

## Apéndice Q. Combustibles y combustión

### Q.1 Combustibles

Describiremos sucintamente los tipos y las características de interés, como fuentes de calor, de los combustibles.

#### Q.1.1 INTRODUCCIÓN

Los combustibles son las materias empleadas para generar calor a partir de su oxidación rápida, o combustión. Los combustibles más generalizados son compuestos hidrocarbonados que, según su origen, pueden clasificarse en naturales y artificiales o sintéticos. A su vez, los naturales pueden ser fósiles o biológicos (biomasa). La figura Q.1 muestra la relación carbono e hidrógeno de los combustibles industriales más corrientes<sup>1</sup>.

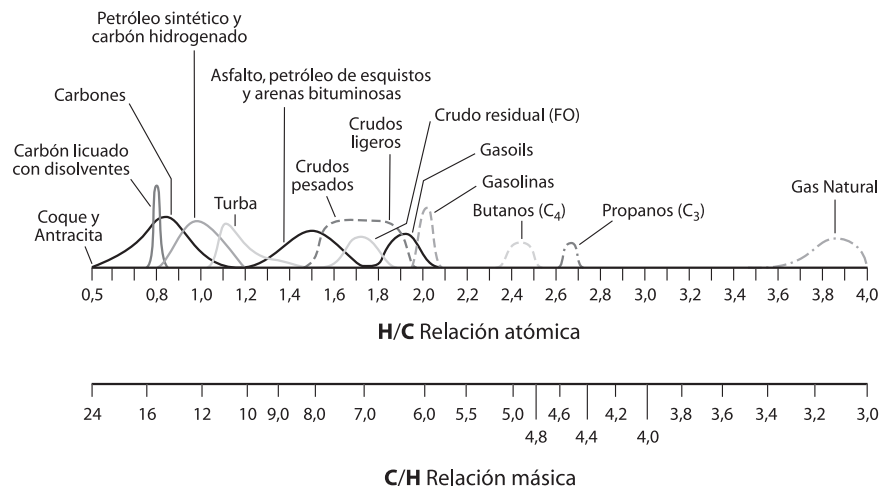


Figura Q.1. Relación hidrógeno/carbono en combustibles fósiles y sintéticos.

Cuando los combustibles se utilizan directamente en los motores que impulsan vehículos terrestres, marinos o aéreos, se denominan *carburantes*. A partir de ahora la denominación *combustible* se referirá exclusivamente a los usados en hogares (instalaciones fijas).

Los combustibles pueden clasificarse básicamente en tres grandes grupos:

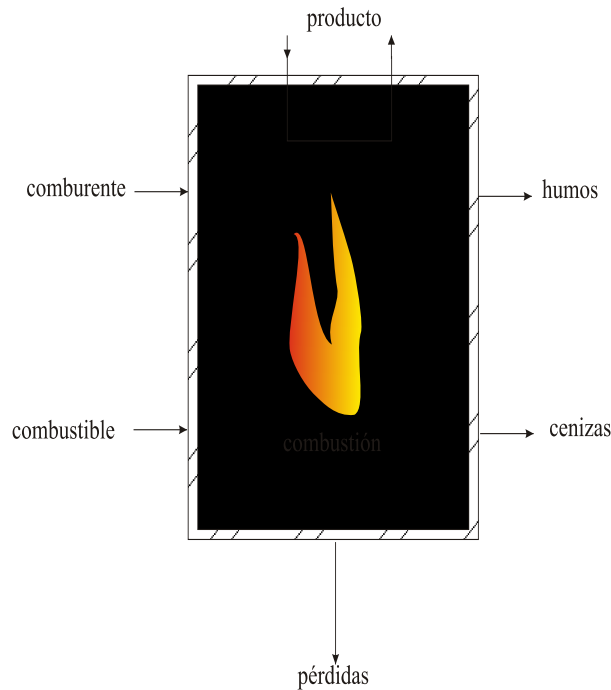
- Gaseosos
- Líquidos
- Sólidos

<sup>1</sup>Kutz, Myer (Editor) *Mechanical Engineers' Handbook*, Wiley & Sons, New York, 1986, p. 1682.

Cada uno de estos grupos tiene unas características particulares de composición y de manejo.

**Q.1.2 INFORMACIÓN NECESARIA PARA UTILIZAR LOS COMBUSTIBLES**

La combustión requiere un comburente, normalmente aire (también se puede emplear oxígeno puro o mezclas gaseosas conteniendo oxígeno) y genera una determinada cantidad de gases denominados humos, pudiendo también, si no son gaseosos, dejar un residuo sólido, o cenizas. Para el dimensionado y la operación del equipo donde se efectúa la combustión es preciso conocer la cantidad de combustible, la cantidad de aire necesario para su correcta combustión, el volumen de humos generados, las condiciones de presión y temperatura de cada una de estas corrientes y propiedades tales como calor específico, densidad, viscosidad, etc. En definitiva, los balances de masa y energía de la combustión y las propiedades físicas del combustible, el comburente y los humos producto de la misma. Para los combustibles sólidos el cálculo de las cenizas también es importante. La figura Q.2 resume la información manejada para los cálculos de procesos de calentamiento por combustión.



Balance de energía ----- Potencia calorífica útil + Pérdidas = Potencia necesaria

Caudal de combustible = (Potencia necesaria)/(Poder calorífico del combustible)

Además del caudal de combustible se necesitan su composición (C, H, etc.) y la del comburente

PARA DIMENSIONAR:

SE NECESITAN TEMPERATURA, CAUDAL Y COMPOSICIÓN DE:

Ventiladores y conductos	Humos y comburente
Transferencia de calor	Producto
Recuperación de calor	Humos y comburente
Separadores	Humos
Chimenea	Humos

Figura Q.2

La cantidad de combustible se determina a partir de las exigencias térmicas, o carga, y del calor de combustión, o poder calorífico<sup>2</sup>, del mismo. Para combustibles que contienen hidrógeno se distinguen dos: *poder calorífico superior*,  $P_s$ , que es igual a la entalpía de combustión<sup>3</sup> cambiada de signo, a partir del combustible y el comburente a 25°C (298 K) y los productos en su fase estable a 25°C, es decir con el agua producto de la combustión en fase líquida, y *poder calorífico inferior*,  $P_i$ , igual al valor anterior al que se ha sustraído la entalpía de vaporización del agua a 25°C, de forma que supone que, en los productos, ésta se mantiene en fase de vapor.

Para combustibles con agua o humedad libre, también se distingue entre poderes caloríficos húmedos o brutos,  $P_{SH}$  y  $P_{IH}$ , más comúnmente denominados *poder calorífico útil*, y poderes caloríficos netos, sin humedad ni cenizas,  $P_{SS}$  y  $P_{IS}$ .

### Q.1.3. CARACTERÍSTICAS Y DETERMINACIÓN DE LAS MISMAS PARA LOS TIPOS BÁSICOS DE COMBUSTIBLES

#### Q.1.3-1 Combustibles gaseosos

Los combustibles gaseosos son siempre mezclas de un número relativamente pequeño gases, en general hidrocarburos, lo que permite la fácil determinación de su composición. El análisis se realiza por cromatografía de gases y, conocida la composición, puede calcularse teóricamente la potencia calorífica (entalpía de combustión) por suma directa, en las proporciones de la mezcla, de las potencias caloríficas de sus componentes, así como la estequiometría de la combustión y las propiedades, tanto del combustible como de los productos de su combustión.

Esto hace que los cálculos necesarios para el diseño de los equipos de combustión y la operación de los mismos puedan efectuarse de forma simple y exacta.

También es posible la determinación experimental de la potencia calorífica, sin conocer su composición, mediante un calorímetro a flujo (proceso estacionario a presión constante) que describe Crosby<sup>4</sup>.

Si no se opera adecuadamente, la combustión de los gases puede ser inestable, básicamente debido a la existencia de un límite inferior del caudal de combustible, para evitar el retorno de llama, y uno superior, para que no se produzca el desprendimiento de la misma. También puede ser incompleta, lo que refleja la composición de los humos (relación  $CO/CO_2 > 0,01$ , por ejemplo). Para evitar estos problemas hay que relacionar el gas con el quemador. El gas se tipifica mediante parámetros como el *índice de Wobbe*<sup>5</sup>,  $W$ :

$$W = \frac{P_s}{d^{0,5}}$$

donde  $P_s$  es el poder calorífico superior y  $d$  la densidad relativa respecto al aire, y funciones de la composición, como la denominada *potencial de combustión*  $C$ , por ejemplo:

<sup>2</sup>También denominada potencia calorífica.

<sup>3</sup>Una metodología simple para la estimación de entalpías de combustión de sustancias orgánicas (gaseosas, líquidas o sólidas) la da R. L. Cardozo en "Prediction of the Enthalpy of Combustion of organic Compounds", *AIChE Journal*, Vol. 32 (1986), nº 5, pp. 844-847.

<sup>4</sup>Crosby, E.J: *Experiments in Transport Phenomena*, Wiley & Sons, New York, 1961.

<sup>5</sup>Wobbe, C., "La definizione della qualita dei gas", *L'Industria del gas e degli aquedotti*, Noviembre 1926.

$$C = \frac{H_2 + 0,6CO + 0,6C_nH_m + 0,3CH_4}{d^{0,5}}$$

determinado a partir de la composición centesimal en volumen del gas ( $C_nH_m$  indica los hidrocarburos distintos del metano). Dado un quemador y una serie de gases combustibles, se determina los valores de los dos parámetros cuando la combustión es incompleta, los que provocan retorno de llama y los correspondientes a desprendimiento de llama, con lo que se obtienen tres curvas en plano  $C-W$  que permiten definir un área donde un gas, cuyo punto representativo esté en su interior, quema adecuadamente y es sustituible por todos los combustibles gaseosos que den valores de los dos parámetros que definan un punto situado en la misma área. Para detalles y otras expresiones de los índices y de las funciones de la composición, véase *Interchangeabilité des gaz*, Société du Journal des usines a Gaz, Paris, 1971, publicación de la *Association Technique de l'Industrie du Gaz en France*. La práctica totalidad de los gases utilizados como combustibles, solos o mezclados, están incorporados al banco de datos de la aplicación PROPIEDADES, aunque ésta no incluye los calores de combustión<sup>6</sup>. Los gases combustibles, debido a su extraordinaria facilidad para difundirse en el aire, pueden causar deflagraciones incontroladas en caso de escape, siempre que la mezcla con el aire tenga una composición comprendida entre unas determinadas concentraciones, denominadas límite inferior de inflamabilidad y límite superior de inflamabilidad.

Finalmente, para resumir las características fundamentales, podemos decir que los combustibles gaseosos son los más fáciles y económicos de transportar y utilizar, y los menos contaminantes pero, por contra, son los más peligrosos de manejar, precisamente por su fácil combustibilidad

### Q.1.3-2 Combustibles líquidos

Los combustibles líquidos provenientes de petróleo, que constituyen la mayor parte de los combustibles líquidos actuales, son mezclas de un número muy grande, en muchos casos superior al centenar, de hidrocarburos y pequeñas cantidades (a nivel de impureza) de otras moléculas, en general orgánicas, conteniendo azufre, oxígeno, nitrógeno, etc., así como metales pesados: vanadio, hierro, níquel, etc. También pueden contener en emulsión, agua con sales disueltas y partículas sólidas.

Los procedentes de la biomasa son mezclas mucho menos complejas, especialmente los oxigenados (alcoholes).

Esto conduce a que la determinación de la composición química de los derivados del petróleo y aún, la simple relación carbono e hidrógeno, necesaria para establecer el balance de masa de la combustión, sea compleja y costosa. Asimismo, la deducción a partir de fórmulas fisicoquímicas, de su entalpía de combustión y sus propiedades, es laboriosa y poco precisa. Por este motivo se establecieron, a principios del siglo pasado, métodos empíricos, basados en la estadística, para estimar con precisión suficiente, a partir de ensayos normalizados, simples y económicos, las propiedades necesarias para el dimensionado y operación de las instalaciones de combustión.

---

<sup>6</sup>Excepto para destilados y residuos petrolíferos.

No obstante, el análisis elemental de combustibles líquidos (y sólidos) se puede realizar actualmente de forma automática, mediante aparatos que efectúan una combustión completa y analizan los humos. El inconveniente es el alto precio de dichos aparatos. El poder calorífico se determina, de forma económica, directamente, mediante una combustión controlada a volumen constante (*ensayo calorimétrico*) efectuada en un sistema cerrado, o bomba de combustible, descrita en la publicación ASTM<sup>7</sup>, *Book of ASTM Standards*, Part 23, D-240.

Existen dos clases de combustibles líquidos derivados del petróleo: *los destilados* y *los residuos*. Para ambos la característica fundamental es la densidad, que, para evitar el uso de valores muy próximos, frecuentemente se expresa en grados API<sup>8</sup>, que verifican la relación:  $densidad\ relativa\ 60^{\circ}F/60^{\circ}F = 141,5/(\text{API} + 131,5)$ . La segunda característica fundamental para los destilados es la curva de destilación (relación temperatura tanto por ciento destilado)<sup>9</sup> obtenida en un alambique normalizado, corrientemente según normas ASTM, y para los residuos la viscosidad. Fundamentalmente la densidad está relacionada con la potencia calorífica del combustible, la curva de destilación de un destilado refleja su pureza y la viscosidad de los residuos condiciona el coste de utilización, pues los mecheros requieren que la viscosidad del combustible no supere un valor límite, típicamente 30 cSk (mm<sup>2</sup>/s), lo que normalmente exige un precalentamiento del combustible, tanto mayor cuanto mayor sea la viscosidad del mismo.

A diferencia de los combustibles sólidos, que sufren una manipulación somera, los líquidos derivados del petróleo son productos elaborados y permiten que existan unas normas de calidad, o *especificaciones*, en todos los países, bien establecidas por la administración, bien por las empresas productoras y consensuadas por los usuarios, revisándose de acuerdo con la evolución de la industria extractora y refinadora de petróleo y, en especial, de las exigencias de la sociedad para la reducción de la contaminación. En la Unión Europea, desde 1995, existen Directivas comunitarias que establecen las fundamentales, que en España se transcriben y publican en el B.O.E., como por ejemplo el Real Decreto 318/1996 de 1 de marzo, etc.

El objeto de las especificaciones es garantizar, en cada caso:

- . La naturaleza del producto, su pureza y la estabilidad de la calidad correspondiente, para evitar el fraude.
- . La seguridad de su manejo.
- . Unas prestaciones adecuadas, teniendo en cuenta las condiciones climáticas.
- . Una limitación de la contaminación.

Para los combustibles, a los que aquí nos limitamos, que son los gasoils<sup>10</sup> y los fuel-oils, las principales especificaciones son:

---

<sup>7</sup>Siglas de *American Society for Testing and Materials*, 1916 Race Street, Philadelphia, Pa, 19103, EE.UU.A.

<sup>8</sup>Siglas de *American Petroleum Institute*, 1801 K. Street N.Y., Washington D.C 20006, EE.UU. A. Esta escala tuvo su origen en un error en el primer densímetro BEAUME que fue adquirido por los EE.UU.A. a principios del siglo XIX.

<sup>9</sup>Que se efectúa en un aparato Engler normalizado, con el que, según la norma ASTM D-86, se determinan las temperaturas a las que se inicia la destilación (IBP), a las que destilan el 10, 30, 50 y 90% en volumen y el punto en que se agota el líquido (EP).

<sup>10</sup>Se utilizan mayoritariamente como carburantes, de mayor precio.

<b>Propiedad</b>	<b>Norma ASTM</b>
De garantía de naturaleza y pureza	
Densidad	D-1298
Destilación	D-86
Color <sup>11</sup>	D-156
Contenido en agua y sedimentos	D-1796
Las de seguridad	
Puntos de destello (“flash point”)	D-93
Las de prestaciones adecuadas:	
Poder calorífico	D-240
Viscosidad	D-445
Punto de enturbiamiento (“cloud point”)	D-97
Punto de fluidez (“pour point”)	D-97, D-2500
Residuo de carbón	D-189, D-524
Azufre <sup>12</sup>	D-1266, D-1552
Vanadio <sup>13</sup>	D-3605
Las de limitación de la contaminación:	
Azufre	D-1266, D-1552
Metales pesados	D-3605
Oxígeno <sup>14</sup>	

Tal como indica la relación anterior, para los ensayos que permiten determinar estas características, internacionalmente se utiliza la normativa ASTM, complementada con la publicada por el IP<sup>15</sup> en *Standard Methods for Testing Petroleum and its Products*. En España, el *Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial Esteban Terradas (INTA)* tradujo y adaptó muchas de estas normas, al igual que muchos otros países como Francia, etc.

Como muestra de unas especificaciones típicas, en las tablas Q-1 a Q-3 se recogen especificaciones de CAMPSA<sup>16</sup> (hoy CLH) para los combustibles líquidos comercializados en España, aunque actualmente, como ya se ha señalado, la CEE ha unificado, con las salvedades climatológicas en su caso, la normativa a nivel europeo.

<sup>11</sup>Sin colorante, que se añade para facilitar la identificación y la distribución comercial.

<sup>12</sup>Por la corrosión que provoca al producirse condensaciones, si desciende excesivamente la temperatura.

<sup>13</sup>Sus óxidos corroen las partes metálicas a alta temperatura, como los quemadores.

<sup>14</sup>Reduce los inquemados en la combustión.

<sup>15</sup>*Institute of Petroleum*, del Reino Unido de la Gran Bretaña.

<sup>16</sup>BOE de 19 septiembre 1975, pág. 19861, rectificación BOE de 21 octubre 1975, pág. 22103.

TABLA Q.1. Especificaciones del gasóleo clase C

Características	Unidades	Mínimo	Máximo	Normas INTA	Normas ASTM
a-Color azul <sup>1</sup>					
b-Densidad a 15°C	kg/l	0,83	0,88	150213	D-287
c-Destilación				150227D	D-86
65% recogido	°C	250	-		
80% recogido	°C	-	370		
Punto final	°C		Se anota <sup>2</sup>		
d-Viscosidad cinemática a 37,8°C	cSt	-	5,5	150216A	D-445
e-Azufre <sup>3</sup>	% en masa	-	0,5	150532A	D-1552
d-Punto de inflamación (destello)	°C	65		150234B	D-93
d-Punto de congelación				150265C	D-97
noviembre a marzo	°C		-3		
abril a octubre	°C		-0		
h-Agua y sedimentos	% en vol.	-	0,1	-	D-2709
i-Residuo carbonoso Ramsbottom, en el 10% residual de la destilación	% en masa	-	0,35	150467A	D-524
j-Corrosión a la tira de cobre	-	-	3	150442	D-130
k-Agentes trazadores <sup>1</sup>					
l-Potencia calorífica superior	kcal/kg.	10.300	-		D-240

1. El tipo y cantidad de colorantes y trazadores debe ser aprobado por el Ministerio de Industria.

2. El 20% final de la destilación estará también constituido por productos destilados, no admitiéndose la incorporación de fracciones residuales.

3. Se pueden utilizar también los métodos INTA 150439B y 150441, correspondientes a ASTM D-129 y D-1551, respectivamente.

TABLA Q.2. Especificaciones del fuel-oil pesado n° 1

Características	Unidades	Mínimo	Máximo	Normas INTA	Normas ASTM
a-Color negro					
b-Viscosidad <sup>1</sup> a 50°C	°Engler	7	14	150218	-
c-Azufre	% en masa	-	2,5	150441 150532	D-1551 D-1552
d-Punto de inflamación (destello)	°C	70	-	150234B	D-93
e-Agua y sedimentos	% en vol.	-	1	150462C	D-1796
f-Agua	% en vol.	-	0,75	150456A 150439B	D-95 D-129
g-Potencia calorífica					
Superior	kcal/kg	10.200	-		D-240
Inferior	kcal/kg	9.700	-		D-240

1. Se pueden utilizar también los métodos INTA 150216A y 150217A, correspondientes a ASTM D-445 y D-88, respectivamente.

TABLA Q.3. Especificaciones del fuel-oil pesado n° 2

Características	Unidades	Mínimo	Máximo	Normas INTA	Normas ASTM
a-Color negro					
b-Viscosidad <sup>1</sup> a 50°C	°Engler	-	50	150218 150439B	- D-129
c-Azufre	% en masa	-	2,5	150441 150532A	D-1551 D-1552
d-Punto de inflamación (destello)	°C	70	-	150234B	D-93

e-Agua y sedimentos	% en vol.	-	1,75	150412C	D-1796
f-Agua	% en vol.	-	1,5	150456A	D-95
g-Potencia calorífica					
Superior	kcal/kg	10.200	-		D-240
Inferior	kcal/kg.	9.500	-		D-240

1. Se pueden utilizar también los métodos INTA 150216A y 150217A, correspondientes a ASTM D-445 y D-88, respectivamente.

Con la destilación ASTM se establecen para las fracciones petrolíferas tres puntos de ebullición medios: *en volumen, molar y promedio*. Así, el punto de ebullición medio en volumen,  $T_V$ , para los destilados, se define como:

$$T_V = \frac{T_{10} + 2T_{50} + T_{90}}{4}, \text{ } ^\circ\text{F}$$

El subíndice indica el porcentaje de líquido destilado a la temperatura en cuestión. A partir de él puede determinarse el punto de ebullición promedio  $T_P$  en  $^\circ\text{F}$  (que es el más útil), mediante la corrección:

$$T_P = T_V + \left[ 2 - \left( \frac{T_{90} - T_{10}}{170 + 0,075 T_V} + 1,5 \right)^3 \right], \text{ } ^\circ\text{F}$$

Entre los parámetros empíricos, el más informativo es el denominado factor de caracterización de Watson o  $K_{UOP}$ , definido como<sup>17</sup>:

$$K_{UOP} = \frac{(T_V + 460)^{\frac{1}{3}}}{d_{60/60}}$$

donde el punto de ebullición promedio se expresa en  $^\circ\text{F}$  y la densidad relativa se determina a  $60^\circ\text{F}$  ( $15,56^\circ\text{C}$ ). Este parámetro, según su valor, indica si predominan las parafinas, los naftenos o los aromáticos en la composición del producto petrolífero<sup>18</sup>, como se aprecia en la figura Q.3 para hidrocarburos puros. Para más información se puede consultar el texto de Hougen, Watson y Ragatz<sup>19</sup>

<sup>17</sup>UOP son las siglas de la empresa de ingeniería que lo introdujo: *Universal Oil Products*.

<sup>18</sup>Cuestión de gran interés para su uso como carburante, como materia prima petrolquímica y para el control ambiental.

<sup>19</sup>Hougen, O. A., K.M. Watson y R.A. Ragatz. *Principios de los procesos químicos. Parte I. Balances de materia y energía*, versión española de la edición norteamericana de 1959 por J. Aguilar Peris. Editorial Reverté, Barcelona, 1964, Capítulo 11.

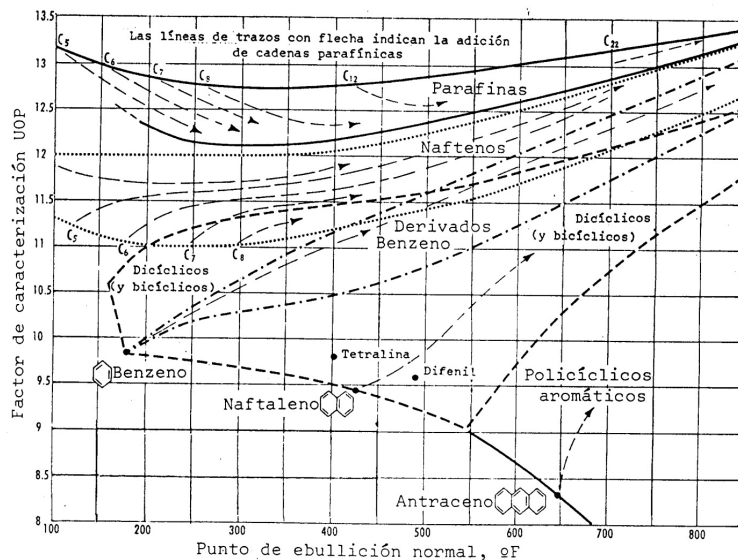


Figura Q.3

Una particularidad de estas propiedades empíricas normalizadas es que, conocidas dos de ellas, se pueden calcular las demás<sup>20</sup>, así en el pasado se establecieron ábacos como el de alineación de Winn<sup>21</sup>, que se muestra en la figura Q.4, y que da, en función de dos propiedades de destilados, normalmente la densidad relativa 60/60°F (15,5/15,5°C),  $d_{60/60}$ , y del punto de ebullición promedio, otras seis propiedades, o el de Mapstone<sup>22</sup> aplicable a residuos.

Posteriormente se han establecido correlaciones numéricas como las que emplean las opciones DESTILADOS y RESIDUOS de la aplicación PROPIEDADES<sup>23</sup>. La información de partida para usar la aplicación para los destilados, es el valor de la densidad y una curva de destilación, normalmente ASTM, y para los residuos, la densidad, los contenidos en azufre, agua y sedimentos, y las viscosidades a dos temperaturas, normalmente a 100°F (37,8°C) y 210°F (98,9°C).

<sup>20</sup> Sigalés, B., *Refino. Primera parte. Introducción a la evaluación de los crudos del petróleo*. Instituto de Petrolquímica Aplicada, Barcelona 1976.

<sup>21</sup> Winn, F.W. "Physical Properties by Nomogram", *Petroleum Refiner*, p. 157-159, February 1957.

<sup>22</sup> Mapstone, G.E. "Get Characterization Factor by Nomogram", *Hydrocarbon Processing & Petroleum Refiner*, p. 149-153, June 1963.

<sup>23</sup> Véase el apartado 7.2-4.8 del primer volumen.

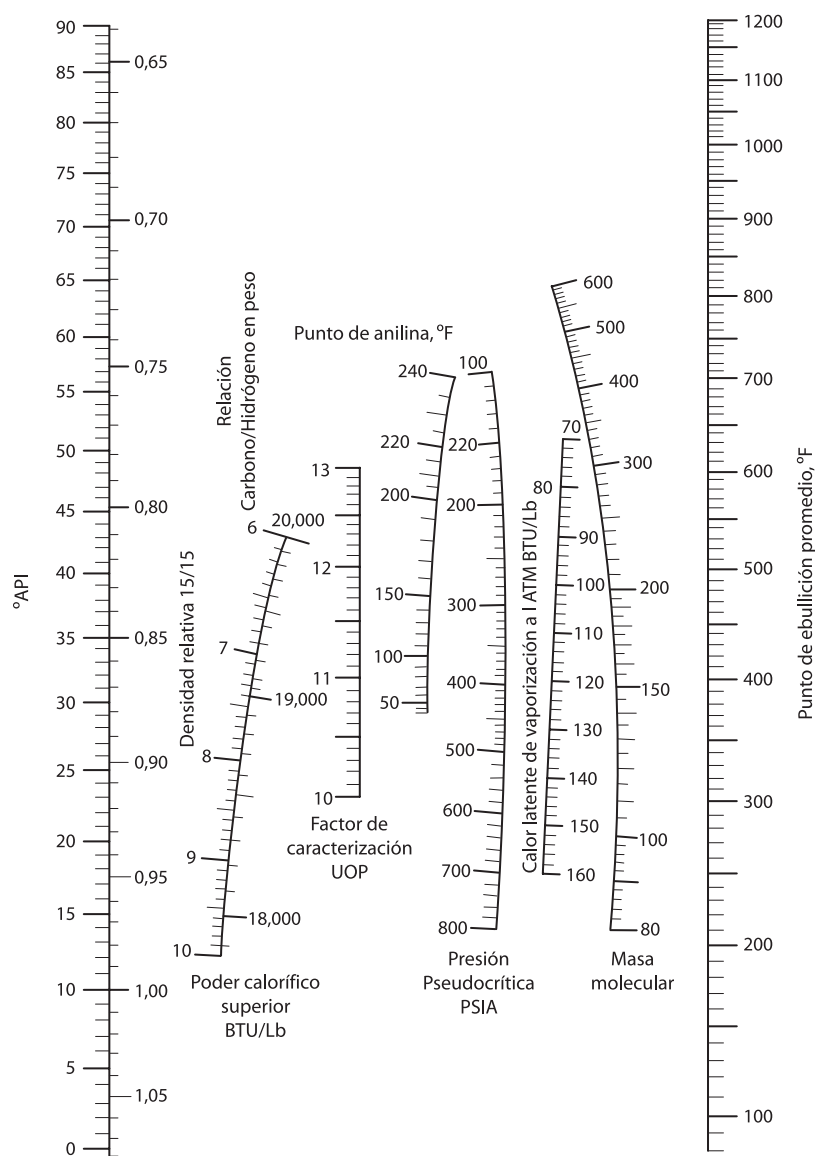


Figura Q.4. Ábaco de Winn. (Ejemplo: una densidad de 0,83 y un punto de ebullición promedio de 450°F, unidos por una recta, nos proporcionan una relación C/H de 6,4, un poder calorífico superior de 19.600 Btu/lb, un factor de caracterización de 11,65, un punto de anilina de 140°F, una presión pseudocrítica de 313 psia, una entalpía de vaporización normal de 107 Btu/lb y una masa molecular de 185).

La relación carbono/hidrógeno que da la aplicación PROPIEDADES, es para el combustible compuesto exclusivamente de carbono e hidrógeno, mientras que los poderes caloríficos superior e inferior ya están corregidos para tener en cuenta el azufre y los no combustibles (agua y sedimentos). Sea por ejemplo un fuel-oil de densidad  $977 \text{ kg/m}^3$  a  $15,5^\circ\text{C}$ , viscosidad cinemática  $(3,7)(10^{-4}) \text{ m}^2/\text{s}$  a  $37,78^\circ\text{C}$  y  $(6,5)(10^{-5}) \text{ m}^2/\text{s}$  a  $98,89^\circ\text{C}$ , 2% de azufre, un 0,4% de sedimentos y un 0,6% de agua. Introduciendo estos datos en la ventana correspondiente a RESIDUOS de la aplicación PROPIEDADES, obtenemos los resultados mostrados en la figura Q.5.

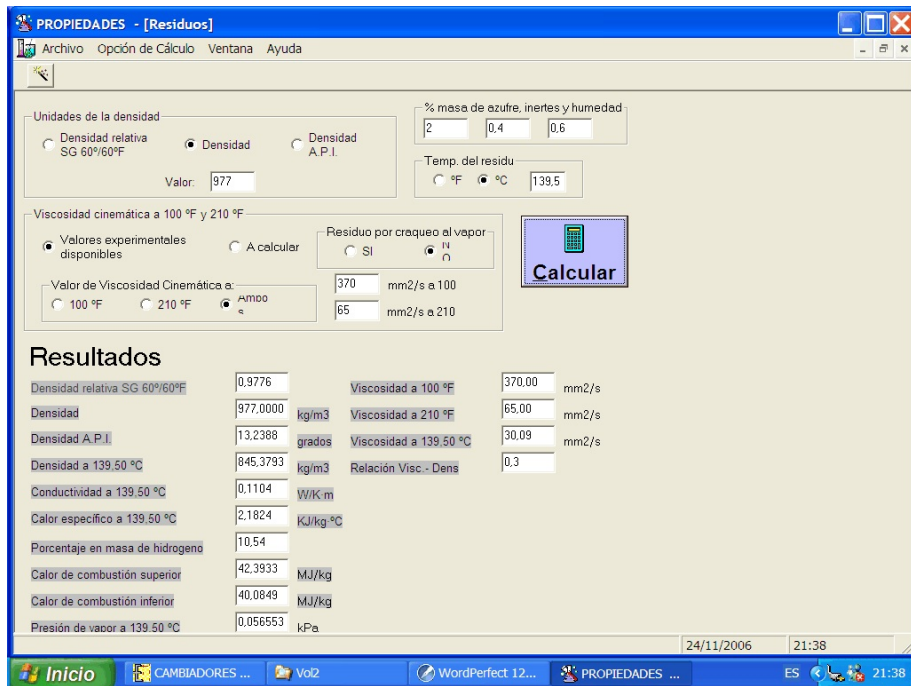


Figura Q.5

Así, para totalidad del combustible tendremos los porcentajes siguientes:

$$H = (10,54)(1 - 0,02 - 0,004 - 0,006) = 10,22\%$$

$$C = (100 - 10,54)(0,97) = 86,78\%$$

Finalmente, como características fundamentales podemos decir que los combustibles líquidos son el mejor compromiso entre facilidad de transporte y de utilización, y seguridad (el fuel-oil es el combustible menos peligroso) aunque son contaminantes.

### Q.1.3-3 Combustibles sólidos

El principal tipo de combustibles sólidos son los carbones, consistentes en materia combustible de origen vegetal alterada por la descomposición anaerobia a altas presiones y temperaturas en el seno de la corteza del globo terráqueo.

Los carbones contienen siempre materia no combustible, constituida por materia inorgánica de los vegetales originales o cenizas inherentes, así denominadas por ser prácticamente inseparables de la materia combustible. También se encuentran en los carbones inclusiones minerales (arcillas, piritas, etc.) incorporadas durante la formación de las vetas, que son las llamadas materia mineral, o cenizas separables, pues pueden ser eliminadas parcialmente mediante un tratamiento físico adecuado.

Los combustibles sólidos contienen siempre humedad. En el caso de los carbones se distingue la denominada humedad libre, que incluye la que ha sido absorbida en el yacimiento, extracción transporte y almacenamiento, y que puede eliminarse dejando secar el carbón en un ambiente

ventilado, hasta quedar aproximadamente en equilibrio con la humedad atmosférica, con lo que todavía contiene humedad, y la denominada humedad inherente, que solo puede eliminarse secando el carbón en una estufa en condiciones controladas.

La materia combustible del carbón, es decir libre de la humedad total y de cenizas, se descompone a efectos prácticos, mediante un análisis empírico, denominado *próximo* o *inmediato*, simple y normalizado, en materia volátil y carbono fijo, sin que éste último corresponda al elemento carbono. La figura Q.6 resume estos conceptos.

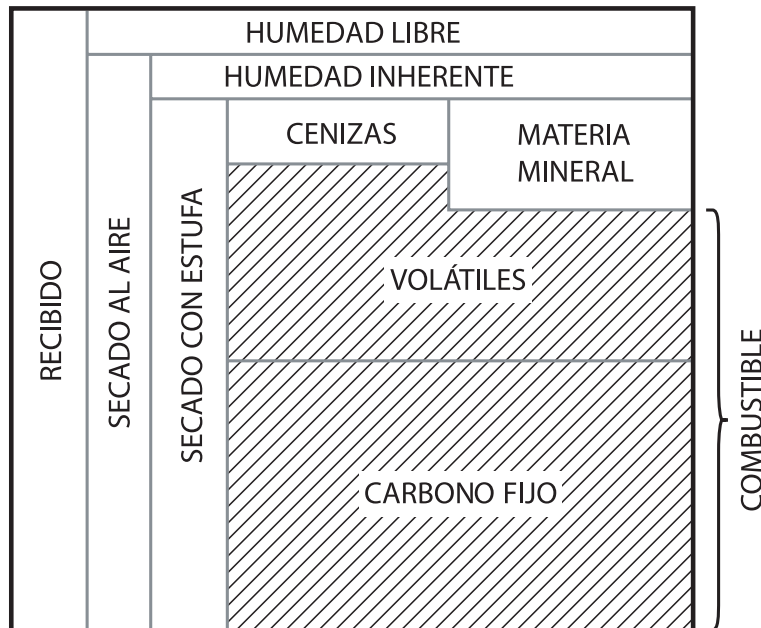


Figura Q.6.

La madera o biomasa puede también considerarse con una composición empírica C/H, una vez realizado el análisis inmediato y determinados los porcentajes de humedad, volátiles y cenizas.

En la figura Q.7 se muestra un gráfico <sup>24</sup> para determinar el poder calorífico superior seco y sin cenizas (o neto) para combustibles sólidos naturales (carbones<sup>25</sup> y biomasa) en función del porcentaje en masa de volátiles obtenido en el análisis inmediato, excluyendo humedad y cenizas, es decir, la proporción de materia volátil en la materia combustible<sup>26</sup>, y los porcentajes totales en masa de H y C. Sin embargo, esta figura se utiliza normalmente para, conocido el poder calorífico superior seco (o neto) y el porcentaje de volátiles en la materia combustible exclusivamente, calcular aproximadamente los de los elementos carbono e hidrógeno<sup>27</sup>, lo que permite establecer los balances de masa y energía de la combustión. De todos modos, la determinación experimental del poder calorífico, junto con el

<sup>24</sup>Tideström, S.H:son, *Manuel de base de l'ingénieur*, Tome II, Dunod, Paris, 1961, p. 201.

<sup>25</sup>Centroeuropeos, agrupados según la clasificación, todavía vigente comercialmente, propuesta por Gruner, M.L. *Traité de métallurgie*, París, 1875.

<sup>26</sup>Un refinamiento consiste en tener en cuenta que la materia mineral se altera en el análisis, lo da la fórmula de Parr: Materia mineral = 1,1 (cenizas) + 0,1 (azufre).

<sup>27</sup>La diferencia a 100 se puede considerar oxígeno.

análisis inmediato, se puede efectuar con facilidad y rapidez con el instrumental de laboratorio moderno.

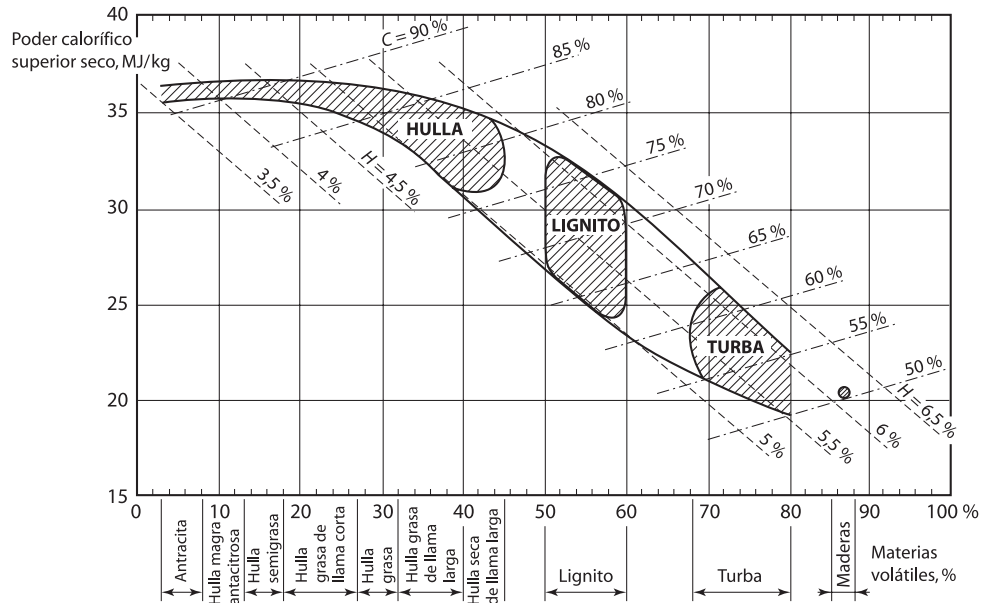


Figura Q.7. Composición y poder calorífico de los combustibles sólidos naturales.

En la tabla Q.4, se muestran una serie de análisis inmediatos típicos de carbones españoles.<sup>28</sup>

Tabla Q.4. Composiciones típicas de carbones españoles

	Antracita	Bituminos o bajo en volátiles	Bituminos o alto en volátiles	Sub-bituminoso	Sub-bituminoso	Turba
Recibido						
Cenizas%	31,9	13,2	49,0	12,4	30,9	18,8
Humedad%	3,1	8,7	6,2	25,0	21,5	47,7
Sin humedad ni cenizas						
Volátiles%	10,9	20,9	36,8	48,7	48,1	53,1
C%	87,2	-	77,8	70,1	67,2	62,4
H%	2,5	-	4,9	5,0	4,8	5,6
O%	8,0	-	15,6	15,3	16,2	28,4

<sup>28</sup>Singer, J. E. (Editor): *Combustion Fossil Power Systems*, Third Edition, Combustion Engineering, Windsor, 1981.

N%	0,9	-	0,8	0,7	0,7	1,5
S%	1,4	2,0	0,9	8,9	11,1	2,1
$P_{ss}$ , MJ/kg	32,8	34,9	30,7	29,4	27,6	21,2
Temp. de fusión en atm. reductora, °C						
Deformación inicial	1.182	1.249	1.480 <sup>+</sup>	1.131	1.116	1.160
Ablandamiento (H=W)	1.327	1.299	1.480 <sup>+</sup>			
Fluido	1.449	1.377	1.480 <sup>+</sup>	1.266	1.393	1.460
Composición de las cenizas%						
SiO <sub>2</sub>	59,0	40,5	53,6	32,3	54,2	54,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,5	22,5	29,2	22,4	21,1	21,8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,5	14,8	6,1	16,8	15,7	7,3
CaO	3,5	6,3	1,2	11,0	3,5	5,2
MgO	1,9	1,1	1,1	1,9	0,8	1,0
Na <sub>2</sub> O	0,8	0,5	0,4	0,3	0,1	0,2
K <sub>2</sub> O	4,0	3,2	4,6	1,2	1,3	0,5
TiO <sub>2</sub>	1,3	-	0,7	0,3	0,8	1,1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	1,4	0,2	-	-
SO <sub>3</sub>	2,0	8,2	1,2	13,2	3,2	5,3
Relación Ácido/base	0,22	0,41	0,16	0,57	0,28	0,18
Índice de pulverización <i>Hardgrove</i>	54	81	-	83	-	-

Sea por ejemplo el carbón bituminoso bajo en volátiles mostrado en la tabla Q.4, que tiene un 2% de azufre, un 13,2% de cenizas, un 8,7% de humedad y no contiene nitrógeno. En la figura Q.7 vemos que para un poder calorífico  $P_{ss}=34,9$  MJ/kg y un 20,9% de volátiles, valores indicados en la tabla Q-4, la fracción combustible contiene un 4,5% de H y un 86% de C, de modo que para la totalidad del

combustible tendremos los porcentajes siguientes:

$$H = (4,5)(1 - 0,132 - 0,087) = (4,5)(0,781) = 3,51\%$$

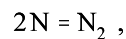
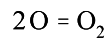
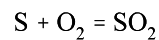
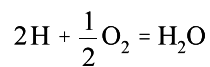
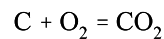
$$C = (0,86)(0,781) = 67,17\%$$

$$O = (100 - 4,5 - 86 - 2)(0,781) = 5,86\%$$

En cuanto a las maderas, sus características dependen evidentemente de su origen, pero se puede considerar que la madera en el árbol contiene del orden del 50% de humedad y que, secada al aire en un ambiente seco, puede reducirse hasta un 15%, pero no a valores menores. Para una madera secada en la estufa a 140°C, con lo que la humedad se sitúa alrededor del 8%, se puede tomar como típica la siguiente composición elemental (% en masa): C 50%, H 6%, O 42%, N 1%, Cenizas 1 %, total 100. Finalmente, como síntesis, podemos decir que los combustibles sólidos son los más económicos en origen, pero difíciles y caros de transportar y utilizar. Son mucho más seguros que los gaseosos, aunque pueden sufrir autoignición almacenados y su polvo formar mezclas explosivas. También son los más contaminantes.

## Q.2 Cálculo simplificado de la combustión

Describiremos una metodología general que supone reacciones completas,



el nitrógeno inerte y no tiene en cuenta los equilibrios químicos. Se considera el aire *seco* una mezcla del 20,95% de oxígeno y 79,05 de nitrógeno, con una masa molecular, en consecuencia, de 28,8538 kg/kmol. Utilizaremos una hoja de cálculo, una vez establecida la composición centesimal como hemos indicado antes para cada grupo de combustibles. Si se parte del consumo de combustible, los cálculos se realizan a partir del caudal del mismo, kg de combustible/h, mientras que si se parte de la producción, kg/h de producto, se basan en 100 kg de combustible

Debido a que el contacto a nivel molecular entre combustible y comburente dista mucho de ser total, es preciso un exceso de comburente para alcanzar una combustión satisfactoria, exceso que depende del combustible y del dispositivo empleado para lograr la combustión. La tabla Q.5 indica los excesos de aire típicos para una serie de distintos combustibles y equipos.

Tabla Q.5 Excesos de aire típicos para distintos combustibles y equipos de combustión<sup>29</sup>

Combustible	Hogar/Mechero	Exceso de aire, % en masa
Carbón pulverizado	Hogar completamente enfriado por agua, con extracción seca de cenizas	15-20
Carbón pulverizado	Hogar parcialmente enfriado por agua, con extracción seca de cenizas	15-40
Carbón molido	Horno de ciclón, a presión o succión	13-20
Carbón molido	Hogar de lecho fluido	15-20
Carbón	Parrilla con alimentación esparcida	25-35
Carbón	Parrilla vibratoria enfriada por agua	25-35
Carbón	Parrillas de cadenas y móviles	25-35
Carbón	Parrilla de alimentación inferior	25-40
Fueloil	Mecheros monocombustible de registro	3-15
Fueloil	Mecheros de llama cónica o plana, con atomización por vapor	10-20
Residuos ácidos	Mecheros multicombustible de llama plana	10-15
Gas natural, de gasógeno y de refinería	Mecheros multicombustible de llama plana	3-10
Gas natural, de gasógeno y de refinería	Mecheros multicombustible	15-30
Gas de alto horno	Mecheros de registro	15-18
Madera/Cortezas	Parrilla móvil enfriada con agua	20-25
Madera/Cortezas	Hogar de lecho fluido	5-15
Melazas	Cualquier tipo de hogar	25-35
Basuras urbanas	Hogar revestido de refractario, enfriada con agua, con parrilla oscilante	80-100
Desperdicios	Hogar enfriado con agua, con parrilla oscilante	40-60
Licor negro	Hornos de recuperación en procesos de pasta de papel kraft y de sosa	15-20

<sup>29</sup>S.C. Stultz y J.B. Kitto (editores) *Steam. Its Generation and Use*, 40<sup>th</sup> edition, Backob Wilcox, Barberton, 1992, p. 9-14.

**Q.2.1 Balance de masa de una combustión a partir del consumo horario de combustible**

El planteamiento general es para combustibles que contengan cenizas y agua. Para combustibles sin cenizas ni humedad (gaseosos o líquidos),  $w$  y  $r$  (véase la tabla siguiente) son nulos y el cálculo se simplifica en consecuencia.

Las operaciones, a efectuar con hoja de cálculo, se puede estructurar en 5 hojas o tablas como las que siguen.

**Tabla Q.2-1.** Cálculo de oxígeno estequiométrico necesario,<sup>30</sup> a partir de la composición total del combustible y de su consumo *mf*.

	Componente	Composic ión	Tanto por 1 real	kg/h	M, kg/kmol	Productos	kmol/h	kmol O <sub>2</sub> /h
Oxidables	C	<i>c</i>	$(c)(1 - w - r) = c'$	$(c')(mf)$	12,01	CO <sub>2</sub>	$(c')(mf)/(12,01) = nc$	<i>nc</i>
	H	<i>h</i>	$(h)(1 - w - r) = h'$	$(h')(mf)$	1,008	H <sub>2</sub> O	$(h')(mf)/(2)(1,008) = nh$	$(0,5)(nh)$
	S	<i>s</i>	$(s)(1 - w - r) = s'$	$(s')(mf)$	32,06	SO <sub>2</sub>	$(s')(mf)/(32,06) = ns$	<i>ns</i>
	O	<i>o</i>	$(o)(1 - w - r) = o'$	$(o')(mf)$	16	O <sub>2</sub>	$-(o')(mf)/(2)(16) = -no$	$-no$
	N	<i>n</i>	$(n)(1 - w - r) = n'$	$(n')(mf)$	14,01	N <sub>2</sub>	$(n')(mf)/(14,01)$	0
	Total	1						
No oxidables	Humedad	<i>w</i>	<i>w</i>	$(w)(mf)$	18,016	H <sub>2</sub> O	$(w)(mf)/(18,016) = nw$	0
	Cenizas	<i>r</i>	<i>r</i>	$(r)(mf)$	-----	Cenizas	-----	0
Total		<i>w + r</i>					kmol O <sub>2</sub> /h	$\Sigma = no^{30}$
Total combus- tible <i>mf</i>			1				kg O <sub>2</sub> /h	$(32)(no^{30}) = mo^{30}$

<sup>30</sup>Correspondiente a la combustión sin exceso de aire, o neutra.

**Tabla Q.2-2.** Cálculo de los gases no quemados y consumo de aire,  $ma$ .

Con la aplicación PROPIEDADES hallamos la presión de saturación  $P_s$ , en atmósferas, del agua a la temperatura a la hemos determinado su humedad relativa  $H_r$ . El exceso de aire  $e$  lo definimos como (aire consumido - aire estequiométrico)/aire consumido

	kmol/h	exceso aire	Consumo	Total (kmol/h)	M (kg/kmol)	kg/h
$O_2$	$no''$	$(e)(no''')$	$-no''$	$(e)(no''')$	32	$(32)(e)(no''')$
$N_2 = (O_2)(0,7905/0,2095)$	$nn$	$(e)(nn)$	0	$(1 + e)(nn)$	28,02	$(28,02)(1 + e)(nn)$
$H_2O \approx (O_2 + N_2)(H_r)(P_s/(1 - H_r P_s))$	$nh'$	$(e)(nh')$	0	$(1 + e)(nh')$	18,01	$(18,01)(1 + e)(nh')$
					Total no quemados	$\Sigma = mg$
					$O_2$ , estequiom.	$mo''$
					Total aire	$mg + mo'' = ma$

**Tabla Q.2-3.** Cálculo de los gases producidos por la oxidación del combustible.

	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Total, kmol/h
C	<i>nc</i>					<i>nc</i>
H		<i>nh</i>				<i>nh</i>
S			<i>ns</i>			<i>ns</i>
O				0		0
N					0	0
Humedad		<i>nw</i>				<i>nh'</i>
Cenizas						0
Total	<i>nc</i>	<i>nh + nw</i>	<i>ns</i>	0	0	<i>nc + nh + (1 + e) nh' + nw</i>
M, kg/kmol	44,01	18,016	64,06	32	28,02	----
Total kg/h	$(44,01)(nc)$	$(18,016)(nh + nw)$	$(64,06)(ns)$	0	0	$\Sigma = gc$

Con estos valores ya podemos comprobar el balance de masa, que ha de cerrar exactamente.

Entradas	kg/h	Salidas	kg/h
Combustible	<i>mf</i>	Cenizas	$(r)(mf)$
Aire	<i>ma</i>	Gases producto de combustión	<i>gc</i>
		Gases no quemados	<i>mg</i>
Total	$mf + ma$	Total	$(r)(mf) + gc + mg$

Finalmente hemos de establecer la composición molar de los humos, que nos da las presiones parciales de los componentes, necesarias para calcular la emitancia y absorbancia de los humos.

	kmol/h	% en volumen
CO <sub>2</sub>	<i>nc</i>	$100 nc / \Sigma$
H <sub>2</sub> O (combustión + humedad comb. + humedad aire)	$h + nw + (1 + e) nh'$	$100 [h + nw + (1 + e) nh'] / \Sigma$
O <sub>2</sub>	$eno''$	$100 eno'' / \Sigma$
SO <sub>2</sub>	<i>ns</i>	$100 ns / \Sigma$
N <sub>2</sub>	$(1 + e) nn'$	$100 (1 + e) nn' / \Sigma$
Total	$\Sigma$	100

### Q.2.2-2 Balance de masa de una combustión para 100 kg de combustible

El cálculo se puede estructurar igualmente en 5 tablas, incluyendo el balance global y la composición molar de los humos, que son idénticas a las mostradas en el apartado anterior.

**Tabla 2.2-1.** Cálculo de oxígeno estequiométrico necesario para 100 kg de combustible.

	Componente	Composición, %	% real, kg	M, kg/kmol	Productos	kmol/100 kg	kmol O <sub>2</sub> /100 kg
Oxidables	C	$c$	$(c)(100 - w - r) = c'$	12,01	CO <sub>2</sub>	$(c')/(12,01) = nc$	$nc$
	H	$h$	$(h)(100 - w - r) = h'$	1,008	H <sub>2</sub> O	$(h')/(2)(1,008) = nh$	$(0,5)(nh)$
	S	$s$	$(s)(100 - w - r) = s'$	32,06	SO <sub>2</sub>	$(s')/(32,06) = ns$	$ns$
	O	$o$	$(o)(100 - w - r) = o'$	16	O <sub>2</sub>	$-(o')/(2)(16) = -no'$	$-no'$
	N	$n$	$(n)(100 - w - r) = n'$	14,01	N <sub>2</sub>	$(n')/(14,01)$	0
	Total	100					
No oxidables	Humedad	$w$	$w$	18,016	H <sub>2</sub> O	$(w)/(18,016)$	0
	Cenizas	$r$	$r$	-----	Cenizas	-----	0
Total		$w + r$				kmol O <sub>2</sub> /100 kg	$\Sigma = no'$
Total combustible			100			kg O <sub>2</sub> /100 kg	$(32)(no') = mo'$

Las tablas siguientes siguen el modelo expuesto antes, con la salvedad de referirse a 100 kg de combustible en vez de a su caudal.

Se comprueba el balance de masa y se establece la composición molar de los humos como en el cálculo la anterior.

### Q.3 Ejercicios

1. Dado el carbón bituminoso bajo en volátiles de la tabla Q-4:

- a) Determínese la potencia calorífica inferior referida al combustible sin agua ni cenizas
- b) Calcúlense los kg/h necesarios para suministrar una potencia total (útil + pérdidas) de 1.456,555 kW, a un horno
- c) Efectúese el balance de masa de la combustión con un 50% de exceso de aire a 10°C y un 5% de humedad.

**Resultados:** a) 33,89 MW/kg; b) 198,11 kg/h; c) Aire: 2.592,04 kg/h, Humos: 2.764,0 kg/h, Composición de los humos, vol. %: CO<sub>2</sub>, 11,93; H<sub>2</sub>O, 4,83; SO<sub>2</sub>, 0,11; O<sub>2</sub>, 6,75; N<sub>2</sub>, 76,40.

2. Efectúese el balance de masa de la combustión de 100 kg/h del fuel-oil de la figura Q.5, con un 20% de exceso de aire a 30°C y un 60% de humedad.

**Resultados:** Por 100 kg de combustible. Aire: 1.649,69 kg, Humos: 1.749,29 kg, Composición de los humos, vol. %: CO<sub>2</sub>, 11,9846; H<sub>2</sub>O, 10,8753; SO<sub>2</sub>, 0,1035; O<sub>2</sub>, 3,2580; N<sub>2</sub>, 73,7779.

3. Dado un G.N. de composición volumétrica, en %, 85 de metano, 10 de etano, 3 de nitrógeno y 2 de agua:

- a) Efectúese el balance de masa de la combustión de 1 m<sup>3</sup> en C.N., con un exceso del 3% de aire a 30°C y un 50% de humedad.
- b) Hállense el índice de Wobbe y el potencial de combustión del gas.

4. Efectúese el balance de masa de la combustión de 125 kg/h del gasoil de densidad a 15°C y destilación ASTM:

% recogido	°F
IBP	345
10	387
30	404
50	419
70	433
90	459
FBP	483

con un exceso del 12% de aire a 20°C y un 40% de humedad. El contenido de azufre del gasoil es despreciable.

5. Dado un destilado de densidad relativa igual a 0.83 del que se conocen las temperaturas de la destilación ASTM correspondientes al 10% (405°F), al 50% (453°F) y al 90% (490°F), calcúlense todas las propiedades disponibles con la aplicación PROPIEDADES y compárense con los resultados dados por la figura Q.4.

