

Ing. Pablo Krassa K.

# **“Combustión”, hecha fácil**

Bajo el título que encabeza estas líneas se publicó en el número de octubre de la revista «Power» un artículo de Bill Maddock. Está destinado para facilitar los cálculos de los ingenieros y prácticos que se preocupan de la marcha económica de sus instalaciones de combustión. He creído que las tablas y explicaciones que trae podrán servir también en nuestro país. Para aprovecharlos hubo que convertir los datos que se refieren a libras y pies cúbicos a base de las unidades métricas. Al tratar de hacerlo se encontraron desgraciadamente una serie de errores, aparentemente de imprenta, así que hubo necesidad de calcular prácticamente de nuevo los valores de las tablas que van adjunto. Se completaron también, agregando los valores referentes al vapor de agua que el autor no había tomado en cuenta, probablemente debido a la poca influencia que tienen, si no se trata de combustibles muy húmedos. Para mayor utilidad he reemplazado además en el ejemplo de aplicación de los cálculos el carbón norteamericano por el de la Cía. Minera e Industrial de Lota.

Todas las cifras de las tablas se basan en los siguientes datos:

Aire: 0,814 metros cúbicos por kg.  
4,35 × peso del oxígeno.  
4,78 × volumen del oxígeno.

Nitrógeno: 0,848 metros cúbicos por kg.  
3,30 × peso del oxígeno.  
3,78 × volumen del oxígeno.

Anhidrido carbónico (CO<sub>2</sub>): 0,536 metros cúbicos por kg.  
Oxígeno: 0,740 metros cúbicos por kg.

Todos estos valores se refieren a 15° C. y 760 mm. de presión.

El texto del artículo con las modificaciones indicadas es el siguiente:

Muchas veces el ingeniero tiene que calcular los volúmenes pesos y velocidades de los humos, para poder determinar las capacidades de los ventiladores o dimensiones de los conductos, como también para controlar la eficiencia de la combustión. Si no se tienen reunidas las fórmulas y tablas, uno se pierde fácilmente en un lote de cifras y papeles.

La tablas adjuntas contienen la mayor parte de los datos necesarios para tales cálculos, datos que se refieren a los diferentes componentes de los combustibles y de los humos respectivamente. La idea consiste en considerar cada uno de estos com-

«Combustión», hecha fácil

ponentes tal como si se quemara aisladamente. La cantidad de aire necesaria para quemar el combustible entonces es simplemente igual a la suma de las cantidades necesarias aisladamente para cada componente.

Hay que fundar el cálculo en la composición del combustible. El que se lo vende, gustosamente se lo indicará. Después hay que decidirse si se quiere fundar el cálculo en por cientos de peso o de volumen. Para el cálculo de la cantidad de aire necesario para la combustión sirve la primera tabla. Indica las cantidades requeridas para cada uno de los componentes de un combustible por unidades de peso y también por unidades de volumen para los combustibles gaseosos. Para el cálculo de la cantidad de humo sirve la segunda tabla, que contiene los pesos y volúmenes que se forman al quemar 1 kilo de los diferentes componentes indicados en la primera columna. Con las cifras indicadas en las tablas respectivas hay que multiplicar el número de kilos del componente respectivo que contiene un kilo del combustible.

Hecha esta operación para cada uno de los componentes, se suman los valores y se tiene el resultado deseado, sin recurrir durante una noche a un libro de química o tratar de recordar lo que es el peso molecular. Ud. habrá hecho entonces lo que hacen los expertos bien pagados, pero la tabla se ha encargado de las molestias.

Por ejemplo si un carbón de la mina de Lota de la Compañía Minera e Industrial tiene el siguiente análisis:

C 75,6%; H 5,6%; O 8,85%; N 2,3%; S 0,9% Humedad 3,85%

y Ud. desea calcular los kgs. de humo y su volumen, producidos por la combustión de 1 kg. de este carbón, se tiene rápidamente la contestación.

Primero hay que averiguar que cantidad de hidrógeno del carbón en realidad es accesible como combustible. La parte ya combinada con el oxígeno naturalmente no puede quemarse. Se necesitan 8 partes de oxígeno para combinar con 1 parte de hidrógeno; por lo tanto descontamos del porcentaje de hidrógeno (5,6%) la octava parte del oxígeno ( $8,85 : 8 = 1,1$ ) para obtener la del hidrógeno disponible ( $5,6 - 1,1 = 4,5$ ).

En seguida se hace el cálculo tomando simplemente los valores de las columnas correspondientes de las tablas y multiplicando con las cantidades de los componentes del combustible, por kg. de éste.

Componentes	kgs. en 1 kg. de carbón	kgs. de humo que se obtienen		
		por kg. del componente	por kg. de carbón	
Carbono.....	0,756	×	12,59	9,51
Hidrógeno disponible.....	0,045	×	35,80	1,61
Azufre.....	0,009	×	5,35	0,05
Humedad.....	0,134	×	1,00	0,13
Total.....				11,30

El cálculo de la humedad se hace en la forma siguiente: Comprende tanto la humedad propia del combustible (0,0385 kgs. por kg. de carbón) como también la que se forma por la acción del oxígeno sobre el hidrógeno combinado (0,0885 de oxígeno y 0,011 kgs. de hidrógeno; en total 0,0995 kgs. de humedad por kg. de carbón). Así la humedad total producida resulta igual a

$$0,0385 + 0,0995 = 0,138 \text{ kgs, por kg. de carbón}$$

Para deducir el volumen el cálculo es exactamente igual, con la única diferencia de que los valores deben ser tomadas de la segunda columna de tabla 2. (Productos de la combustión).

Componentes	kgs. en 1 kg. de carbón	metros cúbicos de humo producidos	
		por kg. del componente	por kg. de carbón
Carbono.....	0,765	× 9,435	7,12
Hidrógeno disponible .....	0,045	× 34,25	1,54
Azufre .....	0,009	× 3,523	0,03
Humedad .....	0,134	× 1,315	0,17
Total .....			8,86

Los valores indicados se refieren a una combustión completa, efectuada con la cantidad de aire estrictamente necesaria y el volumen del gas no ha sido corregido en relación con la temperatura de los humos. Esta última corrección se efectúa, basado en las temperaturas absolutas (Grados centígrados + 273) por ejemplo en la forma siguiente:

$$\text{Volumen a } 200^{\circ}\text{C} = \text{volumen a } 15^{\circ}\text{C.} \times \frac{273 + 200}{273 + 15} = 8,86 \frac{473}{288} = 14,5 \text{ m.}$$

Para conocer la cantidad de humo formado incluyendo el exceso de aire usado (por ej.: un 20%) hay que calcular,—aprovechando los datos de la primera tabla,—las cantidades de aire necesario teóricamente por kilo de combustible. Se considera entonces que el exceso de aire (por ej.: el 20% de la cantidad teóricamente requerida) pase por la zona de combustión sin ser afectado. Este valor debe agregarse a la cantidad de humo calculado arriba para el caso de una combustión con el aire estrictamente necesario.

En nuestro ejemplo tendremos:

Componentes	kgs. en 1 kg. de carbón	Metros cúbicos de aire necesario		
		por kg. de cada componente	por kg. de combustible	
Carbono .....	0,765	×	9,44	7,14
Hidrógeno disponible .....	0,045	×	28,40	1,28
Azufre .....	0,009	×	3,55	0,03
Humedad .....	0,134	×	..	..
Total .....				8,45

El 20% de este volumen--o bien 1,69 m<sup>3</sup>--correspondería al exceso de aire y debe ser agregado a los 8,86 m<sup>3</sup> de humo teórico resultando un total de 10,55 m<sup>3</sup>., para la temperatura de 15°C y la presión de 760 mm. de mercurio.

Si se quiere nuevamente calcular el volumen correspondiente a 200°C. se tiene:

$$\text{Volumen a } 200^{\circ}\text{C.} = \text{Vol. a } 15^{\circ} \times \frac{473}{288} = 10,55 \times \frac{473}{288} = 17,4 \text{ m}^3.$$

TABLA N.º 1

CLASE	COMBUSTIBLES					SE PRECISAN PARA LA COMBUSTIÓN COMPLETA							
	Características de los componentes					metros cúbicos por metro cúbico		kilos por metro cúbico		metros cúbicos por kilo		kilos por kilo	
	Símbolo	Peso molecular	% C.	m <sup>3</sup> por kilo	de O <sub>2</sub>	de aire	de O <sub>2</sub>	de aire	de O <sub>2</sub>	de aire	de O <sub>2</sub>	de O <sub>2</sub>	de aire
Hidrógeno.....	H <sub>2</sub>	2	0	11,76	0,5	2,39	0,676	2,94	5,92	28,40	8	34,80	
C a CO.....	C	12	100	..	..	..	..	..	0,985	4,72	1,33	5,78	
C a CO <sub>2</sub> .....	C	12	100	..	..	..	..	..	1,970	9,44	2,67	11,56	
CO a CO <sub>2</sub> .....	CO	28	43	0,798	0,5	2,89	0,676	2,94	0,423	2,03	0,572	2,49	
Azufre.....	S	32	0	..	..	..	..	..	0,740	3,55	1,0	4,35	
Metano.....	CH <sub>4</sub>	16	75,0	1,476	2,0	9,56	2,704	11,76	2,96	14,20	4,0	17,40	
Acetileno.....	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	26	92,0	0,909	2,5	11,95	3,380	14,70	2,28	10,92	3,08	13,40	
Etileno.....	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28	86,0	0,844	3,0	14,34	4,056	17,64	2,54	11,82	3,43	14,50	
Etano.....	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30	80,0	0,788	3,5	16,73	4,732	20,58	2,765	13,30	3,74	16,30	
Gasolina.....	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	..	84,0	0,2075	12,5	59,81	16,730	73,50	2,586	12,40	3,50	15,20	
Gas natural.....	....	..	74,0	1,334	2,1	10,1	2,859	12,35	2,810	13,50	3,80	16,52	

TABLA 2  
PRODUCTOS DE LA COMBUSTION

	metros cúbicos por metros cúbicos			kgs. por metros cúbicos			metros cúbico por kgs.			kgs. por kgs.			% de		Calorías Por kg.		
	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	Total	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	Total	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>				
Hidrógeno.....	..	1,0	1,89	..	0,764	2,230	2,994	..	11,85	22,40	34,25	..	9,0	26,80	35,80	100	34,200
Humedad.....	..	1,0	..	..	0,764	..	0,764	..	1,315	..	1,315	..	1,0	..	1,0	..	..
C a CO.....	..	..	..	..	..	..	..	CO	1,975	3,720	5,695	2,33	..	4,46	6,79	63,6	2,420
C a CO <sub>2</sub> .....	..	..	..	..	..	..	..	1,975	..	7,460	9,435	3,67	..	8,92	12,59	79,1	8,100
CO a CO <sub>2</sub> .....	1,0	..	1,89	1,865	..	2,230	4,095	0,845	..	1,600	2,445	1,57	..	1,92	3,49	65,5	2,440
Azufre.....	..	..	..	..	..	..	..	SO <sub>2</sub>	0,723	2,800	3,523	2,00	..	3,35	5,35	79,1	2,220
Metano.....	1,0	2,0	7,56	1,865	1,528	8,920	12,313	1,481	2,962	11,180	15,623	2,75	2,25	13,40	18,40	88,3	13,120
Acetileno.....	2,0	1,0	9,45	3,730	0,764	11,150	15,644	1,822	0,912	8,620	11,354	3,38	0,69	10,30	14,37	82,5	11,925
Etileno.....	2,0	2,0	11,34	3,730	1,528	13,380	18,638	1,692	1,692	9,610	12,984	3,14	1,29	11,48	15,91	85	11,858
Etano.....	2,0	3,0	13,23	3,730	2,312	15,610	21,652	1,580	2,370	10,450	14,400	2,93	1,80	12,52	17,25	86,9	12,348
Gasolina.....	8,0	9,0	47,25	14,920	6,936	55,750	77,606	1,657	1,858	9,770	13,285	3,09	1,40	11,71	16,20	85,5	11,300
Gas natural.....	1,1	2,05	8,00	2,052	1,566	9,366	12,984	1,445	2,712	10,620	14,777	2,72	2,10	12,72	17,54	87,9	12,430