XI.- INTRODUCCIÓN A LA COMBUSTIÓN

pfernandezdiez.es

Introducción	*401*
Leyes fundamentales	*402*
Leyes de conservación de la masa y energía	*402*
Ley de los gases ideales	*403*
Ley de pesos combinados	*403*
Leyes de Avogadro, Dalton y Amagat	*403*
Aplicación de las leyes fundamentales	*403*
Evaluación molar de la combustión	*406*
Combustibles gaseosos	*406*
Combustibles sólidos y líquidos	*407*
Composición del aire	*408*
Aire teórico para la combustión	*409*
Productos de la combustión por unidad de masa de combustible	*410*
Unidades gravimétricas alternativas	*411*
Método en Btu	*411*
Calor de combustión	*413*
Medida del calor de combustión	*414*
Poderes caloríficos superior e inferior	*415*
Temperatura de ignición	*415*
Temperatura adiabática de la llama	*416*
Cálculos de combustión en operaciones comerciales	*418*
Absorbentes y aditivos	*418*
Residuos y desechos	*420*
$C_{inquemado}$	*420*
Exceso de aire (aire$_{exceso}$)	*421*
Cálculos de combustión y rendimiento	*422*
Aire$_{comburente}$-aire$_{teórico}$	*423*
Gases de combustión	*424*
Agua procedente del combustible	*424*
Humedad total de los humos	*425*
Masa de residuos procedentes del combustible	*425*
Eficiencia del combustible	*425*
Pérdidas por radiación y convección	*427*
Otras pérdidas	*427*
Entalpía	*427*
Entalpía del aire y gases	*427*
Entalpía de sólidos y combustibles	*429*
Medida del exceso de aire	*429*
Análisis de humos	*430*
Toma de muestras de los humos	*432*
Ensayo de combustibles heterogéneos	*432*
Ejemplos de cálculos de combustión	*433*
Método en Mol	*433*
Mátodo en Btu	*434*
Tabla.- Cálculos de combustión en Btu de un carbón bituminoso	*435*
Tabla.- Cálculos de combustión en Btu de un carbón bituminoso, con absorbente	*436*
Tabla.- Cálculos de combustión con absorbente	*438*
Tabla.- Cálculos de aire$_{exceso}$ de un carbón bituminoso a partir del O_2 medido en humos en base húmeda	*439*
Tabla.- Cálculos de aire$_{exces}$ en carbón bituminoso, a partir del O_2 en base húmeda, con absorbente.	*440*
Tabla.- Captura de S por análisis de humos en un carbón bituminoso	*441*
Tabla.- Cálculos de Combustión para determinar el peso de humos$_{secos}$, de agua$_{evaporada}$ y de aire$_{exceso}$	*441*

Un generador de vapor requiere de una fuente de calor a un determinado nivel de temperatura; un combustible fósil se quema en el hogar de la caldera y produce calor, aunque también se puede emplear energía residual procedente de otros procesos.

La combustión es la combinación rápida del O_2 con los elementos inflamables del combustible. En la mayoría de los combustibles fósiles hay tres elementos combustibles significativos, C, H_2 y S; el S es el de menor importancia como fuente de calor, pero puede tener una influencia importante en problemas de corrosión y contaminación.

El objetivo de una buena combustión es liberar toda la energía del combustible, a la vez que se minimizan las pérdidas derivadas de las imperfecciones de la combustión y del $aire_{exceso}$.

La combinación de los elementos inflamables del combustible con el oxígeno, requiere de:

- *Temperatura lo suficientemente alta para la ignición de los elementos inflamables*
- *Turbulencia que facilite el íntimo contacto combustible-oxígeno*
- *Tiempo suficiente para completar el proceso*

parámetros que frecuentemente se designan como las tres T de la combustión: $\begin{cases} Temperatura \\ Tiempo \\ Turbulencia \end{cases}$

La Tabla XI.1 relaciona los elementos químicos, simples y compuestos, que se encuentran en los combustibles normalmente utilizados en los diversos tipos de generación de vapor comercial de calor; como factores de conversión interesantes se incluyen los siguientes:

$$Btu/lb \times 2{,}326 = 1\ kJ/kg \quad ; \quad (°F - 32)\frac{5}{9} = °C \quad ; \quad 0{,}4536\ lb = 1\ kg$$

La constante universal de los gases perfectos: $R = 8{,}3145\ kJ/kmol°K = 1545\ ft.lb/molR°$

$1\ kmol\ a\ 0°C\ y\ 1{,}01\ bar = 22{,}4\ m^3$

XI.1.- LEYES FUNDAMENTALES

Ley de conservación de la masa.- Establece que la materia no se crea ni se destruye, por lo que se puede hacer un balance de masa, entre la suma de los componentes entrantes y salientes para un proceso determinado. Si x kg de combustible se combinan con y kg de aire, siempre resultan $(x+y)$ kg de productos formados.

Ley de conservación de la energía.- Estipula que la energía no se crea ni se destruye, de forma que la suma de las energías entrantes (potencial, cinética, térmica, química y eléctrica) en un proceso dado, debe ser igual a la suma de las salientes. En el proceso de combustión la energía quí-

mica pasa fundamentalmente a energía térmica; cuando se quema 1 lb de un carbón que libera 13500 Btu, la cantidad de masa que se convierte en energía es sólo de $3{,}5.10^{-10}$ lb.

Desde el punto de vista de la física nuclear, las leyes de conservación de masa y energía no son muy exactas, pero son suficientes para los cálculos de combustión que se realizan en Ingeniería.

Ley de los gases ideales.- Según esta ley, el volumen de un gas ideal es directamente proporcional a su temperatura absoluta e inversamente proporcional a su presión. Para 1 mol de cualquier gas ideal la constante de proporcionalidad es la misma, y la ley se expresa en la forma:

$$v_M = \frac{R\,T}{p},\ \textit{siendo:}\ \begin{cases} v_M\ \textit{, el volumen / mol} \\ p\textit{, la presión absoluta} \\ T\textit{, la temperatura absoluta} \\ R\textit{, la constante universal de los gases} \end{cases}$$

Ley de pesos combinados.- Todas las sustancias se combinan según unas proporciones en peso, simples y definidas, exactamente proporcionales a las relaciones de los pesos moleculares de los respectivos componentes.

Ley de Avogadro.- Volúmenes iguales de diferentes gases sometidos a idénticas presión y temperatura, tienen el mismo número de moléculas. El cociente entre el peso de 1 mol de una sustancia y su peso molecular es constante; 1 mol de cualquier sustancia químicamente pura tiene el mismo número de moléculas. Por la ley de gases perfectos, como la molécula de cualquier gas ideal ocupa siempre el mismo volumen a una presión y temperatura dadas, se deduce que volúmenes iguales de diferentes gases (en iguales condiciones de presión y temperatura) contienen el mismo número de moléculas.

Ley de Dalton.- La presión total de una mezcla de gases es la suma de las presiones parciales de cada uno de los gases individuales, si cada uno de ellos ocupase el volumen que ocupa la mezcla. Cada gas presente en una mezcla ocupa, por sí solo, el volumen global de la misma y ejerce una presión independiente de la de los demás.

Ley de Amagat.- El volumen ocupado por una mezcla de gases es igual a la suma de los volúmenes ocupados por cada uno de los componentes de la mezcla, a presión y temperatura idénticas a las de la mezcla.

XI.2.- APLICACIÓN DE LAS LEYES FUNDAMENTALES

La Tabla XI.2 resume las relaciones moleculares y básicas entre combustible y O_2, para las sustancias que intervienen normalmente en la combustión y el poder calorífico de cada sustancia. La mayoría de las relaciones gravimétricas y volumétricas, relativas a los cálculos de combustión, se determinan utilizando la información de la Tabla XI.2 y las siete Leyes Fundamentales anteriores.

Tabla XI.1.- Constantes de combustión

N°	Sustancia	Fórmula	a) Peso molecular	b) Densidad lb/ft^3	b) Volumen específico ft^3/lb	b) Densidad relativa (aire = 1)	Calor de combustión Btu/ft^3		Calor de combustión Btu/lb	
							Bruto	d) Neto	Bruto	d) Neto
1	Carbono	C	12,011	-	-	-	-	-	14093	14093
2	Hidrógeno	H_2	2,0159	0,0053	167,97	0,0695	325	274,6	61095	51625
3	Oxígeno	O_2	31,9988	0,0846	11,819	1,1053	-	-	-	-
4	Nitrógeno	N_2	28,0135	0,0744	13,443	0,9717	-	-	-	-
4'	Nitrógeno atm.	$N_{2(atm)}$	28,1619	0,0748	13,372	0,9769	-	-	-	-
5	Monóxido de C	CO	28,0104	0,074	13,506	0,9672	321,9	321,9	4347	4347
6	Dióxido de C	CO_2	44,0098	0,117	8,547	1,5284	-	-	-	-
	Serie parafínica C_nH_{2n+2}									
7	Metano	CH_4	16,0428	0,0424	23,574	0,5541	1013	922	23875	21495
8	Etano	C_2H_6	30,0697	0,0803	12,455	1,0488	1792	1639	22323	20415
9	Propano	C_3H_8	44,0966	0,1196e	8,361e	1,5624	2592	2385	21669	19937
10	n-Butano	C_4H_{10}	58,1235	0,1582e	6,321e	2,0666	3373	3113	21321	19679
11	Iso-butano	C_4H_{10}	58,1235	0,1582e	6,321e	2,0666	3365	3105	21271	19629
12	n-Pentano	C_5H_{12}	72,1504	0,1904e	5,252e	2,4872	4017	3714	21095	19507
13	Iso-pentano	C_5H_{12}	72,1504	0,1904e	5,252e	2,4872	4007	3705	21047	19459
14	Neo-pentano	C_5H_{12}	72,1504	0,1904e	5,252e	2,4872	3994	3692	20978	19390
15	n-Hexano	C_6H_{14}	86,1773	0,2274e	4,398e	2,9702	4767	4415	20966	19415
	Serie olefínica C_nH_{2n}									
16	Etileno	C_2H_4	28,0538	0,0746	13,412	0,974	1613	1512	21636	20275
17	Propileno	C_3H_6	42,0807	0,1110e	9,009	1,45	2336	2185	21048	19687
18	n-Buteno (Butileno)	C_4H_8	56,1076	0,1480e	6,757e	1,9333e	3086	2885	20854	19493
19	Iso-buteno	C_4H_8	56,1076	0,1480e	6,757e	1,9333	3069	2868	20737	19376
20	n-Penteno	C_5H_{10}	70,1345	0,1852e	5,400e	2,4191	3837	3585	20966	19359
	Serie aromática C_nH_{2n-6}									
21	Benceno	C_6H_6	78,1137	0,2060e	4,954e	2,6912e	3746	3585	18184	17451
22	Tolueno	C_7H_8	92,1406	0,2431e	4,114e	3,1753e	4497	4296	18501	17672
23	Xileno	C_8H_{10}	106,1675	0,2803	3,586e	3,6612e	5222	4970	19633	17734
	Otros									
24	Acetileno	C_2H_2	26,0379	0,0697	14,345	0,9106	1499	1448	21502	20769
25	Naftaleno	$C_{10}H_8$	128,1736	0,3384e	2,955e	4,4206e	5855	5654	17303	16707
26	Alcohol metílico	CH_3OH	32,0422	0,0846e	11,82	1,1052	868	767	10258	9066
27	Alcohol etílico	C_2H_5OH	46,0691	0,1216e	9,224e	1,5884e	1600	1449	13161	11918
28	Amoniaco	NH_3	17,0306	0,0456e	21,930e	0,5957e	441	364	9667	7986
29	Azufre	S	32,066	-	-	-	-	-	3980	3980
30	Sulfuro de Hidróg.	SH_2	34,0819	0,0911	10,897e	1,1899e	646	595	7097	6537
31	Sulfuro de Azufre	SO_2	64,0648	0,1733	5,77	2,264	-	-	-	-
32	Vapor de agua	H_2O	18,0153	0,0476	21,017	0,62315	-	-	-	-
33	Aire	-	289660	0,0766	13,063	1	-	-	-	-

Todos los volúmenes de gases corregidos a 60°F y 30"Hg en seco

a) Pesos atómicos: C = 12,011 ; H = 1,00794 ; N = 14,0067

b) Densidades calculadas a partir de valores dados en g/dm^3 a 0°C y 760 mm Hg, por Tablas Internacionales, habida cuenta de desviaciones conocidas de la ley de gases perfectos. Cuando no hay densidades disponibles, se toma el volumen de 1 mol igual a 22,415 dm^3.

c) Para gases saturados con agua, el valor de Btu hay que rebajarlo en 1,74%

d) La corrección del poder calorífico bruto, para obtener el neto, se determina deduciendo 1,059,7 Btu/lb_{agua} en los productos de combustión (ASME Steam Tables, 1983).

e) Algunos materiales no existen como gases a 601°F y 30"Hg, en cuyo caso los valores consignados son teóricos.

Tabla XI.1.- Constantes de combustión (continuación)

Nº	ft^3/ft^3 combustible						lb/lb combustible						Aire teórico $lb/10^4 Btu$
	Requisitos			Gases de combustión			Requisitos			Gases de combustión			
	O_2	$N_{2(atm)}$	Aire	CO_2	H_2O	$N_{2(atm)}$	O_2	$N_{2(atm)}$	Aire	CO_2	H_2O	$N_{2(atm)}$	
1	1	3,773	4,773	1	-	3,773	2,664	8,846	11,51	3,664	-	8,846	8,167
2	0,5	1,887	2,387	-	1	1,887	7,936	26,353	34,29	-	8,937	26,353	513
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	0,5	1,887	2,387	1	-	1,887	0,571	1,897	2,468	1,571	-	1,897	5,677
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Serie olefínica C_nH_{2n}													
7	2	7,547	9,547	1	2	7,547	3,989	13,246	17,235	2,743	2,246	13,246	7,219
8	3,5	13,206	13,206	2	3	13,206	3,724	12,367	16,092	2,927	1,797	12,367	7,209
9	5	18,866	23,868	3	4	18,866	3,628	12,047	15,676	2,994	1,634	12,047	7,234
10	6,5	24,526	31,026	4	5	24,526	3,578	11,882	15,46	3,029	1,55	11,882	7,251
11	6,5	24,526	31,026	4	5	24,526	3,578	11,882	15,46	3,029	1,55	11,882	7,268
12	8	30,186	38,186	5	6	30,186	3,548	11,788	15,329	3,05	1,498	11,781	7,267
13	8	30,186	38,186	5	6	30,186	3,548	11,788	15,329	3,05	1,498	11,781	7,283
14	8	30,186	38,186	5	6	30,186	3,548	11,788	15,329	3,05	1,498	11,781	7,307
15	9,5	35,846	45,346	6	7	35,846	3,527	11,713	15,24	3,064	1,463	11,713	7,269
Serie olefínica C_nH_{2n}													
16	3	11,32	14,32	2	2	11,32	3,422	11,362	14,784	3,318	1,284	11,362	6,833
17	4,5	16,98	21,48	3	3	16,98	3,422	11,362	14,784	3,318	1,284	11,362	7,024
18	6	22,64	28,64	4	4	22,64	3,422	11,362	14,784	3,318	1,284	11,362	7,089
19	6	22,64	28,64	4	4	22,64	3,422	11,362	14,784	3,318	1,284	11,362	7,129
20	7,5	28,3	35,8	5	5	28,3	3,422	11,362	14,784	3,318	1,284	11,362	7,135
Serie aromática C_nH_{2n-6}													
21	7,5	28,3	35,8	6	3	28,3	3,072	10,201	13,274	3,38	0,692	10,201	7,3
22	9	33,959	42,959	7	4	33,959	3,125	10,378	13,504	3,343	0,782	10,378	7,299
23	10,5	39,619	50119	8	5	39,619	3,164	10,508	13,673	3,316	0,848	10,508	7,338
Otros													
24	2,5	9,433	11,933	2	1	9,433	3,072	10,201	13,274	3,38	0,692	10,201	6,173
25	12	45,279	57,279	10	4	45,279	2,995	9,947	12,943	3,434	0,562	9,947	7,48
26	1,5	5,66	7,16	1	2	5,66	1,498	4,974	6,472	1,373	1,124	4,974	6,309
27	3	11,32	14,32	2	3	11,32	2,084	6,919	9,003	1,911	1,173	6,919	6,841
28	0,75	2,83	3,58	-	1,5	3,33	1,409	4,679	6,088	-	1,587	5,502	6,298
29	1	3,773	4,773	1	-	3,773	1	3,32	4,32	1,998	-	3,32	10,854
30	1,5	5,66	7,16	1	1	5,66	1,41	4,682	6,093	1,88	0,529	4,682	8,585

Tabla XI.2.- Reacciones de combustión

Combustibles	Reacciones	Moles	Masa/peso, lb	Pcal sup Btu/lb-comb.
Carbono a CO	$2\ C + O_2 = 2\ CO$	$2 + 1 \rightarrow 2$	$24 + 32 = 56$	3950
Carbono a	$C + O_2 = CO_2$	$1 + 1 \rightarrow 1$	$12 + 32 = 44$	14093
Monóxido de carbono	$2\ CO + O_2 = 2\ CO_2$	$2 + 1 \rightarrow 2$	$56 + 32 = 88$	4347
Hidrógeno	$2\ H_2 + O_2 = 2\ H_2O$	$2 + 1 \rightarrow 2$	$4 + 32 = 36$	61095
Azufre a SO_2	$S + O_2 = SO_2$	$1 + 1 \rightarrow 1$	$32 + 32 = 64$	3980
Metano	$CH_4 + 2\ O_2 = CO_2 + 2\ H_2O$	$1 + 2 \rightarrow 1 + 2$	$16 + 64 = 80$	23875
Acetileno	$2\ C_2H_2 + 5\ O_2 = 4\ CO_2 + 2\ H_2O$	$2 + 6 \rightarrow 4 + 2$	$52 + 160 = 212$	21502
Etileno	$C_2H_4 + 3\ O_2 = 2\ CO_2 + 2\ H_2O$	$1 + 3 \rightarrow 2 + 2$	$28 + 96 = 124$	21636
Etano	$2\ C_2H_6 + 7\ O_2 = 4\ CO_2 + 6\ H_2O$	$2 + 7 \rightarrow 4 + 6$	$60 + 224 = 284$	22323
Sulfuro de hidrógeno	$2\ H_2S + 3\ O_2 = 2\ SO_2 + 2\ H_2O$	$2 + 3 \rightarrow 2 + 2$	$68 + 96 = 164$	7097

El proceso de combustión para el C y el H_2 se resume en las ecuaciones siguientes:

$C + O_2 = CO_2$; *1 molécula + 1 molécula = 1 molécula*

$2\ H_2 + O_2 = 2\ H_2O$; *2 moléculas + 1 molécula = 2 moléculas*

Cuando 1 ft^3 de O_2 se combina con C se forma 1 ft^3 de CO_2

Si el C se considerase como un gas ideal en estado sólido, se necesitaría 1 ft^3 de este gas

En las ecuaciones precedentes existe un balance de masas, de acuerdo con la ley de pesos combinados y sin embargo no existe un balance de volúmenes o un balance desde el punto de vista molecular.

XI.- EVALUACIÓN MOLAR DE LA COMBUSTIÓN

***Combustibles gaseosos*.-** Los cálculos en base molar tienen una aplicación simple y directa para los combustibles gaseosos, cuyos análisis normalmente se detallan en porcentajes referidos a volumen, como por ejemplo:

85,3% CH_4 ; 12,6% C_2H_6 ; 0,1% CO_2 ; 1,7% N_2 ; 0,3% O_2 , en % de volumen

En una mezcla, la fracción molar correspondiente a un componente es el cociente entre el número de moles del componente y la suma total de moles del conjunto de todos los componentes que integran la mezcla; de acuerdo con la ley Avogadro, como un mol de cualquier gas ideal ocupa el mismo volumen, la fracción molar de un componente de una mezcla de gases ideales es igual a la fracción volumétrica de ese componente:

$$\frac{Moles_{componente}}{Moles_{mezcla}} = \frac{Volumen_{componente}}{Volumen_{mezcla}}$$

concepto que es muy útil, porque el análisis volumétrico de una mezcla de gases facilita las fracciones molares de sus componentes; de acuerdo con ésto, el análisis del combustible anterior se puede poner en la forma:

$$85{,}3\ CH_4 \ ;\ 12{,}6\ C_2H_6 \ ;\ 0{,}1\ CO_2 \ ;\ 1{,}7\ N_2 \ ;\ 0{,}3\ O_2 \ en\ \frac{mol}{100\ mol}$$

El contenido de cada elemento químico, en cada uno de los componentes del combustible para 100 moles de combustible se expresa en los siguientes cuadros:

C en CH = 85,3 x 1	*85,3*				
C en C_2H_6 = 126, x 2	*25,2*	*H_2 en CH_4 = 85,3 x 2*	*170,6*	*O_2 en CO_2 = 0,1 x 1*	*0,1*
C en CO_2 = 0,1 x 1	*0,1*	*H_2 en C_2H_6 = 12,6 x 3*	*37,8*	*O_2 en O_2 = 0,3 x 1*	*0,3*
Total C en 100 mol combustible	*110,6 mol*	*Total H_2 en 100 mol combustible*	*208,4 mol*	*Total O_2 en 100 mol combustible*	*0,4 mol*

N_2 en N_2 = 1,7 x 1	1,7
Total N_2 en 100 mol combustible	1,7 mol

Las necesidades de O_2/aire y los productos de combustión se pueden calcular a partir de cada elemento químico puro componente; se obtienen de la Tabla XI.1.

La conversión de los componentes gaseosos a una base referida a elementos químicos puros tiene dos ventajas principales: $\begin{cases} Permite\ una\ mejor\ comprensión\ del\ proceso\ de\ combustión \\ Facilita\ medios\ para\ calcular\ el\ análisis\ elemental\ en\ peso\ del\ combustible \end{cases}$, lo que constituye una práctica en la industria de calderas; resulta adecuado para determinar el análisis elemental de un combustible complejo, cuando se queman a la vez combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. La conversión de componentes de combustibles gaseosos, dados en mol/100 mol, para referirlos a la base lb/100 lb, en % en peso, es de la forma:

Conversión de componentes de combustibles gaseosos

Componente	mol / 100 mol	lb / mol	lb / 100 mol	mol / lb	lb / 100 lb
Carbono	110,6 x	12,011	= 1.328,4	x (100 / 1808,9) =	73,43
Hidrógeno	208,4 x	2,016	420,1	x (100 / 1808,9) =	23,2
Oxígeno	0,4 x	31,999	12,8	x (100 / 1808,9) =	0,7
Nitrógeno	1,7 x	28,013	47,6	x (100 / 1808,9) =	2,6
Total		1808,9		100	

Combustibles sólidos y líquidos.- El *análisis elemental* se puede expresar en porcentajes referidos a una base gravimétrica.

El *análisis másico* se puede convertir en un análisis en base molar, dividiendo la fracción másica correspondiente a cada componente, por su peso molecular:

$$\frac{Fracción\ másica}{Peso\ molecular} = \frac{\dfrac{lb_{componente}}{100\ lb_{combustible}}}{\dfrac{lb_{componente}}{mol_{componente}}} = \frac{mol_{componente}}{100\ lb_{combustible}}$$

Tabla XI.3.- Cálculo de humos y de aire teórico necesario en "mol"

Componente combustible	% en peso	Peso molecular	Mol / 100 lb	Producto combustión	Mol oxígeno teórico
1	2	3	2 / 3 = 4		6
C	72	12,011	5,995	CO_2	5,995
H_2	4,4	2,016	2,183	H_2O	1,091*
S	1,6	32,066	0,05	SO_2	0,05
O_2	3,6	31,999	0,113	-	- 0,113
N_2	1,4	26,013	0,05	N_2	0
H_2O	8	18,015	0,444	H_2O	0
Ceniza	9	-	-	-	-
Total	100	-	8,835	-	7,023

La columna (6) computa moles de oxígeno, como O_2 requerido para la combustión, por lo que para obtener moles de O_2 equivalentes a los de H_2O se tienen que dividir éstos por 2.

El cálculo se ilustra en la Tabla XI.3, en la que se indican los productos de la combustión y el O_2 requerido por cada uno de los elementos inflamables del combustible.

Cuando el combustible contiene O_2 la cantidad teórica requerida de O_2/aire se reduce.

Composición del aire.- En las combustiones normales y en las aplicaciones de los generadores de vapor, la fuente de O_2 está constituida por aire atmosférico. Los cálculos y obtención de constantes se basan en el concepto de atmósfera estándar que tiene un peso molecular de 28,966 y que está compuesta por $\begin{cases} 0{,}20947 \text{ moles de } O_2 \\ 0{,}78086 \text{ moles de } N_2 \\ 0{,}00934 \text{ moles de } Ar \\ 0{,}00033 \text{ moles de } CO_2 \end{cases}$

Para simplificar los cálculos, en el valor del N_2 se incluyen el Ar y trazas de otros elementos; este nuevo N_2 se identifica como nitrógeno atmosférico N_{2a} con un peso molecular equivalente a 28,261 tal como se indica en la Tabla XI.4.

Tabla XI.4.- Composición del aire

Componentes principales	*Composición del aire seco*	
	% en volumen	*% en peso*
Oxígeno	*20,95*	*23,14*
Nitrógeno atmosférico	*79,05*	*76,86*
Total	*100*	*100*

Normalmente, el aire contiene algo de humedad; la Asociación Americana de Fabricantes de Calderas considera un contenido de humedad en el aire igual a 0,013 $\frac{lb_{agua}}{lb_{aire\ seco}}$, que corresponde con el 60% de humedad relativa a 80ºF (26,7ºC).

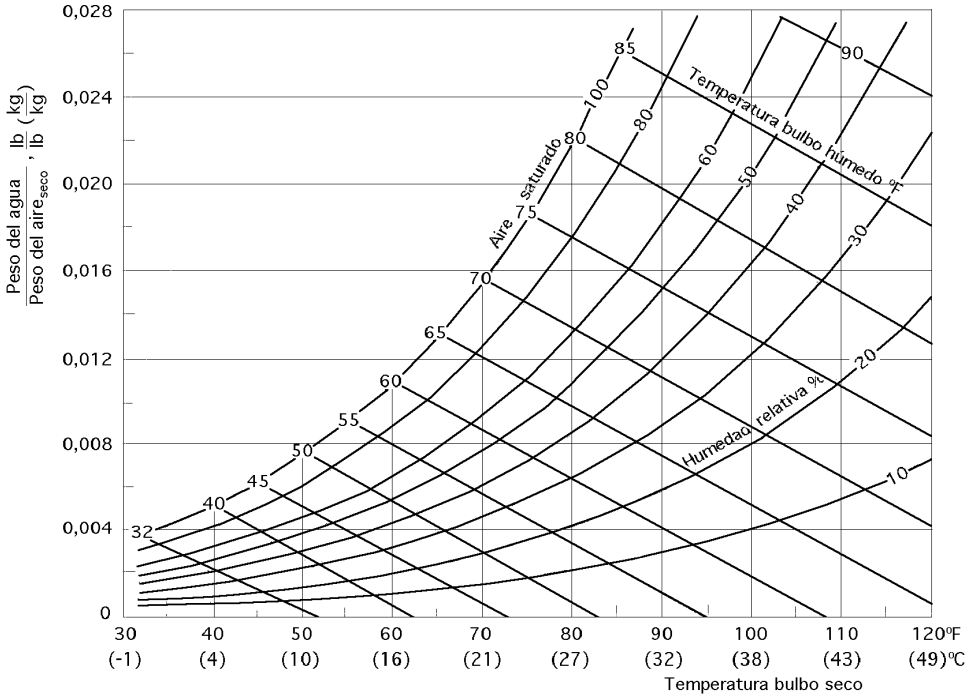
Para cálculos de combustión en base molar, la humedad gravimétrica se multiplica por 1,608 que es el cociente $\frac{peso\ molecular_{aire}}{peso\ molecular_{agua}}$, por lo que el contenido estándar de humedad igual a 0,013 $\frac{lb_{agua}}{lb_{aire\ seco}}$, se convierte en 0,0209 $\frac{mol_{agua}}{mol_{aire\ seco}}$.

El contenido de la humedad real en el aire se determina a partir de la temperatura de los termómetros de bulbos seco y húmedo, o bien a partir de la humedad relativa Φ usando el diagrama psicrométrico, Figura XI.1, o mediante la expresión:

$$Humedad\ relativa\ \Phi = 0{,}622\ \frac{p_v}{p_b - p_v}\ \frac{lb}{lb_{aire\ seco}}\ ,\ con\ \begin{cases} p_b\ \ presión\ barométrica \\ p_v = p_{parcial}\ \ del\ vapor\ de\ agua\ en\ el\ aire = 0{,}01\ \Phi\ p_{sat} \\ p_{sat}\ \ del\ vapor\ de\ agua\ a\ la\ T_{bulbo\ seco} \end{cases}$$

$$p_v = p_{sat\ a\ T_{bulbo\ húmedo}} - \frac{(p_{barométrica} - p_{sat\ a\ T_{bulbo\ húmedo}})\,(T_{bulbo\ seco} - T_{bulbo\ húmedo})}{2830 - (1{,}44\ T_{bulbo\ húmedo})}$$

en la que las presiones vienen en psi, y las temperaturas en ºF.



Humedad relativa = Fracción$_{molar}$ del vapor$_{agua}$ en el aire$_x$ Fracción$_{molar}$ en saturación

Fig XI.1.- Ábaco psicrométrico.- Contenido de agua en el aire, para diversas temperaturas de bulbos seco y húmedo

Con las cifras de la Tabla XI.4, se pueden establecer los valores de algunas constantes, que se usan con frecuencia en cálculos de combustión:

$$\frac{mol_{aire}}{mol_{O_2}} = \frac{100}{20,95} = 4,77\ \frac{mol_{aire}}{mol_{O_2}} \qquad \frac{Peso_{aire\ seco}}{Peso_{O_2}} = \frac{100}{23,14} = 4,32\ \frac{Peso_{aire\ seco}}{Peso_{O_2}}$$

$$\frac{mol_{N_{2a}}}{mol_{O_2}} = \frac{79,05}{20,95} = 3,77\ \frac{mol_{N_{2a}}}{mol_{O_2}} \qquad \frac{Peso_{N_{2a}}}{Peso_{O_2}} = \frac{76,86}{23,14} = 3,32\ \frac{Peso_{N_{2a}}}{Peso_{O_2}}$$

Los cálculos de la Tabla XI.2 pueden servir para la combustión con aire, en lugar de la combustión con O_2, añadiendo 3,77 moles de N_{2a} por cada mol de O_2, en ambos miembros, de cada reacción.

Por ejemplo: $\begin{cases} \text{Combustión del CO en aire: } 2\ CO + O_2 + 3,77\ N_{2a} = 2\ CO_2 + 3,77\ N_{2a} \\ \text{Combustión del } CH_4 \text{ en aire: } CH_4 + 2\ O_2 + 2\ (3,77\ N_{2a}) = CO_2 + 2\ H_2O + 7,54\ N_{2a} \end{cases}$

Aire teórico para la combustión.- Es la mínima cantidad de aire necesaria para que se pueda alcanzar teóricamente una combustión completa. En el proceso de combustión se pueden formar pequeñas cantidades de SO_3, NO_x, hidrocarburos inquemados y otras sustancias; estos produc-

tos son motivo de preocupación como materiales contaminantes, pero su influencia sobre la cantidad de aire necesaria y sobre los productos de la combustión no se considera normalmente en los cálculos de combustión.

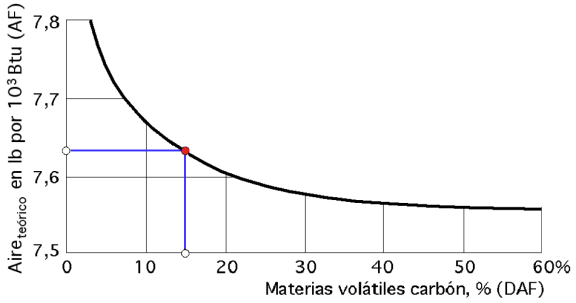


Fig XI.2.- Aire teórico en lb por cada 10000 Btu de P.C. Para carbones de un determinado % de volátiles

Para asegurar la combustión completa del combustible es necesario utilizar una cantidad de aire mayor que la teórica necesaria, $aire_{exceso}$. Para el ejemplo de la Tabla XI.3, se pueden utilizar los cálculos de combustión en base molar, como los correspondientes a una combustión completa si se usa un 20% de $aire_{exceso}$, cálculos que se resumen en la Tabla XI.5.

Como consecuencia de la utilización de $aire_{húmedo}$ como comburente, en los productos de la combustión hay también presencia de N_{2a} y O_2 a causa del $aire_{exceso}$ y de H_2O que está presente en la totalidad del aire, Tabla XI.5.

Tabla XI.5.- Cálculo de necesidades de aire húmedo, en "mol"

Línea nº	*Descripción*	*Fuente*	*Cantidad mol / 100 lb.comb.*
1	*O_2 teórico de combustión*	*Tabla XI.3*	*7,023*
2	*Fracción molar O_2 en el aire seco*	*Fracción volumen O_2 de Tabla XI.4*	*0,2095*
3	*Aire seco teórico*	*(1)/(2)*	*33,523*
4	*Exceso aire del 20%*	*(3) x 0,20*	*6,705*
5	*Total aire seco comburente*	*(3) + (4)*	*40,228*
6	*Fracción molar H_2O en el aire seco*	*	*0,0209*
7	*H_2O en aire seco total*	*(5) x (6)*	*0,841*
8	*Fracción molar $N_{2(atm)}$ en el aire seco*	*Fracción volumen $N_{2(atm)}$ de Tabla XI.4*	*0,7905*
9	*$N_{2(atm)}$ en aire sec o teórico*	*(3) x (8)*	*26,5*
10	*$N_{2(atm)}$ en exceso de aire seco*	*(4) x (8)*	*5,3*
11	*O_2 en exceso de aire seco*	*(2) x (4)*	*1,405*

** Aire comburente estándar a 80°F; 60% humedad relativa; 0,013 $lb_{H_2O}/lb_{aire\text{-}seco}$; 0,0209 mol H_2O/mol aire seco.*

XI.3.- PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN POR UNIDAD DE MASA DE COMBUSTIBLE

La Tabla XI.6 presenta un listado de los productos de combustión y del aire comburente, en base molar (volumétrica) y su conversión a base gravimétrica húmeda y seca.

Los productos de la combustión calculados en base molar con las Tablas XI.3 y 5, se especifican en la columna A. Por conveniencia, las fuentes de humedad se separan de los productos secos para efectuar los cálculos de la composición de humos en bases seca y húmeda.

El producto acuoso (columna A Tabla XI.6) procede de la $\begin{cases} \text{- combustión del } H_2 \text{ del combustible} \\ \text{- humedad contenida en el } \begin{cases} \text{combustible} \\ \text{aire} \end{cases} \end{cases}$

El nitrógeno atmosférico N_{2a} es la suma del nitrógeno: $\begin{cases} \text{- correspondiente al aire}_{teórico} \\ \text{- procedente del aire}_{exceso} \end{cases}$

Tabla XI.6.- Cálculo de humos y aire, en "peso"

Línea nº	*Componente*	*A* *Tablas XI.3 y 5* *mol / 100 lb-comb*	*B* *A - A6* *Vol. seco %*	*C* *A-A11* *Vol. húmedo %*	*D* *Tabla XI.1* *Peso molecular*	*E* *A x D* *lb / 100lb-comb*
GASES O HUMOS DE COMBUSTIÓN						
1	CO_2	*5,995*	*15,25*	*14,02*	*44,01*	*263,8*
2	SO_2	*0,05*	*0,13*	*0,115*	*64,065*	*3,2*
3	$N_{2\ combustible}$	*0,05*	*0,13*	*0,115*	*20,013*	*1,4*
4	$N_{2(atm)}$ *aire*	*31,8 = 26,5 + 5,3*	*80,92*	*74,35*	*28,161*	*895,5*
5	O_2	*1,405*	*3,57*	*3,29*	*31,999*	*45*
6	*Total humo seco*	*39,3*	*100*			*1208,9*
7	H_2O *combustión*	*2,183*				
8	H_2O *combustible*	*0,444*				
9	H_2O *aire*	*0,841*				
10	H_2O *total*	*3,468*		*8,11*	*18,015*	*62,5*
11	*Total humo húmedo*	*42,768*		*100*		*1271,4*
AIRE						
12	*Aire seco*	*40,228*			*28,996*	*1165,3*
13	*Vapor de agua*	*0,843*			*18,015*	*15,2*
14	*Total aire húmedo*					*1180,5*

El N_{2a} está separado del $N_{2(comb)}$ para tener en cuenta el diferente peso molecular de ambos; como el $N_{2(comb)}$ es pequeño con respecto al N_{2a} se puede incluir en el N_{2a}. En algunos gases combustibles, como el gas de horno alto, el $N_{2(comb)}$ es mucho más elevado que el N_{2a}.

Para calcular el % volumétrico de los componentes de los gases de combustión, se suman en base seca y en base húmeda, según muestran las columnas B y C de la Tabla XI.6.

El peso molecular de cada componente se indica en la columna D; la masa de cada componente expresada en $\frac{lb}{100\ lb_{comb}}$*, es el producto de* $\frac{mol}{100\ mol_{comb}}$ *por el peso molecular relativo a cada componente.*

El cálculo del peso de aire se indica en la Tabla XI.6, y sigue los mismos pasos que el cálculo de los productos gaseosos en humos.

XI.4.- UNIDADES GRAVIMÉTRICAS ALTERNATIVAS

MÉTODO EN BTU.- En los cálculos de transferencia de calor en calderas es norma utilizar unidades gravimétricas para expresar las cantidades de aire, gases de combustión y fluido de trabajo (vapor o agua), viniendo dadas las entalpías de los fluidos caliente y frío en Btu/lb.

Por ejemplo, si un carbón tiene un 10% de ceniza, dicho carbón define parcialmente el material combustible si su poder calorífico es de $\begin{cases} 10000\ Btu/lb \text{ habrá } 10\ lb \text{ de ceniza por cada aporte de } 10^6\ Btu \\ 5000\ Btu/lb \text{ habrá } 20\ lb \text{ de ceniza por } 10^6\ Btu \end{cases}$

Para una carga determinada se puede considerar que el aporte calorífico del combustible no varía de forma apreciable; si la caldera quema combustible de menor poder calorífico que el de referencia (por ejemplo la mitad), produce el doble de ceniza que la correspondiente al combustible original. La primera columna de la Tabla XI.8 indica el $aire_{teórico}$ para varios combustibles, referido a la base $\frac{masa}{masa_{comb}}$.

Los valores resultantes tienen pequeñas diferencias dentro de cada uno de los tipos de combustible.

Para los combustibles $\begin{cases} residuos\ sólidos\ urbanos\ o\ basuras \\ derivados\ de\ desechos \end{cases}$, Tabla XI.8, se observa que el $aire_{teórico}$ necesario es del mismo orden que el requerido por los combustibles fósiles.

Para poder contrastar resultados se incluyen valores para el C e H_2 que son los principales elementos inflamables de cualquier combustible y se indican carbones que tienen materias volátiles (sobre puro, es decir, seco y sin ceniza) superiores al 30%.

Tabla XI.7.- Cálculos de Combustión, en "mol"

ENTRADAS		
1	Exceso aire: quemador / caldera / economizador, %	20 / 20 / 20
2	Humedad en aire, lb / lb aire seco	0,013
3	Poder calorífico combustible, Btu / lb	
COMBUSTIBLE.- Carbón bituminoso, Virginia, USA		
4	Entrada combustible, 10^6 Btu / hora	330
5	Pérdida por $C_{inquemado}$, %	0,4
6	$C_{inquemado}$: (5) x (3) / 14500	0,39

CALCULOS PRODUCTOS COMBUSTION											
	Productos combustión	Análisis elemental, % en peso									
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	K
7	Componentes	C	Comb.inquem. (6)	(A) - (B)	S					Ceniza	Total
	Como se quema	80,31			1,54	4,47	2,9	1,38	2,85	6,55	100
	C quemado	80,31	0,39	79,32							
8	Peso molecular lb / mol			12,011	32,066	2,016	18,015	28,013	31,999		
9	(7) / (8) mol / 100 mol-comb.			6,654	0,048	2,217	0,161	0,049	0,089		9,218
10	mol O_2 / mol-comp. comb.			1	1	0,5			-1		
11	(9) x (10) mol O_2 / mol-comb.			6,654	0,048	1,109			- 0,089		7,722
12	Humo producto			CO_2	SO_2	H_2O	H_2O	N_{2comb}			

	Constituyentes del aire, mol / 100 lb. combustible		En quemador	En caldera / economizador
13	Exceso de O_2	(11 K) x (1) / 100	1,544	1,544
14	Total de O_2	(13) + (11 K)	9,266	9,266
15	$N_{2(atm)}$ - aire	(14) x 3,77	34,933	24,933
16	Aire (seco)	(14) + (15)	44,199	44,199
17	H_2O - aire	(16) x (2) x 1,607	0,924	0,924
18	Aire (húmedo)	(16) + (17)	45,123	45,123

		Componentes de humos							
		A	B	C	D	E	F	G	H
		CO_2	SO_2	O_2	$N_{2(comb)}$	$N_{2a\ (aire)}$	H_2O	Total seco	Total húmedo
		(9 C)	(9 D)	{13}	(9 G)	{15}	(9E)+(9F)+(17)	(A) + (E)	(A) + (F)
19	mol / 100 lb.comb.	6,654	0,048	1,544	0,049	34,93	3,302	43,228	46,53
20	% Volumen seco 100 x (19) / (19 G)	15,39	0,71	3,57	0,11	80,82		100	

21	% Volumen húmedo 100 x (19) / (18 H)	14,3	0,1	3,32	0,11	75,07	7,1		100
22	Peso molecular lb / mol	44,01	64,065	31,99	28,013	28,161	18,015		
23	(19) x (22) lb / 100 lb.comb.	292,8	3,1	49,4	1,4	983,7	59,5	1330,4	1389,9

	Parámetros clave para el rendimiento		En quemador	En caldera / economizador
24	Peso molecular humo húmedo, lb / mol	(23H) / (19H)		29,871
25	H_2O en humo húmedo, % peso	100 x (23F) / (23H)		4,28
26	Peso humo seco, lb / 10000 Btu	100 x (23G) / (3)		9,435
27	Peso humo húmedo, lb / 10000 Btu	100 x (23H) / (3)		9,857
28	Peso humo húmedo,103 lb / h	(27) x (4) / 10		325,3
29	Flujo aire (húm), lb / 100 lb.combustible	(16) x 28,966 + (17) x 18,015	1296,9	
30	Flujo aire húmedo, lb / 10000 Btu	100 x (29) / (3)	9,198	
31	Flujo aire húmedo, 103 lb / h	(30) x (4) / 10	303,5	

Tabla XI.8.- Aire teórico requerido por algunos combustibles para fuelóleos y gases combustibles típicos

COMBUSTIBLE	Aire teórico lb / lb.combustible	Poder cal. superior Btu / lb	Aire teórico	
			Típico lb / 10^4 Btu	Intervalo lb / 10^4 Btu
Carbón bituminoso Mat. volátiles sobre puro > 30%, (sin humedad ni ceniza)	9,07	12000	7,56	7,35 a 7,75
Carbón subbituminoso Mat. volátiles sobre puro > 30%, (sin humedad ni ceniza)	6,05	8000	7,56	7,35 a 7,75
Fuelóleo	13,69	18400	7,46	7,35 a 7,75
Gas natural	15,74	21800	7,22	7,15 a 7,35
Madera	3,94	5830	6,75	6,60 a 6,90
Residuos sólidos municipales Combustibles procedentes de desechos	4,13	5500	7,5	7,20 a 7,80
Carbono	11,5	14093	8,16	
Hidrógeno	34,28	61100	5,61	

Tabla XI.9.- Análisis de combustible y aire teórico

Análisis del combustible			
FUELÓLEO PESADO		GAS NATURAL	
Azufre	1,16	Metano	85,3
Hidrógeno	10,33	Etano	12,6
Carbono	87,87	Anhidrido carbónico	0,1
Nitrógeno	0,14	Nitrógeno	1,7
Oxígeno	0,56	Oxígeno	0,3
		Densidad relativa	0,626
		Btu / ft^3 (como se quema)	1090
Btu / lb (como se quema)	18400	Btu / lb (como se quema)	22,379
AIRE TEÓRICO, COMBUSTIBLE Y HUMEDAD			
Aire teórico, lb / 10000 Btu	7,437	Aire teórico, lb / 10000 Btu	7,206
Combustible, lb / 10000 Btu	0,543	Combustible, lb / 10000 Btu	0,44
Humedad, lb / 10000 Btu	0,502	Humedad, lb / 10000 Btu	0,912

XI.4.- CALOR DE COMBUSTIÓN

La energía calorífica desprendida en el hogar de una caldera por la combinación de los elementos combustibles con el O_2 depende de los productos finales de la combustión.

Por ejemplo, si 1 lb de C reacciona con O_2 para producir 14000 Btu de calor, Tabla XI.2, tal reacción puede tener lugar:

- En una sola etapa, para formar CO_2

- En dos etapas sucesivas, bajo ciertas condiciones, de forma que en la primera se forme CO produciéndose sólo un desprendimiento de calor de 3960 Btu por cada lb de C, y en la segunda el CO reacciona con el oxígeno residual para formar CO_2 con una liberación de calor de 10140 Btu por cada lb de C.

MEDIDA DEL CALOR DE COMBUSTIÓN.- En el estudio de calderas, el calor de combustión es la cantidad de energía que genera la combustión completa de la unidad de combustible en peso. La cantidad de calor generado por la combustión completa es constante, para una combinación dada de elementos combustibles, sean éstos simples o compuestos.

El poder calorífico de un combustible se determina en un calorímetro midiendo directamente la totalidad del calor desprendido en la combustión del combustible. Los productos de la combustión se enfrían en el interior del calorímetro hasta la temperatura inicial; el calor absorbido por el medio refrigerante se mide para determinar el poder calorífico superior $P_{cal\cdot sup}$.

Para todos los combustibles sólidos y la mayoría de los líquidos, el calorímetro es una bomba calorimétrica en la que las sustancias combustibles se queman con O_2 a volumen constante.

Sin embargo, para combustibles gaseosos que tengan entre 900÷ 1200 Btu/ft^3, el calorímetro es de circulación continua, siendo su principio operativo el mismo que el de la bomba calorimétrica, pero el poder calorífico se determina a presión constante. En casi todos los combustibles, la diferencia entre los poderes caloríficos a presión y a volumen constante es pequeña y, normalmente, se puede considerar despreciable. En las instalaciones reales el combustible se quema a presión constante, y el valor del poder calorífico se debe considerar técnicamente a presión constante.

Para determinar la composición de los combustibles gaseosos se utiliza la cromatografía de gases; cuando se conoce la composición de una mezcla de gases, su poder calorífico se determina por la expresión:

$$P_{cal\ mezcla} = (v_a P_{cal\,(a)}) + (v_b P_{cal\,(b)}) + \ldots + (v_x P_{cal\,(x)}) \text{, siendo: } \begin{cases} v_x \text{ la fracción volumétrica} \\ P_{cal\,(x)} \text{ el poder calorífico de cada componente} \end{cases}$$

Una de las correlaciones que se ha utilizado con más frecuencia en la determinación de la potencia calorífica superior de un combustible, $P_{cal\cdot sup}$, es la fórmula de Dulong, con la que se obtiene una exactitud razonable para *carbones bituminosos* con errores del orden de 2%÷3%, de la forma:

$$P_{cal\ sup} = (14544\ C) + \{62028\ (H_2 - \frac{O_2}{9})\} + (4050\ S), \text{ siendo: } \begin{cases} C \text{ la fracción gravimétrica del carbono} \\ H_2 \text{ la del hidrógeno} \\ O_2 \text{ la del oxígeno} \\ S \text{ la del azufre} \end{cases}$$

Empleando el valor medio del aire teórico m_{aire}, el poder calorífico superior es:

$$P_{cal\ sup} = 100\ x\ \frac{11{,}51\ C + 14{,}29\ H_2 + 4{,}32\ S - 4{,}32\ O_2}{m_{aire}}\ ,\ en\ la\ que:\ \begin{cases} C, H_2, O_2\ y\ S\ vienen\ en\ \%\ gravimétrico \\ m_{aire}\ es\ el\ aire_{teórico}\ en\ lb/10000\ Btu \end{cases}$$

Poderes caloríficos superior e inferior.- En la combustión de los combustibles que contienen H_2 se produce vapor de agua; el poder calorífico de un combustible depende de que este vapor de agua permanezca en estado gaseoso o condense pasando al estado líquido.

En la bomba calorimétrica, los productos de la combustión se enfrían hasta la temperatura inicial y, por tanto, todo el vapor de agua formado en el proceso de combustión, condensa.

El $P_{cal.sup.}$ se determina con exactitud mediante procesos, como el especificado por (ASTM).

Para el poder calorífico inferior $P_{cal.inf}$ todos los productos de la combustión, incluyendo el vapor de agua, se supone permanecen en estado gaseoso y, por tanto, en el $P_{cal.inf}$ no se tiene en cuenta el calor de vaporización del agua.

La determinación analítica del poder calorífico inferior $P_{cal.inf}$ es difícil, pudiéndose calcular por la expresión:

$$P_{cal\ inf} = P_{cal\ sup} - 10{,}30\ (8{,}94\ x\ H_2)$$

en la que los poderes caloríficos vienen en Btu/lb, siendo H_2 el % gravimétrico de hidrógeno en el combustible. Esta ecuación incluye una corrección, por la diferencia que existe entre los procesos de combustión a volumen constante y a presión constante, y hace una deducción por la vaporización del agua durante la combustión. A la temperatura de 68ºF, la deducción es de 1030 Btu/lb_{agua}, siendo la entalpía de vaporización del agua de 1055 Btu/lb_{agua}.

XI.5.- TEMPERATURA DE IGNICIÓN

Las temperaturas de ignición relativas a las diversas sustancias combustibles, varían mucho entre sí, como se indica en la Tabla XI.10, en la que se expresan las temperaturas mínimas y campos de temperaturas para diversos combustibles y compuestos químicos que contienen los combustibles habituales, utilizados en la generación comercial de vapor.

Tabla XI.10.- Temperaturas de ignición de combustibles en aire (Valores aproximados a la presión atmosférica)

Combustible	*Azufre*	*Subcoque (char)*	*Carbono fijo (bituminoso)*	*Carbono fijo (subbituminoso)*	*Carbono fijo (antracita)*	*Acetileno*	*Etano*
Temper. ºF	*470*	*650*	*765*	*870*	*840 a 1115*	*850 a 825*	*880 a 1165*
Combustible	*Etileno*	*Hidrógeno*	*Metano*	*Monóxido de C*	*Queroseno*	*Gasolina*	
Temper. ºF	*900 a 1020*	*1065 a 1095*	*1170 a 1380*	*1130 a 1215*	*490 a 560*	*500 a 800*	

Los factores más importantes que influyen en la temperatura de ignición, son la:

- Presión a la que tiene lugar el proceso

- Velocidad con la que se caracteriza el proceso

- Configuración del recinto donde se desarrolla el proceso

- Cantidad de materiales catalíticos que pueden estar presentes en el proceso

- Uniformidad conseguida en la mezcla aire +combustible

- Fuente usada para la ignición

La temperatura de ignición $\begin{cases} \textit{Decrece cuando aumenta la presión} \\ \textit{Crece cuando se eleva el contenido de humedad del aire comburente} \end{cases}$

Las temperaturas de ignición de las materias volátiles de los carbones varían considerablemente y siempre son superiores a las del C_{fijo} presente en el carbón considerado.

La temperatura de ignición de un carbón se asume como la temperatura de ignición de su carbono fijo, ya que los componentes gaseosos del mismo carbón, sus materias volátiles, se desprenden siempre antes de que alcancen sus respectivas temperaturas de ignición.

XI.6.- TEMPERATURA ADIABÁTICA DE LA LLAMA

Es la temperatura teórica máxima que pueden alcanzar los productos de la combustión, suponiendo que no existen pérdidas de calor hacia el exterior del recinto, ni se produce disociación alguna. La temperatura adiabática es máxima cuando el $aire_{exceso}$ es nulo, es decir, cuando la cantidad de aire es la necesaria y suficiente para su combinación con todo el combustible.

El poder calorífico es el parámetro determinante de la temperatura de la llama, la cual se eleva cuando la temperatura del aire comburente aumenta.

El $aire_{exceso}$ no interviene en el proceso de combustión propiamente dicho, ya que sólo diluye y reduce la temperatura media de los productos gaseosos de la combustión.

La temperatura adiabática se determina a partir de la entalpía adiabática i_{ad} de los productos de combustión, mediante la expresión:

$$i_{ad} = \frac{P_{cal\ sup} - Calor_{latente\ del\ agua} + Calor_{sensible\ del\ aire}}{Peso_{gas\ húmedo}}$$

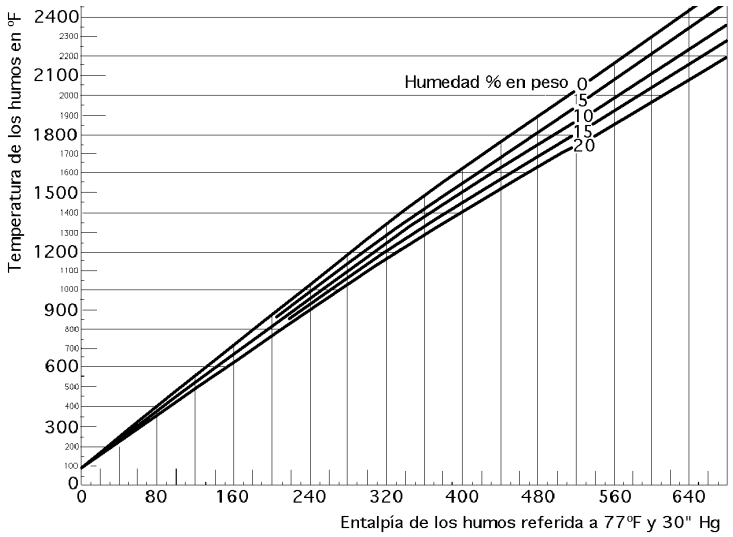
Si se conoce el contenido en humedad y la entalpía de los productos de la combustión, la temperatura teórica de la llama o de los gases se puede obtener gráficamente, a partir de la Figura XI.3. La temperatura adiabática de la llama es un valor ficticio que constituye un límite superior; las temperaturas reales de la llama son siempre menores, debido a que:

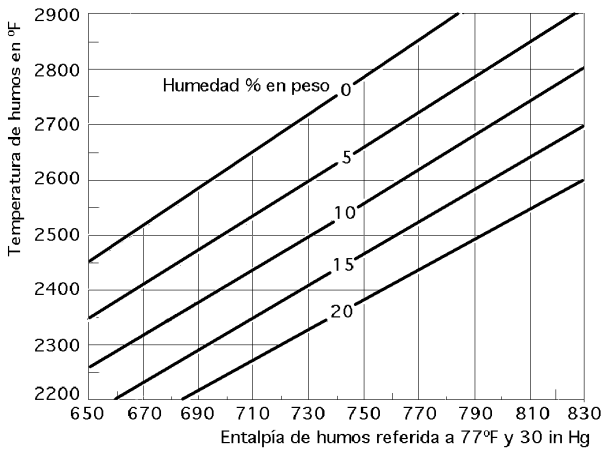
- La combustión no es instantánea ya que en el transcurso de la combustión se pierde algo de calor hacia el medio exterior; con una combustión rápida se reduciría la pérdida de calor, mientras que con una combustión lenta se podría producir una combustión incompleta (inquemados).

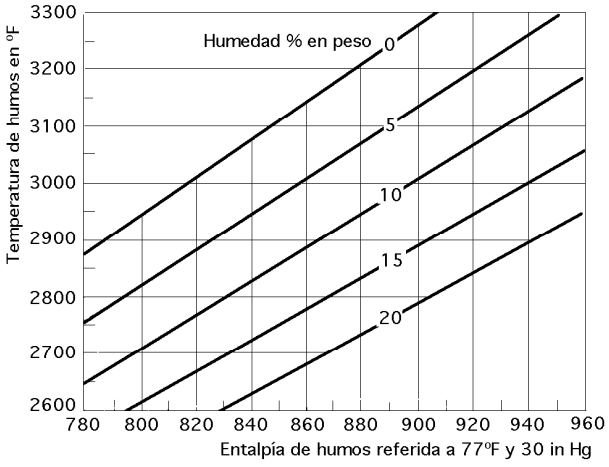
- Para temperaturas superiores a 3000°F, parte del CO_2 y del H_2O presentes en los gases se disocian y absorben energía durante el proceso de combustión.

- A 3500°F, alrededor del 10% del CO_2 presente en los humos se disocia en CO y O_2 con absorción de 4345 $\frac{Btu}{lb_{CO\ formado}}$; al mismo tiempo un 3% del H_2O se disocia en H_2 y O_2 con absorción de 61000 Btu/lb_{H2} formado.

Posteriormente, al enfriarse los gases, los productos disociados CO y H_2 se recombinan nuevamente con el O_2 y se liberan los calores previamente absorbidos; el efecto global es la disminución de la máxima temperatura real de la llama.







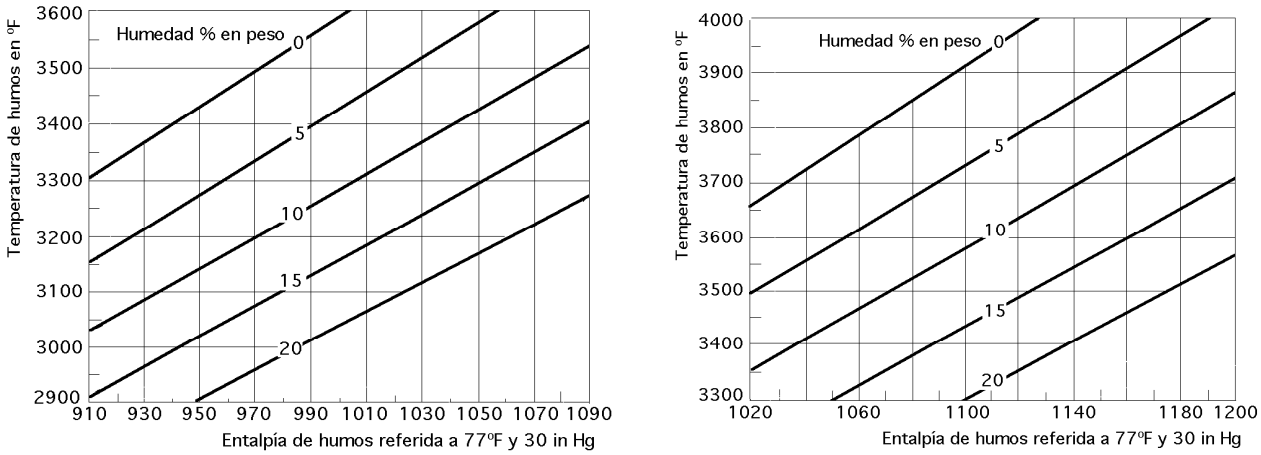


Fig XI.3.- Entalpía de humos referida a 77ºK y 30Hg

XI.7.- CÁLCULOS DE COMBUSTIÓN EN APLICACIONES COMERCIALES

A las metodologías teóricas de evaluación de la combustión, hay que añadir las relativas a aplicaciones particulares que sean importantes para la exactitud de los cálculos de combustión, como son:

- *La inyección de absorbentes del SO_2 y de otros aditivos*
- *La ceniza sólida o residuo sólido*
- *El C no quemado o inquemado*
- *El acreceos*

ABSORBENTES Y ADITIVOS.- Para reducir las emisiones contaminantes, en algunos sistemas de combustión se añaden compuestos químicos en el lado de humos del generador de vapor. Por ejemplo, en los generadores de vapor de lecho fluidificado se utiliza la caliza para reducir las emisiones de SO_2, lo que repercute en los cálculos de combustión y rendimiento, en base a las consideraciones siguientes:

- *Altera la composición de los humos, ya que reduce el SO_2 y aumenta el CO_2*
- *Incrementa la masa de material sólido de desecho, lo que se considera como ceniza de una combustión con aditivos*
- *Aumenta el aire necesario para conseguir la formación del SO_3 que posteriormente producirá el sulfato de calcio $Ca\,SO_4$*
- *Absorbe calor del combustible que se emplea en la calcinación de los carbonatos de Ca y Mg*
- *Añade energía al sistema como consecuencia de la sulfatación* $SO_2 + \frac{1}{2}\,O_2 + CaO \;\rightarrow\; Ca\,SO_4$

Los componentes de la caliza requeridos en los cálculos de combustión, son los siguientes:

$$\textit{Integrantes del reactivo : Carbonato de} \begin{cases} \textit{calcio: } CO_3Ca \\ \textit{magnesio: } CO_3Mg \end{cases} \textit{, agua e inertes}$$

Algunos procesos utilizan absorbentes derivados de la caliza que tienen compuestos reactivos como el hidróxido de calcio, $Ca(OH)_2$ y el hidróxido de magnesio, $Mg(OH)_2$.

La cantidad de absorbente se determina a partir de la relación molar $\frac{Ca}{S}$ de diseño.

La relación másica $\frac{Absorbente}{Combustible}$ se usa para referir los productos absorbentes relativos a una masa de combustible, indicando el absorbente añadido respecto a la masa de combustible.

$$\frac{Absorbente}{Combustible} = \frac{Relación\ molar\ de\ diseño\ \frac{Ca}{S}\ x\ S}{Parte\ moles\ Ca\ en\ absorbente\ en\ \frac{mol}{100\ mol_{abs}}\ x\ 32,066} = \frac{Relación\ molar\ de\ diseño\ \frac{Ca}{S}\ x\ S}{(\frac{CaCO_3}{100,089} + \frac{Ca(OH)_2}{74,096})\ x\ 32,066}$$

en la que:
- $\frac{CO_3Ca}{100,089} + \frac{Ca(OH)_2}{74,096}$ *es la parte de Ca (en moles) en el absorbente* $\frac{mol}{100\ mol_{absorbente}}$
- *S es el % en peso de azufre en el combustible*
- $CaCO_3$ *es el % en peso de carbonato cálcico en el absorbente*
- $Ca(OH)_2$ *es el % en peso de hidróxido de calcio en el absorbente*

Cuando se calientan los carbonatos de Ca y de Mg se desprende CO_2 que se incorpora a los productos de la combustión; este proceso se denomina *calcinación*.

El carbonato de magnesio se calcina rápidamente.

Sin embargo, el calcio a las temperaturas de operación típicas de los lechos fluidificados atmosféricos, no se suele calcinar en su totalidad. A efectos de diseño, se considera que una calcinación del 90% es adecuada y aceptable para las combustiones típicas de los hogares dotados con lechos fluidificados atmosféricos.

En una unidad que se encuentre en funcionamiento, en el supuesto de que exista $CaCO_3$, la fracción gravimétrica de calcinación se determina midiendo el CO_2 en el residuo.

La masa de gas añadida por el absorbente, o CO_2 añadido a los humos, se calcula por la expresión:

$$a)\ Incremento\ de\ CO_2\ debido\ al\ absorbente\ en\ \frac{lb}{10000\ Btu} =$$

$$= 44,01\ x\ incremento\ CO_2 debido\ al\ absorbente\ en\ \frac{lb}{10000\ Btu}\ x\ \frac{100}{P_{cal\ sup}} =$$

$$= 44,01\ \frac{Relación\ molar\ de\ diseño\ \frac{Ca}{S}\ x\ S}{(\frac{CaCO_3}{100,089} + \frac{Ca(OH)_2}{74,096})\ x\ 32,066}\ (\frac{Fracción\ en\ peso\ de\ CaCO_3\ calcinado\ x\ CaCO_3}{100,089} + \frac{MgCO_3}{58,32})\ \frac{100}{P_{cal\ sup}}$$

en la que:
- $CaCO_3$ *es el % en peso de* $CaCO_3$ *en el absorbente*
- $MgCO_3$ *es el % en peso de* $MgCO_3$ *en el absorbente*

b) Incremento de CO_2 debido al absorbente en $\frac{mol}{100\ lb_{abs}}$ =

$$= \frac{Absorbente}{Combustible}\left(\frac{Frac.\ en\ peso\ de\ CaCO_3\ \ calcinado\ en\ \frac{lb}{lb}\ x\ CaCO_3}{100{,}089} + \frac{MgCO_3}{58{,}32}\right)$$

La masa de agua añadida a los humos por el absorbente, incluye el agua libre y la evaporada por la deshidratación de los hidróxidos de Ca y Mg, y se calcula en la forma:

c) Agua añadida a los humos por el absorbente en $\frac{lb}{10000\ Btu}$ =

$$= 18{,}015\ x\ Moles\ de\ agua\ debidos\ al\ absorbente\ en\ \frac{mol}{100\ lb_{abs}}\ x\ \frac{100}{P_{cal\ inf}} =$$

$$= 18{,}015\ x\ \left(H_2O + \frac{Ca(OH)_2}{74{,}096} + \frac{Mg(OH)_2}{84{,}321}\right)\ x\ \frac{100}{P_{cal\ sup}}$$

en la que: $\begin{cases} Ca(OH)_2 \text{ es el \% en peso de hidróxido de calcio en el absorbente} \\ Mg(OH)_2 \text{ es el \% en peso de hidróxido de magnesio en el absorbente} \\ H_2O \text{ es el agua libre debida al absorbente, } (mol/100\ lb_{abs}) \end{cases}$

El absorbente gastado se refiere a los productos sólidos residuales procedentes de la utilización de la caliza, y es la suma de la masa total de los componentes reactivos tras la calcinación $CaCO_3$, CaO, MgO y el SO_3, formados en la correspondiente reacción de sulfatación; su valor se expresa en la forma:

d) Sólidos añadidos a humos en $\frac{lb}{10000\ Btu}$ = *Sólidos añadidos a humos en* $\frac{lb}{lb_{comb}}\ x\ \frac{10000}{P_{cal\ sup}}$

en la que:

$$Sólidos\ añadidos\ a\ humos\ en\ \frac{lb}{lb_{comb}} = \frac{Absorbente\ (lb)}{Combustible\ (lb)} - (0{,}4401\ x\ moles\ CO_2\ \ desde\ absorbente\ en\ \frac{mol}{100\ mol_{abs}}) -$$

$$- (0{,}1805\ x\ moles\ H_2O\ desde\ absorbente\ en\ \frac{mol}{100\ mol_{abs}}) + (250\ S\ x\ Fracción\ másica\ capturada\ de\ S\ del\ combust.\ en\ \frac{lb}{lb})$$

S es el % en peso de azufre en el combustible

Residuos y desechos.- La diferencia entre residuos y desechos radica en que los residuos son productos sólidos que abandonan el generador de vapor, mientras que los desechos son basuras sólidas municipales y los combustibles derivados de ellas.

$C_{inquemado}$.- En las aplicaciones comerciales de los combustibles sólidos, no resulta práctico quemar completamente el combustible; de hecho, siempre aparece algo de combustible en los residuos, como $C_{inquemado}$, por ejemplo en forma de CO presente en los humos.

El H_2 contenido en el combustible se consume por completo en cualquier combustión.

Los costes de inversión y de energía necesarios para quemar esos residuos combustibles, son mayores que las pérdidas de energía a causa de ellos.

La evolución del equipo de combustión para reducir las emisiones de NO_x ha conducido a algunas tolerancias en el incremento del $C_{inquemado}$ y del CO.

El $C_{inquemado}$ repercute en los cálculos de combustión y representa una pérdida de eficiencia, por lo que hay que proceder a su medida, determinando el C_{total} presente en la ceniza de la caldera, según la norma ASTM-D3278.

Si hay presencia de carbonatos, como es el caso de las calderas de lecho fluidificado que utilizan caliza, en el C_{total} se debe incluir el C correspondiente a los carbonatos.

El CO_2 correspondiente a la ceniza, se determina según el método que especifica la norma ASTM-D1756; la masa total de C se corrige para referirla a la masa de $C_{inquemado}$, restando de aquélla el C correspondiente al CO_2 de la forma $\frac{12,1}{44,91}\ CO_2$

El $C_{inquemado}$ determinado se contabiliza como % de C presente en la ceniza, y se cuantifica como % de $C_{inquemado}$ referido a la unidad de combustible, por la expresión:

$$C_{inquemado}\,en:\ \frac{lb}{100\ lb_{comb}} = (\%\ en\ peso\ de\ C_{inquemado}\ en\ residuo)\ (Fracción\ de\ residuo\ en\ combustible\ \frac{lb}{lb_{comb}})$$

$$con:\ Fracción\ de\ residuo\ en\ combustible = \frac{(\%\ ceniza\ en\ combustible) + (100 \times Fracción\ absorbente\ gastado\ en\ \frac{lb}{lb_{comb}})}{100 - (\%\ de\ C_{inquemado}\ en\ residuo)}$$

Exceso de aire ($aire_{exceso}$).- Para asegurar una combustión completa en las aplicaciones comerciales, se necesita más aire que el estequiométrico, ya que el $aire_{comburente}$ y el *combustible* no se mezclan perfectamente. El $aire_{exceso}$ no interviene en la combustión y sale por la chimenea formando parte de los humos; valores del $aire_{exceso}$ para diversos combustibles y sistemas de combustión, se presentan en la Tabla XI.11.

El $aire_{exceso}$ a la salida del generador de vapor debe ser superior al $aire_{exceso}$ requerido en el equipo de quemadores, para:

$$\begin{cases} Tener\ en\ cuenta\ las\ infiltraciones\ de\ aire\ a\ través\ de\ la\ fumistera\ en\ unidades\ con\ tiro\ equilibrado \\ Computar\ el\ aire\ de\ sellado\ que\ se\ usa\ en\ unidades\ con\ tiro\ presurizado \end{cases}$$

En las unidades modernas construidas con paredes membrana, el $aire_{exceso}$ a la salida de la

unidad es un $1\% \div 2\ \%$ más elevado, que el $aire_{exceso}$ requerido para el equipo de combustión.

En unidades antiguas, las infiltraciones a través de la fumistería pueden ser importantes, por lo que si se pretende operar a la salida del generador de vapor con menor $aire_{exceso}$, se puede llegar a que haya insuficiente aire en los quemadores, lo que provocaría unas pobres características de combustión.

Tabla XI.11.- $Aire_{exceso}$ requerido en equipos de combustión

COMBUSTIBLE	*TIPO DE HOGAR O QUEMADOR*	*$Aire_{exceso}$ % peso*
Carbón pulverizado	*Hogar refrigerado por agua con extracción húmeda o seca de ceniza*	*15 a 20*
	Hogar parcialmente refrigerado por agua	*15 a 40*
Carbón troceado	*Hogar ciclón, equilibrado o presurizado*	*13 a 20*
	Combustión en lecho fluidificado	*15 a 20*
Carbón	*Hogar mecánico*	*25 a 35*
	Hogar mecánico con parrilla vibrante refrigerada por agua	*25 a 35*
	Hogar mecánico con parrilla sinfín	*25 a 35*
	Hogar mecánico con alimentación inferior	*25 a 40*
Fuelóleo	*Quemadores tipos cortatiros*	*3 a 15*
Gas natural *Gas batería coque* *Gas refinería*	*Quemadores tipos cortatiros*	*3 a 15*
Madera / virutas	*Parrillas sinfín y vibrante refrigerada por agua*	*20 a 25*
	Combustión en lecho fluidificado	*5 a 15*
Comb. derivados de desechos	*Hogar refrigerado agua / parrilla sinfín*	*40 a 60*
Residuos sólidos municipales	*Hogar refrigerado por agua con refractario y parrilla oscilante*	*80 a 100*
	Horno rotativo	*60 a 100*
Bagazo	*Todos los hogares*	*25 a 35*
Licor negro	*Hogares recuperadores de Kraft y pulpa*	*15 a 20*

XI.8.- CÁLCULOS DE COMBUSTIÓN Y RENDIMIENTO

Los cálculos de combustión constituyen el punto de partida para el diseño y determinación de las características funcionales de los generadores de vapor y sus diversos sistemas y equipos, que establecen:

- Las cantidades de los productos componentes que intervienen en la química del proceso de combustión (aire, humos y absorbente)

- La eficiencia del proceso de combustión

- La cantidad de calor desprendido en la combustión

La unidad utilizada para cuantificar los productos en los cálculos de combustión es: $\frac{lb}{10000\,Btu}$

Para combustibles gaseosos, el análisis volumétrico se convierte en análisis gravimétrico.

Aire$_{comburente}$- aire$_{teórico}$.- El $aire_{comburente}$ es el $aire_{total}$ que precisa el equipo de combustión igual a la suma del $aire_{teórico}$ y el $aire_{exceso}$.

El $aire_{teórico}$ es la mínima cantidad de aire que se requiere para la conversión completa del C, H_2 y S presentes en el combustible, en gases de combustión.

Si se utiliza caliza u otro aditivo para controlar la emisión de compuestos sulfurosos, algo de S tampoco pasa a SO_2 requiriéndose oxígeno adicional según la reacción de sulfatación:

$$CaO + SO_2 + \frac{1}{2} O_2 \Rightarrow CaSO_4$$

El $aire_{real}$ se calcula a partir del $aire_{teórico}$, que se corrige por el $C_{inquemado}$ y por la reacción de sulfatación, mediante las ecuaciones:

$$Aire_{teórico} en \frac{lb}{10000\ Btu} = Aire_{teórico} en \frac{lb}{100\ lb_{comb}} \frac{100}{P_{cal\ sup}}$$

$$Aire_{teórico} en \frac{lb}{100\ lb_{comb}} = (11{,}51 \times \%\ en\ peso\ C_{quemado}) + 34{,}29\ H + 4{,}321\ S\ (1 + \frac{Fracción\ de\ S_{captur.absorb.}}{2}) - 4{,}32\ O_2$$

$$en\ la\ que: \begin{cases} \%\ en\ peso\ C_{quemado} = \%\ C_{comb.} - \%\ de\ C_{inquemado} \\ H_2\ es\ el\ \%\ en\ peso\ de\ H_{2(en\ el\ combustible)}\ ;\ O_2\ es\ el\ \%\ en\ peso\ de\ O_{2(en\ el\ comb.)} \\ S\ es\ el\ \%\ en\ peso\ de\ S_{(en\ el\ comb.)} \end{cases}$$

$$La\ fracción\ de\ S_{capturado\ por\ el\ absorbente}\ viene\ en\ lb/lb_{azufre}\ y\ es = \frac{Masa\ de\ S_{retenida}}{Masa\ de\ S_{presente\ en\ el\ comb.}}$$

Su valor es cero, salvo que en el hogar se utilice un absorbente, como la caliza, para reducir las emisiones de SO_2.

Para cálculos de diseño, se estima la pérdida de $C_{inquemado}$ mediante la expresión:

$$\%\ C_{inquemado} = Pérdida\ por\ C_{inquemado} \times \frac{P_{cal\ sup}}{14500}$$

$$Las\ masas\ de \begin{cases} aire_{seco} \\ agua_{en\ el\ aire} \\ aire_{húmedo} \end{cases} se\ calculan\ por\ las\ expresiones:$$

$$Masa\ aire_{seco} = Masa\ aire_{teórico} \times (1 + \frac{\%\ aire_{exceso}}{100})$$

$$Masa\ agua_{en\ el\ aire} = W \times Masa\ aire_{seco}$$

$$Masa\ aire_{húmedo} = Masa\ aire_{seco} + Masa\ humedad\ aire = Masa\ aire_{seco}\ (1 + W)$$

en las que: $\begin{cases} Las\ masas\ de\ aire\ vienen\ dadas\ en\ lb/10000\ Btu \\ W\ es\ la\ humedad\ del\ aire\ en\ lb/lb_{aire\ seco} \end{cases}$

Gases de combustión.- Los productos de la combustión (salvo los productos sólidos o residuos de la misma) se identifican como gases o humos húmedos. El gasto másico del flujo de humos húmedos se utiliza para los cálculos de la transferencia de calor y para el diseño de los equipos auxiliares.

El total de los productos gaseosos, excluyendo la humedad, se identifica como gases secos o humos secos; este parámetro se utiliza para el cálculo de rendimientos y para la determinación de la entalpía correspondiente a los gases de combustión.

El humo húmedo se compone de:

- *Gas húmedo procedente del combustible (combustible sin ceniza, $C_{inquemado}$ y $S_{capturado}$)*
- *Aire comburente*
- *Humedad presente en el aire comburente*
- *Humedad adicional, como la del vapor de atomización*
- *Absorbente del CO_2 (si se utiliza) y de la humedad procedente del absorbente implicado en el proceso*

El humo seco es la diferencia entre los gases húmedos y el total de los términos húmedos.

El humo húmedo procedente del combustible es el de la masa inflamable que hay en el combustible sin ceniza, menos *(el % de $C_{inquemado}$ + el % de $S_{capturado}$)*, si es que se utiliza absorbente para la reducción de las emisiones de SO_2:

$$Gas_{húm.\ procedente\ del\ comb.} = \{100 - \%\ peso\ ceniza_{comb.} - \%\ C_{inquemado} - (S \times Fracción\ en\ peso\ S_{capturado})\}\ \frac{100}{P_{cal\ sup}}$$

El ***agua procedente del combustible*** es la suma del agua:

- *Presente en el combustible*
- *Producida por la combustión del H_2 del combustible*

$$El\ agua\ procedente\ del\ combustible\ en\ \frac{lb}{10000\ Btu} = (8{,}94\ H_2 + H_2O)\ \frac{100}{P_{cal\ sup}}$$

en la que: $\begin{cases} H_2\ \ es\ el\ \%\ en\ peso\ de\ H_{2(en\ el\ comb)} \\ H_2O\ es\ el\ \%\ en\ peso\ de\ humedad\ en\ el\ combustible \end{cases}$

El peso total de los gases húmedos es la suma del: $\begin{cases} Aire\ seco \\ Contenido\ de\ agua\ en\ el\ aire \\ Gas\ húmedo\ procedente\ del\ combustible \end{cases}$, y en algunos casos, del agua adicional y la procedente del absorbente, es decir:

$$Peso\ gases_{húmedos}\ (\frac{lb}{10000\ Btu}) = Masa\ aire_{seco} + Masa\ humedad\ aire + Masa\ gases_{húm.\ combus.} + Agua_{(adic.\ +\ absorb.)}$$

La ***humedad total de los humos*** es la suma del agua $\begin{cases} procedente\ del\ combustible \\ presente\ en\ el\ aire \end{cases}$, y cuando sea aplicable, del agua adicional y del agua procedente del absorbente, es decir:

$$Humedad\ total\ humos = Agua_{comb} + Agua_{aire} + Agua_{(adicional\ +\ absorbente)}$$

El $humo_{seco}$ es la diferencia entre los $gases_{húmedos}$ y la humedad total presente en los humos:

$$Masa\ humos_{secos}\ (\frac{lb}{10000\ Btu}) = Masa\ humos_{húmedos} + Humedad\ humos$$

El porcentaje de humedad en los humos es un parámetro que se utiliza para determinar la entalpía de los mismos y viene dado por la expresión:

$$\%\ humedad\ humos = 100\ \frac{Humedad\ total\ humos}{Peso\ total\ gases_{húmedos}}$$

En la mayoría de los combustibles, la masa de sólidos presentes en los humos es insignificante y se puede ignorar; si la masa de residuos es significativa, los sólidos prácticamente no influyen en el volumen del caudal del flujo de humos; sin embargo, los sólidos aumentan la entalpía de los humos, lo que se debe tener en cuenta cuando el contenido en ceniza del combustible sea superior a 0,15/10000 Btu, o si se usa absorbente.

La ***masa de residuos procedentes del combustible***, expresada en $\frac{lb}{10.000Btu}$, se calcula en la forma:

$$Masa\ residuo_{proc.\ comb.} = (\%\ en\ peso\ ceniza_{comb.} + \%\ C_{inquemado})\ \frac{100}{P_{cal.sup.}}$$

El % de residuos sólidos presentes en los humos, se determina mediante la ecuación:

$$\%\ Residuos = \frac{Masa\ residuo_{proc.comb.} + Masa\ absorbente\ gastado}{Masa\ humos\ sin\ sólidos}\ x\ 100$$

Eficiencia del combustible.- Se denomina eficiencia η del combustible o rendimiento del generador de vapor, a la relación entre las energías de salida y de entrada, en la forma:

$$\eta = 100\ x\ \frac{Energía\ salida}{Energía\ entrada\ combustible} = 100\ x\ \frac{Energía\ salida}{Gasto\ másico_{comb}\ x\ P_{cal.sup.}}$$

El concepto de energía de salida aplicado al generador de vapor, es el calor absorbido por el vapor de trabajo, capaz de generar energía útil fuera del recinto del generador de vapor.

El concepto de energía de entrada corresponde a la máxima energía disponible, cuando el

combustible se quema completamente, es decir, el gasto másico de combustible multiplicado por el $P_{cal.sup}$ del mismo.

Un balance de energía en el generador de vapor, en régimen permanente, es igual a la energía de entrada procedente del combustible, menos la energía a la salida del generador:

El *concepto de <u>créditos térmicos</u>* $Créd_{térm}$ en Btu/lb, comprende el conjunto de energías:

- Térmicas asociadas a los flujos que entran en el recinto del generador de vapor

- Procedentes de los servicios auxiliares

Las pérdidas térmicas $(Pérd_{térm})$ son las $\begin{cases} \textit{energías salientes procedentes del generador de vapor} \\ \textit{pérdidas de calor al medio exterior} \end{cases}$

El balance energético correspondiente al generador de vapor:

$$\Delta E = Energía\ entrada_{comb.} - Energía\ salida_{gen.vapor} - Pérd_{térmicas}$$

Si $Créd_{térm}$ y $Pérd_{térm}$ se expresan en % respecto del combustible a la entrada, la eficiencia es:

$$\eta = 100 + Créd_{térm} - Pérd_{térm}$$

La correlación más general para el cálculo de créditos por unidad de masa a la entrada, se obtiene al expresar la cantidad correspondiente a cada constituyente individual, en la forma:

$$\%\ Créd_{térm} = \frac{Flujo_{grav.}\ c_{espec.\ medio}\ (T_{ent} - T_{ref})}{100} = \frac{Flujo_{grav}\ (i_{ent} - i_{ref})}{100}$$

Si la energía de entrada y las pérdidas térmicas se expresan en % respecto del combustible a la entrada, la eficiencia es:

$$\eta = 100 + \frac{Energía_{entrada\ comb.} - Pérd_{térmicas}}{100} = 100 + \frac{Flujo_{grav}\ (i_{ent} - i_{ref})}{100} - \frac{Flujo_{grav.}\ (i_{sal} - i_{ref})}{100}$$

La temperatura de referencia se suele tomar igual a la temperatura del aire que sale de los ventiladores de tiro forzado, o a la del aire que entra en el calentador de humos/aire.

En el caso de que el suministro principal de $aire_{comburente}$ proceda de serpentines:

- Precalentadores de aire por vapor

- Alimentados con vapor de la caldera

la temperatura de referencia se toma igual a la del aire a la entrada de los precalentadores; la ventaja de utilizar esta referencia es que se elimina el cálculo de los créditos debidos a la temperatura del aire de entrada y a la humedad en el aire.

Pérdidas por radiación y convección.- Las pérdidas por radiación comprenden el calor perdido hacia el medio ambiente a través de las superficies del recinto del generador de vapor, incluyendo los conductos de aire y humos que hay entre el primero y el último de los recuperadores de calor, a la salida de la caldera o a la salida del calentador de aire; estas pérdidas dependen de:

- La diferencia de temperaturas entre la promedia de $\begin{cases} \textit{la superficie del cerramiento} \\ \textit{el medio ambiente } 50^{o}F \end{cases}$

- La velocidad media del aire atmosférico en la superficie del cerramiento, de 100 ft / min ó 0,5 m / seg

La tendencia actual es calcular las pérdidas de calor por *radiación-convección* sobre el área plana proyectada de la unidad, utilizando coeficientes estándar de transferencia de calor

Otras pérdidas no consideradas.- Durante la fase de diseño de una unidad generadora de vapor, sólo se pueden calcular las pérdidas de energía más importantes teniendo en cuenta los datos de diseño. Las pérdidas no calculadas, de menor importancia, se estiman a partir de los datos disponibles.

El fabricante del generador de vapor añade al global de las pérdidas un factor de seguridad, para tener en cuenta las desviaciones inesperadas de las características funcionales. Los valores típicos de estos márgenes, para el diseño, son los siguientes:

- Un 1% de la entrada de calor, cuando se trata de combustibles sólidos, líquidos y carbones que tengan buenas características de combustión y buenas propiedades frente a escorificación y ensuciamiento

- Un 1,5% o más del calor de entrada, en el caso de combustibles que cuenten con pobres características de combustión y con malas propiedades frente a escorificación y enjuiciamiento

El margen del fabricante no se tiene en cuenta al medir eficiencias o ensayar rendimientos reales, ya que sólo se aplica como factor de seguridad frente a las características de funcionamiento esperadas.

XI.9- ENTALPÍA

Entalpía del aire y gases.- La entalpía es un indicativo del nivel energético de una sustancia, a presión y temperatura determinadas; se utiliza en los cálculos de $\begin{cases} \textit{rendimiento térmico} \\ \textit{pérdidas de calor} \\ \textit{balances de energía} \\ \textit{transferencia de calor} \end{cases}$

La influencia de la presión en la entalpía se puede considerar despreciable a efectos prácticos, en casi todos los campos de la Ingeniería, excepto cuando se trate de vapor o agua a muy alta presión. Las entalpías de la mayor parte de los gases que intervienen en los cálculos de combustión, se pueden representar gráficamente mediante una curva de segundo grado, en función de la temperatura, por el polinomio:

$$i = a\,T^2 + b\,T + c \quad \Rightarrow \quad T = \frac{-\,b + \sqrt{b^2 - 4\,a\,(c - i)}}{2\,a}$$

La determinación de la entalpía en los gases que se consideran en los cálculos de combustión, a la temperatura T(ºF), se puede realizar por medio de la ecuación anterior, empleando los coeficientes específicos que se presentan en la Tabla XI.12.

Tabla XI.12.- Coeficientes de la ecuación de entalpía $i = a\,T^2 + b\,T + c$) para el aire y gases

Temperatura ºF	Coeficientes a	b	c	Coeficientes a	b	c
	Aire seco (a)			Nitrógeno atmosférico (e)		
0-500	$8{,}299003.10^{-6}$	0,2383802	- 18,43552	$5{,}484835.10^{-6}$	0,2450592	-18,9332
500-1500	$1{,}474577.10^{-5}$	0,233247	- 17,47061	$1{,}496168.10^{-5}$	0,2362762	- 16,91089
1500-2500	$8{,}137865.10^{-6}$	0,252605	-31,64983	$8{,}654128.10^{-6}$	0,2552508	- 31,18079
2500-4000	$4{,}164187.10^{-6}$	0,2726073	-56,82009	$3{,}953408.10^{-6}$	0,2798019	- 60,92904
	Aire húmedo (b)			Oxígeno		
0-500	$8{,}577272.10^{-6}$	0,2409682	- 18,63678	$1{,}764672.10^{-5}$	0,2162331	- 16,78533
500-1500	$1{,}514376.10^{-5}$	0,2357032	- 17,64590	$1{,}403084.10^{-5}$	0,2232213	- 19, 37546
1500-2500	$8{,}539973.10^{-6}$	0,2551966	- 31,89248	$6{,}424422.10^{-6}$	0,2438557	- 33,21262
2500-4000	$4{,}420080.10^{-6}$	0,2758523	- 58,00740	$4{,}864890.10^{-6}$	0,2517422	- 60,92904
	Vapor de agua			Dióxido de carbono		
0-500	$2{,}998262.10^{-5}$	0,4400434	- 34,11883	$5{,}544506.10^{-5}$	0,1943114	- 15,23170
500-1500	$4{,}575975.10^{-5}$	0,4246434	- 30,38311	$2{,}560224.10^{-5}$	0,227006	- 24,11829
1500-2500	$3{,}947132.10^{-5}$	0,4475365	- 50,55380	$1{,}045045.10^{-5}$	0,2695922	- 53,77107
2500-4000	$2{,}423208.10^{-5}$	0,5252888	- 149,06430	$4{,}595554.10^{-6}$	0,2989397	- 90,77172
	Humo seco (c)			Dióxido de azufre		
0-500	$1{,}582949.10^{-5}$	0,2327271	- 18,03014	$3{,}420275.10^{-5}$	0,1439724	- 11,25959
500-1500	$1{,}725460.10^{-5}$	0,2336275	- 18,57088	$1{,}366242.10^{-5}$	0,1672132	- 17,74491
1500-2500	$8.957486.10^{-6}$	0,257825	- 36,21436	$1{,}045045.10^{-5}$	0,1923931	- 34,83202
2500-4000	$4{,}123110.10^{-6}$	0,2821454	- 66,50061	$4{,}595554.10^{-6}$	0,2047152	- 50,27839
	Gas escape turbina (d)			Monóxido de carbono		
0-500	$1{,}692527.10^{-5}$	0,2327271	- 18,02865	$5{,}544506.10^{-5}$	0,1943114	- 15,23170
500-1500	$1{,}726157.10^{-5}$	0,2336275	- 18,57088	$2{,}559673.10^{-5}$	0,2269866	- 24,10722
1500-2500	$8{,}955249.10^{-6}$	0,257825	- 36,21585	$1{,}044889.10^{-5}$	0,269504	- 53,79888
2500-4000	$4{,}123110.10^{-6}$	0,2821454	- 55,80848	$4{,}530355.10^{-6}$	0,2987122	- 90,45853
	Ceniza / SiO_2					
0-500	$7{,}735829.10^{-5}$	0,1702036	- 13,36106			
500-1500	$2{,}408712.10^{-5}$	0,2358873	- 32,88512			
1500-2500	$1{,}394.10^{-5}$	0,2324186	- 4,85559			
2500-4000	$1{,}084.10^{-5}$	0,246019	- 19,48141			

(a) Aire seco, de composición en volumen: O_2= 20,847%, N_2= 78,086%, Ar= 0,934% y CO_2= 0,033%

(b) Aire húmedo conteniendo 0,013 lb agua / lb aire seco

(c) Gas seco compuesto por: O_2= 3,5%, CO_2= 15,4%, SO_2= 0,1% y N_{2a}= 81,1%.

(d) Gas de escape de turbina compuesto en volumen por: O_2= 16,97%, CO_2= 2,97% y N_{2a}= 80,06% (fuelóleo nº 2 con exceso de aire del 400%)

(e) N_{2a} compuesto por nitrógeno atómico, Ar y CO_2 en aire estándar

Las curvas de correlación indican que los valores facilitados tienen un error del orden de:

± 0,2 Btu / lb, para entalpías inferiores a 40 Btu / lb

± 0,2 Btu / lb, para entalpías superiores a 40 Btu / lb

Para una mezcla de gases, como puede ser el $\begin{cases} aire_{seco} + vapor_{agua} \\ humos + vapor_{agua} \end{cases}$, los coeficientes (a, b, c) se determinan con la expresión gravimétrica:

$$n_{mezcla} = \sum x_i n_i \text{ , en la que : } \begin{cases} x_i \text{ es la fracción gravimétrica del componente } i \\ n_i \text{ es el coeficiente a, b, c para el componente } i \\ n_{mezcla} \text{ es el coeficiente equivalente a, b, c para la mezcla} \end{cases}$$

Las Fig XI.3 y 4 proporcionan valores gráficos de las entalpías correspondientes a humos y aire estándar.

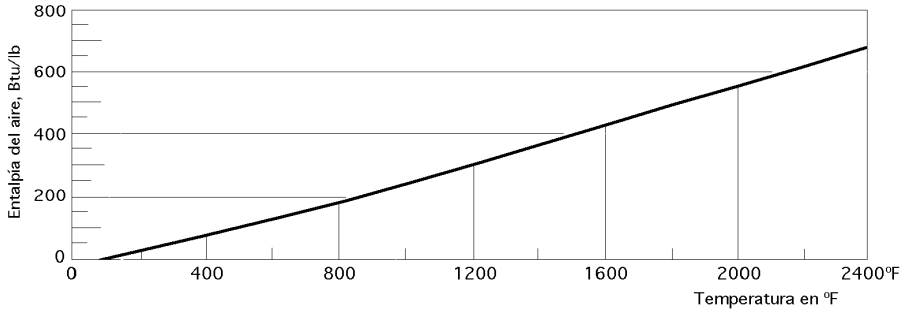


Fig XI.4.- Entalpía del aire, compuesto por las fracciones másicas 0,987 de $aire_{seco}$ y 0,013 de $aire_{húmedo}$ a la temperatura de referencia de 77°F y presión de 30"Hg

Entalpía de sólidos y combustibles.- Las entalpías del carbón, caliza y fuelóleo se evalúan con bastante exactitud, por medio de las expresiones:

$$i_{carbón} = \{(1 - W_F)\,(0{,}217 + 0{,}002481\, Materias_{vol.}) + W_F\}\,(T - 77)$$

$$i_{caliza} = \{(1 - W_F)\, i_{caliza\ seca} + W_F\}\,(T - 77) = \left| i_{caliza\ seca} = 0{,}0001128\, T^2 + 0{,}179\, T - 14{,}45 \right| =$$

$$= \{(1 - W_F)\,(0{,}0001128\, T^2 + 0{,}179\, T - 14{,}45) + W_F\}\,(T - 77)$$

$$i_{fuelóleo} = C_1 + C_2\,(API) + C_3\ T + C_4\,(API)\,T + \{C_5 + C_6\,(API)\}\,T^2$$

$$API = \frac{141{,}5 - 131{,}5\,(SPGR)}{Densidad_{apar.\,(adim.)}} = \frac{141{,}5}{Densidad_{apar.\,(adim.)}} - 131{,}5$$

en las que: $\begin{cases} W_F \text{ es la fracción gravimétrica de humedad en el carbón o en la caliza} \\ Materias_{volátiles} \text{ , son las materias volátiles sobre puro (seco y sin ceniza), \%} \\ C_1 = -30{,}016\ ;\ C_2 = -0{,}11426\ ;\ C_3 = 0{,}373\ ;\ C_4 = 0{,}00143\ ;\ C_5 = 0{,}0002184\ ;\ C_6 = 0{,}0000007 \end{cases}$

XI.10.- MEDIDA DEL EXCESO DE AIRE *($aire_{exceso}$)*

Una cantidad de aire escasa puede ser la causa de una gran cantidad de combustible inquemado y puede constituir un riesgo contra la seguridad de las personas y de la instalación. Si la cantidad de aire comburente es demasiado grande, el funcionamiento de la unidad implica un aumento

de las pérdidas de calor en la chimenea.

Análisis de humos.- Los principales componentes de los gases de combustión son, el CO_2, N_2 y H_2O; el $aire_{exceso}$ se determina midiendo el O_2 y CO_2 contenidos en los humos.

La forma en la que se obtiene la muestra de los gases de combustión, tanto en base húmeda como en base seca, es la siguiente:

Cuando se extrae una muestra de un flujo de gases, normalmente el vapor de agua condensa y la muestra se considera como en base seca, la cual se aspira a través de agua a temperatura ambiente, para asegurar que esté libre de vapor de agua

Cuando se efectúa una medida in situ de una muestra de humo con un analizador, o cuando se toman las precauciones precisas para que la humedad de la muestra no condense, se obtiene una muestra en base húmeda

La cantidad de oxígeno O_2 en los humos es muy significativa para definir el estado real de la combustión, lo que constituye una indicación bastante exacta del $aire_{exceso}$; su existencia demuestra que se ha introducido más O_2 que el realmente utilizado.

En el supuesto de una combustión completa:

- Un bajo valor de O_2 indica un moderado $aire_{exceso}$ y, por tanto, pérdidas normales en la chimenea

- Altos valores de O_2 indican pérdidas mayores en la chimenea

La Fig XI.5 es un diagrama de combustión volumétrica con $humos_{secos}$, que se utiliza en los ensayos de campo, y correlaciona O_2, CO_2 y N_{2a}.

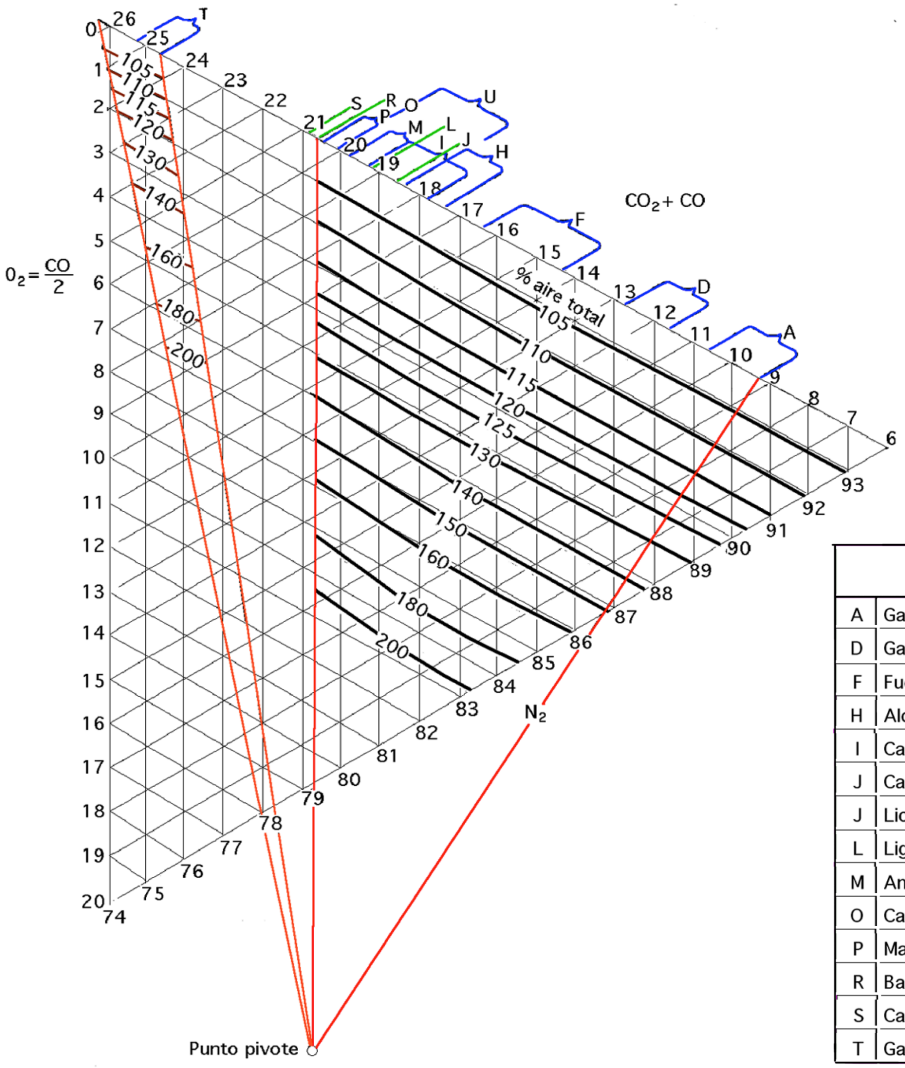
- Para la combustión uniforme y completa de un combustible, todos los puntos representativos tienen que estar alineados en una recta (recta de combustión), que pasa por el punto pivote

- La recta de combustión se puede orientar pero siempre pasando por el punto pivote, tal como se indica para diversos combustibles.

- En el diagrama se resaltan también las líneas de $aire_{exceso}$, observándose que el exceso de aire es prácticamente constante con un O_2 dado, para una amplia gama de combustibles.

- En una muestra seca o húmeda de humos, la cantidad de O_2 es un indicativo fiable del $aire_{exceso}$, ya que éste no es sensible a las variaciones de humedad en los distintos tipos de combustibles

En el funcionamiento de calderas hay que hacer un seguimiento continuo del O_2 presente en los humos, mediante un analizador que determine su nivel en base húmeda. El resultado de los ensayos con un determinado combustible, corresponde a puntos representativos situados en la recta de combustión, con una tolerancia del orden de 0,2 en la relación O_2/CO_2.



Combustible		CO_2 máximo % en volumen
A	Gas Batería coque (8% CO)	9,23 a 10,6
D	Gas natural	11,6 a 12,7
F	Fuelóleo	14,25 a 16,35
H	Alquitrán y brea	17,5 a 18,4
I	Carbón bituminoso	17,7 a 19,3
J	Carbón vegetal	18,6
J	Licor negro sin sal aglutinada	18,6
L	Lignito, coque	19,2
M	Antracita	19,3 a 19,85
O	Casca para curtir	20,1
P	Madera	20,1 a 20,5
R	Bagazo	20,65
S	Carbono puro	20,9
T	Gas horno alto	24,6 a 25,3

Para combustión uniforme completa, todos los puntos han de estar sobre rectas que deben pasar por el punto pivote

Fig XI.5.- Ábaco de combustión volumétrica humos secos

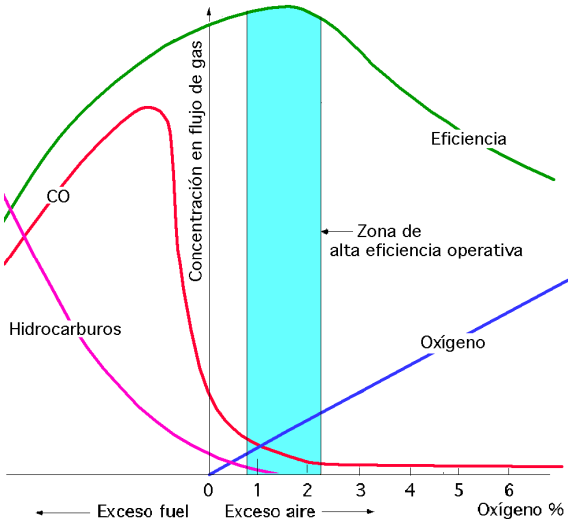


Fig XI.6.- Eficiencia de la combustión en función del exceso de fuel y del aire$_{exceso}$

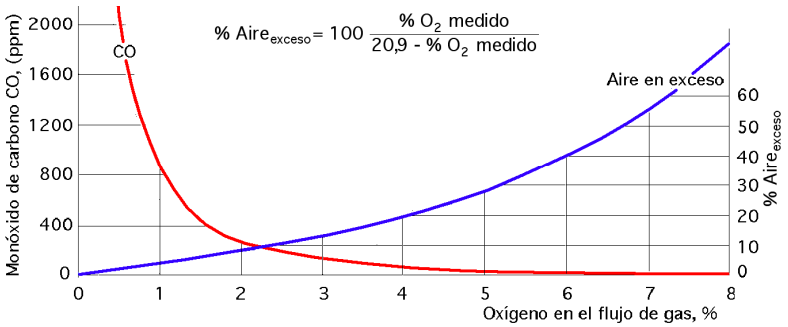


Fig XI.7.- Relación entre el aire$_{exceso}$, el CO y el oxígeno en el flujo de gases

Toma de muestras de los humos.- Para asegurar una muestra de humo representativa, su toma se hace siempre en un mismo número de puntos. Para una vigilancia normal de las características funcionales y operativas, se deben considerar en cada conducto de humos secciones del orden de 9 ft^2 (0,8 m^2), con 24 puntos de toma de muestras por sección transversal de flujo.

XI.11.- ENSAYO DE COMBUSTIBLES HETEROGÉNEOS

Cuando se realiza la evaluación de las características operativas de un generador de vapor que quema un combustible heterogéneo, como basuras o desechos sólidos urbanos, no es posible obtener una muestra representativa del combustible, ya que la composición de las basuras puede variar mucho. Para el diseño de calderas que las queman, los datos se concretan en el análisis elemental del combustible promedio y en la variación de los componentes, humedad y ceniza; los cálculos de diseño son los mismos que los de calderas que queman combustibles homogéneos.

Cuando se quema un combustible heterogéneo, para evaluar sus características medias y determinar el rendimiento de la caldera, la práctica industrial más generalizada consiste en considerar la caldera como un calorímetro. Para calcular el rendimiento de la unidad, el método emplea los mismos principios que los utilizados cuando se analiza el combustible; la diferencia radica en que el régimen del flujo y el contenido en humedad de los mismos se miden directamente, basándose en el análisis del combustible y en la medida del O_2 presente en los humos.

Otras medidas adicionales que se requieren respecto a los métodos convencionales, son:

- *Flujo de humos y humedad presente en los mismos*
- *O_2 y CO_2 en los humos*
- *Régimen de flujo de residuos en los principales puntos de extracción*

Para hacer el ensayo se calculan el *aire$_{exceso}$*, el peso de los *humos$_{secos}$* y el agua evaporada procedente del combustible; se determinan el peso de los humos:

- *Húmedos y su contenido en humedad*
- *Secos que se calcula como diferencia entre las dos cifras anteriores*

La composición de los humos se determina midiendo el O_2 y el CO_2

El nitrógeno $N_{2a} = 100 - (O_2 + CO_2)$

El $N_{2(humos)} = N_{2a}$ *, con un peso molecular de 28,16 lb / mol*

El $N_{2(combust)}$ *se desprecia, porque los quemadores de basura siempre operan con elevado* $aire_{exceso}$

La humedad global presente en los humos puede proceder de vapores o de líquidos:

- *La procedente de vapores se debe:*
  - *A la humedad del aire*
  - *Al vapor de atomización*
  - *Al vapor de sopladores*
- *La procedente de líquidos se debe a la:*
  - *- presente en el combustible*
  - *- que se forma por la combustión del* H_2 *del combustible*
  - *- que se genera por el agua de apagado de los residuos o cenizas*
  - *relativa a los rociadores existentes en el foso de combustible*

La humedad del aire y la procedente de otras fuentes de vapores se tiene que medir, ya que las pérdidas de rendimiento por calor sensible se deben separar de las pérdidas por agua evaporada, que es la humedad total presente en los humos, menos la debida a fuentes de vapores.

El gasto de $aire_{seco}$ *se calcula por medio del* $N_{2(humos)}$

El $aire_{exceso}$ *se determina con el* O_2

El $aire_{teórico} = aire_{total} - aire_{exceso}$

El % de $aire_{exceso}$ *se calcula con los flujos gravimétricos de* $aire_{exceso}$ *y* $aire_{teórico}$

XI.12.- EJEMPLOS DE CÁLCULOS DE COMBUSTIÓN

Los ejemplos se pueden ejecutar en hojas de cálculo, organizando los cálculos según una secuencia lógica. Las entradas se sitúan en la parte superior de las hojas. Para todos los ejemplos se utiliza un análisis elemental gravimétrico del combustible.

Cuando se trata de combustibles gaseosos, el análisis volumétrico se convierte en gravimétrico. Los cálculos se indican como combinaciones algebraicas de las cifras consignadas en las posiciones entre paréntesis, afectadas de los coeficientes adecuados; los flujos gravimétricos de aire y humos vienen en $\frac{lb}{10000\ Btu}$ y en $\frac{1000\ lb}{hora}$

MÉTODO EN MOL.- Constituye la base para todo tipo de cálculos de combustión, siendo la fuente de una serie de constantes que se utilizan en otros métodos de cálculo simplificados. Las constantes que hay que conocer son, los pesos moleculares de los elementos componentes del combustible y del aire.

La Tabla XI.7 recoge un ejemplo de los cálculos de combustión en base molar, referidos a un

carbón bituminoso, suponiendo que el $aire_{exceso}$ en quemadores es igual al $aire_{exceso}$ a la salida de la caldera:

- Las posiciones 1 a 6 son las entradas requeridas; si se conoce el total del $C_{inquemado}$ (posición 6), se calculan las pérdidas por $C_{inquemado}$ (posición 5)

- Se han designado como entradas el $aire_{exceso}$ $\begin{cases} en\ quemadores \\ a\ la\ salida\ de\ la\ caldera \end{cases}$, por si se desean computar las infiltraciones de aire en la fumistería (posición 1)

Un paso intermedio para los cálculos en base molar, lo constituye el análisis volumétrico de los humos (posiciones 20 y 21).

MÉTODO EN BTU.- Establecidos los principios de cálculos de combustión en base molar, se pueden acometer los cálculos generales de combustión por el método en Btu, que es el preferido. Los cálculos facilitados en la Tabla XI.13A son más amplios y comprensibles que el cálculo de los pesos de aire y humos que se indican en la Tabla XI.7; se incluyen las posiciones necesarias para manipular el impacto que tiene el absorbente en los cálculos de combustión, rendimiento y en el calor disponible en el hogar

Tabla XI.13A.- Las entradas para el *combustible* y para el $aire_{exceso}$, junto con las entradas calculadas a partir del combustible son prácticamente las mismas que en la Tabla XI.7.

- Las posiciones 1 a 19 son las entradas, junto con los cálculos previos que se requieren para los cálculos de combustión.

- Para el cálculo de rendimientos hay que proveer las cifras correspondientes a las posiciones 44 a 46.

- Si se emplea absorbente, hay que completar con anterioridad la Tabla XI.14, de cálculos de combustión con absorbente, posiciones 11 a 14 y 46.

- Como a la temperatura de referencia 80°F, las temperaturas de entrada del aire y del combustible son iguales, los créditos de calor para el cálculo del rendimiento, son nulos.

- El calor total procedente del combustible se calcula por medio de la eficiencia (posición 53) y de la producción a la salida del generador de vapor (posición 10).

- Los regímenes de los flujos de aire y humos se calculan a partir de la entrada del combustible y de los resultados correspondientes de los cálculos de los humos de combustión

La Tabla XI.13A muestra los resultados relativos a un carbón bituminoso y a otro subbituminoso con $\begin{cases} - \ contenido\ en\ humedad > (30\%\ en\ peso) \\ - \ poder\ calorífico < (8360\ Btu/lb) \end{cases}$

Para una misma generación en caldera y análogas condiciones de contorno, los resultados relativos a estos carbones expresados en unidades $\frac{lb}{10000\ Btu}$ se recogen en la citada Tabla.

Se observa que el $aire_{teórico}$, el $aire_{seco}$ y el $humo_{seco}$ resultantes son prácticamente iguales para

ambos combustibles.

El peso del $humo_{húmedo}$ y del $agua_{en\ humos}$ es mayor en el carbón subbituminoso, por su mayor contenido en humedad.

La eficiencia con el carbón subbituminoso es menor debido a su más alto contenido de humedad y no a su menor poder calorífico; el peso de $humo_{seco}$ es algo mayor para el carbón subbituminoso, lo que resulta lógico por el menor rendimiento, mientras que el mayor peso de $humo_{húmedo}$ de ese carbón, se debe a la más elevada humedad y menor rendimiento.

Tabla XI.13 A.- CÁLCULOS DE COMBUSTIÓN EN BTU DE UN CARBÓN BITUMINOSO, Virginia USA

				Combustible 15	Análisis elemental	16	Aire teórico	17	lb / 100 lb comb
1	Exceso aire, Quem./Sal.caldera/Economiz. %	20/20							
2	Temperatura entrada aire, °F	80		Elemento	% peso	K1	(15) x K1	K2	(15) x K2
3	Temperatura de referencia, °F	89	A	Carbono	80,31	11,51	924,4		
4	Temperatura combustible, °F	80	B	Azufre	1,54	4,32	6,7		
5	Temp. aire salida caldera. Aire, °F	350	C	Hidrógeno	4,47	34,29	153,3	8,94	39,96
6	Temp. humo salida caldera aire (sin fuga), °F	390	D	Agua	2,9			1	2,9
7	Humedad en aire, lb/lb aire seco	0,013	E	Nitrógeno	1,38				
8	Humedad adicional, lb/100 lb combustible	0	F	Oxígeno	2,85	- 4,32	- 12,3		
9	Resid. salida caldera/Economizad. % total	85	G	Ceniza	6,55				
10	Salida calor, 10^6 Btu/h	285,6	H	Total	100	Aire	1072,1		42,86

	Correcciones por absorbente (de Tabla XI.14, si se usa)				
11	Aire teór. adicional, Tabla 14 (21)	0	18	Poder calorífico superior, Btu/lbcomb	14100
12	CO_2 de absorbente, Tabla 14 (19)	0	19	Pérdida por $C_{inquem.}$, % entrada combustible	0,4
13	H_2O de absorbente, Tabla 14 (20)	0	20	$Aire_{teór.}$ lb/10^4Btu, (16 H)x 100/18	7,604
14	Absorbente gastado, Tabla 14 (24)	0	21	C_{inquem},%Combustible,(19) x(18)/14500	0,39

	Cálculo de humos (gases) de combustión, cantidad/10000 Btu (Entrada combustible)		
22	Aire teórico (corregido), lb/10000 Btu	(20) - (21) x 1151/(18) + (11)	7,572
23	Residuo de combustible, lb/10000 Btu	[(15G) + (21)] x 100 /(18)	0,049
24	Residuo total, lb/10000Btu	(23) + (14)	0,049

		A) Quemador	B) Infiltración	C) Salida hogar	D) Sal. Cald/Econ.
25	Exceso aire, % peso	20	20	20	20
26	Aire seco, lb/10000 Btu	[1 + (25)/100] x (22)		9,086	9,086
27	Agua del aire, lb/10000 Btu	(26) x (7)		0,118	0,118
28	Humedad adicional, lb/10000 Btu	(8) x 100 /(18)		0	0
29	H_2O del combustible, lb/10000 Btu	(17H) x 100/(18)		0,304	0,304
30	$Humo_{húmedo}$ de combustión lb/10000 Btu	[100 - (15G) - (21)] x 100/(18)		0,66	0,66
31	CO_2 del absorbente, lb/10000 Btu	-12		0	0
32	H_2O del absorbente, lb/10000 Btu	-13		0	0
33	Total $humo_{húmedo}$, lb/10000 Btu	Suma de (26) a (32)		9,864	9,864
34	Agua en $humo_{húmedo}$, lb/10000 Btu	(27) + (28) + (29) + (32)		0,422	0,422
35	$Humo_{seco}$, lb/10000 Btu	(33) - (34)		9,442	9,442
36	H_2O en humos, % en peso	100 x (34)/(33)		4,28	4,28
37	Residuo, % peso	(9) x (24)/(33)		0,42	0,42

	Cálculo del rendimiento (eficiencia), % entrada combustible				
	Pérdidas en %	Entalpías			Pérdidas
38	Humo seco		0,0024 x (35 D) x [(6) - (3)]		7,02
39	Agua	Ental. vapor 1 psi, T= (6)	$i_1 = \{(3,95.10^{-5}) T + 0,4329\} T + 1062,2$	1237,1	

40	Combustible	Entalpía agua T= (3)	i_2 = (3) - 32	48	
41	Como se quema		(29) x [(39) - (40)] / 100		3,61
42	Humedad en el aire		0,0045 x (27D) x [(6) - (3)]		0,16
43	Carbono inquemado		(19) ó (21) x 14500 /(18)		0,4
44	Radiación y convención				0,4
45	No Comput.+ Margen Fabricante				1,5
46	Pérdidas netas absorbente		(41) de Tabla 14		0
47	Suma de pérdidas		Suma de (38) a (46)		13,09

	Créditos		
48	Calor en aire seco, %	0,0024 x (26 D) x [(2) - (3)]	0
49	Calor en humedad aire, %	0,0045 x (27 D) x [(2) - (3)]	0
50	Calor sensible en combustible, %	{Entalpía a T(4) - Entalpía a T(3)} x 100 / (18)	0
51	Otros, %		0
52	Suma de créditos, %	Suma de (48) a (51)	0
53	Rendimiento, %	100 - (47) + (52)	86,91

	Parámetros llaves del rendimiento		Salida hogar	Salida Cald / Econ.
54	$Entrada_{desde\ combust.}$, 10^6 Btu/h	100 x (10) /(53)		328,6
55	Régimen combustible, 10^7 lb/h	1000 x (54) /(58)		23,3
56	Régimen combustible, 10^7 lb/h	(53) x (33) / 10	324,1	324,1
57	$Aire_{húm}$ quemadores, lb / 10^4 Btu	$[1 + (7)] \times \{1 + \frac{25\,A}{100}\}$	9,205	
58	$Aire_{húmedo}$ quemadores, 10^3lb/h	(54) x (57) / 10	302,5	
59	Calor disponible, 10^4 Btu/h i_a= 66 Btu/lb	$(54)\ \frac{(18) - 10{,}30 \times (17\,H)}{18} - 0{,}005\ \{(44) + (45)\} + \{i_{aire}\ a\ T(5)\}\ \frac{(57)}{100}$	335,2	
60	$Calor_{dispon.}$ / $lb_{humo\ húmedo}$, Btu/lb	1.000 x (59) / (56)	1034,2	
61	Temperatura adiabática llama, °F	De Fig XI.3 para: i = (60) y % H_2O = (36)	3560	

Resultados relativos a un carbón bituminoso y a un carbón subbituminoso						
Parámetro	$Aire_{teórico}$	$Aire_{seco}$	$Humo_{seco}$	$Humo_{húmedo}$	H_2O en humos	Rendimiento
Bituminoso	7,527	9,086	9,442	9,864	0,422	86,9
Sub-bituminoso	7,542	9,05	9,463	10,303	0,84	82,1

Tabla XI.13B.- En ella se desarrolla el mismo ejemplo que en la Tabla XI.13A, pero utilizando un absorbente en la combustión en lecho fluidificado atmosférico, y una relación molar $\frac{Ca}{S} = 2{,}5$.

Se espera una captura del 90% de S

Existe una mayor pérdida por $C_{inquemado}$, típica de los procesos de combustión en lecho fluido

Para desarrollar las entradas en la Tabla XI.13B hay que tener completados los cálculos mostrados en la Tabla XI.14. Las pérdidas debidas al absorbente no son excesivamente importantes (posición 46 de la Tabla XI.13B)

La diferencia en el rendimiento, respecto al ejemplo de la Tabla XI.13A, se debe al distinto valor de la pérdida supuesta por el $C_{inquemado}$. En el ensayo de una caldera, el $aire_{exceso}$ requerido para la combustión se determina a partir del $\begin{cases} - O_2 \text{ medido en humos} \\ - \text{Análisis del combustible} \\ - C_{inquemado}\text{, Tabla XI.13B} \end{cases}$, que son los mismos que se indican en las Tablas XI.7 y 13A.

Las composiciones de humos correspondientes a las Tablas XI.13A y B, se pueden comparar al efecto de sopesar la influencia que tiene la adición de absorbente.

El ejemplo presentado en las Tablas XI.13A y B es el que se utiliza como base para el ejemplo de la Tabla XI.15B. Estas Tablas se pueden utilizar también para determinar la composición volumétrica de los humos (húmedos o secos), cuando se conoce el $aire_{exceso}$ (posiciones 25 a 32).

Tabla XI.13B.- CÁLCULOS DE COMBUSTIÓN EN BTU DEL CARBÓN BITUMINOSO de la Tabla XI.13B, con absorbente

	Condiciones de entrada por ensayo o por especificación			Combustible: Carbón bituminoso, Virginia, USA.					
				15	Análisis elemental	16	Aire teórico lb/100 lb_{comb}	17	H_2O lb/100 lb_{comb}
1	Exc. aire, Quemador/Sal. cald./Econom. %	20/20							
2	Temperatura entrada aire, °F	80		Elemento	% peso	K1	(15) x K1	K2	(15) x K2
3	Temperatura de referencia, °F	89	A	Carbono	80,31	11,51	924,4		
4	Temperatura combustible, °F	80	B	Azufre	1,54	4,32	6,7		
5	Temp. aire salida caldera. Aire, °F	350	C	Hidróg.	4,47	34,29	153,3	8,94	39,96
6	Temp. humo Salida caldera aire (sin fuga), °F	390	D	Agua	2,9			1	2,9
7	Humedad en aire, lb/lb aire seco	0,013	E	Nitróg.	1,38				
8	Humedad adicional, lb/100 lb combustible	0	F	Oxígeno	2,85	- 4,32	- 12,3		
9	Residuo salida caldera/Economiz. % total	85	G	Ceniza	6,55				
10		285,6	H	Total	100	Aire	1072,1		42,86

	Correcciones por absorbente (de Tabla 14, si se usa)				
11	$Aire_{teórico}$ adicional, Tabla 14 (21)	0,0212	18	Poder calorífico superior, Btu/lb comb	14100
12	CO_2 de absorbente, Tabla 14 (19)	0,0362	19	Pérdida por $C_{inquem.}$, % entrada combustible	2,5
13	H_2O de absorbente, Tabla 14 (20)	0,0015	20	$Aire_{teórico}$, lb/10^4 Btu, (16 H) x 100/(18)	7,604
14	Absorbente gastado, Tabla 14 (24)	0,0819	21	$C_{inquem.}$, % combustible, (19) x (18)/14500	2,43

	Cálculo de humos (gases) de combustión, cantidad /10.000 Btu entrada combustible		
22	$Aire_{teórico}$ (corregido), lb/10000 Btu	(20) - (21) x 1151/(18) + (11)	7,477
23	Residuo de combustible, lb/10000 Btu	[(15G) + (21)] x 100/(18)	0,064
24	Residuo total, lb/10000 Btu	(23) + (14)	0,146

		A) Quemador	B) Infiltración	C) Salida hogar	D) Sal. Cald/Econ.
25	$Aire_{exceso}$, % peso	18,9	1	19	20
26	$Aire_{seco}$, lb/10000 Btu	[1 + (25)/100] x (22)		8,838	8,838
27	Agua del aire, lb/10000 Btu	(26) x (7)		0,115	0,116
28	Humedad adicional, lb/10000 Btu	(8) x100/(18)		0	0
29	H_2O del combustible, lb/10000 Btu	(17H) x 100/(18)		0,304	0,304
30	$Humo_{húmedo}$ de combustión lb/10000 Btu	[100 - (15G) - (21)] x100/(18)		0,646	0,646
31	CO_2 del absorbente, lb/10000 Btu	(12)		0,036	0,036
32	H_2O del absorbente, lb/10000 Btu	(13)		0,002	0,002
33	Total $humo_{húmedo}$, lb/10000 Btu	Suma de (26) a (32)		9,637	9,712
34	Agua en $humo_{húmedo}$, lb/10000 Btu	(27) + (28) + (29) + (32)		0,421	0,422
35	$Humo_{seco}$, lb/10000 Btu	(33) - (34)		9,216	9,29
36	H_2O en humo, % peso	1 00 x (34)/(33)		4,37	4,35
37	Residuo, % peso	(9) x (24)/(33)		1,36	1,35

48	Calor en aire seco, %	0,0024 x (26 D) x [(2) - (3)]	0
49	Calor en humedad aire, %	0,0045 x (27 D) x [(2) - (3)]	0
50	Calor sensible en combustible, %	{Entalpía a T(4) - Entalpía a T(3)} x 100/(18)	0
51	Otros, %		0
52	Suma de créditos, %	Suma de (48) a (51)	0
53	Rendimiento, %	100 - (47) + (52)	84,8

	Parámetros llaves del rendimiento		Salida hogar	Salida Cald/Econ.
54	Entrada desde combustible, 10^6 Btu/h	100 x (10)/(53)		336,8

55	*Régimen combustible, 10^7 lb/h*	*1 000 x (54)/(58)*		*23,9*
56	*Peso humo$_{húmedo}$, 10^3 lb/h*	*(53) x (33)/10*	*324,6*	*327,1*
57	*Aire$_{húmedo}$ quemadores, lb/10^4 Btu*	*[1 + (7)] x {1 + [(25 A)/100]}*	*8,878*	
58	*Aire$_{húmedo}$ quemadores, 10^3lb/h*	*(54) x (57)/10*	*299*	
59	*Calor disponible, 10^4 Btu/h* *i_a= 66 Btu/lb*	$(54)\ x\ \frac{(18)\ -10{,}30\ x\ (\ 17\ H)}{18}\ -\ 0\ ,005\ x\ \{(44)+(45)\}\ +\ \{\ i_{aire}\ a\ T(\ 5\ )\}\ x\ \frac{(57)}{100}$	*342,8*	
60	*Calordisponible/lb$_{humo\ húmedo}$, Btu/lb*	*1000 x (59)/(56)*	*1056,1*	
61	*Temperatura adiabática llama, °F*	*De Fig XII.1 para: i = (60) y % H_2O = (36)*	*3624*	

Cuando se ensayan unidades que queman desechos sólidos municipales o combustibles derivados de desechos, no resulta práctica la determinación del análisis elemental del combustible.

Tabla XI.14.- CÁLCULOS DE COMBUSTIÓN CON ABSORBENTE

	Combustible Carbón bituminoso, Virginia, USA				
1	*S en combustible, % peso*	*1,54*	6	*Captura S, lb/lb azufre*
2	*Ceniza en combustible, % peso*	*6,55*	7	*Temperatura referencia, °F*
3	*Poder calorífico superior, Btu/lb comb*	*14100*	8	*Temperatura salida humos (sin fuga), °F*
4	*Pérdida por C$_{inquem}$, % entrada combustible*	*2,5*	9	*Temperatura absorbente, °F*
5	*Relación molar Ca/S*	*2,5*		

Productos del absorbente	*(10) Análisis % masa*	*(11) Peso/mol lb/mol*	*(12) = (10)/(11) mol Ca/lb.absorb.*	*(13 Fracción Calcinación*	*(14) Peso/mol lb/mol*	*(15) lbCO_2/lb$_{absorb.}$ (10)(13)(14)/(11)*	*(16) lb$_{agua}$/lb$_{absorbente}$ (10)(13)(14)/(11)*
A) $CaCO_3$	*89,8*	*100,089*	*897*	*0,9*	*44,01*	*35,529*	
B) MgCO3	*5*	*84,321*		*1*	*44,01*	*2,61*	
C) $Ca(OH)_2$	*0*	*74,096*	*0*	*1*	*18,015*		*0*
D) $Mg(OH)_2$	*0*	*58,328*		*1*	*18,015*		*0*
E) H_2O	*1,6*	*18,015*		*1*	*18,015*		*1,6*
F) Inerte	*3,6*						
G) Total Ca	*mol/100 lb.absorbente*		*0,897*	*Total*		*38,139*	*1,6*

	Cálculos absorbente/humos, lb/10000 Btu		
17	*Absorbente, lb/lb.combustible*	*(1) x (5)/(12G)/32,066*	*0,1339*
18	*Absorbente, lb/10000 Btu*	*10000 x (17)/(3)*	*0,095*
19	*CO_2 de absorbente, lb/10000 Btu*	*(15 G) x (18)/100*	*0,0362*
20	*H_2O de absorbente, lb/10000 Btu*	*(16 G) x (18)/100*	*0,0015*
21	*Aire teórico adicional, lb/10000 Btu*	*216 x (1) x (6)/(3)*	*0,0212*
22	*Reducción SO_2 , lb/10000 Btu*	*200 x (1) x (6) /(3)*	*0,0197*
23	*SO_2 formado, lb/10000 Btu*	*0,2314 x (21) + (22)*	*0,0246*
24	*Absorbente gastado, lb/10000 Btu*	*(18) - (19) - (20) + (23)*	*0,0819*
25	*Carbono inquemado, lb/10000 Btu*	*(4) x 100 /14500*	*0,0172*
26	*Residuo del combustible, lb/10000 Btu*	*(2) x 100/(3) + (25)*	*0,0637*
27	*Residuo total, lb/10000 Btu*	*(24) + (26)*	*0,1456*

	Pérdidas debidas al absorbente, % entrada combustible			
28	*H_2O del absorbente %*	*Vapor a 1 psi, T = (8)*	*i_1 = [(0,00003958) (8) + 0,4329] (8) + 1062,2*	
29		*i_{agua}*	*i_2 = (9) - (32)*	
30		*0,01 (20) [(28) - (29)]*		*0,018*

31	*Calor sensible absorbente en %*	*(18) x {1 - (19 E)/100} x {i_T = (9) - i_T = (7) }/100*	*0*
		$i_{caliza\ seca}$ = {(0,001128) T + 0,179} T - 14,45	

	Calcinación/deshidratación, %			
32	*CO_3Ca*	*(10 A) x (13A) x (18) x 766/10000*	*0,588*	
33	*CO_3Mg*	*(10B) x 1 x (18) x 652/10000*	*0,031*	
34	*$Ca(OH)_2$*	*(10 C) x 1 x (18) x 636/10000*	*0*	
35	*$Mg(OH)_2$*	*(10 D) x 1 x (18) x 625/10000*	*0*	
36	*Ganancia calor sulfatación*	*(6) x (1) x x/(3)*	*0,662*	
37	*Total pérdidas por reacciones*	*(32) + (33) + (34) + (35) - (36)*		*- 0,043*

	Pérdida calor sensible residuos			
	Ubicación	(38) Temperatura residuo °F	(39) Flujo másico x (27) ($i_{T=(38)}$ - $i_{T=(7)}$) / 10000 % régimen total x lb / 10000 Btu(Btu / lb - Btu / lb) / 10000	Pérdidas %
	A) Purga lecho	1500	10 x 0,1456 x {276,3 - 0,5} / 10000	0,055
	B) Economizador	600	10 x 0,1456 x {116,2 - 0,5} / 10000	0,017
	C) Polvo	390	80 x 0,1456 x {64,3 - 0,5} / 10000	0,075
40	Total		$i_{residuo}$ ={ (- 2,843.10^{-8}) T + (1,09.10^{-4}) T + 0,16 }T - 129, 5	0,146
41	Suma pérdidas por absorbente, en %		(30) - (31) + (37) + (40)	0,121

Tabla XI.15A.- CÁLCULO DEL AIRE$_{exceso}$ DE UN CARBÓN BITUMINOSO A PARTIR DEL O_2 MEDIDO EN HUMOS EN BASE HÚMEDA

				Datos absorbente (si se aplica)	
1	Humedad en aire, lb / lb.aire seco	0,013	6	$CO_{2\ absorb.}$, mol / 100 $lb_{combustible}$ Tabla16	0
2	Humedad adicional, lb / lb.combustible	0	7	$H_2O_{absorb.}$, mol / 100 $lb_{combustible}$ Tabla16	0
3	Poder calorífico superior, Btu / lb	14100	8	Captura azufre, lb / $lb_{azufre\ combustible}$ Tabla16	0
4	Pérdidas / $C_{inquem.}$, % entrada combustible	0,4			
5	$C_{inquemado}$, (3) x (4) / 14500	0,39			

	Productos de la combustión								
9	Análisis elemental, % peso			(10) $Aire_{teórico}$ lb / 100 $lb_{combustible}$		(11) $Humo_{seco\ comb.}$ mol / 100 l $_{combustible}$		(12) $Humo_{húmedo\ combinado}$	
	Componentes combustible	Como se quema	Carbono quemado	K1	(9) x K1	K2	(9) x K2	K3	(9) x K3
A	Carbono	80,31	80,31						
B	$C_{inquemado}$ (5)		0,39						
C	$C_{quemado}$ = (A) - (B)		79,92	11,51	919,9	12,011	6,654		
D	Azufre	1,54		4,32	6,7	32,066	0,048		
E	Hidrógeno	4,47		34,29	153,3			2,016	2,217
F	Agua	2,9						18,015	0,161
G	Nitrógeno	1,38				28,013	0,049		
H	Oxígeno	2,85		- 4,32	- 12,3				
I	Ceniza	6,55							
K	Total	100			1067,6		6,751		2,378

13	$Humo_{seco}$ mol / 100 $lb_{combustible}$	(11 K) - (11 D) - (8) + (6)	6,751
14	$Humo_{húmedo}$, mol / 100 $lb_{combustible}$	(12 K) + (13) + (7)	9,129
15	$Aire_{teórico}$ (corregido), mol / 100 $lb_{combustible}$	$\frac{(10\ K) + \{(8) \times (9\ D) \times 2,16\}}{28,966}$	36,857

	Exceso de aire, cuando se conoce el Oxígeno				
16	Oxígeno, % volumen (ENTRADA)				3,32
17	Base medición O_2	Seco = 0 Húmedo = 1	Seco	Húmedo	
18	Humedad en aire, mol / $mol.aire_{seco}$		0	(1) x 1,608	0,021
19	Producto seco / húmedo, mol / 100 $lb_{combustible}$		(13)	(14)	9,129
20	Humedad adicional, mol / 100 $lb_{combustible}$		0	(2) / 18,016	0
21	Cálculo intermedio, paso 1		(15) x {07, 905 + (18)}		29,909
22	Cálculo intermedio, paso 2		(19) + (20) + (21)		39,039
23	Cálculo intermedio, paso 3		20,95 - (16) x {1 + (18)}		17,56
24	$Aire_{exceso}$, % peso		100 x (16) x (22) / (15) / (23)		20

	O_2 , CO_2 , SO_2 cuando se conoce el $Aire_{exceso}$				
25	$Aire_{exceso}$, % peso				20
26	$Humo_{seco}$, mol / 100 $lb_{combustible}$	(13) + (15) x {0,7905 + (25) / 100}			43,258
27	$Humo_{húmedo}$, mol / 100 $lb_{combustible}$	(13) + (15) x [07, 905 + (18) + {1 + (18)} x (25) / 100]			46,565
			Seco	Húmedo	
28	Oxígeno, % volumen	(25) x (15) x 0,2095 / (26) ó (27)	(26)	(27)	3,32
29	Dióxido de C, % volumen	100 x {(11 C) + (6)} / {(26) ó (27)}	(26)	(27)	14,29
30	Dióxido de S, % volumen	100 x {1 - (8)} x (11 D) / {(26) ó (27)}	(26)	(27)	0,3131
31	Agua, % volumen	Agua = 0,0 (seco) ó 100 x {(27) - (26)} / (27)		(27)	7,1

Tabla XI.15B.- CÁLCULOS DEL AIRE$_{exceso}$ EN CARBÓN BITUMINOSO, A PARTIR DEL O_2 MEDIDO EN BASE HÚMEDA, CON ABSORBENTE.

La totalidad del S$_{combustible}$ no se convierte en SO_2, por lo que la cantidad de S$_{capturado}$ se calcula primero mediante la Tabla XI.16.

				Datos absorbente (si se aplica)	
1	Humedad en aire, lb / lb.aire$_{seco}$	0,013	6	CO_2 absorbente , mol / 100 lb$_{combustible}$ Tabla16	0,116
2	Humedad adicional, lb / lb$_{combustible}$	0	7	H_2O absorbente , mol / 100 lb$_{combustible}$ Tabla16	0,012
3	Poder calorífico superior, Btu / lb	14100	8	Captura azufre, lb / lb.azufre $_{combustible}$ Tabla16	0,9
4	Pérdidas / C$_{inquemado}$, % entrada combustible	2,5			
5	C$_{inquemado}$, (3) x (4) / 14500	2,43			

		Productos de la combustión								
		Análisis elemental, % peso			(10) Aire teórico lb / 100 lb$_{combustible}$		(11) Humo$_{seco\ o\ comb.}$ mol / 100 lb$_{combustible}$		(12) Humo$_{húmedo\ comb}$	
		Componentes combustible	Como se quema	Carbono quemado	K1	(9) x K1	K2	(9) x K2	K3	(9) x K3
9	A	Carbono	80,31	80,31						
	B	C$_{inquemado}$ (5)		2,43						
	C	C$_{quemado}$ = (A) - (B)		77,88	11,51	896,4	12,011	6,484		
	D	Azufre	1,54		4,32	4,32	32,066	0,048		
	E	Hidrógeno	4,47		34,29	34,29			2,016	2,217
	F	Agua	2,9						18,015	0,161
	G	Nitrógeno	1,38				28,013	0,049		
	H	Oxígeno	2,85		- 4,32	- 12,3				
	I	Ceniza	6,55							
	K	Total	100			1067,6		6,581		2,378

13	Humo$_{seco}$, mol / 100 lb$_{combustible}$	(11 K) - (11 D) - (8) + (6)	6,654
14	Humo$_{húmedo}$, mol / 100 lb$_{combustible}$	(12 K) + (13) + (7)	9,044
15	Aire$_{teórico}$ (corregido), mol / 100 lb$_{combustible}$	{ (10 K) + (8) x (9 D) x 2 ,16} / 28,966	36,149

	Exceso de aire, cuando se conoce el Oxígeno				
16	Oxígeno, % volumen (ENTRADA)				3,31
17	Base medición O_2	Seco = 0 Húmedo = 1	Seco	Húmedo	
18	Humedad en aire, mol / mol.aire$_{seco}$		0	(1) x 1,608	0,021
19	Producto seco / húmedo, mol / 100 lb$_{combustible}$		(13)	(14)	9,044
20	Humedad adicional, mol / 100 lb$_{combustible}$		0	(2) / 18,016	0
21	Cálculo intermedio, paso (1)		(15) x {0,7905 + (18)}		29,335
22	Cálculo intermedio, paso (2)		(19) + (20) + (21)		39,379
23	Cálculo intermedio, paso (3)		20,95 - (16) x {1 + (18)}		17,56
24	Aire$_{exceso}$ (%peso)		100 x (16) x (22) / (15) / (23)		20

	O_2 , CO_2 , SO_2 , cuando se conoce el aire$_{exceso}$				
25	Aire$_{exceso}$ (%peso)				20
26	Humo$_{seco}$, mol / 100 lb$_{combustible}$	(13) + (15) x {0,7905 + (25) / 100}			42,46
27	Humo$_{húmedo}$, mol / 100 lb$_{combustible}$	(13) + (15) x [07, 905 + (18) + {1 + (18)} x (25) / 100]			45,761
			Seco	Húmedo	
28	Oxígeno, % volumen	(25) x (15) x 0,2095 / (26) ó (27)	(26)	(27)	3,31
29	CO_2 , % volumen	100 x {(11 C) + (6)} / {(26) ó (27)}	(26)	(27)	14,42
30	SO_2 , % volumen	100 x {1 - (8)} x (11 D) / {(26) ó (27)}	(26)	(27)	0,0105
31	Agua, % volumen	H_2O = 0,0 (seco) 100 x {(27) - (26)} / (27)		(27)	7,21

Tabla XI.16.- CAPTURA DE S POR ANÁLISIS DE HUMOS EN UN CARBÓN BITUMINOSO

1	SO_2 , ppm	105 / 10000 =	0,0105 %	2	O_2 de humo, donde se mide SO_2 , %	3,31

	Datos de la Tabla 15 = Cálculos de $aire_{exceso}$ sobre medida de O_2				
3	Humedad aire, lb / 100 $lb_{combustible}$	0,013	7	$Aire_{teórico}$, lb / 100 $lb_{combustible}$	1044,1
4	Humedad adicional, lb / 100 $lb_{combustible}$	0	8	$Humo_{seco}$, mol / 100 $lb_{combustible}$	6,581
5	Azufre en combustible, % peso	1,54	9	$Humo_{húmedo}$, mol / 100 $lb_{combustible}$	2,378
6	Poder calorífico, Btu / $lb_{combustible}$	14100			
	Datos de Tabla 1 = Cálculos de combustión - absorbente				
10	CO_2 de absorbente , lb / 100 $lb_{absorbente}$	38,139	12	Absorbente, $lba_{bsorbente}$ / $lb_{combustible}$	0,134
11	H_2O de absorbente , lb / 100 $lb_{absorbente}$	1,6			

	CALCULOS, mol / 100 $lb_{combustible}$, salvo otra indicación				
	SO_2 / O_2 = base medición	Seco = 0 Húmedo = 1	Seco	Húmedo	
13	Humedad aire, mol / mol.$aire_{seco}$		0	(3) x 1,608	0,0209
14	Humedad adicional		0	(4) x 18,015	0
15	Humo (producto combustión) de combustible		(8)	(8) + (9)	8,959
16	H_2O de absorbente	(11) x (12) / 18,015	0	calcular	0,012
17	CO_2 de absorbente	(10) x (12) / 44,01			0,116
18	Cálculo intermedio, paso 1	{0,7095 + (13)} x 2 / 20,95			29,247
19	Cálculo intermedio, paso 2	Suma de (14) a (18)			38,334
20	Cálculo intermedio, paso 3	1 - {1 + (13)} x (2) / 20,95			0,8387
21	Cálculo intermedio, paso 4	{0,7905 + (13)} x 2,387 - 1			0,9368
22	Cálculo intermedio, paso 5	(1) x (19) x 32,066 / (5) / (20)			9,993
23	Cálculo intermedio, paso 6	(21) x (1) / (20)			0,0117
24	Captura de azufre, lb / lb.azufre	{100 - (22)} / {100 + (23)}			0,9
25	SO_2 liberado, lb / 10000 Btu	20000 x {1 - (24)} x (5) / (6)			0,22

Tabla XI.17.- CÁLCULOS DE COMBUSTIÓN, PARA DETERMINAR EL PESO DE $HUMOS_{secos}$, $AGUA_{evaporada}$ Y $AIRE_{exceso}$, UTILIZANDO EL PESO DE HUMOS

		A) Análisis húmedo (no requerido)		B) Análisis seco
1	O_2 % vol	9,28	Medido en base seca ó 100 / {100 - (3A)} x (1A)	10,55
2	CO_2 % vol	9,56	Medido en base seca ó 100 / {100 - (3A)} x (1A)	9,73
3	H_2O % vol	12		
4	Flujo másico gases de combustión, 10^3lb / hora			539,2
5	Humedad en humo, lb / lb. $humo_{húmedo}$			0,0754
6	Humedad en aire, lb / lb. $aire_{seco}$			0,013
7	Humedad adicional (otras fuentes distintas de combustible y aire), 10^3lb / hora			0

	CÁLCULOS		
8	Agua en $humo_{húmedo}$, 1000 lb / h	(4) x (5)	40,7
9	Peso $humo_{seco}$, 1000 lb / h	(4) - (8)	498,5
10	N_{2a} en $humo_{seco}$, % vol sec o	100 - (1B) - (2B)	79,72
11	Peso molecular $humo_{seco}$, lb / mol	0 ,32 x (1B) + 0,4401 x (2B) + 0,28161 x (10)	30,11
12	$Humo_{seco}$, 1000 mol / h	(9) / (11)	16,56
13	Peso $aire_{seco}$, 1000 lb / h	0 ,28161 x (10) x (12) / 07, 685	483,8
14	Agua en $aire_{seco}$, 1000 lb / h	(13) x (6)	6,3
15	$Agua_{evaporada}$, 1000 lb / h	(8) - (7) - (14)	34,4
16	$Aire_{exceso}$, 1000 lb / h	(18) x (9) x 0,32 / 02, 315 / (11)	241,4
17	$Aire_{teórico}$, 1000 lb / h	(13) - (16)	242,4
18	$Aire_{exceso}$, % en peso	100 x (16) / (17)	99,6

Parámetro	Aire teórico	Aire seco	Humo seco	Humo húmedo	Agua en humos	Rendimiento
Bituminoso	7,527	9,086	9,442	9,864	0,422	86,90%
Subbituminoso	7,542	9,05	9,463	10,303	0,84	82,10%

BIBLIOGRAFIA.- CAP XI.- INTRODUCCIÓN A LA COMBUSTIÓN

F.D. Rosini & al.- SELECTED VALUES OF PHYSICAL AND THERMODINAMIC PROPERTIES OF HYDROCARBONS AND RELATED COMPOUNDS.- Research Project 44, American Petroleum Institute, Pittsburgh, (1953)

D. Mc A. Mason & B.E. Eakin.- PROPOSED STANDARD METHOD FOR CALCULATING HEATING VALUE AND SPECIFIC GRAVITY FROM GAS COMPOSITION.- American Gas Association Proceedings, CEP-61-11, (1961)

I. P.- GAS ENGINEERS HANDBOOK.- The Industrial Press, New York, (1965)

JANAF.- THERMODINAMICAL TABLES, 2nd Ed..- Publication NSRDS-NBS-37, U.S. National Bureau of Standards , (National Institute of Standards and Technology), Washington, D.C., (1971)

NASA.- PUBLICATION SP-273.- (1971)

M.A. Elliot, ed..- CHEMISTRY OF COAL UTILIZATION, 2nd Suppl. Vol., Wiley, New York, (1981)

C.A. Meyer & al.- ASME STEAM TABLES.- American Society of Mechanical Engineers, New York, (1983)

J. Entwistle, T.C. Heil and G.E. Hoffman.- STEAM GENERATION EFFICIENCY REVISITED.- Technical Paper 88-JPGC/PTC-3, American Society of Mechanical Engineers, New York, (1988)

CRC.- HANDBOOK OF CHEMISTRY AND PHYSICS, 71st Ed..- CRC Press, Boca Raton, Florida, (1990)

P.M. Gehart, T.C. Heil and J.T. Phillips.- STEAM GENERATOR PERFORMANCE CALCULATION STRATEGIES FOR ASME PTC-4.- Technical Paper 91-JPGC/PTC-1., American Society of Mechanical Engineers, New York, (1991)

B&W STEAM: ITS GENERATION AND USE.- 40th Edition, Chapter 9.- The Babcock & Wilcox Company, Barberton, Ohio, USA, (1992)