aire, es posible determinar cuál es el más económico o aquel que las hace mínimas.

Las pérdidas por calor sensible en los humos: Crecen de forma lineal con al exceso de aire. Como es lógico, para la misma temperatura de salida de humos, crecerán proporcionalmente

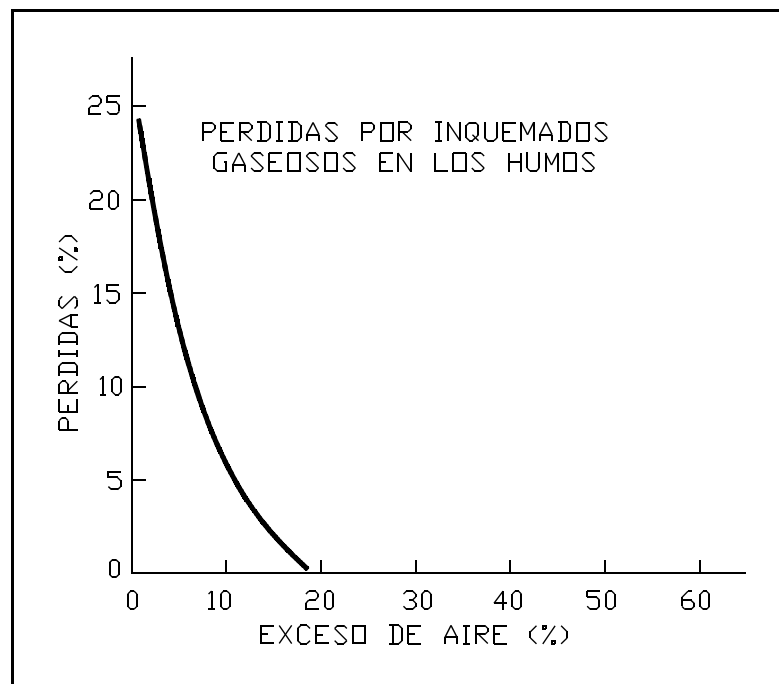


Figura 3: Pérdidas por inquemados gaseosos

a la cantidad de humos emitidos y esta cantidad crecerá proporcionalmente al exceso de aire. En la *figura 1* se puede ver la variación de estas pérdidas con el exceso de aire.

Pérdidas por inquemados sólidos: Estas pérdidas son muy grandes cuando se produce la combustión con la cantidad de aire estequiométrica o exceso de aire nulo, ya que la mezcla perfecta de combustible y aire no se puede conseguir. Como es lógico disminuyen al aumentar el exceso de aire. Sin embargo, nunca llegan a anularse, sino que alcanzan un mínimo y luego

se mantienen constantes aunque siga aumentando el exceso de aire (ver *figura 2*). Esto es debido a que la eficacia de la mezcla depende de la superficie específica del combustible (sólidos y líquidos) y por ejemplo, en el caso concreto del carbón pulverizado, el tamaño mínimo tiene un límite inferior a partir del cual, la disminución de las pérdidas, no compensa la energía adicional necesaria para la pulverización

Las pérdidas por inquemados gaseosos engloban las ocasionadas por gases que escapan sin haberse quemado totalmente (CO , H_2 , Hidrocarburos ligeros). Al contrario de lo que ocurre con las pérdidas debidas a inquemados sólidos, éstas pueden anularse aumentando el exceso de aire, tal como se muestra en la *figura 3*. Esto es debido a que los combustibles en fase gaseosa

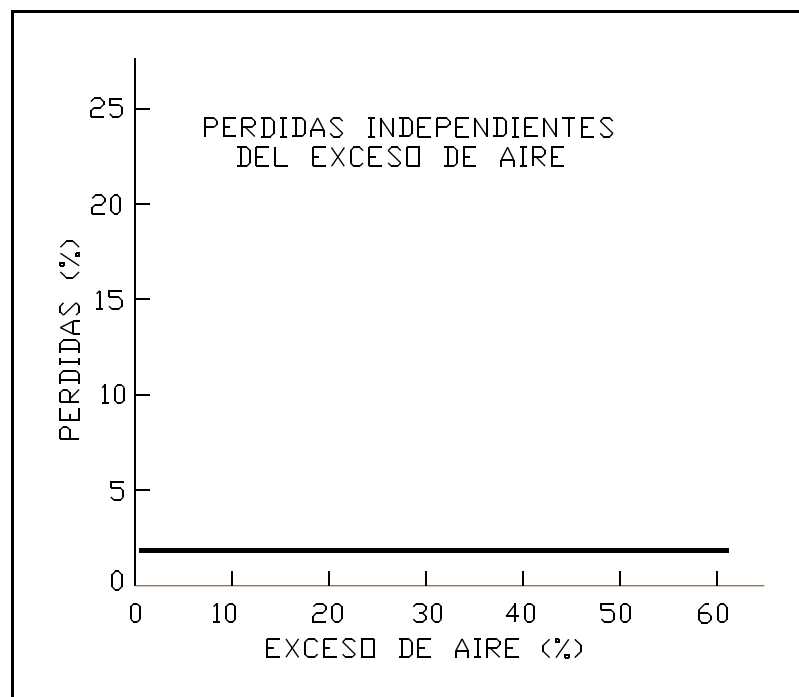


Figura 4: Pérdidas independientes del exceso de aire

no tienen la limitación en cuanto a tamaño de partícula que tienen los combustibles sólidos y líquidos y se pueden conseguir mezclas aire-combustible mucho más eficaces en cuanto a rendimiento de la combustión.

Las pérdidas independientes del exceso de aire que enumeramos anteriormente y que están constituidas por las Pérdidas por calor latente de los humos, Pérdidas por el calor sensible de las cenizas y Pérdidas por radiación, se pueden representar como se indica en la *figura 4*. Si se suman las pérdidas representadas en las *figuras 1 a 4*, se obtienen las pérdidas totales de la combustión en función del exceso de aire. Esta suma se muestra en la *figura 5*. Como se puede apreciar, cuando aumenta el exceso de aire, las pérdidas totales disminuyen con bastante rapidez, pero alcanzan un mínimo y luego vuelven a aumentar.

El valor del exceso de aire para el que las pérdidas son mínimas es el **exceso de aire más económico** y es el valor del mismo con el que se debe quemar un combustible. El exceso de

aire más económico no es el mismo para todos los combustibles, depende mucho de que el combustible sea sólido líquido o gaseoso. Se puede considerar de forma aproximada y como término medio que para la combustión de un combustible sólido el exceso de aire más económico está en el orden del 20 %, para un combustible líquido del 15 % y para un combustible gaseoso del 10 %. Estos valores varían dentro de un rango en función de las propiedades de cada combustible.

10.- LA TEMPERATURA TEÓRICA MÁXIMA

Se define como temperatura máxima de la combustión la temperatura que se alcanzaría

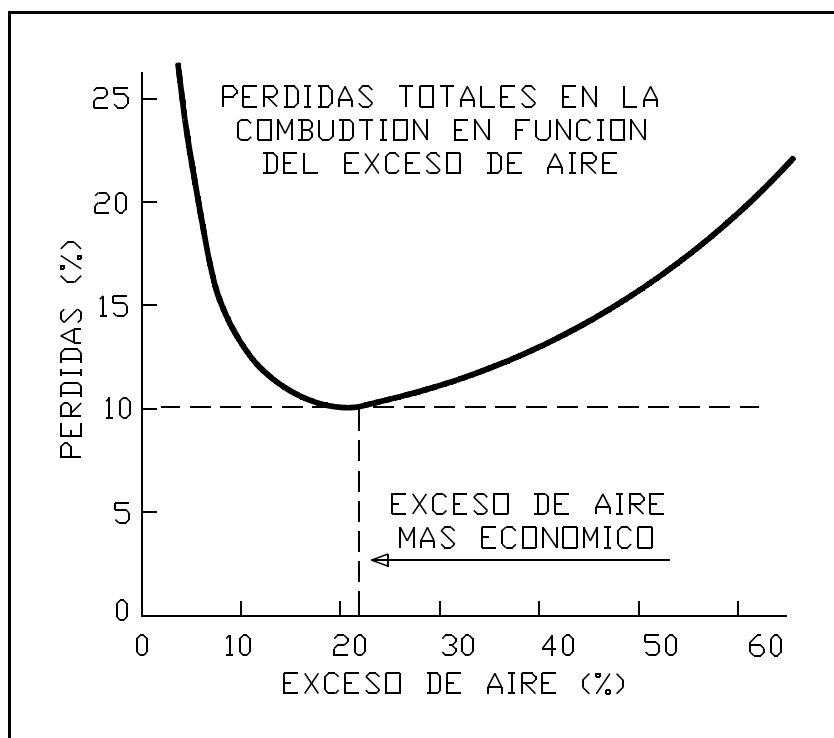


Figura 5: Exceso de aire más económico

si aquella fuera completa, con la cantidad de aire estequiométrica y sin pérdidas. El cálculo de esta temperatura se basa en los calores específicos medios de los gases de combustión.

A continuación se relacionan las temperaturas teóricas máximas de combustión con el aire teórico para algunos combustibles.

Si se trabaja con exceso de aire baja la temperatura de combustión porque se producen mayor cantidad de humos. Si se trabaja con defecto de aire, la combustión no es completa por lo que baja la temperatura.

Si se supone que todo el calor liberado en la combustión se emplea en elevar la temperatura de los humos resultantes y se considera el calor específico medio de estos, la temperatura alcanzada será:

$$T = \frac{Q}{C_m V}$$

siendo:

- Q = Calor total liberado o poder calorífico inferior.
 C_m = Calor específico medio de los gases entre 0°C y la temperatura T .
 V = Volumen de los humos.

Si ahora se tiene en cuenta que el calor total está formado por la suma del calor de combustión " Q_C " más el calor sensible del aire de combustión " Q_A " más el calor sensible del combustible " Q_S " y el denominador de la expresión anterior se puede desglosar en la suma de los productos del calor específico medio de cada componente, a presión constante, por su volumen como parte de la mezcla, se tiene:

$$T = \frac{Q_C + Q_A + Q_S}{C_{P,CO_2} V_{CO_2} + C_{P,N_2} V_{N_2} + C_{P,H_2O} V_{H_2O} + C_{P,O_2} V_{O_2}}$$

Para calcular esta temperatura se pueden aplicar tres métodos:

- a)** Cálculo iterativo. Se supone una temperatura y se calculan los valores específicos medios correspondientes a esta temperatura. Se halla la temperatura " T " mediante la fórmula de arriba y normalmente se obtendrá un valor distinto del supuesto. Se hace una nueva aproximación utilizando los calores específicos para una temperatura interpolada entre las dos anteriores y se siguen haciendo aproximaciones hasta que la temperatura calculada y la supuesta sean casi iguales.
- b)** Expresando los calores específicos en función de la temperatura. Este método resulta más sencillo y suficientemente aproximado, si se expresan los calores específicos como función lineal de la temperatura, despreciando los términos de segundo grado y superiores. La determinación de la temperatura entonces se reduce a resolver una ecuación de segundo grado en T .
- c)** Por medio de fórmulas empíricas. Una de ellas es la fórmula de Graf que se aplica para distintos rangos de temperatura:

Entre 1.200°C y 2.000°C :

$$T = \frac{Q_C + Q_A + Q_S + 140 V_{CO_2} + 120 V_{H_2O} + 40 V_{N_2}}{0,639 V_{CO_2} + 0,519 V_{H_2O} + 0,373 V_{N_2}}$$

Entre 1.800 °C y 3.000 °C:

$$T = \frac{Q_C + Q_A + Q_S + 140 V_{CO_2} + 200 V_{H_2O} + 70 V_{N_2}}{0,639 V_{CO_2} + 0,561 V_{H_2O} + 0,389 V_{N_2}}$$

Se define como "**Rendimiento pirométrico**" el cociente entre la temperatura real alcanzada en una combustión y la máxima teórica. Suele variar entre 0,5 y 0,75. Para el carbón pulverizado el margen de variación es más estrecho: 0,65 a 0,70.

Combustible	Temperatura teórica máxima de combustión
Carbono puro	2.040 °C
Monóxido de carbono	2.100 °C
Acetileno	2.420 °C
Hidrógeno	2.230 °C
Hulla	2.000 °C

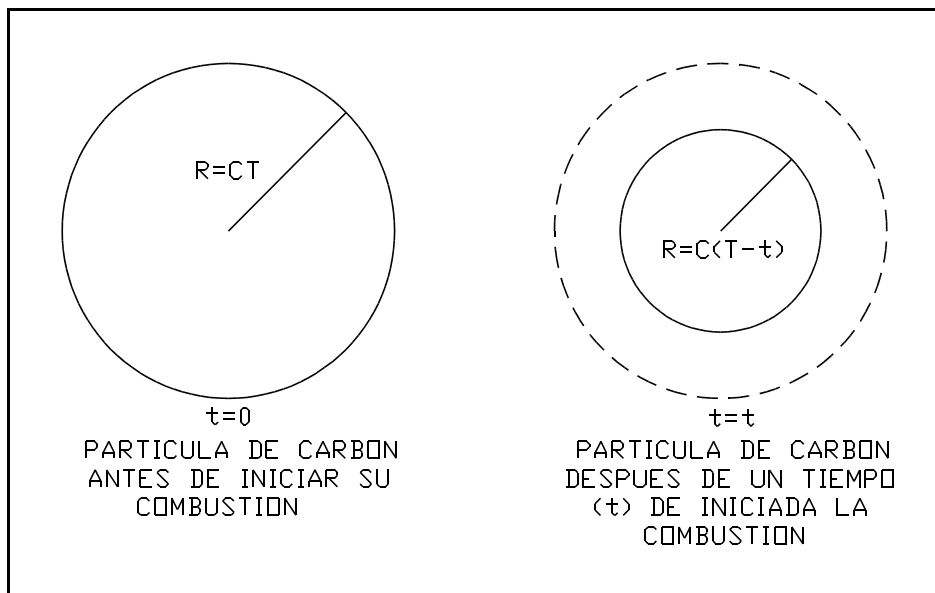


Figura 6: Evolución de la combustión de un grano aislado

11.- LA COMBUSTIÓN DE LOS COMBUSTIBLES SÓLIDOS

Como se ha visto al principio del texto las condiciones necesarias para una buena combustión eran las siguientes:

- Temperatura suficientemente alta para que los constituyentes entren en ignición.

- Proporción adecuada aire/comburente.
- Grado de mezcla adecuado para que el aire y el combustible tengan un buen contacto superficial.
- Tiempo necesario para el desarrollo de una combustión completa

En este apartado se verá el grado en que estas condiciones se pueden alcanzar en un combustible sólido y la mayor o menor influencia que tiene este grado de consecución, sobre la eficiencia de la combustión

Como ya se ha mencionado en repetidas ocasiones, hablar de la combustión de combustibles sólidos, en la actualidad, es hablar de la combustión del carbón y, con más precisión, del carbón pulverizado y del carbón en lecho fluido.

A continuación se exponen las cuestiones más importantes relativas a la combustión del carbón en sus distintas formas.

11.1.- INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA EN EL TIEMPO DE COMBUSTIÓN

Consideremos primero la combustión de un grano aislado. Esta cuestión ha sido estudiada ampliamente sobre modelos y aquí sólo se van a considerar las conclusiones obtenidas.

Se han tenido en cuenta estas hipótesis:

1. El carbón es homogéneo e isótropo.
2. Los trozos son de forma regular: cubo, esfera, etc.
3. El peso quemado por unidad de tiempo es proporcional a la superficie en el momento considerado.

Si se llama " t " al tiempo transcurrido desde el inicio de la combustión y " T " al tiempo total que tarda en quemarse un grano, se establecen en función de $x = t/T$ las ecuaciones que dan los valores de:

- α Es la relación entre el volumen quemado hasta el instante t , y el volumen nicial.
 ω que es la relación entre la superficie externa, en el instante t , y la superficie inicial.

Estas ecuaciones se obtienen de la siguiente manera (*figura 6*):

Si la velocidad de avance de la combustión en el grano es C m/s, y se supone el grano esférico, el radio inicial del grano será CT , y su volumen $(4/3)\pi(CT)^3$. Transcurrido un tiempo t desde el inicio de la combustión del grano, el radio sin quemar será $C(T-t)$ y el volumen quemado en el tiempo t será $(4/3)\pi(CT)^3 - (4/3)\pi C^3(T-t)^3$. Por lo tanto:

$$\alpha = \frac{(4/3)\pi C^3 [T^3 - (T-t)^3]}{(4/3)\pi C^3 T^3} = \frac{T^3 - (T-t)^3}{T^3} = 1 - \left(1 - \frac{t}{T}\right)^3$$

$$\alpha = 1 - (1 - x)^3$$

Siguiendo el mismo método operativo, se obtiene la relación superficial.

$$\omega = (1 - x)^2$$

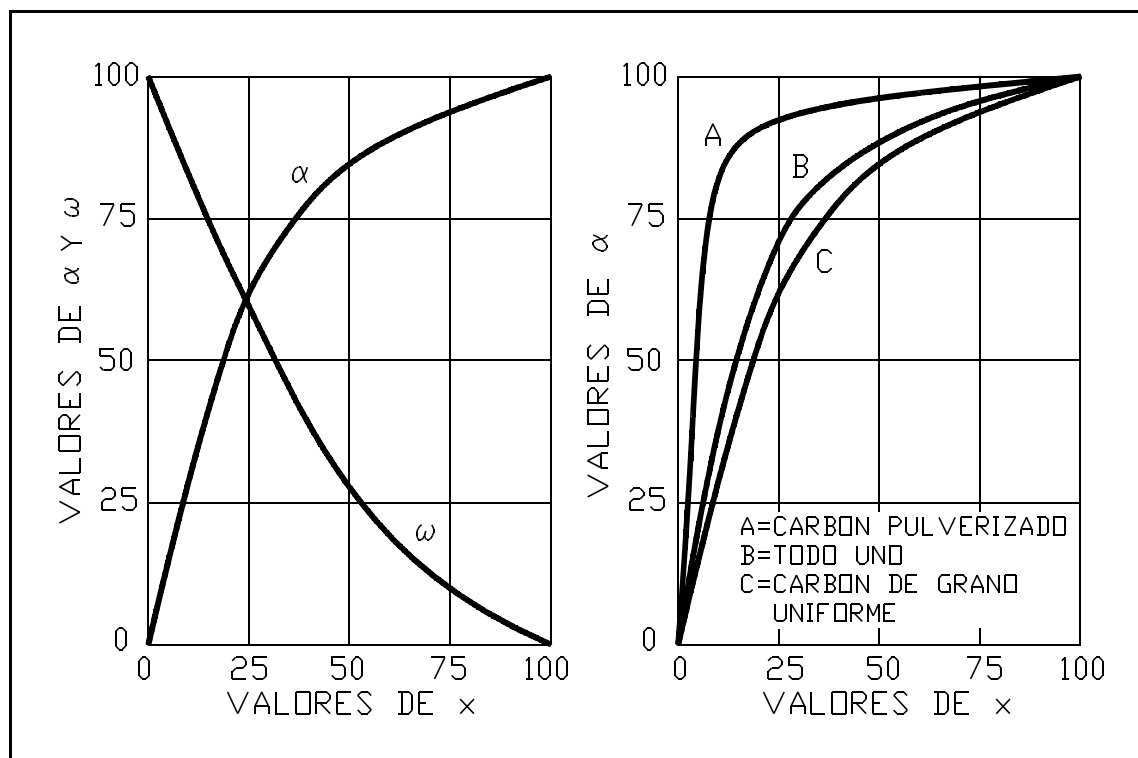


Figura 7: valores de α y ω para distintas granulometrías del carbón, en función de x

Estas dos ecuaciones se representan en la gráfica de la izquierda de la *figura 7*, donde se ve, que el volumen quemado crece muy rápidamente al principio y, después, lo hace cada vez más lentamente.

Cuando ha transcurrido el 25 % del tiempo de combustión, el volumen y, por consiguiente, el peso del combustible quemado es ya el 58 %. Cuando el tiempo transcurrido es el 75 %, se ha quemado el 98 % del combustible, es decir, que la última cuarta parte del tiempo total de combustión se emplea en quemar solamente el 2 % del combustible.

Cuando en vez de quemar un combustible de grano uniforme, se quema un todo uno, en el que pueden aparecer todos los tamaños, el problema se hace mucho más complejo. Es evidente que el tiempo total de la combustión es función de las dimensiones de los tamaños mayores. Por otra parte, el peso del combustible quemado por unidad de tiempo, en un momento determinado, depende de la superficie total, suma de la de todas las partículas que existen en dicho momento. Al tratarse de una mezcla de granos de diferente tamaño, el tanto por ciento de peso de combustible quemado en el periodo inicial será mayor que si los granos fueran todos del tamaño de los mayores, ya que al principio existe mayor proporción de tamaños finos, los cuales tienen una superficie específica grande. Como dichos tamaños más finos se queman pronto, su proporción en la masa de carbón residual va disminuyendo y como consecuencia disminuye la

superficie específica y por tanto la masa de combustible se quemará más despacio a medida que transcurre el tiempo de combustión. Por lo tanto la pendiente de la curva del valor de α , para un todo uno, como se puede ver en la gráfica de la derecha de la *figura 7*, al principio es mayor que la correspondiente a tamaño uniforme y a medida que va transcurriendo la combustión, se hace menor.

Para carbón pulverizado, la proporción de tamaños finos es mucho mayor y por lo tanto, como se ve en la gráfica de la derecha de la *figura 7*, la pendiente de la curva de los valores de α , es muy grande al principio y muy pequeña al final.

De las curvas anteriores se puede sacar una conclusión importante. Para carbón de granos uniformes hace falta el 66 % del tiempo de combustión completa para quemar el 96 % del combustible, para carbón todo uno comercial se necesita el 55 % y, para carbón pulverizado, basta el 22 % del tiempo total, para quemar el 96 % del combustible.

En otros términos, para quemar el último 4 % es necesario el:

34 % del tiempo total, si el carbón es de granos uniformes.

45 % si el carbón, en cuanto a tamaños, es un tipo comercial.

78 % si el carbón está pulverizado.

Se comprende, pues, que tratar de conseguir una combustión sin inquemados en un carbón pulverizado, originará el establecer un hogar excesivo, ya que $3/4$ del mismo sólo sirven para quemar el 0,4 del combustible.

En la gráfica de la izquierda de la *figura 8* se puede ver cual sería la cantidad de inquemados en función del tiempo de combustión para carbones de distintas granulometrías.

11.2.- INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA EN LA POTENCIA DEL HOGAR

El hogar es la zona de la caldera donde se realiza la combustión. Se llama potencia de un hogar a la cantidad de calor " Q " liberada por hora. Esta cantidad se puede considerar que depende de:

La superficie total de los granos de carbón que hay dentro del hogar, S_T .

La eficacia de esta superficie, ϕ .

El calor que desprende el combustible, por hora y metro cuadrado de superficie, q .

$$Q = S_T \cdot \phi \cdot q$$

Superficie total, S_T :

En régimen estacionario, en el interior de un hogar se tendrá una cantidad de combustible que estará en un estado tal que va desde el que está iniciando la combustión (el que acaba de introducirse, $t = 0$), hasta el que está totalmente quemado (el que se introdujo hace un tiempo $t = T$).

El total de combustible que hay en el hogar, tendrá, en el estado de combustión en el que se encuentra, una superficie " S_T " y ese mismo combustible, antes de entrar en el hogar, tendrá un peso " G " y una superficie específica " s ".

Para unas características del combustible determinadas y para una determinada proporción de inquemados admisible a la salida del hogar, se conoce, de acuerdo con las curvas

de la *figura 8*, la relación, " β " entre la superficie del combustible que hay en el hogar y la del mismo combustible antes de entrar en el hogar.

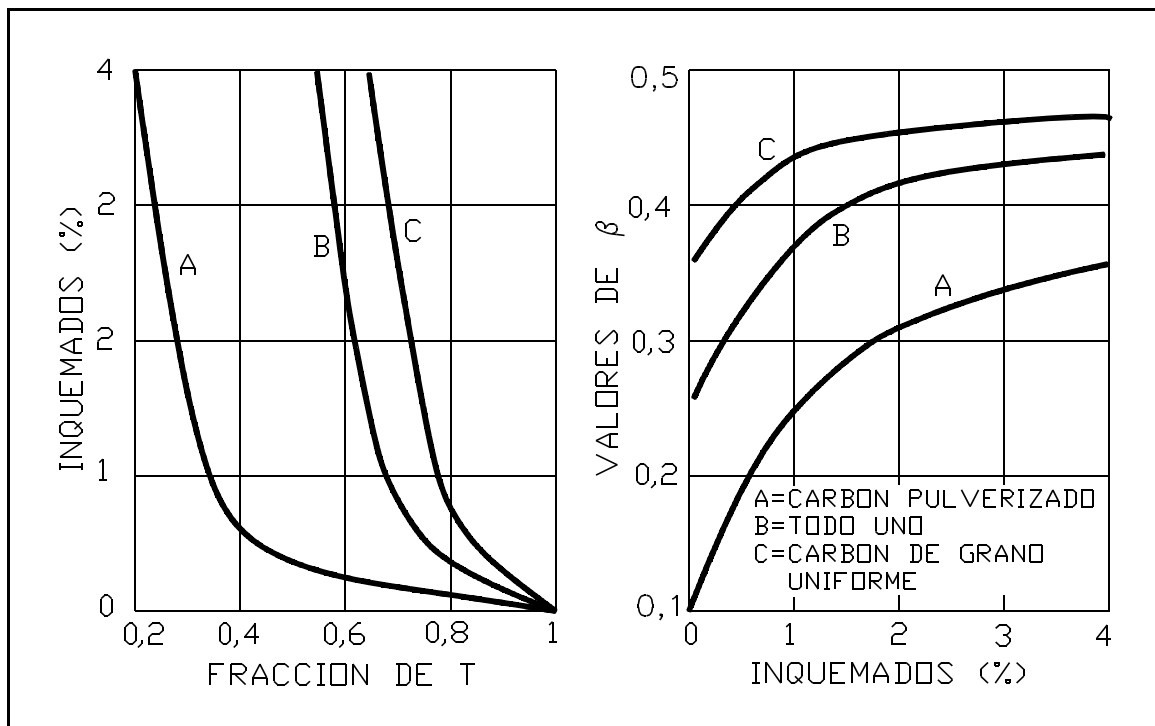


Figura 8: Inquemados en función del tiempo de combustión transcurrido y valores de β para distintos tipos de carbones

La superficie del combustible antes de entrar en el hogar será:

$$S_l = G.s$$

y la superficie del combustible que se está quemando será:

$$S_T = \beta.S_l = \beta.G.s$$

Como G y s son constantes, las curvas de la *Figura 8* muestran como aumentará S_T , si se aumenta la cantidad de inquemados admisible. Para granos uniformes, si se pasa de 0 % a 2 %, aumenta S_T en la proporción $0,46/0,35 = 1,39$. Para esta misma variación en inquemados, el valor de β y, por consiguiente, el de S_T se cuadruplica, aproximadamente, en el caso del carbón pulverizado.

En la gráfica izquierda de la *figura 9* se obtiene la superficie específica para los tipos de carbón comercial I a V, y en la de la derecha para el carbón pulverizado, en función del tanto por ciento de rechazo en un tamiz del número 70. Se ve que la superficie específica del carbón pulverizado es de 500 a 1000 veces la del carbón en grano.

<i>Tipo de carbón</i>	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>	<i>V</i>
<i>Tamaño de grano (mm)</i>	<i>50-80</i>	<i>25-50</i>	<i>15-25</i>	<i>8-15</i>	<i>6-10</i>

Como se desprende de esta clasificación, la relación de diámetros entre los tamaños máximos y mínimos está entre 1,6 y 2.

Los tamices se clasifican por el número de mallas por centímetro cuadrado y a título de ejemplo, se citan las características de algunos tipos.

<i>Tamiz N° DIN 1171</i>	<i>Mallas por cm²</i>	<i>Diámetro del hilo (mm)</i>	<i>Luz de malla (mm)</i>	<i>Equivalencia ASTM N°</i>
<i>30</i>	<i>900</i>	<i>0,130</i>	<i>0,200</i>	<i>70</i>
<i>40</i>	<i>1600</i>	<i>0,100</i>	<i>0,150</i>	<i>100</i>
<i>50</i>	<i>2500</i>	<i>0,080</i>	<i>0,120</i>	<i>No hay</i>
<i>70</i>	<i>4900</i>	<i>0,055</i>	<i>0,090</i>	<i>170</i>
<i>80</i>	<i>6400</i>	<i>0,050</i>	<i>0,075</i>	<i>200</i>

El número de tamiz indica la cantidad "n" de hilos por centímetro lineal (en ASTM por pulgada) y, por lo tanto, el de mallas o cuadrados por centímetro cuadrado será "n²".

Eficacia de la superficie

Hasta ahora, se han considerado los granos de carbón, en el proceso de combustión, como si cada uno estuviera bañado enteramente por el aire y se comportara como un grano aislado. En realidad, y sobre todo en la combustión sobre una parrilla, la superficie del combustible accesible al aire de combustión, sólo es una parte de la superficie total, en esta parte es donde puedan tener lugar reacciones de combustión. Por lo tanto, es necesario multiplicar la superficie total por un coeficiente menor que la unidad, " ϕ ", llamado "**eficacia de la superficie**".

Si se llama " q " a la cantidad de calor desprendida por el combustible por hora y metro cuadrado de superficie, de acuerdo con lo expuesto anteriormente, la potencia de un hogar o calor total desprendido por hora será:

$$Q = \beta \cdot G \cdot s \cdot \phi \cdot q$$

Para dar una idea de la magnitud de las cantidades que entran en esta expresión se pueden comparar los valores para un hogar que haya de desprender $7 \cdot 10^5$ kcalorías por hora, con carbón pulverizado de un rechazo del 5 % en el tamiz número 70, para otro utilizado en una caldera de lecho fluido, de un tamaño máximo de 4 mm y para otro que sea carbón en grano, del tipo IV. Admitiendo en los tres casos un 4 % de inquemados y siendo $q = 500$ kcal/m² para los tres casos.

Carbón	Q (kcal)	β	s (m ² /kg)	ϕ	q (kcal/m ²)	G (kg)
Todo uno	7.10^5	0,47	0,43	0,20	500	34636
< 4 mm	7.10^5	0,47	1,00	1.00	500	2979
Pulverizado	7.10^5	0,37	315,00	1.00	500	12

En el caso del carbón todo uno quemado en parrilla, tiene que haber dentro del hogar la cantidad de carbón correspondiente a 34636 kg. En el caso de que el hogar sea de combustión de carbón en lecho fluido, la cantidad de carbón que tiene que permanecer dentro del hogar debe de ser de 2979 kg y en el caso de carbón pulverizado, la cantidad que debe de permanecer dentro del hogar, es únicamente de 12 kg.

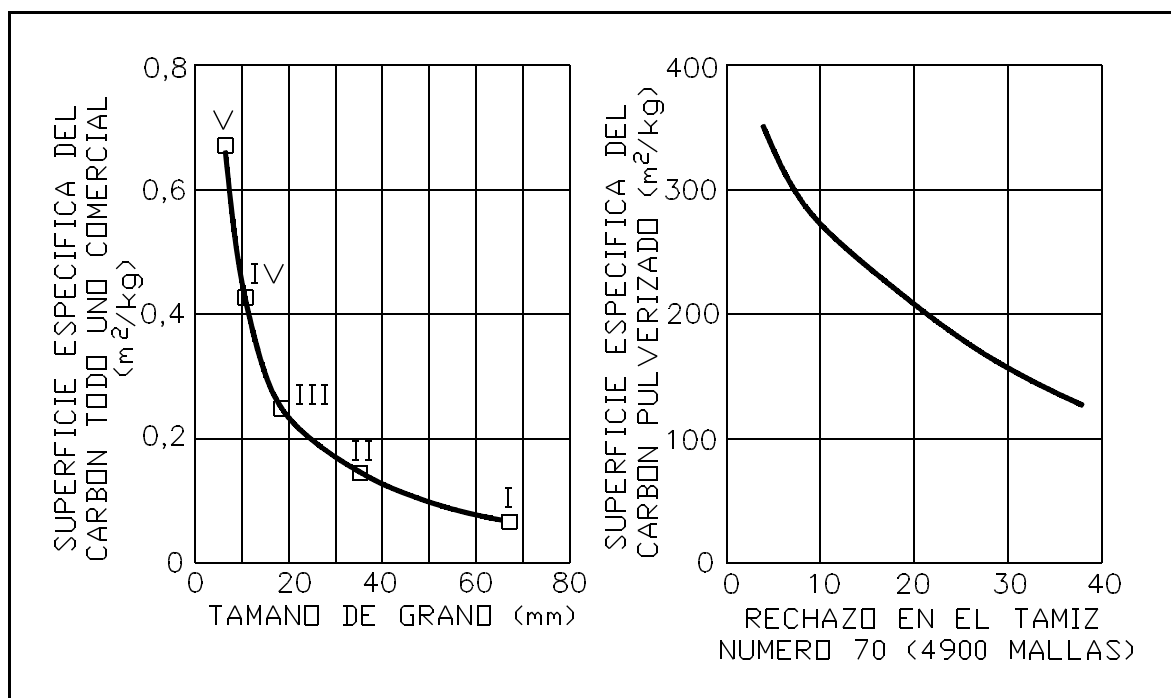


Figura 9: Superficie específica de distintos carbones

Para la misma potencia del hogar, el carbón que debe de permanecer en el interior del mismo es menor cuanto menor sea el tamaño de grano. Otro factor que influye mucho en esta cantidad es el hecho de que el carbón se queme en suspensión ya que la eficiencia de la superficie es del 100 %.

11.3.- INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA EN LA POTENCIA ESPECÍFICA

Se llama potencia específica a la cantidad de calor producido, por metro cúbico de cámara de combustión y hora.

En un hogar de carbón pulverizado, el valor de la potencia específica depende del tamaño de partícula: el hogar puede asimilarse a un conducto de sección constante S , en el que los gases

circulan a una velocidad " v " (figura 9).

Caudal de gases = $S.v$

Si " a " es el volumen de aire necesario para la combustión de 1 kg de carbón:

Cantidad de carbón que se puede quemar en el hogar en un segundo = $S.v/a \text{ kg}$

Por otra parte, si se necesitan " T " segundos para la combustión completa de los tamaños mayores, el conducto asimilado al hogar ha de tener:

Longitud del hogar = $v.T \text{ m}$

Volumen del hogar = $S.v.T \text{ m}^3$

Volumen necesario del hogar para quemar 1 kg . de carbón por segundo será:

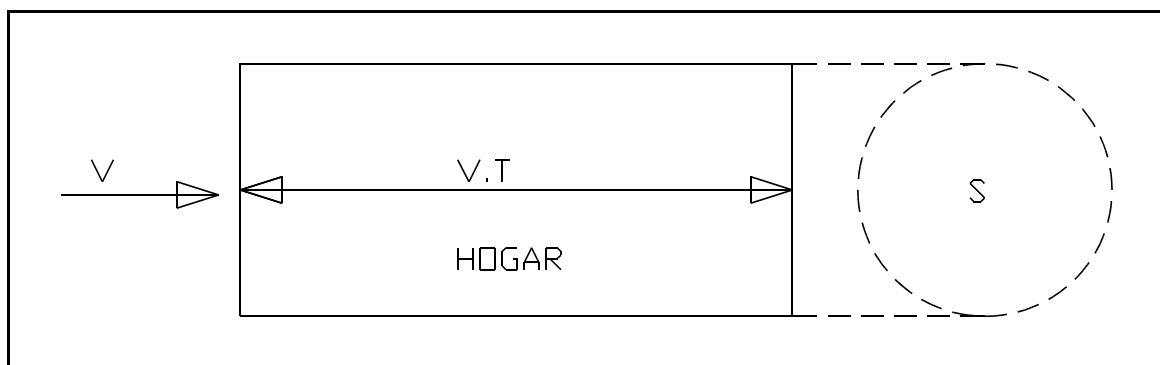


Figura 10: Representación esquemática de un hogar

$$V_{\text{necesario para quemar } \frac{1 \text{ kg}}{\text{s}}} = \frac{S.v.T}{\frac{S.v}{a}} = a.T \text{ m}^3$$

Si se quema el mismo carbón, el factor a no interviene y el volumen necesario del hogar es directamente proporcional a " T ".

Si el poder calorífico es " H " kJ/kg , y se quema 1 kg/s , en una hora se producirán $3600.H \text{ kJ/h}$, que necesitan un volumen, según se ha visto, de $a.T \text{ m}^3$ de hogar, luego la potencia específica del hogar será:

$$P_{\text{Específica}} = \frac{3600.H}{T.a} \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3.h}$$

Como ejemplo, y para resaltar la influencia del tamaño de partícula sobre la potencia específica, se indican sus valores observados en un hogar donde se quema polvo de hulla con un poder calorífico de 37500 kJ/kg , y admitiendo un tiempo de combustión " T " dado por:

$$T = 55.d^{1.5} \text{ s}$$

donde "d" es el diámetro del grano en milímetros.

d (mm)	0,01	0,02	0,03	0,04	0,08	0,10	0,16	0,20
T (s)	0.055	0.156	0.286	0.440	1.245	1.739	3.520	4.919
P (kJ/h.m ³)	27.3.10 ⁷	9.7.10 ⁷	5.3.10 ⁷	34.1.10 ⁶	12.1.10 ⁶	8.6.10 ⁶	42.6.10 ⁵	30.5.10 ⁵

Los carbones pulverizados tienen un tamaño máximo de 0.08 a 0,10 mm, lo que permite alcanzar potencias específicas, teóricas, de 12,1.10⁶ a 8,6.10⁶ kJ/m³.h.

11.4.- LA COMBUSTIÓN DEL CARBÓN PULVERIZADO

En estos hogares el combustible pulverizado a tamaños muy finos (menores de 0,1 mm) es arrastrado por una corriente de aire precalentado, que se inyecta en el hogar por los quemadores, a medida que la mezcla entra en el hogar, se inflama. El aire de arrastre o **aire primario** no es más que una parte del aire que se emplea en la combustión; el resto, o aire secundario (y eventualmente aire terciario), se introduce en el hogar por conductos dispuestos de forma que produzcan una agitación energética de la mezcla.

El aire "no primario" se inyecta, en el hogar, de dos formas distintas:

- **El aire secundario**, que se inyecta rodeando la vena de aire primario y carbón a la salida del quemador.
- **El aire terciario** que, cuando existe, se introduce en el hogar a una cierta distancia del nacimiento de la llama.

Debido a la gran superficie específica del carbón pulverizado el exceso de aire necesario es relativamente bajo y se pueden quemar combustibles de baja calidad y elevado contenido en cenizas. Así mismo, con los quemadores actuales, de gran gasto, se pueden conseguir unidades de gran potencia, que producen varios miles de toneladas de vapor por hora.

11.5.- LAS FASES DE LA COMBUSTIÓN DEL CARBÓN PULVERIZADO

La combustión del carbón, desde su salida del quemador hasta que se haya completado y los humos producidos en la misma abandonan el hogar, se distinguen varias fases:

a) Fase de precalentamiento:

El combustible arrastrado por el aire primario, previamente calentado, se proyecta dentro del hogar, donde se calienta por la radiación de las paredes y de la misma llama. El carbón termina de secarse y comienza el desprendimiento de materias volátiles. Cuando las partículas alcanzan una cierta temperatura se inicia la oxidación con desprendimiento de calor, primero lentamente y, después, al ritmo rápido correspondiente a la inflamación propiamente dicha con lo que aparece la llama. Esta primera fase es perfectamente perceptible, ya que la llama no se inicia en la boca del quemador sino a cierta distancia, que mide el retardo a la inflamación. La temperatura a la que comienza la inflamación varía con:

- El contenido de materias volátiles.
- La finura del grano.

Por ejemplo, es de $170 - 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ para carbón pulverizado que pasa por el tamiz número 100 , y llega a $460 - 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ para tamaños comprendidos entre los tamices números 30 y 70 . Para el mismo tamaño de partícula, las temperaturas más altas corresponden a las antracitas y las más bajas a las hullas con alto contenido en volátiles. Esta fase de precalentamiento debe ser tal que la llama no se aleje del quemador porque produciría inestabilidad, pero tampoco debe producirse en la misma boca del quemador y menos en su interior porque las altas temperaturas alcanzadas producirían la destrucción del mismo. La duración y por tanto la longitud de esta fase depende de los siguientes factores:

- El contenido de materias volátiles.
- La finura del grano (limitada por el coste de la pulverización).
- Calor transmitido al combustible por la propia llama y por las superficies radiantes (diseño de la cámara de combustión).
- Cantidad de aire primario, relación aire primario/carbón.
- Temperatura del aire primario, que está limitada por el riesgo de inflamación en los pulverizadores, debe de ser baja ($\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$) para los carbones altos en volátiles y puede ser mayor ($> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) para los carbones bajos en volátiles, como la antracita.

Hay que tener en cuenta que la presencia de inertes (cenizas y humedad) en el carbón, disminuye su reactividad y por lo tanto aumentan la temperatura de inflamación y la fase de precalentamiento.

b) Fase de inflamación

Comienza en la zona donde aparece la llama visible que es justo el límite de la zona de precalentamiento. A cierta distancia de la boca del quemador, cuando la temperatura es suficientemente alta, las materias volátiles se inflaman y comienza la combustión que también se propaga a las partículas de carbón. El comienzo de la fase de inflamación debe ser estable. Se llama distancia de inflamación la existente entre la boca del quemador y el punto de inflamación. A partir del comienzo de la inflamación se produce también la entrada en contacto del carbón, ya en combustión, con el aire secundario. Como las materias volátiles son fácilmente inflamables, la temperatura de inflamación de un carbón es más baja cuanto mayor es su contenido en materias volátiles.

Para analizar la propagación de esta inflamación sirve la *figura 11*, donde el plano *AB* representa la sección del chorro de aire-carbón en la zona donde comienza la inflamación. En este plano se tienen en cuenta siete partículas de carbón numeradas ($1-2-3-4-5-6-7$) dispuestas sobre el mismo diámetro de la sección de la vena de aire-carbón. Las partículas 1 y 7 son las primeras en inflamarse, un tiempo después lo hacen la 2 y 6 que ya se habrán desplazado debido al tiempo de retardo con respecto a las primeras en inflamarse y habrán alcanzado las posiciones $2'$ y $6'$; luego se inflaman las partículas 3 y 5 y cuando lo hacen habrán alcanzado las posiciones $3'$ y $5'$ y por último, se inflamará la partícula 4 cuando haya alcanzado la posición $4'$. Este razonamiento se puede hacer para todas las partículas situadas análogamente sobre los diferentes diámetros de la sección considerada del chorro de aire-carbón.

Se ve, pues, que el carbón en la zona de inflamación forma un cono cuyo vértice está en $4'$ y la base en el plano *AB*. Si t es el tiempo que tarda en desplazarse la partícula 4 a $4'$ y V_C la

velocidad del chorro de aire-carbón, la distancia "h" entre 4 y 4' será: $h = V_C \cdot t$, que es la altura del cono de inflamación.

La velocidad V_C depende de la proporción de aire primario en la mezcla aire-carbón, a mayor proporción de aire, mayor velocidad y viceversa.

La llama se propaga en el chorro de carbón a una velocidad V_F llamada **velocidad de deflagración** y la zona de ignición o la distancia "d" a la boca del quemador, será estable cuando $V_C = V_F$.

Para las demás propiedades (finura del grano, calor transmitido al combustible por la propia llama y por las superficies radiantes y temperatura del aire primario) iguales, la velocidad

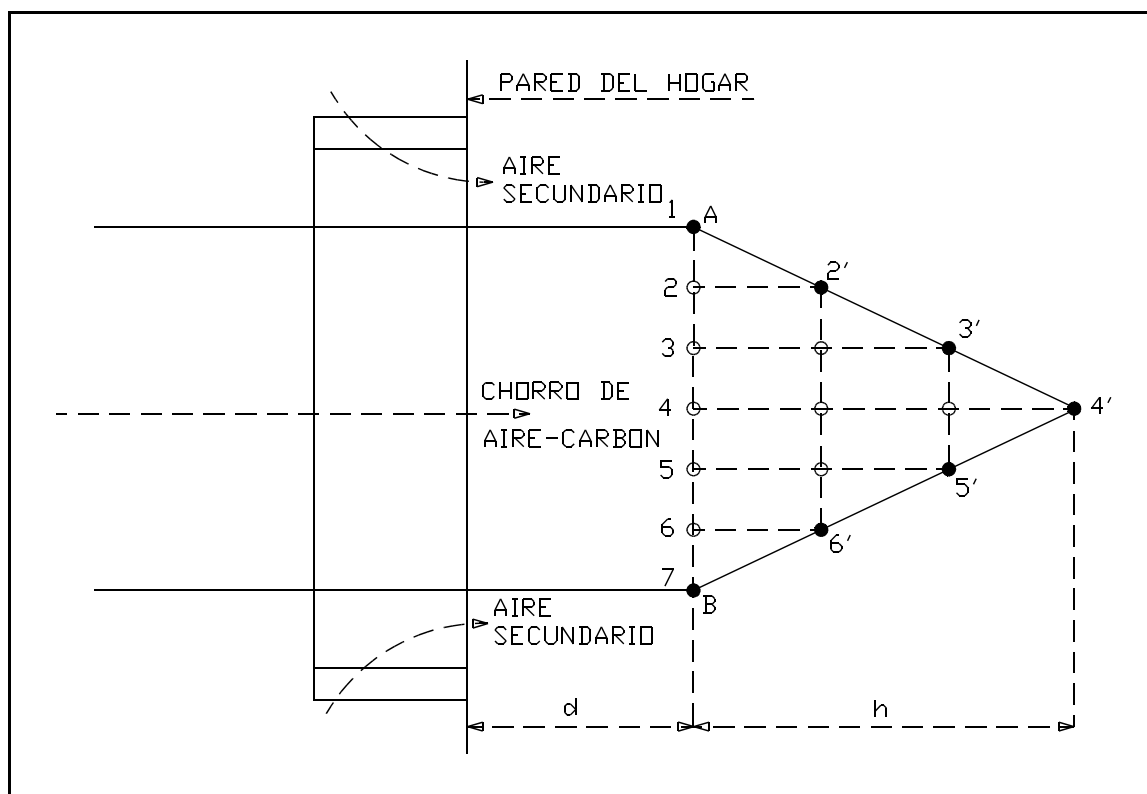


Figura 11: Esquema de la zona de inflamación de una llama

V_F depende del contenido del carbón en materias volátiles y cenizas y de la relación aire/carbón del chorro carbón-aire primario.

En un carbón con el 15 % de materias volátiles y el 5 % de cenizas, la velocidad de propagación de la llama es máxima para una mezcla compuesta de 2,8 kg. de aire por kg. de carbón, y vale: $V_F = 4,2 \text{ m/s}$

En un carbón con el 30 % de materias volátiles y el 5 % de cenizas, la velocidad de propagación es máxima para una mezcla compuesta de 4,4 kg. de aire por kg. de carbón y vale: $V_F = 12,8 \text{ m/s}$

Se debe reducir al mínimo el volumen del cono de inflamación así como la distancia "d" de la boca del quemador al plano "AB" ya que ocupan inútilmente un espacio de la cámara de

combustión. La forma más práctica de disminuir este espacio es disminuyendo la velocidad V_C , y ésta se reduce cuando disminuye la proporción de aire primario. Por otra parte, esta proporción, no debe ser inferior a un cierto valor, a fin de que se produzca el transporte del carbón y se inicie rápidamente la inflamación de las materias volátiles.

La velocidad V_F de propagación de la llama, fijadas las condiciones de entrada del combustible, para variarla, sólo cabe actuar sobre la temperatura de la zona de ignición, la cual se puede variar separando parte del aire primario, en la zona del quemador (ya se realizó el transporte) e inyectando el aire separado en otra zona. Al estudiar los quemadores se verá con más detalle esta forma de actuar. De todos modos, se debe trabajar con una V_C algo mayor que V_F para que las dos se igualen a una cierta distancia del quemador, ya que, de lo contrario, la combustión se iniciará en la misma boca del quemador o incluso dentro de él, lo que ocasionaría su destrucción.

La tabla siguiente indica las distintas proporciones de aire primario, con respecto al aire total, adecuadas para distintos tipos de carbones:

Carbones	Contenido en materias volátiles (%)	Aire primario (%)
Antracita	5 - 10	15 - 30
Hulla seca	14 - 16	25 - 40
Hulla grasa	24 - 25	35 - 40
Hulla de gas	27 - 28	45 - 50
Hulla de llama larga	29 - 30	60 - 75
Las 4 hullas consideradas corresponden a la clase II , grupos 1,2 y 3 según la clasificación ASTM de los carbones.		

La temperatura de ignición del chorro aire-carbón, que se alcanza por la radiación recibida del interior de la cámara de combustión, se inicia en la periferia del chorro, mientras que para alcanzar el interior del mismo es necesario un cierto retraso, al ser esta parte menos accesible a la radiación. Lo mismo ocurre con el aire secundario, primero alcanza la periferia y con mayor retraso el centro del chorro. Para conseguir una buena combustión hay que favorecer el acceso de aire secundario a las partículas de combustible, lo que se consigue induciendo la mezcla de las venas de aire-carbón y aire secundario mediante una agitación enérgica, imponiéndoles una turbulencia, lo que se logra por la forma constructiva del propio quemador. Los orígenes de la turbulencia pueden ser los siguientes:

- **Turbulencia interna:** provocada porque la velocidad no es la misma en todos los puntos de la sección perpendicular al movimiento de la vena aire-carbón, lo que da lugar al deslizamiento de unas capas con respecto a otras. Esta turbulencia aumenta, aumentando la velocidad del chorro.

- **Turbulencia de la combustión:** originada por el desprendimiento de los gases, se forma una cierta turbulencia alrededor de cada partícula, con un aumento rápido e importante de volumen. Cada partícula se convierte en un foco de agitación.

- **Turbulencia externa:** que es provocada por la conformación del quemador (que puede

ir provisto, por ejemplo, de álabes directores que dan a la vena un movimiento helicoidal), por la disposición relativa de los quemadores o por la disposición del recorrido de la llama.

c) Fase principal

Inmediatamente después de la fase de inflamación, el aire secundario envuelve el carbón inflamado, se completa la combustión de las materias volátiles y se quema su carbono fijo. En esta fase, la combustión es más activa, tiene un tamaño mayor que las anteriores, con la llama más brillante y la temperatura más elevada. La radiación emitida por esta zona de llama, suministra el calor necesario para calentar rápidamente el aire-carbón que entra en el hogar hasta la temperatura de ignición.

d) Fase final

Una vez formada completamente la llama, en la cola de la misma, ya se ha quemado prácticamente toda la materia combustible, exceptuando algunas partículas de carbono. Por tanto las únicas materias sólidas que permanecen son estas partículas de carbono y las cenizas que no se hayan decantado durante las fases anteriores. Estas partículas permanecen incandescentes y por eso, la llama en la parte final aparece con un tono rojizo que se extingue a medida que se enfrían las partículas sólidas.

11.6.- DURACIÓN DE LA COMBUSTIÓN DEL CARBÓN PULVERIZADO

En resumen, el problema de la combustión de carbón pulverizado reside esencialmente en la reducción del tiempo de combustión. Son dicho tiempo y la velocidad del chorro aire-carbón, los que fijan la longitud de la llama y, por consiguiente, la dimensión del hogar puesto que hace falta que la combustión termine antes de que los humos salgan del hogar y alcancen los haces tubulares.

Como no se puede reducir la velocidad del aire más que hasta cierto límite, porque se podrían producir dificultades en el transporte del carbón, se podría producir la destrucción del quemador por retroceso de llama y se disminuiría la turbulencia, sólo queda reducir en lo posible el tiempo de combustión, lo que confirma lo indicado cuando se estudió la potencia específica de un hogar.

Para reducir el tiempo de combustión habrá que actuar sobre los mismos parámetros que ya se ha visto que influyen en la inflamación:

- **El contenido en materias volátiles.** Este parámetro depende del tipo de carbón, por lo que cuando se trata de quemar uno determinado, para aumentar su contenido en volátiles, solo cabe la posibilidad de mezclarlo con otro que tenga un contenido mayor.

- **El contenido en cenizas:** Lo mismo que el parámetro anterior este contenido depende del propio carbón, luego para mejorarlo (reducirlo), lo que se puede hacer es mezclarlo con otro carbón que tenga un contenido inferior.

- **La finura del grano:** Ya se vio como a tamaños más finos se tenía un tiempo de combustión inferior, que venía dado por la fórmula: $T = 55 \cdot d^{1.5}$. El tamaño mínimo está limitado por el coste de la pulverización. Una mayor finura conduce a un mayor gasto de pulverización, que puede ser excesivo. Hay, pues, un grado óptimo en cuyas proximidades conviene

mantenerse. En general, se define la finura óptima como aquella que permite obtener la unidad de peso de vapor a un coste total mínimo. A título orientativo se pueden dar los siguientes valores para distintos tipos de carbones:

Carbón	Volátiles (%)	Rechazo en el tamiz N° 70
Lignito (Clase IV, Grupo 1)	26 - 28	30 - 40
Hulla grasa (Clase II, Grupo 2)	20 - 25	15 - 18
Hulla semigrasa (Clase II, Grupo 1)	15 - 20	10 - 12
Hulla seca y antracita (Clase I)	< 14	6 - 8

- **La temperatura del hogar:** Influye en el calor transmitido por radiación al combustible entrante. Se diseñan hogares para funcionar con temperaturas de combustión altas cuando el carbón es poco reactivo, como el de bajos volátiles, y para funcionar con temperaturas relativamente bajas cuando el carbón es más reactivo, como el de altos volátiles.

- **Temperatura del aire primario:** Ya se vio como la temperatura del aire primario influía en la velocidad de inflamación del carbón y como consecuencia tendrá también influencia en el tiempo que tarde en completarse la combustión. Ya se vio como esta temperatura estaba limitada por el riesgo de inflamación en los pulverizadores a unos 70 °C para los carbones altos en volátiles, unos 100 °C, o algo más, para los carbones bajos en volátiles, como la antracita.

- **La proporción de aire primario:** También se vio que para cada carbón había una proporción aire primario-carbón para la que la velocidad de propagación de la llama es óptima. De todos modos también se vio que la cantidad de aire primario en la mezcla debía de ser la adecuada para el transporte del carbón pulverizado y para que la velocidad de deflagración compitiera con la velocidad del chorro de entrada.

- **La turbulencia:** Todos los hogares y quemadores están diseñados para que el aire primario-carbón y el aire secundario se mezclen adecuadamente para que la combustión sea lo mejor posible. Esta mezcla se logra provocando turbulencia, por la disposición de cada quemador individualmente o por la posición relativa de los quemadores, e incluso por la trayectoria de la llama en el hogar.

- **Sobre el exceso de aire:** Al aumentar el exceso de aire se beneficia, en principio, la combustión, ya que aumenta la probabilidad de que las partículas de carbón sean alcanzadas por el aire necesario para que se produzca la combustión completa. Esto se ha confirmado por experiencias en las que, por ejemplo, se ha visto que al pasar de 20 a 40 % de exceso de aire, el tiempo de combustión se ha reducido de 0,5 a 0,35 segundos. No obstante este no es un método aconsejable ya que, como se ha visto aumentan las pérdidas por calor sensible en los humos.

11.7.- ESTABILIDAD DE LA LLAMA EN LA COMBUSTIÓN DEL CARBÓN PULVERIZADO

La combustión de cualquier combustible, no será estable si no se cumple alguna de las condiciones requeridas para una buena combustión, enumeradas al principio.

La estabilidad de la llama es un factor que hay que tener muy en cuenta en los hogares de carbón pulverizado. Los principales problemas ocasionados por la inestabilidad de la llama son:

- Grandes fluctuaciones en la presión del hogar
- Desarrollo de la combustión con muy mal rendimiento fundamentalmente por la producción de gran cantidad de inquemados.
- Riesgo de explosiones en el hogar.

La primera condición para que la llama sea estable es que su encendido sea bueno. Para ello debe de ser "franco" y producirse en una zona próxima a la boca del quemador, pero fuera de él. El punto de encendido no debe estar alejado de la boca del quemador.

Ya se dijo que para inflamar el carbón se necesita una temperatura lo suficientemente alta que asegure su secado final, el desprendimiento de materias volátiles, su posterior inflamación y, por último, la inflamación del carbono fijo. Por lo tanto, la estabilidad o inestabilidad de la llama están relacionadas directamente con la temperatura. Si esta es lo suficientemente alta, el carbón se inflamará y su combustión será estable. Por el contrario, si la temperatura en el hogar es baja, para el carbón que se esté quemando, éste tendrá dificultad para encenderse, con el riesgo de que la llama se haga inestable. La inestabilidad de la llama toma especial importancia en el funcionamiento de las calderas a a potencias muy por debajo de la nominal. En estas circunstancias, la temperatura del hogar es más baja que a potencia nominal, dificultándose con ello el encendido del carbón. En ocasiones, se necesita, para asegurar la estabilidad de la llama, emplear una fuente de calor auxiliar. Para aportar este calor se disponen unos quemadores, de Fuel-oil, Gas-oil o de gas, que aseguran, en estos regímenes de carga, el perfecto encendido del quemador principal de carbón. A estos quemadores auxiliares se les denomina, quemadores de apoyo, pilotos o en ocasiones pueden ser los propios ignitores. Este apoyo calorífico de la combustión del carbón a las cargas mínimas se efectúa para todos los tipos de carbones. Sin embargo, para funcionamiento a cargas intermedias, sólo requieren estabilización de la llama algunos tipos de carbones. En general, cuanto mayor es el contenido en materias volátiles, menor grado de estabilización requieren y viceversa. Por lo tanto, la antracita es el carbón que requiere mayor estabilización en su combustión (incluso al 100% de carga) y las hullas de alto contenido en volátiles los que menos. La finura de grano es otro factor de gran incidencia en la estabilidad de la llama de un determinado carbón.

12.- LA COMBUSTIÓN DE LOS COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

Ya se establecieron al principio del texto las condiciones necesarias para la combustión de cualquier combustible:

- Temperatura suficientemente alta para que los constituyentes entren en ignición.
- Proporción adecuada aire/comburente.
- Grado de mezcla adecuado para que el aire y el combustible tengan un buen contacto superficial.
- Tiempo necesario para el desarrollo de una combustión completa.

En general en los combustibles líquidos estas condiciones son mucho más fáciles de conseguir que en los combustibles sólidos.

Los combustibles líquidos empleados en las centrales térmicas se puede considerar que están dentro de los grupos Fuel-oil y Gasóleo. Sus ventajas respecto a los sólidos, en cuanto a la combustión son las siguientes:

- Necesitan menos exceso de aire
- Tiene mayor uniformidad en cuanto a composición y poder calorífico
- La puesta en marcha de las unidades que queman estos combustibles, es más rápida
- Requieren una instalación para combustión más sencilla. No se necesita la instalación de molienda y tampoco son necesarias las instalaciones voluminosas de eliminación de escorias y cenizas.
- Es mucho más fácil la atomización de los combustibles líquidos que la pulverización del carbón. Lo mismo que el carbón pulverizado, estos combustibles también requieren un incremento en su superficie específica para lograr una mezcla íntima de aire con toda la masa de combustible y conseguir una combustión completa. Esta pulverización se logra en el mismo quemador y puede efectuarse por dos métodos:
 - Pulverización por medio de un fluido auxiliar: aire o vapor
 - Pulverización mecánica

Cuanto mejor es la pulverización (gotas más pequeñas y mayor superficie específica) menor es el tiempo de combustión, lo que permite alcanzar grandes potencias específicas de los hogares y también llamas muy estables.

12.1.- LA COMBUSTIÓN DEL FUEL-OIL

Este combustible líquido se puede utilizar en las calderas como combustible principal y como combustible auxiliar. Un ejemplo de esta segunda utilidad es la estabilización de la combustión del carbón pulverizado.

Su viscosidad a la temperatura ambiente es muy elevada, por lo tanto es necesario calentarla hasta reducirla a valores que hagan posible el bombeo y la atomización en los quemadores. La viscosidad del Fuel-oil decrece con la temperatura, hasta 120 °C y a partir aquí se mantiene casi constante, por lo tanto no es útil pasar de dicha temperatura. Una viscosidad adecuada para manipular bien el Fuel-oil español es de 50 grados Engler que se consiguen con temperaturas entre 90 y 100 °C

El Fuel-oil tiene una temperatura de ignición bastante baja y un gran poder calorífico, por lo que su combustión es estable.

A pesar de que el Fuel-oil tiene un contenido en cenizas muy bajo, éstas pueden ser mucho más perjudiciales que las del carbón, si contienen sulfatos alcalinos y vanadio, cuya presencia se ha comprobado que es muy perjudicial por originar fuertes corrosiones.

El contenido en azufre es también muy perjudicial, ya que origina condensaciones de ácido sulfúrico en los últimos recuperadores de calor, si, como es lo normal, la temperatura de los humos es inferior a su punto de rocío. Estas condensaciones ácidas producen corrosión importantes en los precalentadores de aire.

12.2.- LA COMBUSTIÓN DEL GASOLEO

Este combustible presenta aún menos problemas para su combustión que el Fuel-oil. A

la temperatura ambiente tiene una viscosidad adecuada para bombearlo y atomizarlo. Se emplea como combustible para los ignitores y también como combustible de arranque durante la primera fase de calentamiento, hasta que la temperatura del hogar es adecuada para quemar Fuel-oil y las condiciones del vapor de la caldera son apropiadas para calentarlo y atomizarlo (Lo normal es que el calentamiento y la atomización del Fuel-oil se hagan con vapor de la propia caldera). La razón de su escasa utilización es su elevado precio.

13.- LA COMBUSTIÓN DE LOS COMBUSTIBLES GASEOSOS

La mayor parte de los combustibles gaseosos que se utilizan en las centrales térmicas se pueden calificar como ideales, puesto que pueden quemarse con un exceso de aire muy pequeño y, por lo tanto, con gran eficacia; además, no contienen en sí mismos materiales que produzcan residuos sólidos. Se comprende, por otra parte, que es fácil establecer para estos combustibles un equipo de control automático de la combustión que regule las cantidades de aire y combustible y, en consecuencia, atienda instantáneamente a las fluctuaciones para hacer frente a las variaciones en la demanda de vapor. En contrapartida, es un combustible muy peligroso, pues puede formar mezclas detonantes y las consiguientes explosiones, que pueden originar, además de daños a las personas, la destrucción de las instalaciones.

Tabla 4

COMPOSICIÓN DE ALGUNOS COMBUSTIBLES GASEOSOS				
Componentes	Composición en volumen a 15 °C y presión atmosférica			
	Gas natural	Gas de horno alto	Gas de horno de coque	Gas de refinería
CO₂	0,14	10,00	1,80	3,30
CO	-	27,50	6,30	1,50
O₂	0,10	0,50	0,20	-
H₂	-	2,70	53,00	5,60
N₂	3,20	59,00	3,40	-
CH₄	87,40	0,30	31,60	30,90
C₂H₆	6,80	-	-	19,80
C₃H₈	1,55	-	-	38,10
C₄H₁₀	0,81	-	-	0,60
C₅H₁₂	-	-	-	-
C₂H₄	-	-	3,70	0,20

Cuando se trata de un gas muy pobre, como el gas de horno alto, se necesitan quemadores de mucha turbulencia, que consigan una mezcla muy buena, para que sea mínimo el exceso de

aire necesario para que la combustión sea completa. Para quemar estos gases muy pobres, se necesitan hogares muy voluminosos. Normalmente el gas de horno alto se precalienta antes de su entrada a los quemadores para mejorar su reactividad y facilitar su combustión. El gas de horno alto, puede llevar partículas sólidas en suspensión, por lo que no se puede considerar un combustible exento de cenizas.

13.1.- PROPIEDADES FUNDAMENTALES

Composición

El comportamiento calorífico de estos combustibles depende, básicamente, de la proporción de los distintos gases simples que contienen. En la *tabla 4* figuran los análisis representativos de los gases de los cuatro tipos de combustibles gaseosos más empleados.

Temperatura de inflamación

Ya se definió anteriormente la temperatura de ignición. Para cada sustancia, y en condiciones ideales, tal temperatura está definida (ver *tabla 3*), pero es difícil asegurar una mezcla íntima y de características constantes, por lo cual se suelen establecer unos ciertos márgenes. En la mencionada *tabla 3*, figuran las temperaturas de inflamación para diversos gases simples, a la presión atmosférica (que es la que aproximadamente existe en los hogares de las calderas).

Límite de inflamabilidad

En la combustión de un gas con aire hay dos composiciones límites, dentro de las cuales la combustión se mantiene por sí misma. Hay un valor mínimo y otro máximo del tanto por ciento de gas en la mezcla aire-gas, dentro de los cuales una mezcla se inflama y continua quemándose. Todas las mezclas por debajo del límite de inflamabilidad inferior son demasiado pobres en gas y las que están por encima del límite superior son demasiado pobres en aire para mantener la combustión sin aportación de calor en el exterior. En la *tabla 5* se dan los límites de inflamabilidad para varios gases.

Velocidad de propagación de la llama

Esta característica es de gran importancia en el diseño de los quemadores, pues hay que evitar el retroceso de la llama, que se produce cuando la velocidad del chorro de la mezcla aire-gas es menor que la de propagación de la llama y también hay que evitar el alejamiento del punto de ignición, que se produce en caso contrario y provocaría combustión inestable. La velocidad de propagación de la llama, en una mezcla aire-gas, es función del porcentaje de combustible. Las mínimas velocidades corresponden a las proporciones límites de inflamabilidad y, entre ambas, hay una composición que da una velocidad máxima de propagación. En la *tabla 5* se reflejan las experiencias realizadas con gases simples, a presiones normales, en el interior de tubos de 25 mm de diámetro, en las que se han obtenido datos sobre límites de inflamabilidad y velocidades de propagación de la llama.

En el caso de gas de horno alto, quizás por la gran proporción de nitrógeno que contiene y, habida cuenta de la variación de composición que puede presentar, se puede fijar como límite inferior de inflamabilidad una mezcla con 36 a 57 % de gas y como límite superior una de 65 %.

Tabla 5

LÍMITES APROXIMADOS DE INFLAMABILIDAD Y VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LA LLAMA DE MEZCLAS DE GASES SIMPLES CON AIRE						
Gas	Mezcla límite inferior		Mezcla de velocidad máxima		Mezcla límite superior	
	%	Velocidad (m/s)	%	Velocidad (m/s)	%	Velocidad (m/s)
CO	16,3	0,195	50,0	1,250	71,2	0,194
H ₂	6,2	0,161	38,5	4,846	71,4	-
CH ₄	5,8	0,233	9,9	0,671	13,3	0,191
C ₂ H ₆	3,3	0,181	6,3	0,853	10,6	0,197
C ₃ H ₈	2,4	0,208	4,7	0,820	7,3	0,203
C ₄ H ₁₀	1,9	0,201	3,7	0,826	6,5	0,203
C ₅ H ₁₂	1,6	0,202	2,9	0,829	5,4	0,202
C ₂ H ₄	3,4	0,223	7,1	1,417	14,1	0,203

14.- EL CONTROL DE LA COMBUSTIÓN

Es necesario controlar el proceso de combustión para obtener un buen rendimiento, para lo cual y de acuerdo con lo expuesto a lo largo del capítulo, es necesario una proporción correcta del exceso de aire. Termodinámicamente se puede determinar la relación aire combustible mediante la fórmula de Rosin-Fehling:

$$A = e(W_i/1000 + 0,5)C$$

donde:

A = Caudal de aire en m^3/h .

W_i = Poder calorífico inferior del combustible en $kcal/kg$.

C = Cantidad de combustible en kg .

e = Exceso de aire.

La aplicación directa de esta fórmula, en el caso de combustibles sólidos, tiene ciertas dificultades. La cantidad y el poder calorífico del combustible son difíciles de medir y el exceso de aire depende de la potencia y del estado de la caldera.

La forma más normal de controlar el exceso de aire está basada en el análisis de humos. En esta procedimiento pueden medirse alguno o todos de los siguientes gases: CO_2 , O_2 , CO , H_2 .

Los analizadores de humos, lo hacen de forma continua tomando muestra en un lugar seleccionado, que analizan a intervalos regulares de tiempo, que pueden ser de un minuto o más. Estos análisis son automáticos y se mantiene de forma continua indicación y registro de los valores obtenidos. Una o más de estas medidas se utilizan como señales primarias para controlar el exceso de aire. Es muy normal, en las calderas de carbón pulverizado, utilizar la medida de O_2 en los humos como señal primaria, y el control tiende a mantener éste en un valor que depende

de la carga, variando el aire de combustión. Hay también sistemas de control que utilizan como señal primaria la medida de CO y mantienen una aportación de aire tal que el CO se mantenga en el umbral de su aparición en los humos (del orden de $20 ppm$). Otros sistemas incorporan más de una medida como señal primaria.

Existe una proporcionalidad entre el caudal de vapor y el caudal de combustible y lógicamente entre éste y el caudal de aire. Estas relaciones también pueden ser usadas para generar señales primarias de control, pero de hecho se utilizan como señales de anticipación.

Para controlar los inquemados sólidos, no es posible el análisis continuo y se recurre a uno o varios análisis diarios de inquemados en las cenizas. Cuando la presencia de estos inquemados es más alta de la permitida, puede deberse a una mala pulverización en los molinos de carbón o a una mala mezcla en los quemadores. Cuando, en la combustión de combustibles líquidos, se producen inquemados sólidos de tipo hollines, se debe a una mala atomización en los quemadores. Si la atomización no es buena, se forman gotas grandes. El tiempo de permanencia en el hogar no es suficiente para que se complete la combustión. Las gotas van desprendiendo gases y queda un residuo carbonoso que no completa su combustión y sale con

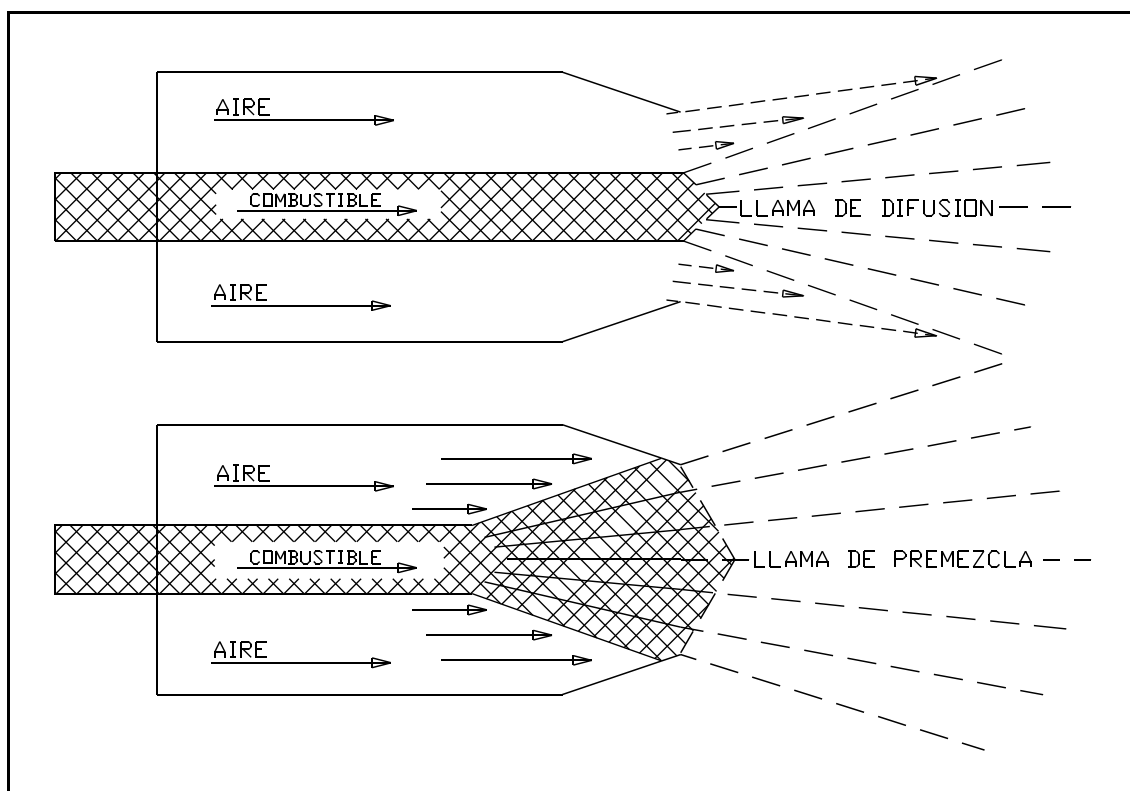


Figura 12: Formación de las llamas de difusión y de premezcla

los humos en forma de hollines.

15.- LA FORMACIÓN DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO DURANTE LA COMBUSTIÓN

En el proceso de combustión, el nitrógeno del combustible y una pequeña parte del nitrógeno atmosférico se oxidan y, por lo tanto, entre los productos de la combustión, aparece monóxido de nitrógeno (NO) y dióxido de nitrógeno (NO_2), a los cuales se les llama genéricamente NO_x . El total de óxidos de nitrógeno formado durante la combustión, suele estar compuesto de un 5 % de NO_2 y un 95 % de NO , aunque en la práctica, se da como referido a NO_2 .

Las cantidades de óxido de nitrógeno formadas no afectan al funcionamiento de las calderas, pero se ha comprobado que contribuyen de forma importante a la formación de la niebla fotoquímica, que aparece durante el día en las zonas de alta actividad humana o industrial, que daña los ojos, los pulmones y perjudica la vegetación. La presencia de óxidos de nitrógeno en

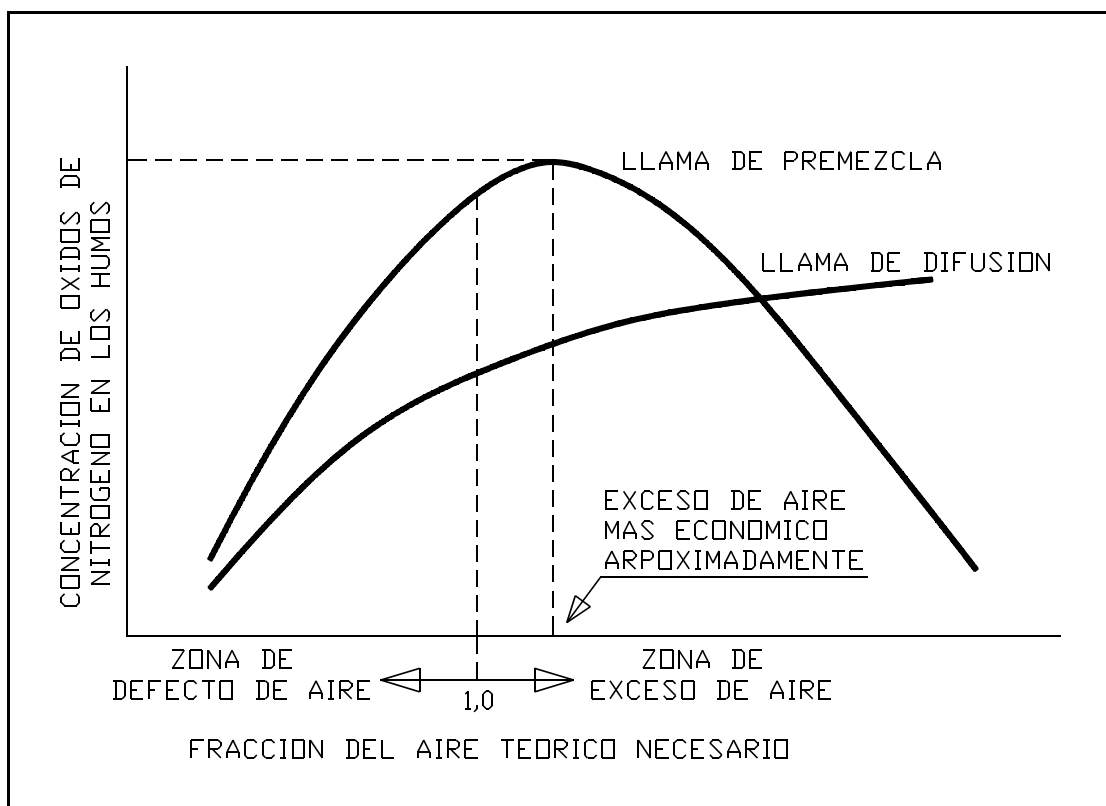


Figura 13: Formación de óxidos de nitrógeno según el tipo de llama.

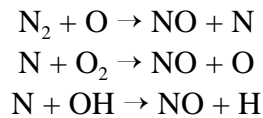
la atmósfera también contribuye a la deposición de partículas sólidas ácidas y a la lluvia ácida.

Los orígenes de los óxidos de nitrógeno que se forman durante la combustión son los siguientes:

NO_x TÉRMICO

Recibe esta denominación el óxido de nitrógeno que se forma por la oxidación a alta temperatura del nitrógeno contenido en el aire de combustión. Se forma a temperaturas

superiores a 1200 °C bajo condiciones oxidantes. La formación del óxido de nitrógeno de esta procedencia aumenta exponencialmente con la temperatura. A las temperaturas mencionadas tanto el nitrógeno como el oxígeno, se encuentran en estado atómico. Las reacciones principales que intervienen en la oxidación del nitrógeno atmosférico son las siguientes:



Las condiciones típicas repetidamente mencionadas para una buena combustión (alta temperatura, tiempos de residencia suficientemente largos y buena mezcla de aire y combustible) tienden a aumentar la formación de óxidos de nitrógeno. La formación del NO_x térmico se reduce disminuyendo la temperatura máxima y media de la llama. Los métodos para conseguir esto, que se verán más detalladamente al estudiar los quemadores, son:

- Retardo de la mezcla del aire secundario con el combustible. Lo cual se consigue reduciendo la turbulencia en la proximidad del quemador, lo cual reduce la velocidad de combustión, como consecuencia se retarda la liberación de calor y entonces la competencia entre liberación y emisión de calor hace que la temperatura de la llama descienda
- Aportación del aire secundario a la llama en etapas. El aire secundario se hace llegar a la llama desde distintos conductos, normalmente concéntricos con el de entrada de aire primario-carbón. Esto produce un retardo en la combustión con los mismos efectos apuntados en el párrafo anterior.
- Mezcla de humos de salida de la caldera con el aire de combustión: Esta operación reduce la temperatura de la llama porque el total de gases a calentar en la misma aumenta mientras no varía la cantidad de calor liberado.

En la *figura 12* se esquematiza, el concepto de lo que es llama de difusión y lo que es llama de premezcla. En la primera el aire secundario se incorpora a la llama durante la combustión (esta se puede retardar si su incorporación se hace lenta) y en la segunda se mezcla con el combustible y el aire secundario antes del inicio de la ignición (la combustión será más rápida ya que está hecha la mezcla de todos los ingredientes). La temperatura que se alcanza en las llamas de difusión es superior a la que se alcanza en las llamas de premezcla. En la *figura 13* se representa la cantidad de NO_x formado, según el tipo de llama que se utilice en la combustión, en función del exceso de aire. El punto óptimo de exceso de aire, o exceso de aire más económico, para las llamas de difusión, en las calderas de carbón pulverizado, coincide aproximadamente con el que propicia la máxima de formación de NO_x . Con base en estos conceptos, se han desarrollado varios tipos de quemadores que se caracterizan por cumplir en mayor o menor medida estas condiciones.

NO_x PROCEDENTE DEL NITRÓGENO DEL COMBUSTIBLE

El NO_x formado a partir de nitrógeno del combustible representa el 50 % del formado en la combustión de los combustibles líquidos y el 80 % del formado en la combustión del carbón

pulverizado. El nitrógeno en el combustible se encuentra formando parte de los compuestos orgánicos de los que se libera en radicales libres desde los que pasa a NO o a N_2 . Aunque el nitrógeno del combustible es el origen de la mayor parte de las emisiones que tienen lugar en la combustión, solo se transforma en NO_x entre el 20 y el 30 % del contenido.

La formación del NO_x partiendo del nitrógeno contenido en el combustible, tiene lugar según una serie de reacciones no muy bien conocidas. Se forma según dos caminos distintos:

Uno de estos caminos es la oxidación de las especies nitrogenadas de los volátiles, en la fase inicial de la combustión. Durante el desprendimiento de volátiles y la primera fase de oxidación de los mismos, el nitrógeno forma varios compuestos intermedios en las regiones de la llama ricas en combustible. Estos compuestos intermedios posteriormente forman NO o N_2 molecular. El que se forme uno u otro depende fundamentalmente de las condiciones oxidantes o reductoras en esta zona de la llama. El óxido de nitrógeno formado según este mecanismo representa entre el 60 % y el 90 % del total.

El segundo camino de oxidación del nitrógeno del combustible, es la oxidación de los radicales nitrogenados que se desprenden durante la combustión de la fracción char del carbón. Estas reacciones son mucho más lentas que las anteriores.

La formación del NO_x partiendo del nitrógeno contenido en el combustible, depende fundamentalmente de las condiciones oxidantes o reductoras durante la fase de formación, desprendimiento y principio de combustión de los volátiles, pero depende muy poco de la temperatura en la zona de combustión, por lo tanto la reducción de la formación de NO_x según este mecanismo se puede reducir haciendo que las condiciones durante la primera fase de la combustión sean reductoras, con lo cual el nitrógeno contenido en los productos intermedios mencionados, se reduce a N_2 . Las técnicas mencionadas anteriormente, de retardo de la mezcla y aportación de aire secundario en etapas, para reducir la temperatura de la llama, son igualmente útiles para conseguir condiciones reductoras en la primera fase de combustión.

Una parte de los óxidos de nitrógeno formados por conversión del nitrógeno del combustible, en la zona de la llama rica en combustible, se denomina " **NO_x SÚBITO**". Este óxido de nitrógeno se debe a la formación de especies intermedias de cianuro de hidrógeno (HCN) y a las reacciones entre el nitrógeno molecular y los compuestos hidrocarbonados. Estas reacciones van seguidas por la oxidación del HCN a NO . Los quemadores modernos se diseñan para reducir la temperatura de llama y para conseguir condiciones reductoras en la primera fase de la combustión, retardando la mezcla de aire y de combustible. Por lo tanto la combustión se inicia bajo condiciones de riqueza en combustible que son las adecuadas para la formación del NO_x súbito. El NO_x súbito puede contribuir al total del NO_x producido en una cantidad que oscila entre cero y 100 ppm.