IX.- FUENTES DE ENERGÍA

pfernandezdiez.es

Formación de los carbones	*343*
Clasificación de los carbones.- Clasificación ASTM por porcentajes	*345*
Características de cada tipo de carbón: Turba, lignito, subbituminoso, bituminoso, antracita	*349*
Caracterización de los carbones	*351*
Análisis standard ASTM	*351*
Humedad	*351*
Humedad estructural, superficial, de equilibrio y residual	*352*
Análisis inmediato	*352*
Análisis elemental ASTM-D3176	*352*
Poder calorífico superior del carbón	*353*
Grindabilidad	*353*
Indice de hinchamiento libre	*354*
Composición de la ceniza	*354*
Temperatura de fusión de la ceniza	*354*
Perfil de la combustión	*354*
Indice de abrasividad	*355*
Indice de erosión	*356*
Viscosidad de la escoria	*356*
Propiedades y tipos de carbones	*356*
Combustibles derivados del carbón: cocke, subcoque y líquidos	*356*
Combustibles gaseosos	*359*
Gas de batería de coque	*360*
Gas de horno alto	*360*
Gas de agua y gas pobre o gas de gasógeno	*361*
Subproductos gaseosos de la gasificación	*361*
Combustible mezcla carbón y agua	*362*
Fuelóleos	*363*
Características de los fuelóleos	*363*
Destilados y residuales	*364*
Análisis de fuelóleos	*365*
Análisis elemental de fuelóleos	*365*
Densidad API	*365*
Viscosidad	*366*
Poder calorífico	*366*
Punto de congelación y de gasificación	*366*
Agua y sedimentos	*367*
Propiedades de los fuelòleos	*367*
Gas natural	*369*
Otros combustibles	*370*
Subproductos del petróleo	*370*
Coque retardado	*370*
Alquitrán de petróleo y emulsiones de aceites	*371*
Madera	*371*
Subproductos y desechos de la madera	*373*
El bagazo y otros desechos vegetales	*373*
Residuos sólidos urbanos	*373*
Referencias	*375*

El carbón es la segunda fuente más importante de combustible, el 32% de la energía mundial, y es el combustible fósil más común en la generación de energía eléctrica. A consecuencia de las emisiones resultantes de SO_2, los niveles del contenido de S en los carbones introducen criterios básicos para su utilización. Las preocupaciones medioambientales sobre las distintas emisiones de contaminantes, especialmente SO_2, NO_x y CO_2, pueden limitar el futuro crecimiento del consumo mundial del carbón.

La gran mayoría de los carbones USA son $\begin{cases} - \textit{ subbituminosos} \\ - \textit{ lignítico} \end{cases}$, y tienen bajos contenidos de S, lo que permite cumplimentar de forma económica, las exigencias del Acta Federal de Aire Limpio y las disposiciones legales sobre lluvia ácida.

Sin embargo, en USA, Japón y países europeos, se están investigando tecnologías para obtener un uso limpio del carbón, con el fin de facilitar la reducción de emisiones contaminantes, a la vez que se mejora la eficiencia energética. En USA, algunas de estas tecnologías se encuentran actualmente en fase de comercialización a la espera de su implantación en las centrales termoeléctricas, actuales y futuras.

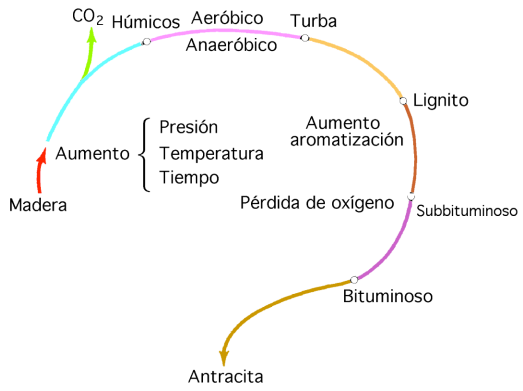
IX.1.- FORMACIÓN DE LOS CARBONES

El carbón se ha formado a partir de plantas, por medio de procesos químicos y geológicos que han tenido lugar a lo largo de millones de años. La deposición de sucesivas capas de residuos vegetales en regiones húmedas o pantanosas, en condiciones que impedían su exposición al aire y la consiguiente putrefacción de los residuos acumulados, junto con la acción bacteriana, la presión y la temperatura actuando sobre la materia orgánica a lo largo del tiempo, contribuyeron a la transformación de los residuos vegetales en carbón, proceso denominado carbonización.

El primer producto de este proceso es la turba, que contiene parcialmente descompuestos, tallos, ramas y cortezas, y que no se suele clasificar como carbón; la turba se transforma progresivamente hasta llegar a ser lignito, más carbonizado, que puede llegar a convertirse en antracita.

Durante la carbonización tienen lugar una serie de procesos físicos y químicos, que junto con la presión y temperatura a que está sometido el material orgánico provocan cambios estructurales y químicos, que incluyen: $\begin{cases} - \textit{ un incremento en el contenido de carbono} \\ - \textit{ una pérdida de agua, oxígeno e hidrógeno} \\ - \textit{ una gran resistencia frente a disolventes} \end{cases}$

El proceso de la carbonización se representa en la Fig IX.1, en forma esquemática. El carbón es muy heterogéneo y puede variar ampliamente su composición química, según sea el yacimiento de procedencia.



Composición en % en peso, base seco sin ceniza			
Material	*Carbono*	*Hidrógeno*	*Oxígeno*
Madera	*49*	*7*	*44*
Turba	*60*	*6*	*34*
Lignito	*70*	*5*	*25*
Subbituminoso	*75*	*5*	*30*
Bituminoso	*85*	*5*	*10*
Antracita	*94*	*3*	*3*

Fig IX.1.- Proceso de la carbonización

Además de los componentes orgánicos (carbono, hidrógeno y oxígeno), el carbón contiene impurezas, como la ceniza y el S.

La *ceniza* procede del material mineral o inorgánico, aportado o absorbido durante el período de la carbonización. Las fuentes de ceniza incluyen substancias inorgánicas, como la sílice, que forman parte de la estructura química de las plantas.

Durante el período de carbonización la materia orgánica captura $\begin{cases} iones\ inorgánicos \\ granos\ minerales \end{cases}$, que están presentes en el agua pantanosa.

En los poros y grietas de las vetas de carbón se depositan materias como limo, pizarra y pirita.

El S se presenta en el carbón en tres formas diferentes:

- *El S-orgánico, que forma parte de la estructura molecular del carbón*

- *El S-piritoso, que aparece como mineral pirita*

- *El S-sulfato, principalmente como sulfato de hierro*

La principal fuente de S es el ión sulfato, presente en el agua. El agua dulce tiene una baja concentración de sulfatos, mientras que el agua salada tiene un elevado contenido de sulfatos; por esta razón, el carbón bituminoso de USA, que procede de depósitos orgánicos acumulados en esa región cuando los mares cubrían la misma, tiene un alto contenido en S.

El carbón es una sustancia compleja y heterogénea. A veces resulta útil establecer una fórmula estructural que pueda servir de ayuda, como modelo y con las debidas precauciones, para ilustrar algunas reacciones del carbón y colaborar en el futuro desarrollo de procesos relacionados con el mismo, como son la gasificación, la combustión y la licuefacción.

IX.2.- CLASIFICACIÓN DE LOS CARBONES

El carbón es una sustancia heterogénea que abarca amplios campos en su composición, estructura y propiedades particulares, por lo que es necesario un sistema de clasificación de acuerdo con

una serie de calidades, como la alteración progresiva que ha tenido lugar en el proceso de carbonización, cuando se ha transformado sucesivamente, a partir del lignito, pasando por los denominados subbituminoso, bituminoso y antracita.

Clasificación ASTM por porcentajes.- La clasificación ASTM se utiliza como criterio, para definir el $\begin{cases} \text{- valor de los parámetros de materias volátiles} \\ \text{- carbono fijo determinado en un análisis inmediato} \\ \text{- poder calorífico} \end{cases}$

El sistema de clasificación ASTM ayuda a identificar las utilizaciones óptimas comerciales de los diferentes carbones y facilita información con vistas a su combustión; se presenta en la Tabla IX.3 y se describe en la Sección D388 de las normas del Código ASTM.

El análisis inmediato es el método de ensayo en laboratorio, y se describe en ASTM-D271; con este análisis se determinan:

- *El contenido de humedad*
- *La cantidad de ceniza residual en una combustión completa*
- *Las materias volátiles que se desprenden cuando se calienta a una determinada temperatura*
- *El carbono fijo residual tras el desprendimiento de las materias volátiles*

La Tabla IX.5 facilita un análisis inmediato de un carbón (en este caso de West Virginia, USA), tal como se recibe, que incluye la humedad total presente en el carbón, cuando éste llega a las instalaciones de la planta energética.

Para los carbones viejos se utilizan como parámetros de clasificación $\begin{cases} \text{- el carbono fijo} \\ \text{- las materias volátiles} \end{cases}$

La cantidad de estos contenidos se determina sobre base seca y sin materia mineral, mediante la formulación desarrollada en 1906 por S.W. Parr, por lb, de la forma:

$$\%\ Carbono\ fijo = C_{fijo\ \%} = \frac{C_{fijo} - 0{,}15\ S}{100 - (M + 1{,}08\ A + 0{,}55\ S)}\ x\ 100$$

$$\%\ Materia\ volátil = M_{volátil\%} = 100 - C_{fijo\%}$$

$$Btu_{\%} = \frac{Btu - 50\ S}{100 - (1{,}08\ A + 0{,}55\ S)}$$

$$\text{Fórmulas aproximadas:} \begin{cases} \%\ Carbono\ fijo:\ C_{fijo\ \%} = \dfrac{C_{fijo}}{100 - (1{,}1\ A + 0{,}1\ S)}\ x\ 100 \\ \%\ Materia\ volátil:\ M_{volátil\ \%} = 100 - C_{\%} \\ Btu_{\%} = \dfrac{Btu}{100 - (1{,}1\ A + 0{,}1\ S)} \end{cases}$$

en las que: $\begin{cases} Btu \text{ es el poder calorífico por lb, (1 kJ/kg= 2,326 Btu/lb)} \\ M \text{ es el \% de humedad superficial ; A es el \% de ceniza ; S es el \% de azufre} \end{cases}$

Todos estos carbones tienen menos de 48 Btu/lb sobre puro (seco y sin ceniza). La humedad es el contenido de agua estructural, que no incluye el agua superficial del carbón. Si posee propiedad aglome-rante hay que clasificarlo en el grupo *bajo en volátiles*, dentro de la clase bituminoso. Los carbones que tienen 69% o más de C fijo sobre puro se clasifican según su C fijo, para cualquier potencia calorífica.

Los porcentajes de C calculados sobre muestra $\begin{cases} - \text{ seca (sin humedad)} \\ - \text{ pura (sin materia mineral)} \end{cases}$ permiten su clasificación.

Todos los parámetros se evalúan sobre muestra húmeda.

Tabla IX.1.- Información energética de la Administración USA. Estados con mayores reservas comprobadas de carbón (10^9 ton)

Nombre del estado USA	Reservas totales		Reservas en el interior		Reservas a cielo abierto		% Total
	ton	t	ton	t	Ton	t	USA
Montana	120	109	71	64	49	44	25,3
Illinois	79	72	63	57	16	15	16,5
Wyoming	69	63	43	39	26	24	14,5
West Virginia	38	34	33	30	5	4,5	8
Kentucky	30	27	25	23	5	5,4	6,5
Pennsylvania	30	27	28	25	1	0,9	6,2
Ohio	190	17	13	12	6	5,4	3,9
Colorado	170	15	12	11	5	4,5	3,6
Texas	14	13	0	0	14	13	2,8
Indiana	10	9	9	8	1	0,9	2,2
Todos los demás	50	45	24	22	25	23	10,4
TOTAL USA	476	431	321	291	154	140,6	100

Tabla IX.3.- Clasificación de carbones en % (ASTM-D388)

Clase	Grupo	Límites Carbono Fijo % puro (seco, sin ceniza)		Límites Materias Volátiles % puro (seco, sin ceniza)		Límites Poder Calorífico Btu/lb puro (seco, sin ceniza)		Carácter aglomerante
		≥	<	>	≤	≥	<	
I Antracita	Meta-antracita	98			2			No aglomerante
	Antracita	92	98	2	8			
	Semi-antracita C	86	92	8	14			
II Bituminoso	Bajo en volátiles	78	86	14	22			Aglomerante en general
	Medio en volátiles	69	78	22	31			
	Alto en volátiles A		69	31		14.000 d		
	Alto en volátiles B					13.000 d	14000	
	Alto en volátiles C					11500	13000	
						10.500 e	11500	Aglomerante
III Sub bituminoso	Sub-bituminoso A					10500	11500	No aglomerante
	Sub-bituminoso B					9500	10500	
	Sub-bituminoso C					8300	9500	
IV Lignito	1. Lignito A					6300	8300	No aglomerante
	2. Lignito B						6300	

Tabla IX.3.- Contenidos en S y reservas comprobadas de USA en interior y a cielo abierto x (10^6 ton)

ESTADO	Rangos de contenido en azufre, %				
	< 1,0	1,1 a 3,0	> 3,0	No Conocido	Total
Alabama	624,7	1099,9	16,4	1239,4	2981,8
Alaska	11458,4	184,2	0	0	11645,4
Arizona	173,3	176,7	0	0	350
Arkansas	81,2	463,1	46,3	74,3	665,7
Colorado	7475,5	786,2	47,3	6547,3	14869,2
Georgia	0,3	0	0	0,2	0,5
Illinois	1005,1	7341,4	42968,9	14256,2	65664,8
Indiana	548,8	3305,8	5262,4	1504,1	10622,6
Iowa	1,5	226,7	2105,9	549,2	2884,9
Kansas	0	309,2	6956	383,2	1388,1
Kentucky East	6558,4	3321,8	299,5	2729,3	12916,7
Kentucky West	0,2	564,4	9243,9	2815,9	12623,9
Maryland	135,1	690,5	187,4	34,6	1048,2
Michigan	4,6	85,4	20,9	7	118,2
Missouri	0	182	5226	4080,5	9487,3
Montana	101646,6	4115	502,6	2116,7	108396,2
New Mexico	35753	793,4	0,9	27,5	4394,8
North Carolina	0	0	0	31,7	31,7
North Dakota	5389	10325,4	268,7	15	16003
Ohio	134,4	6440,9	12534,3	1872	21077,2
Oklahoma	275	326,6	241,4	450,5	1294,2
Oregon	1,5	0,3	0	0	1,8
Pennsylvania	7318,3	16913,6	3799,6	2954,2	31000,6
South Dakota	103,1	287,9	35,9	1	428
Tennessee	204,8	533,2	156,5	88	986,7
Texas	650,9	1884,6	284,1	444	3271,9
Utah	1968,5	1546,7	49,4	478,3	4042,5
Virginia	2140,1	1163,5	14,1	330	1649,9
Washington	603,5	1265,5	39	45,1	1954
West Virginia	14092,1	14006,2	6823,3	4652,5	39589,8
Wyoming	39912,3	14657,4	1701,1	3060,3	53336,1
TOTAL	200181,4	92997,5	92571,5	50778	436735,7

Tabla IX.4.- Diecisiete carbones seleccionados USA (ordenados según clasificación ASTM)

Nº	Rango carbón		Situación	Análisis carbón, con humedad de yacimiento						% Carbono fijo	% Btu
	Clase	Grupo		Humedad en equilibrio	Materias volátiles	Carbono fijo	Ceniza	Azufre	$P_{cal\ inf}$ Btu		
1	I	1	Schuylkill	4,5	1,7	84,1	9,7	0,77	12745	99,2	14280
2	I	2	Lackawanna	2,5	6,2	79,4	11,9	0,6	12925	94,1	14880
3	I	3	Montgomery	2	10,6	67,2	21,2	0,62	11925	88,7	15340
4	II	1	McDowell	1	16,6	77,3	5,1	0,74	14715	82,8	15600
5	II	1	Cambria	1,3	17,5	70,9	10,3	1,68	13800	81,3	15595
6	II	2	Somerset	1,5	20,8	67,5	10,2	1,68	13720	77,5	15485
7	II	2	Indiana	1,5	23,4	64,9	10,2	2,2	13800	74,5	15580
8	II	3	Westmoreland	1,5	30,7	56,6	11,2	1,82	13325	65,8	15230
9	II	3	Pike	2,5	36,7	57,5	3,3	0,7	14480	64,3	15040
10	II	3	Belmont	3,6	40	47,3	9,1	4	12850	55,4	14380
11	II	4	Williamson	5,8	36,2	46,3	11,7	2,7	11910	57,8	13710
12	II	4	Emery	5,2	38,2	50,2	6,4	0,9	12600	57,3	13560
13	II	5	Vermilion	12,2	38,8	40	9	3,2	11340	51,8	12630
14	III	1	Musselshell	14,1	32,2	46,7	7	0,43	11140	59	12075
15	III	2	Sheridan	25	30,5	40,8	3,7	0,3	9345	57,5	9745
16	III	3	Campbell	31,1	31,4	32,8	4,8	0,55	8320	51,5	8790
17	IV	1	Mercer	37	26,6	32,2	4,2	0,4	7255	55,2	7610

% FC = FC sobre puro (seco, sin ceniza), % *% Btu = Btu / lb sobre puro (seco, sin ceniza)*

Tabla IX.5.- Análisis de carbón tal como se recibe (Carbón de vapor de Pittsburg, West Virginia, EE.UU.)

Análisis inmediato		*Análisis elemental*	
Humedad	*2,5*	*Humedad*	*2,5*
Materias Volátiles	*37,6*	*Carbono*	*75*
Carbono Fijo	*52,9*	*Hidrógeno*	*5*
Ceniza	*7*	*Azufre*	*2,3*
Total	*100*	*Nitrógeno*	*1,5*
Poder calorífico		*Oxígeno*	*6,7*
Btu / lb	*13000*	*Ceniza*	*7*
kJ / kg	*-30238*	*Total*	*100*

Los carbones $\begin{cases} más\ jóvenes \\ de\ bajo\ porcentaje \end{cases}$ se clasifican por su contenido en Btu, determinado sobre una base seca y pura.

Para distinguir convenientemente los grupos contiguos, se utiliza el *índice de hinchamiento*, tal como se especifica en la norma del Código ASTM-D388.

La Tabla IX.4 presenta una selección de diecisiete carbones USA, ordenados mediante el sistema de clasificación ASTM.

CARACTERÍSTICAS DE CADA TIPO DE CARBÓN:

Turba.- Es el primer producto que se presenta en el proceso de formación del carbón y es una sustancia heterogénea de materia vegetal parcialmente descompuesta y de materia mineral. Su color va desde el amarillo al pardo (marrón oscuro), dependiendo de su edad geológica; contiene hasta un 70% de humedad, siendo su poder calorífico bajo, del orden de 3000 Btu/lb (6980 kJ/kg).

Lignito.- Es un carbón blando de baja calidad; su gama de colores va desde el pardo (marrón) hasta el negro; su poder calorífico es siempre inferior a 8300 Btu/lb (19300 kJ/kg).

Los yacimientos de lignito son geológicamente jóvenes y en estos carbones se pueden reconocer algunos residuos de materia vegetal; su contenido en $\begin{cases} -\ humedad\ puede\ llegar\ al\ 30\% \\ -\ materias\ volátiles\ puede\ ser\ alto \end{cases}$ por lo que los lignitos arden con mucha facilidad.

El lignito se seca cuando se expone al aire. Cuando está almacenado combustiona espontáneamente, lo que es motivo de preocupación; su transporte a grandes distancias no es económico, a causa de su elevado contenido en humedad y bajo en Btu.

Carbón subbituminoso.- Es negro, con poca textura vegetal; no es coquizable, pues sufre un pequeño hinchamiento al calentarse y tiene un contenido de humedad relativamente alto, del 15÷30%; cuando se seca, tiene tendencia a la combustión espontánea.

El carbón subbituminoso tiene un alto contenido en volátiles e igniciona (enciende y arde) con facilidad, tiene menos ceniza y quema con más limpieza que los carbones de tipo lignito.

Los carbones subbituminosos de USA tienen muy poco S, casi siempre menos del 1 %.

Debido a su poder calorífico superior, que oscila entre $\begin{cases} 8.300 \div 11.500\ Btu/lb \\ 10.306 \div 26.749\ kJ/kg \end{cases}$, y a su bajo contenido en S, el cambio desde otro carbón a uno subbituminoso constituye una opción muy atractiva para muchas centrales termoeléctricas, con vistas a la limitación de las emisiones de SO_2.

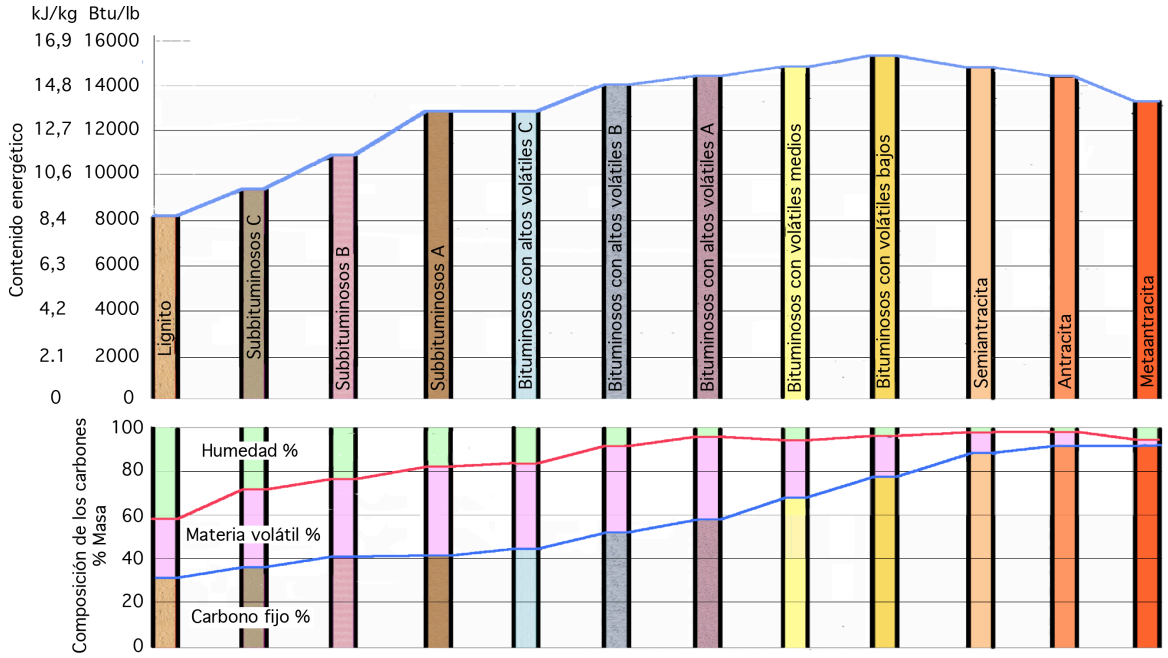


Fig IX.2.- Contenido energético y composición estructural de los carbones

Carbón bituminoso.- Es el que se quema en mayor cantidad en las centrales termoeléctricas. Tiene aspecto negro, con capas alternadas de negro brillante y mate; su poder calorífico está comprendido entre $\begin{cases} 10.500 \div 14.000\ Btu/lb \\ 24.423 \div 36.053\ kJ/kg \end{cases}$ y su contenido de carbono fijo oscila entre el 69÷86%.

Su poder calorífico es más alto, y la humedad y volátiles más bajos que los que corresponden a los subbituminosos y lignitos; su alto poder calorífico y su relativo alto contenido en volátiles, permiten que estos carbones bituminosos ardan fácilmente cuando se atomizan hasta un polvo fino y rara vez experimentan combustión espontánea durante su almacenamiento. Algunos tipos cuando se calientan en ausencia de aire, se ablandan y desprenden volátiles, formando un producto negro y poroso (*coque)*, que se utiliza en los hornos altos como combustible.

Antracita.- Es el carbón de más calidad, negro brillante, duro y frágil, con pocas o ninguna apariencia de capas. Es el carbón que tiene el más alto contenido en carbono fijo, que se suele situar entre el 86÷98%. Su bajo contenido en volátiles justifica que la antracita tenga siempre una combustión lenta; la mayoría de las antracitas tienen un contenido muy bajo en humedad, que se sitúa en torno al 3%.

Su poder calorífico es del orden de 15.000 Btu/lb (34.890 kJ/kg), ligeramente inferior al correspondiente a los carbones bituminosos; es de bajo contenido en S y ceniza y arde con llama caliente y limpia.

IX.3.- CARACTERIZACIÓN DE LOS CARBONES

El criterio para configurar la clasificación de carbones por porcentajes (calidad) se basa en su análisis inmediato.

El análisis de carbones facilita información útil, como:

- La selección del carbón idóneo para una determinada instalación de generación de vapor

- La evaluación de los equipos necesarios para el sistema de manipulación y combustión

- El aporte de datos para el diseño de los equipos inherentes a la planta que utilice el carbón

El análisis consiste en una serie de determinaciones de acuerdo con unas normas concretas bien establecidas, según métodos estandarizados ASTM, o ensayos especiales desarrollados por empresas particulares.

ANÁLISIS ESTÁNDAR ASTM.- A consecuencia de la variación que presentan los distintos carbones en su contenido de humedad y ceniza, la composición determinada por un análisis inmediato hay que referirla a una base referencial como alguna de las siguientes:

a) El como se recibe se refiere al porcentaje en peso, de los diversos componentes del carbón, tal y como llega al laboratorio para su análisis; las muestras tal como se reciben contienen niveles de humedad muy diferentes entre sí

b) En el análisis sobre base seca se determina la humedad de la muestra; este valor se utiliza para corregir el porcentaje de cada componente respecto a un nivel de humedad cero, es decir, sobre seco

c) La ceniza del carbón determinada en el análisis anterior no es la materia mineral contenida en el combustible, lo que puede causar problemas cuando los carbones se clasifican por porcentajes, de conformidad con el sistema ASTM

Estas bases referenciales se utilizan para corregir los diversos valores del análisis inmediato, referidos a una base de materia mineral, a fin de determinar la materia volátil, el carbono fijo y el poder calorífico.

HUMEDAD.- El carbón que se recibe en una planta termoeléctrica tiene una gran variedad de contenidos en humedad estructural y superficial, que se presentan en diversas formas.

La *humedad estructural* es un componente intrínseco que se mantiene ligada a la estructura del carbón y no se puede eliminar con facilidad cuando el carbón se seca al aire.

La *humedad superficial* se ha añadido externa y posteriormente a la carbonización y se puede eliminar con la simple exposición del carbón al aire.

La humedad estructural no se puede diferenciar de la superficial mediante un análisis convencional.

Existen otros tipos de humedad para caracterizar un carbón, como la { *- de equilibrio*, *- de aire seco*, *- libre*

Humedad de equilibrio.- Se utiliza como una estimación de la humedad estructural; el metodo estandarizado ASTM-D121 define la humedad total del carbón, como la pérdida en peso que experimenta una muestra del mismo, bajo condiciones específicas y mantenidas de { *- temperatura*, *- tiempo*, *- caudal de aire*

Si se utiliza la norma ASTM-D3302, la humedad total se calcula a partir de la pérdida o ganancia en humedad, en una corriente de aire seco o con una humedad residual dada.

Humedad residual.- La muestra se seca al aire y a continuación se la somete a un secado complementario en un horno. Debido a que los análisis posteriores (inmediato y elemental) se realizan sobre muestras secadas al aire, el valor de la humedad residual resulta imprescindible para { *- convertir*, *- referir* los parámetros a base seca.

Cualquiera que sea la pérdida de humedad en el secado al aire, hay que tener presente que hay que manipular y pulverizar muestras de carbón que se toman del sistema de alimentación de combustible a la caldera.

ANÁLISIS INMEDIATO.- Consiste en la determinación de los contenidos en materia volátil, carbono fijo y ceniza, según *ASTM-D3172*. En una muestra en la que la ceniza se ha excluido, la materia volátil y el carbono fijo son los dos parámetros indicadores para la clasificación por porcentajes.

El *contenido de materia volátil* en el carbón indica la facilidad de ignición que tiene el combustible analizado y pone de manifiesto la necesidad de un combustible suplementario, para conseguir la óptima estabilización de la llama del combustible principal.

El *contenido en ceniza (escoria y polvo)* define la capacidad con la que debe operar el sistema para su recogida y estimar el coste de su manipulación (transporte y almacenamiento).

Análisis elemental ASTM-D3176.- Incluye la determinación de los contenidos en C, H_2, N_2 y S, así como el cálculo del contenido en O_2. Cuando el análisis elemental se utiliza junto con el po-

der calorífico del carbón, es posible realizar cálculos de combustión para determinar:

- *La cantidad de carbón en la alimentación*
- *El aire comburente necesario*
- *Los valores de la difusividad (liberación de calor)*
- *El rendimiento de la caldera*
- *La emisión de S de la planta*

Azufre.- Para determinar los diferentes estados en que se puede encontrar el S presente en un carbón, se utiliza el ensayo ASTM-D4292, con el que se determinan las cantidades correspondientes a $\begin{cases} S\text{-}sulfato \\ S\text{-}piritoso \\ S\text{-}orgánico \end{cases}$ que se cumplimenta determinando el $\begin{cases} S\text{-}total \\ S\text{-}sulfato \\ S\text{-}pirítico \end{cases}$ obteniéndose el S-orgánico por la diferencia entre el primero y la suma de los otros dos.

La cantidad de S piritoso presente en un carbón es un indicador de la abrasividad del combustible.

PODER CALORÍFICO SUPERIOR DEL CARBÓN.- Se obtiene en bomba calorimétrica adiabática y se expresa en Btu/lb (kJ/kg), referido a una determinada base $\begin{cases} seca \\ seca\ y\ pura \end{cases}$, etc.

El valor encontrado determina la máxima energía del combustible teóricamente disponible para la producción de vapor; dicho valor se utiliza para fijar la cantidad de combustible que se necesita manipular, pulverizar y quemar en la planta.

El *poder calorífico superior* (PCS) se define como el calor desprendido por la unidad de combustible, cuando éste se quema y da productos finales en forma de ceniza, CO_2, SO_2, N_2 y agua líquida, o parcialmente en forma de vapor.

El *poder calorífico inferior* (PCI) se calcula a partir del superior y es el calor producido por la unidad de combustible, cuando la totalidad del agua presente en los productos finales está en forma de vapor; su cálculo, conforme indica la ASTM-D407, se efectúa restando del superior la cantidad de 1030 Btu/lb (2396 kJ/kg), que es el calor de disociación del vapor de agua.

Para los cálculos de combustión, $\begin{cases} en\ USA\ se\ utiliza\ el\ poder\ calorífico\ superior \\ en\ Europa\ se\ utiliza\ el\ poder\ calorífico\ inferior \end{cases}$

GRINDABILIDAD.- El ensayo de grindabilidad (triturabilidad) Hardgrove es una medida empírica de la facilidad con la que se puede moler y pulverizar un determinado carbón; para su evaluación se utiliza el método de la norma ASME-D409, que implica la molienda de una muestra de 50 gramos de carbón, secada al aire y tamizada en una malla de $16 \div 30$ mesh, mediante un molino de pista y bolas, que gira durante un minuto un total de 60 revoluciones; tras la operación, se mide el

carbón pulverizado que pasa por un tamiz de 200 mesh (75 mm).

Mediante las curvas que correlacionan la cantidad de carbón que pasa por el tamiz 200 mesh y la grindabilidad de muestras estandarizadas, suministradas por el Departamento de Energía de USA, se determina el índice de Grindabilidad Hardgrove del carbón ensayado. Algunos fabricantes de molinos de carbón han desarrollado correlaciones para los niveles de finura deseados, que relacionan la grindabilidad Hardgrove y la capacidad del molino.

ÍNDICE DE HINCHAMIENTO LIBRE.- Se emplea para indicar las características de coquización del carbón ensayado; el índice se determina por el método ASTM-D720, que consiste en calentar una muestra de 1 gramo de carbón, durante un tiempo especificado, a una temperatura determinada. El producto de la muestra de carbón obtenida durante este ensayo de hinchamiento, se compara con un juego de perfiles estandarizados; cuanto más extendido sea el perfil del producto obtenido en el ensayo, tanto mayor será el nivel de hinchamiento libre. En general, los carbones oxidados presentan índices de hinchamiento libre más bajos. El índice de hinchamiento libre se puede usar como medida relativa de las propiedades coquizantes y del grado de oxidación de un carbón.

COMPOSICIÓN DE LA CENIZA.- El análisis elemental de la ceniza se realiza tomando una muestra de la generada por el carbón objeto de ensayo, obtenida y procesada con arreglo a la norma ASTM-D3174. Los elementos presentes en la ceniza se determinan mediante análisis convencionales y se cuantifican en forma de óxidos. Medidas por absorción atómica proporcionan el dióxido de silicio SiO_2, óxido de aluminio Al_2O_3, dióxido de titanio TiO_2, óxido férrico Fe_2O_3, óxido de calcio CaO y óxido de potasio K_2O.

$$\text{El análisis de la ceniza} \begin{cases} - \textit{ facilita el cálculo de los índices de ensuciamiento y escorificación} \\ - \textit{ establece una relación } \dfrac{\textit{viscosidad escoria}}{\textit{temperatura}} \end{cases}$$

Temperatura de fusión de la ceniza.- La temperatura de fusión de la ceniza de los carbones, de conformidad con la norma ASTM-D1857, se determina a partir de unos conos construidos con la ceniza a ensayar que, una vez preparados, se calientan en unas condiciones bien determinadas. Las temperaturas de fusión se determinan en atmósfera oxidante y en atmósfera reductora, y tienen que coincidir con unas deformaciones o perfiles bien definidos adquiridos por los conos de ceniza *(Ver cap XX)*. Las temperaturas de deformaciones (inicial, hemisférica, fusión) de los conos facilitan información que permite establecer las características de la fusión de la ceniza de un carbón y que se utiliza para clasificar la ceniza frente a una potencial escorificación.

IX.4.- PERFIL DE LA COMBUSTIÓN

La técnica del perfil de la combustión predice las características de la combustión de combus-

tibles; esta tecnología y sus resultados se han aplicado a diversos combustibles líquidos y sólidos. El ensayo utiliza una muestra de 300 mg de combustible sólido que se oxida bajo ciertas condiciones especificadas; sus partículas son de tamaño inferior al que pasa por un tamiz de 60 mesh (250 mm), y se calienta en una corriente de aire a razón de 27ºF/min (15ºC/min).

La variación del peso de la muestra en el ensayo se mide continuamente; el perfil de la combustión es la gráfica resultante de representar la velocidad de la pérdida de peso respecto a la temperatura del hogar. Se ha comprobado experimentalmente que los carbones con similares perfiles de combustión tienen también similares comportamientos en los grandes hogares de las plantas.

Si se compara el perfil de la combustión de una muestra de un carbón desconocido, con el correspondiente a una muestra de un carbón conocido, para el primero se puede predecir el:

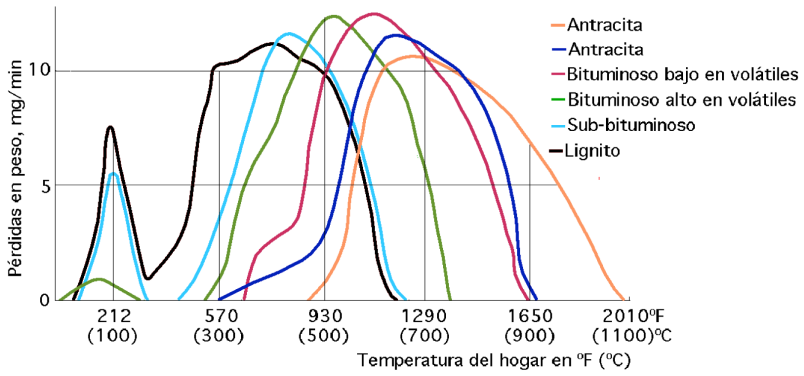


Fig IX.3.- Perfiles de combustión de carbón

- *Diseño del hogar*
- *Tiempo de residencia*
- *Exceso de aire ($aire_{exceso}$)*
- *Ajuste de los quemadores*

La *superficie* que encierra la curva del perfil con el eje de temperaturas es proporcional a la cantidad de materia combustible que hay en la muestra y la *altura* de dicha curva con relación al mismo eje es una medida de la intensidad de la combustión.

El perfil de la combustión es útil para evaluar nuevos combustibles para calderas, como son los subcoques (chars), los derivados del carbón y las basuras procesadas; la Fig IX.3 representa un conjunto de perfiles de combustión pertenecientes a carbones de diversos porcentajes.

Índice de abrasividad.- La abrasividad del carbón afecta a la vida de los elementos molturadores del molino (pulverizador); las partículas de cuarzo presentes en el carbón contribuyen de forma significativa a la abrasividad del combustible.

Para determinar la cantidad de cuarzo presente en un carbón,

- Se quema la muestra de combustible

- Se recoge la ceniza obtenida y se lava para eliminar todos los componentes solubles en ácidos

- Se tamiza el residuo para separar las fracciones correspondientes a los diversos tamaños que lo componen

- A continuación, en cada una de las fracciones correspondientes a cada tamaño, se separa un lote que tenga un total de 1000 partículas y, en cada uno de estos lotes, se determina el número de partículas de cuarzo presentes, con técnicas de microscopía; a partir de los datos obtenidos se calcula el valor de la presencia de cuarzo, que constituye un indicador de la abrasividad del carbón ensayado

Otro índice de abrasión se determina tomando una muestra de carbón calibrada y se coloca en contacto directo con cuatro probetas de ensayo metálicas acopladas a un eje de rotación que gira un total de 12000 revoluciones a una velocidad de 24 rev/seg; tras este proceso se determina la perdida de peso sufrida por los testigos metálicos de ensayo y, a partir de ello, se calcula el índice de abrasión para la muestra del carbón ensayada.

Índice de erosión.- En las calderas, la erosión tiene lugar por el impacto de las partículas de carbón pulverizadas sobre las diversas líneas (tuberías o conductos) de combustible a los quemadores y a otros componentes situados entre los molinos y los quemadores.

En el ensayo de erosión se sumerge una probeta en una corriente de carbón pulverizado; la pérdida de peso experimentada por la probeta indica la erosividad del carbón que interviene en la prueba.

Viscosidad de la escoria.- La viscosidad de la escoria de un carbón se mide a varias temperaturas, en atmósfera oxidante y en atmósfera reductora, mediante un viscosímetro para alta temperatura.

En las aplicaciones de calderas que quemen este carbón, los datos obtenidos en las medidas de viscosidad de la escoria se emplean para predecir el comportamiento del carbón original frente a su perfil de escorificación. El resultado puede poner de manifiesto, por ejemplo, la conveniencia de utilizar hogares de ceniza fundida y quemadores ciclón, para quemar el carbón ensayado.

IX.5.- PROPIEDADES Y TIPOS DE CARBONES

En la Tabla IX.6 se recogen las características básicas de una serie de carbones USA, que se identifican por el Estado donde se ubican los yacimientos y por el porcentaje en el que se clasifican; se incluyen los correspondientes análisis inmediato y elemental y, se explicita el poder calorífico superior de cada uno de ellos.

La Tabla IX.7 facilita una información de una serie de carbones internacionales similar a la precedente.

Combustibles derivados del carbón.- Como consecuencia de los abundantes yacimientos existentes y de los precios que imperan en el mercado, la demanda de carbón como combustible para centrales termoeléctricas, es más que probable que continúe creciendo en el futuro.

También se puede contemplar una futura sustitución de los aceites de petróleo y del gas natural, por combustibles derivados del carbón, como $\begin{cases} \textit{- líquidos y gases carboquímicos} \\ \textit{- lechadas de carbón y subcoques (chars)} \end{cases}$

Actualmente se investigan métodos y técnicas para obtener combustibles derivados del carbón que sean limpios y tengan una combustión eficiente.

Tabla IX.6.- Análisis de algunos carbones USA

ESTADO	Antracita	Bituminoso			Sub-bituminoso	Lignito			
		Pittsburg 8 Volát. altos Pa. o Ill.	Illinois 6 Volát. altos Illinois	UpperFreeport Volát. medios Pennsylvania	Decker Montana	N. Dakota	Hallsville Texas	Bryan Texas	S.Miguel Texas
Análisis inmediato, %									
Humedad	7,7	5,3	17,6	2,2	23,4	33,3	37,7	34,1	14,2
Volátiles / seco	6,4	40,2	44,2	28,1	40,8	43,6	45,2	31,5	21,2
C fijo / seco	83,1	50,7	45	58,5	54	45,3	44,4	18,1	10
Ceniza / seco	10,5	9,1	10,8	13,4	5,2	11,1	10,4	50,4	68,8
Poder calorífico, Btu / lb									
Como se recibe	11800	12540	10300	12970	9540	7090	7080	3930	2740
Seco	12880	13230	12500	13260	12450	10630	11360	5960	3200
Puro	14390	14550	14010	15320	13130	11960	12680	12020	10260
Análisis elemental, %									
Carbono	83,7	74	69	74,9	72	63,3	66,3	33,8	18,4
Hidrógeno	1,9	5,1	4,9	4,7	5	4,5	4,9	3,3	2,3
Nitrógeno	0,9	1,6	1	1,27	0,95	1	1	0,4	0,29
Azufre	0,7	2,3	4,3	0,76	0,44	1,1	1,2	1	1,2
Ceniza	10,5	9,1	10,8	13,4	5,2	11,1	10,4	50,4	68,8
Oxígeno	2,3	7	10	4,97	16,41	19	16,2	11,1	9,01
Análisis de ceniza, %									
SiO_2	51	50,58	41,68	59,6	23,77	29,8	23,32	62,4	66,85
Al_2O_3	34	24,62	20	27,42	15,79	10	13	21,5	23,62
Fe_2O_3	3,5	17,16	19	4,67	6,41	9	22	3	1,18
TiO_2	2,4	1,1	0,8	1,34	1,08	0,4	0,8	0,5	1,46
CaO	0,6	1,13	8	0,62	21,85	19	22	3	1,76
MgO	0,3	0,62	0,8	0,75	3,11	5	5	1,2	0,42
Na_2O	0,74	0,39	1,62	0,42	6,2	5,8	1,05	0,59	1,67
K_2O	2,65	1,99	1,63	2,47	0,57	0,49	0,27	0,92	1,57
P_2O_5	-	0,39	-	0,42	0,99	-	-	-	-
SO_3	1,38	1,11	4,41	0,99	18,85	20,85	9,08	3,5	1,32

Temperaturas de fusión de la ceniza, ºF																
	Bituminoso						Subbitum.		Lignito							
	Pittsburg 8 Volát. altos		Illinois 6 Volát. altos		Pennsylvania Volát. medios		Decker Montana		N. Dakota		Hallsville Texas		Bryan Texas		S.Miguel Texas	
Deformación inicial	2220	2560	1930	2140	2750	2750	2120	2420	2030	2160	2000	2210	2370	2470	2730	2750
Fluidificación esférica	2440	2640	2040	2330	2750	2750	2250	2470	2130	2190	2060	2250	2580	2670	2750	2750
Fluidificación hemisférica	2470	2650	2470	2400	2750	2750	2270	2490	2170	2220	2090	2280	2690	2760	2750	2750
Fluidificación 0,0625"	2570	2670	2570	2600	2750	2750	2310	2510	2210	2280	2220	2350	2900	2900	2750	2750
Fluidificación Flat	2750	2750	2750	2700	2750	2750	2380	2750	2300	2300	2330	2400	2900	2900	2750	2750

Coque.- Cuando el carbón se calienta en ausencia o con defecto de aire, los componentes más ligeros volatilizan y los hidrocarburos más pesados pirolizan, es decir, se rompen molecularmente, liberando gases y breas, y dejando un residuo carbonoso que contiene la ceniza y algo del S que había en el carbón original, lo que se conoce como coque. El contenido en S y ceniza del coque depende del que tenía el carbón original y del proceso de coquización que se haya empleado. La utilización más importantes del coque se encuentra en la industria siderúrgica, para la producción de arrabio en los hornos altos y para la carga de los cubilotes; como arde prácticamente sin generar humo, se utiliza en calefacción.

El coque en polvo, de tamaño inferior al correspondiente a la malla 0,625" mesh (15,875 mm) no sirve para la carga de los hornos altos y frecuentemente se aprovecha para la generación de va-

por; en la Tabla IX.8 se muestra un análisis típico de coque en polvo. Una parte de las breas producidas en los distintos procesos de coquización se queman en equipos similares a los que se emplean para quemar los aceites pesados del petróleo.

Tabla IX.7.- Propiedades de algunos carbones internacionales

Procedencia	*AUSTRALIA*	*CHINA*	*FRANCIA*	*SUDÁFRICA*	*INDONESIA*	*COREA*	*ESPAÑA*
Análisis elemental, %							
Carbono	*56,6*	*62,67*	*74,6*	*69,7*	*56,53*	*68,46*	*37,02*
Hidrógeno	*3,5*	*3,86*	*4,86*	*4,5*	*4,13*	*0,9*	*2,75*
Nitrógeno	*1,22*	*0,83*	*1,39*	*1,6*	*0,88*	*0,2*	*0,88*
Azufre	*0,35*	*0,46*	*0,79*	*0,7*	*0,21*	*2,09*	*7,46*
Ceniza	*24*	*4,71*	*8,13*	*10,1*	*1,77*	*23,48*	*38,69*
Oxígeno	*7,43*	*10,34*	*9,42*	*9,1*	*12,58*	*4,38*	*11,39*
Análisis inmediato, %							
Humedad	*6,9*	*17,13*	*0,8*	*4,3*	*23,9*	*0,5*	*1,8*
Volátiles / seco	*24,8*	*30,92*	*36,11*	*35,3*	*45,57*	*7,46*	*45,27*
C fijo / seco	*44,3*	*47,24*	*54,96*	*50,3*	*28,76*	*68,56*	*14,24*
Ceniza / seco	*24*	*4,71*	*8,13*	*10,1*	*1,77*	*23,48*	*38,69*
Procedencia	*AUSTRALIA*	*CHINA*	*FRANCIA*	*SUDÁFRICA*	*INDONESIA*	*COREA*	*ESPAÑA*
Poder calorífico superior							
Btu / lb	*9660*	*10740*	*13144*	*12170*	*9840*	*9443*	*6098*
Análisis de ceniza, %							
SiO_2	*57,9*	*22,7*	*44,6*	*44,7*	*71,37*	*55*	*14,5*
Al_2O_3	*32,8*	*9*	*29,9*	*32,7*	*13,32*	*17*	*8,2*
Fe_2O_3	*6,2*	*15,68*	*13,1*	*4,6*	*7*	*12,5*	*2,7*
TiO_2	*1*	*0,43*	*0,6*	*1,2*	*0,57*	*1,4*	*0,3*
CaO	*0,6*	*28,88*	-	*5,7*	*2,88*	*0,1*	*45*
MgO	*0,8*	*2*	*3,5*	*1,3*	*0,53*	*0,1*	*1,2*
Na_2O	*0,1*	*0,7*	*3,1*	*0,1*	*0,34*	*0,1*	*0,1*
K_2O	*0,5*	*0,46*	-	*0,3*	*0,24*	*3,1*	*0,4*
P_2O_5	-	*0,09*	-	*2,2*	*0,16*	-	-
SO_3	*0,8*	*20,23*	*2,8*	*4,6*	*3,9*	-	-
Temperatura fusión (reductora / oxidante) de ceniza, ºF							
Deformación inicial	*2740*	*2750*	*2200*	*2220*	*2190*	*2300*	*2620*
Ablandamiento	*2750*	*2750*	*2240*	*2270*	*2310*	*2500*	*2750*
Ablandam. hemisférico	*2750*	*2750*	*2250*	*2280*	-	-	*2750*
Fluidificación 0,0625 ln	*2750*	*2750*	*2280*	*2290*	*2670*	*2820*	*2750*
Fluidificación Flat	*2750*	*2750*	*2340*	*2320*	-	-	*2750*

Tabla IX.8.- Análisis de bagazo y de menudo de coque

Análisis como se quema, % en peso	*Bagazo*	*Menudo de coque*
Análisis inmediato		
Humedad	*52*	*7,3*
Materias volátiles	*40,2*	*2,3*
Carbono fijo	*6,1*	*79,4*
Ceniza	*1,7*	*11*
Análisis elemental		
Hidrógeno	*2,8*	*0,3*
Carbono	*23,4*	*80*
Azufre	*Trazas 0,6*	-
Nitrógeno	*0,1*	*0,3*
Oxígeno	*20*	*0,5*
Humedad	*52*	*7,3*
Ceniza	*1,7*	*11*
Poder calorífico		
Btu / lb	*4000*	*11670*
kJ / kg	*9304*	*27144*

Subcoque y líquidos.- Con vistas a la utilización del carbón en el sector del transporte, en la industria ligera y en los mercados comerciales, se ha desarrollado otro proceso de coquización que se conoce como *gasificación reducida* o ligera, que es una modificación del proceso de la gasificación estándar, (el carbón se calienta en ausencia de oxígeno a $\begin{cases} \text{- presión atmosférica} \\ \text{- temperatura baja} < 1300°F\ (701°C) \end{cases}$), condiciones inferiores a las de la gasificación convencional $\begin{cases} \text{en atmósfera de aire o de oxígeno} \\ \text{a una temperatura del orden de } 2000°F\ (1076°C) \end{cases}$

La gasificación reducida da lugar a un $\begin{cases} \text{- Gas que puede ser sustitutivo del gas natural} \\ \text{- Líquido que tiene propiedades similares a las del gasóleo n° 2} \\ \text{- Sólido parecido al coque, denominado subcoque o (char)} \end{cases}$

Tabla IX.9.- Análisis de subcoques (chars) de carbones de Illinois, USA, %

	Carbón de Illinois	*Subcoque 1*	*Subcoque 2*	*Subcoque 3*
	Análisis inmediato			
Agua	*3,5*	*2,4*	*3,8*	*2,4*
Volátiles	*35,1*	*21,6*	*115,6*	*12,1*
Carbono fijo	*53,1*	*65,7*	*69,4*	*73,2*
Ceniza	*8,3*	*10,2*	*11,1*	*12,3*
Poder calorífico				
Btu / lb	*12935*	*12662*	*12534*	*12446*
kJ / kg	*13647*	*13359*	*13224*	*13131*
Análisis elemental				
Carbono	*72*	*75,6*	*76,6*	*77,5*
Hidrógeno	*5,3*	*3,7*	*3,1*	*2,5*
Nitrógeno	*1,7*	*1,8*	*1,7*	*1,8*
Azufre	*2,2*	*1,8*	*1,8*	*1,8*
Oxígeno	*10,5*	*69*	*5,6*	*4,2*

La Tabla IX.9 facilita el análisis de varios subcoques producidos por gasificación reducida, sobre carbones de Illinois (USA). El subcoque se puede pulverizar y mezclar con un producto líquido, para formar una lechada que se utiliza como combustible en calderas de generación de vapor.

Las suaves condiciones operativas del proceso de gasificación reducida dan lugar a la formación de la lechada, que tiene una $\begin{cases} \text{- alta relación } \dfrac{\text{hidrógeno}}{\text{carbono}} \text{ lo que facilita la ignición y combustión estable} \\ \text{- notable fluidez y poco S, en comparación con el contenido del carbón original} \end{cases}$

Aunque el subcoque (char) tiene menor contenido en materias volátiles y es algo más difícil de encender que el carbón original, su comportamiento frente a la combustión es similar. La gasificación ligera enriquece el subcoque en ceniza y rebaja su poder calorífico entre un 5÷ 10%, con respecto al del carbón original.

COMBUSTIBLES GASEOSOS.- Una parte de los combustibles gaseosos se obtienen a partir del carbón, como subproductos de procesos carboquímicos o como productos específicos de procesos de gasificación. La Tabla IX.10 presenta una relación de análisis de estos gases, que han venido sustituyendo con bastante profusión al gas natural y a diversos aceites del petróleo. La tendencia precedente se puede invertir, debido al perfeccionamiento que se va logrando en el proceso de gasifica-

ción del carbón y por el creciente uso del carbón en la industria química y en el sector de los combustibles líquidos.

Tabla IX.10.- Análisis de combustibles gaseosos derivados del carbón

Combustibles gaseosos derivados del carbón	*Batería coque*	*Horno alto*	*Agua carburada*	*Pobre gasógeno*
	Análisis, % en volumen			
Hidrógeno	*47,9*	*2,4*	*34*	*14*
Metano	*33,9*	*0,1*	*15,5*	*3*
Etileno	*5,2*	-	*4,7*	-
Monóxido carbono	*6,1*	*23,3*	*32*	*27*
Dióxido carbono	*2,6*	*14,4*	*4,3*	*4,5*
Nitrógeno	*3,7*	*56,4*	*6,5*	*50,9*
Oxígeno	*0,6*	-	*0,7*	*0,6*
Benceno	-	-	*2,3*	-
Agua	-	*3,4*	-	-
	Densidad relativa			
Con respecto al aire	*0,413*	*1,015*	*0,666*	*0,857*
	Poder calorífico superior			
Btu/f³t a 60°F y 30"Hg	*590*	-	*534*	*163*
kJ/m³ a 16°C y 102 kPa	*21983*	-	*19986*	*6073*
Btu/f³t a 80°F y 30"Hg	-	*83,8*	-	-
kJ/m³ a 26°C y 102 kPa	-	*3122*	-	-

Gas de batería de coque.- En el proceso de coquización, una gran parte del carbón se convierte en gases, de los que se recuperan algunos productos interesantes como el sulfato amónico, aceites y breas. La porción no condensable de estos gases es el gas de batería de coque, cuya composición depende de la naturaleza del carbón base y del proceso utilizado para la coquización.

Una parte del S que se encuentra en el carbón original puede estar presente en el gas de batería de coque, en forma de sulfuro de hidrógeno y de bisulfuro de carbono, aunque estos compuestos se pueden eliminar con relativa facilidad mediante el oportuno lavado. El gas de batería de coque contiene otras impurezas que se depositan en las líneas de conducción y en los quemadores; este gas arde fácilmente a causa de su alto contenido en hidrógeno y presenta pocos problemas cuando se emplea como combustible en generadores de vapor.

Gas de horno alto.- El gas que sale de los hornos altos se emplea en otros hornos de la propia acería, en motores de gas y en generadores de vapor; en este último caso, los sedimentos firmemente adheridos en las diversas superficies termointercambiadoras de la caldera, pueden requerir limpieza. El gas de horno alto es de calidad variable, tiene un alto contenido en CO y escaso poder calorífico.

Gas de agua.- El gas de agua se produce al circular vapor a través de un lecho caliente de coque. El carbono del coque se combina con el vapor de agua para formar H_2 y CO, reacción endotérmica, por lo que el lecho se refrigera en el proceso. A veces el gas de agua se enriquece con aceite, haciendo pasar el gas a través de un calentador regenerativo, formado por ladrillos calientes convenientemente rociados con aceite; a consecuencia del calentamiento, el aceite se fractura molecular-

mente (craquiza) y produce gas. Para enriquecer el gas de agua se utiliza gas de refinería, que se mezcla con el vapor que produce el gas de agua, pasando esta mezcla a través del lecho de coque.

También, el gas de refinería se puede mezclar directamente con el gas de agua.

El gas enriquecido por cualquiera de estos métodos, se denomina gas carburado de agua; en muchos lugares, el gas carburado ha sustituido al gas natural.

Gas pobre o gas de gasógeno.- Cuando se quema carbón o coque con defecto de aire o con una determinada cantidad de humedad, se obtiene un producto que se denomina gas pobre o gas de gasógeno que, una vez eliminados los compuestos de S y de ceniza arrastrada, se usa en el lugar de su producción debido a su bajo poder calorífico.

Subproductos gaseosos de la gasificación.- Los procesos de gasificación de carbones constituyen una fuente de gases sintéticos, del tipo del gas natural. El gas procedente de una gasificación de carbón realizada con *vapor+oxígeno* se compone de H_2, CO, CH_4, CO_2 y vapor de agua que no ha reaccionado; si se utiliza aire como fuente del oxígeno comburente, este gas estará diluido con nitrógeno. Aunque las reacciones químicas desarrolladas en un proceso de gasificación son complejas y numerosas, normalmente se destaca la reacción entre el vapor y el carbono, para producir H_2 y CO.

Parte del CH_4 se produce por la reacción del C con el H_2 y por la descomposición térmica de los hidrocarburos pesados presentes en el carbón.

El CO_2 y el calor que requiere el proceso proceden de la reacción del C con el O_2; la composición final del gas subproducto se modifica por la reacción entre el CO y el vapor, produciéndose H_2 y CO_2.

Los productos de la gasificación del carbón se clasifican en tres categorías de gases de poder calorífico bajo, intermedio y alto:

- El gas de poder calorífico bajo, entre $\begin{cases} 100 \div 200\ Btu/ft^3N \\ 3{,}9 \div 7{,}9\ MJ/m^3N \end{cases}$ *, se produce por la gasificación con aire; este gas se emplea como combustible en calderas, o para alimentar una turbina de gas, pero siempre utilizado a pie de la planta gasificadora*

- El gas de poder calorífico intermedio, entre $\begin{cases} 300 \div 450\ Btu/ft^3N \\ 11{,}8 \div 17{,}7\ MJ/m^3N \end{cases}$ *, se produce por la gasificación con oxígeno o por otro proceso que dé lugar a un producto que esté exento de nitrógeno*

- El gas de poder calorífico superior a los $\begin{cases} 900\ Btu/ft^3N \\ 35{,}4\ MJ/m^3N \end{cases}$ *, se utiliza como sustitutivo del gas natural y se obtiene por el mismo proceso de gasificación que el intermedio y, posteriormente, se mejora con metano*

Combustible mezcla carbón y agua.- La preocupación medioambiental relacionada con las emisiones de SO_2 y de partículas sólidas, ha promovido el desarrollo de tecnologías tendentes a evitar esas emisiones; una de estas tecnologías se ocupa de la limpieza y depuración del carbón, previo a su combustión, con el fin de conseguir la eliminación del S y materia mineral, presentes en el carbón. Con el fin de alcanzar el nivel de limpieza requerido para poder cumplimentar los requisitos sobre emisiones de S, hay que alterar el estado sólido en que se encuentra el carbón; los procesos de limpieza avanzados que utilizan agua, implican moler el carbón hasta un tamaño de partículas fino, para conseguir la liberación del S piritoso y otros minerales.

El producto fino que constituye el carbón limpio:

- Se puede secar y aglomerar para su posterior utilización

- Puede formar una lechada de carbón+agua, que se manipula como un aceite pesado (fuelóleo), que a temperatura ambiente tiene una viscosidad de unos 1000 centipoises

Las lechadas son suspensiones estables, por lo que las partículas de carbón no se depositan y, por tanto, se pueden transportar y almacenar durante varias semanas sin necesidad de agitación. Su fluidez y estabilidad dependen de la distribución de tamaños que tengan el conjunto de las partículas de carbón y los aditivos empleados. Para mantener una baja viscosidad en la lechada, es preciso que las partículas de carbón permanezcan separadas entre sí, mediante una capa intermedia lubricante. La viscosidad de la lechada y las características de su flujo afectan a la calidad de su atomización.

Cuando el combustible mezcla se encuentra almacenado, para lograr la adecuada estabilidad es necesario que haya una red de cadenas largas de enlace *partícula-partícula*, identificada como gel, que impide que las partículas depositen.

Tabla IX.11.- Propiedades del combustible "carbón + agua"

Tipos	*A*	*B*	*C*	*D*	*E*
Sólidos, %	*75,3*	*69,3*	*60,4*	*69,9*	*74*
Viscosidad, cP a 0,01 s	*1955*	*1575*	*1550*	*510*	*520*
	Poder calorífico superior				
Como se recibe, Btu/lb	*10730*	*9910*	*10180*	*10180*	*11380*
Como se recibe, kJ/kg	*24958*	*23051*	*23679*	*23679*	*26470*
Sobre seco, Btu/lb	*14250*	*14300*	*14670*	*14560*	*15190*
Sobre seco, kJ/kg	*33146*	*33262*	*34122*	*33867*	*35442*
Volátiles, % como se recibe	*24,7*	*26,5*	*24,8*	*22,9*	*28*
Volátiles, % sobre seco	*32,8*	*38,2*	*35,7*	*32,7*	*37,4*
Ceniza, % sobre seco	*7,9*	*6,3*	*5,9*	*6,9*	*2,8*
Azufre, % sobre seco	*0,84*	*0,87*	*0,81*	*0,77*	*0,91*
< 200 mesh (75 µm)	*70*	*78*	*63*	*78*	*73*
Diámetro medio masa, µm	*59*	*44*	*67*	*48*	*53*
Diámetro Sauter, µm	*7*	*9*	*15*	*8*	*11*
PH	*8,6*	*7,6*	*7,3*	*8,1*	*6*
Densidad, gr/cm³	*1,23*	*1,22*	*1,2*	*1,23*	*1,23*

Aunque la lechada de *carbón+agua* se produzca con un carbón finamente pulverizado y se manipule y queme como un fuelóleo, arde de forma diferente al fuelóleo, por lo que los quemadores requeridos para la lechada tienen un diseño especial.

La variación de las propiedades de la lechada afecta a las características operativas del quemador, aunque se haya diseñado adecuadamente.

El carbón original que se ha utilizado para producir la lechada *carbón +agua*, puede influir también en la estabilidad de la ignición y en las necesidades de aire caliente, que disminuyen con el contenido en materias volátiles.

El $\begin{cases} \text{- } \textit{tamaño de las partículas de carbón que se encuentran en suspensión} \\ \text{- } \textit{contenido de agua de la lechada} \end{cases}$, afectan a la combustión del carbono, como consecuencia de la alteración del tiempo de residencia en el quemador.

IX.6.- FUELÓLEOS

A lo largo de millones de años, los ríos transportaron lodos, arena (formando rocas sedimentarias), y pequeños organismos marinos (material orgánico) que se fueron depositando y enterrando en el fango. En el transcurso del tiempo, en un medio sin aire y a alta presión, el material orgánico que contenía carbono e hidrógeno se convirtió en moléculas hidrocarburadas de aceite (petróleo); a consecuencia de la porosidad de las rocas sedimentarias, el aceite fluyó y se acumuló en recintos estancos en los que quedó concentrado, fenomenología que ha ayudado a su recuperación como aceite crudo.

El consumo de aceite mineral (fuelóleo) como combustible para la generación de vapor en centrales termoeléctricas, es del orden de un 3%. En comparación con el carbón, el fuelóleo es fácil de manipular y quemar y tiene menos ceniza que manejar.

En la mayoría de los quemadores de aceite (mecheros), el fuelóleo se atomiza y mezcla con el aire comburente, teniendo en este estado propiedades parecidas a las del gas natural.

A consecuencia de su coste relativamente bajo, el fuelóleo nº 6 se utiliza para la generación de vapor, pudiéndose considerar como un subproducto del proceso de refino del petróleo. El contenido en ceniza de un fuelóleo cualquiera, está entre el $0{,}01\% \div 0{,}5\%$, que es muy bajo en comparación con la de cualquier carbón; a pesar de ésto, la utilización del fuelóleo presenta serios problemas operativos por la presencia de algunos elementos como son los compuestos de Va, Na y S.

Características de los fuelóleos.- Los fuelóleos engloban todos los productos petrolíferos que son menos volátiles que la gasolina en un amplio campo que comprende:

- Desde los aceites ligeros, apropiados para motores de combustión interna y turbinas de gas

- Hasta los aceites pesados, que tienen que calentarse para una adecuada manipulación y uso, siendo los más pesados los adecuados para las calderas de generación de vapor

Los fuelóleos se suelen dividir en dos grandes grupos: $\begin{cases} destilados \\ residuales \end{cases}$

Destilados.- Vaporizan en la operación de refino del petróleo; son fuelóleos limpios, sin sedimentos ni ceniza y tienen una viscosidad relativamente baja; agrupan los grados nº 1 y nº 2 de la especificación ASTM-D396. Aunque el nº 2 se utiliza en la generación de vapor como combustible de alta calidad, se presta mejor a aplicaciones en las que pesan más los costes de limpieza y manipulación. Como ejemplos típicos de utilización están las aplicaciones domésticas e industriales de calentamiento, en las que para minimizar los costes de su consumo, son importantes los bajos contenidos en ceniza y S.

En generadores de vapor, la utilización del nº 2 se limita a las operaciones de puesta en servicio o como combustible de apoyo.

Tabla IX.12.- Especificación estándar para aceites combustibles
Nº 1: Aceite destilado para quemadores con cámara tipo gran volatilidad y para otros quemadores que requieren este grado de aceite
Nº 2: Aceite destilado de caldeo doméstico general, para uso en quemadores que no requieren el nº 1
Nº 4: No requiere precalentamiento para manipulación o quemado
Nº 5 (ligero): Puede requerir precalentamiento, según clima y equipo
Nº 5 (pesado): Puede requerir precalentamiento para su combustión y, en clima frío, también para su manipulación
Nº 6: Requiere precalentamiento para su manipulación y combustión

Grado aceite combinado	Temperatura desgasificación ºF (ºC)	Temperatura congelación ºF (ºC)	Agua + sedimento % vol.	Carbono en 10 % residuos	Ceniza % peso	Temperat. destilación, ºF (ºC)		
						Punto10%	Punto 90%	
COMB.	Mín.	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	Mín.	Máx.
Nº 1	100ºF (38ºC)	0ºF (-32ºC)	Trazas	0,15		420ºF (215ºC)		550ºF (288ºC)
Nº 2	100ºF (38ºC)	20ºF c (-7ºC)	0,1	0,35		d	540ºF c (282ºC)	640ºF (338ºC)
Nº 4	130ºF (55ºC)	20ºF (-7ºC)	0,5		0,1			
Nº 5 ligero	130ºF (55ºC)		1		0,1			
Nº 5 pesado	130ºF (55ºC)		1		0,1			
Nº6	150ºF (65ºC)		2 g					

Grado aceite combinado	Saybold				Viscosidad cinemática, cS				Densidad ºAPI	Corrosión cobre
	a 100 ºF (38ºC)		a 122ºF (50ºC)		a 100 ºF (38ºC)		a 122ºF (50ºC)			
COMB.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Nº 1					1,4	2,2			35	nº 3
Nº 2	32,6 f	37,9			2 c	3,6			30	
Nº 4	45	125			5,8	26,4				
Nº 5	150	300			32	65				
ligero										
Nº 5	350	750	23	40	75	162	42	81		
pesado								368		
Nº6	900	9000	45	300			92			

Los ***residuales*** no se vaporizan mediante calentamiento; teóricamente contienen todos los constituyentes inorgánicos que estaban presenten en el aceite crudo; son negros y de alta viscosidad, requiriendo de calentamiento para su adecuada manipulación y combustión.

Los fuelóleos correspondientes a los grados nº 4 y nº 5 son menos viscosos y, por tanto, más fáciles de manejar y quemar que el nº 6.

Según sea el crudo original que se haya utilizado, el fuelóleo nº 4 puede ser una mezcla de:

- *Aceites residuales*
- *Fracciones destiladas mucho más ligeras*

El fuelóleo nº 5 requiere calentamiento, pero depende de $\begin{cases} el\ equipo\ de\ combustión \\ la\ temperatura\ ambiente \end{cases}$

El fuelóleo nº 6 requiere siempre calentamiento, para su manipulación y combustión.

ANÁLISIS DE FUELÓLEOS.- Un análisis normal de fuelóleo contiene información que cubre los siguientes parámetros: $\begin{cases} - Análisis\ elemental \\ - Densidad\ API \\ - Poder\ calorífico \\ - Viscosidad \\ - Punto\ de\ congelación \\ - Punto\ de\ desgasificación \\ - Agua\ y\ sedimentos \end{cases}$

Análisis elemental.- El análisis elemental de un fuelóleo es similar al de un carbón; el resultado del análisis indica los contenidos en S, H_2, C, N_2, O_2 y ceniza, Tabla IX.13.

El contenido de S en el aceite es un indicativo de la intensidad de la corrosión; durante la combustión el S pasa al estado de óxido que puede reaccionar con $\begin{cases} - el\ vapor\ de\ agua \\ - otros\ componentes\ de\ la\ ceniza \end{cases}$, formando $\begin{cases} - ácidos\ corrosivos \\ - incrustaciones\ de\ sulfato\ potásico \end{cases}$ en las calderas.

El Va también se puede combinar con los óxidos de S y producir productos corrosivos, que se potencian con la presencia de otros elementos, como el Na.

Densidad API.- Para cuantificar la densidad relativa de un aceite, la industria del petróleo emplea una escala de densidades en ºAPI (American Petroleum Institute). La densidad relativa para líquidos, se define como la relación entre el peso de un volumen del producto a una temperatura dada (60ºF) y del mismo volumen de agua a idéntica temperatura (60ºF). La correlación entre la densidad en ºAPI y la densidad relativa responde a la ecuación:

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{densidad_{relativa}\ 60/60^{\circ}F\ (16/16^{\circ}C)} - 131,5$$

en la que se observa que los fuelóleos más pesados y, por tanto de más alta densidad relativa, tienen un menor índice de *°API*.

Tabla IX.13.- Análisis elemental de algunos aceites combustibles

Grado del aceite	*n°1*	*n°2*	*n°3*	*n°5*	*n°6*
	Composición, % en peso				
Azufre	*0,01 a 0,5*	*0,05 a 0,1*	*0,2 a 2,0*	*0,5 a 3,0*	*0,7 a 3,5*
Hidrógeno	*13,1 a 14,1*	*11,8 a 13,9*	*10,6 a 13,0*	*10,5 a 12,0*	*9,5 a 12,0*
Carbono	*85,9 a 86,7*	*86,1 a 88,2*	*86,5 a 89,2*	*86,5 a 89,2*	*86,5 a 90,2*
Nitrógeno	*0 a 0,1*	*0 a 0,1*	-	-	-
Oxígeno	-	-	-	-	-
Ceniza	-	-	*0 a 0,1*	*0 a 0,1*	*0 a 0,5*
	Densidad				
°API	*40 a 44*	*28 a 40*	*15 a 30*	*14 a 22*	*7 a 22*
lb/gal	*6,87 a 6,71*	*7,39 a 6,87*	*8,04 a 7,30*	*8,10 a 7,68*	*8,51 a 7,68*
Relativa	*0,825 a 0,806*	*0,887 a 0,825*	*0,966 a 0,876*	*0,973 a 0,922*	*1,922 a 0,922*
	Punto de congelación				
°F	*0 a -50*	*0 a -40*	*-10 a +50*	*-10 a +80*	*+15 a +85*
	Viscosidad				
cS a 100°F	*1,4 a 2,2*	*1,9 a 3,0*	*10,5 a 65*	*65 a 200*	*260 a 750*
sSU a 100°F	-	*32 a 38*	*60 a 300*	-	-
sSU a 122°F	-	-	-	*20 a 40*	*45 a 300*
	Poder calorífico bruto (calculado)				
Btu/lb	*19.570 a 19.860*	*19.170 a 19.750*	*18.280 a 19.400*	*18.100 a 19.020*	*17.410 a 18.990*
Agua + sedimento, % vol	-	*0 a 0,1*	*Trazas a 1,0*	*0,05 a 1,0*	*0,05 a 2,0*

Viscosidad.- La viscosidad de un líquido es la medida de su resistencia interna al flujo; las escalas de viscosidad más utilizadas son: $\begin{cases} - \text{ Segundo Saybold} \begin{cases} \text{Universal (sSU)} \\ \text{Furol (sSF)} \end{cases} \\ - \text{ Viscosidad} \begin{cases} \text{absoluta (centipoise)} \\ \text{cinemática (centistoke)} \end{cases} \end{cases}$

La viscosidad cinemática es la relación entre la viscosidad absoluta y la densidad:

$$\text{Viscosidad cinemática}_{centistoke} = \frac{\text{Viscosidad absoluta}_{centipoise}}{\text{Densidad}}$$

Poder calorífico.- El poder calorífico de un combustible líquido es el calor desprendido por la combustión de la unidad de combustible; hay dos poderes caloríficos, el superior y el inferior.

En el cálculo de la $P_{cal.sup.}$ se supone que todo el vapor de agua formado por la combustión del H_2 constituyente, está condensado y enfriado hasta su temperatura inicial, por lo que el calor de vaporización del agua obtenida está incluido en el poder calorífico superior.

Para la $P_{cal.inf.}$ se asume que el vapor de agua no condensa ni enfría.

Punto de congelación.- Se define como la temperatura más baja a la que el líquido fluye en condiciones estandarizadas.

Punto de gasificación.- Es la temperatura a la que se debe calentar el líquido para que pro-

duzca vapores que se desprendan (gasifiquen), pero que no ardan continuamente cuando ignicionen.

Para determinar el punto de gasificación se puede emplear el aparato de copa:

- Cerrada o Pensky-Martens
- Abierta o Cleveland

El de copa cerrada indica puntos de gasificación más bajos, porque retiene vapores ligeros que se pierden en el de copa abierta.

Agua y sedimentos.- El nivel de agua y sedimentos es una medida de los contaminantes que hay en el aceite líquido. El sedimento consiste en un conjunto de compuestos de Ca, Na, Mg y Fe; en el fuelóleo pesado, el sedimento puede incluir también C.

- El análisis elemental determina el aire teórico necesario para la combustión completa y, por tanto, influye en el tamaño de la garganta de los quemadores

- Del análisis elemental se obtiene la relación $\frac{C}{H_2}$ *que es un índice de la facilidad conque arde el combustible e indica el nivel de emisiones de partículas de C; una relación que exceda de 7,5, normalmente da una combustión problemática*

La consideración de los porcentajes en N_2 y S, junto con el poder calorífico superior, permite estimar las emisiones de NO_x y SO_2. El porcentaje de ceniza interviene en la emisión de partículas sólidas; el análisis de los componentes de la ceniza, y su magnitud, muestran la tendencia al ensuciamiento y corrosión.

Para el diseño de una caldera se requiere información adicional, como: $\begin{cases} \textit{- C residual} \\ \textit{- Asfaltenos} \\ \textit{- Análisis espectrográfico ceniza} \\ \textit{- Perfil de la combustión} \\ \textit{- Curva de destilación} \end{cases}$

PROPIEDADES DE LOS FUELÓLEOS.- En la Tabla IX.13 se presentan algunos resultados analíticos en relación con determinadas características de una serie de fuelóleos y en la Fig IX.4 se representa la correlación entre el poder calorífico y la densidad en *°API* de varios fuelóleos.

El poder calorífico de los fuelóleos se correlaciona bastante bien con su densidad relativa. Una buena estimación del poder calorífico de un fuelóleo se obtiene mediante la corrección del poder calorífico superior, con la siguiente formulación:

$$P_{cal\ sup_{aparente}} = \frac{P_{cal\ sup}\ \{100 - (A + M + S)\}}{100} + 40{,}5\ S\ ,\ \ siendo:\ \begin{cases} A \text{ el \% de ceniza, en peso} \\ M \text{ el \% de agua, en peso} \\ S \text{ el \% de azufre, en peso} \end{cases}$$

Los porcentajes de volumen de agua y sedimento se pueden intercambiar por sus respectivos

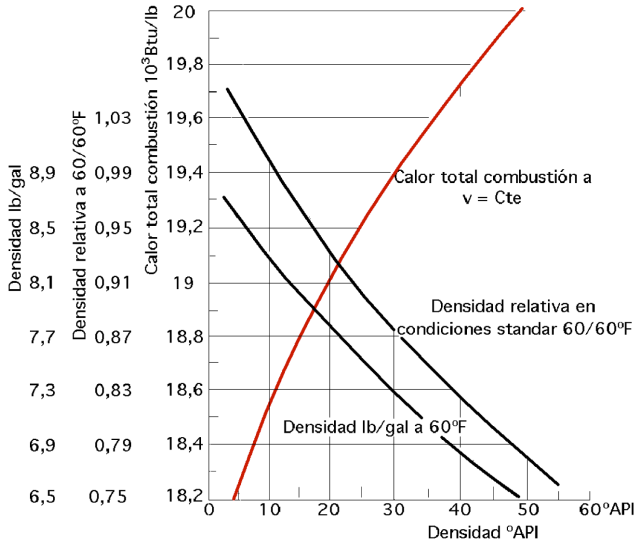


Fig IX.4.- Correlaciones de la densidad y del calor de combustión para diversos aceites

porcentajes en peso sin error apreciable. En la Fig IX.4 se presentan los factores de corrección, para que los volúmenes referidos a otras temperaturas se puedan convertir a volúmenes en las condiciones de referencia; esta corrección depende de la densidad en *ºAPI*. Los equipos de manipulación y combustión se diseñan, normalmente para la máxima viscosidad del aceite.

Si se conoce la viscosidad de un aceite pesado para dos temperaturas, se puede predecir con exactitud su viscosidad a cualquier otra temperatura, entrando con estos valores en el diagrama ASTM que se representa en la Fig IX.6.

La correlación entre viscosidad y temperatura de aceites ligeros se deduce del diagrama ASTM; en este caso, sólo se precisa la viscosidad a una temperatura determinada.

- En ordenadas se marca la viscosidad sSU a 100ºF, que es la temperatura estándar de ensayo para un aceite dado

- Desde el punto anterior se desplaza horizontalmente hasta cortar a la línea vertical correspondiente a la abscisa de la escala horizontal de 100ºF

- Por esta intersección se sigue paralelamente a las líneas diagonales, hasta la línea horizontal que pasa por la viscosidad en ordenadas que requiera la atomización

- La temperatura para lograr la viscosidad deseada se puede leer como abscisa en la escala inferior correspondiente a este último punto de intersección

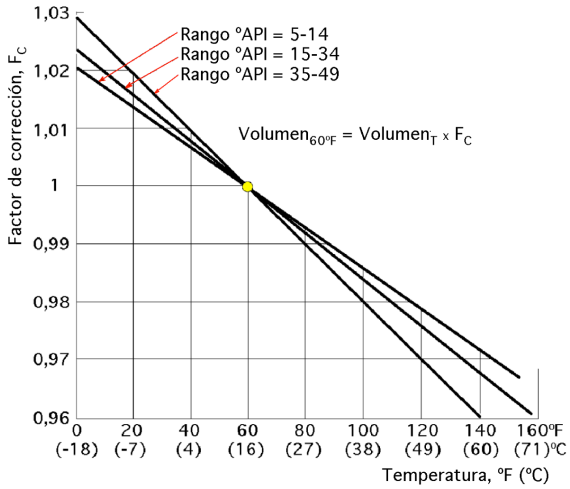


Fig IX.5.- Factores de corrección para el volumen de aceites en función de la temperatura

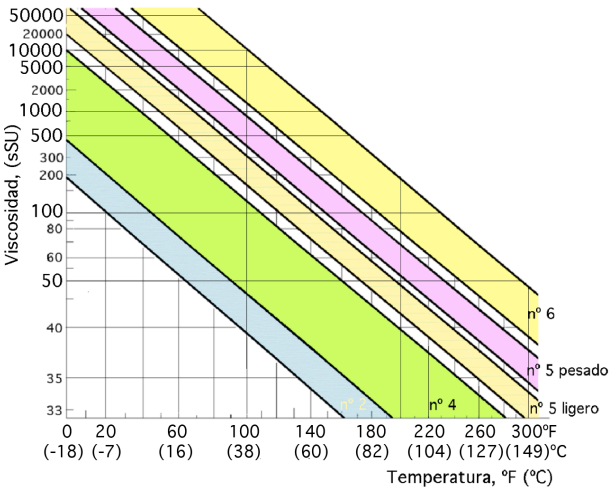


Fig IX.6.- Viscosidad aproximada de aceites combustibles a varias temperaturas

Por ejemplo, la viscosidad de un aceite ligero a una temperatura dada (dentro del grado nº 2) se encuentra trazando una línea paralela a las que limitan el porcentaje nº 2, por el punto conocido de viscosidad y temperatura.

IX.7.- GAS NATURAL

El gas natural se encuentra en las rocas porosas de la corteza terrestre. Las centrales termoeléctricas consumen una cantidad de gas natural relativamente pequeña, pero se ha convertido en un combustible muy empleado para la generación de vapor industrial.

El principal componente del gas natural es el metano; los demás componentes, considerados secundarios son: el etano, el propano y el butano, así como hidrocarburos de la serie pentano a decano; también pueden estar presentes otros gases, como el CO_2, N_2, He y sulfuro de hidrógeno H_2S.

El gas natural se suele clasificar según las siguientes denominaciones:

- *Gas simple, si su contenido es fundamentalmente metano*
- *Gas mezcla, si tiene cantidades apreciables (5÷ 10%C) en hidrocarburos más altos que el metano*
- *Gas agrio, o gas sulfuroso, si contiene sulfuro de hidrógeno H_2S*
- *Gas dulce, si contiene poco o nada de H_2S*

Tabla IX.15.- Muestras de gas natural de USA

Muestra Nº	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*
Fuente	*Pennsylvania*	*Carolina del Sur*	*Ohio*	*Louisiana*	*Oklahoma*
	Análisis de componentes, % volumen				
Hidrógeno	-	-	*1,82*	-	-
Metano	*83,4*	*84*	*93,33*	*90*	*84,1*
Etileno, C_2H_4	-	*0,25*	-	-	-
Etano C_2H_6	*15,8*	*14,8*	-	*5*	*6,7*
CO	-	-	*0,45*	-	-
CO_2	-	*0,7*	*0,22*	-	*0,8*
Nitrógeno	*0,8*	*0,5*	*3,4*	*5*	*8,4*
Oxígeno	-	-	*0,35*	-	-
SH_2	-	-	*0,18*	-	-
	Análisis elemental, % peso				
Azufre	-	-	*0,34*	-	-
Hidrógeno	*23,53*	*23,3*	*23,2*	*22,68*	*20,85*
Carbono	*75,25*	*74,72*	*69,12*	*69,26*	*64,84*
Nitrógeno	*1,22*	*0,76*	*5,76*	*8,06*	*12,9*
Oxígeno	-	*1,22*	*1,56*	-	*1,41*
	Densidad relativa				
Respecto al aire	*0,636*	*0,636*	*0,567*	*0,6*	*0,63*
	Poder calorífico superior a 60°F (16°C) y 30" Hg (102 kPa)				
Btu/ft^3	*1129*	*1116*	*964*	*1022*	*974*
kJ/m^3	*42065*	*41581*	*35918*	*38079*	*36290*
Btu/lb	*23170*	*22904*	*22077*	*21824*	*20160*
kJ/kg	*53893*	*53275*	*51351*	*50763*	*46892*

El gas natural se considera como el combustible más interesante para la generación de vapor, incluso por delante de todos los combustibles líquidos. Se suele abastecer por tubería hasta el con-

sumidor, de modo que se elimina la necesidad de su almacenamiento. El gas natural carece de ceniza y se mezcla fácilmente con el aire, de modo que su combustión es completa y exenta de humos.

Aunque su contenido total de H_2 es alto, el H_2 libre es bajo, por lo que el gas natural arde con menos facilidad que algunos gases que tienen un elevado contenido en H_2 libre.

El alto contenido en H_2 total que tiene el gas natural, en comparación con los aceites (fuelóleos) y carbones, da lugar a la presencia de más vapor de agua en los gases de combustión y de ahí que el equipo de generación de vapor tenga siempre menor eficiencia cuando quema gas natural, lo cual hay que tener muy presente en el diseño. En la Tabla IX.15 se presentan algunos análisis de gas natural, correspondientes a diversos yacimientos USA

IX.8.- OTROS COMBUSTIBLES

Existen combustibles carbonosos que se utilizan también en determinadas instalaciones de calderas, como:
- *Los subproductos del petróleo*
- *La madera y los subproductos y desechos de la industria maderera*
- *El bagazo y otros desechos vegetales*
- *Los residuos sólidos urbanos o basuras*

SUBPRODUCTOS DE PETRÓLEO.- Los residuos o fracciones pesadas procedentes de los procesos de destilación del petróleo, se utilizan para producir mayores cantidades de combustibles ligeros; los residuos sólidos finales se utilizan también como combustible; sus características varían mucho entre sí y dependen del proceso de destilación; en la Tabla XI.16 se indican algunos análisis.

Los combustibles sólidos derivados de los aceites de petróleo son el
- *Coque retardado o coque lento*
- *Alquitrán de petróleo*

Tabla IX.16.- Análisis de combustibles sólidos, derivados de aceites

	Análisis, % peso	
Sobre seco	*Coque retardado*	*Coque fluido*
	Análisis inmediato	
Materias volátiles	*10,8 9,0*	*6,0 6,7*
Carbono fijo	*88,5 90,0*	*93,7 93,2*
Ceniza	*0,7 0,1*	*0,3 0,3*
	Análisis elemental	
Azufre	*9,9 1,5*	*4,7 5,7*
	Poder calorífico	
Btu/lb	*14.700 15.700*	*14.160 14.200*
kJ/kg	*34.192 36.518*	*32.936 33.239*

Coque retardado.- El proceso de obtención del coque retardado emplea aceite residual que se calienta y bombea a un reactor; el coque se deposita en el reactor como una masa sólida y, posteriormente, se extrae por vía mecánica o hidráulica o en forma granular. Algunos tipos de este coque son fáciles de triturar y quemar, mientras que otros presentan grandes dificultades para el trocea-

do, molienda, e incluso para su combustión.

El coque fluido se produce rociando aceite residual caliente sobre un coque seminal, calentado en lecho fluidificado y se retira en pequeñas partículas que se acumulan formando una masa sólida. Este coque se puede pulverizar y quemar en lecho suspendido, y como cualquier otro carbón pulverizado convencional, se puede llevar a un hogar con quemadores ciclón, o se puede utilizar en un lecho fluidificado.

En estas formas de combustión se necesita un combustible suplementario de apoyo, para ayudar a la estabilización de la ignición.

Alquitrán de petróleo.- El proceso para obtener el alquitrán de petróleo es una alternativa al proceso de coquización obteniendo combustibles de distintas características. Los puntos de fusión varían de forma considerable y sus propiedades físicas se extienden $\begin{cases} desde\ el\ blando\ y\ gomoso \\ hasta\ el\ duro\ y\ friable \end{cases}$

Estos combustibles, con bajos puntos de fusión, se pueden calentar y quemar como los fuelóleos pesados, mientras que los que tienen altos puntos de fusión se tienen que pulverizar o trocear convenientemente, antes de ser quemados.

Emulsiones de aceites.- Las mezclas *carbón+agua* sustitutivas de los fuelóleos, presentan buenas perspectivas en muchos sistemas de combustión; se caracterizan por tener unos niveles relativamente altos de contenidos en S, asfaltenos y metales.

Su $\begin{cases} poder\ calorífico \\ contenido\ en\ ceniza \\ viscosidad \end{cases}$, son similares a los de los aceites residuales combustibles, así como las características de $\begin{cases} manipulación \\ combustión \end{cases}$

Cuando estas emulsiones se queman, uno de los problemas que se presenta en las características asfálticas, es la formación de compuestos corrosivos de Va, que se deben a la oxidación de los componentes metálicos presentes en el combustible.

MADERA.- La madera se compone de carbohidratos y tiene un poder calorífico relativamente bajo, en comparación con los carbones bituminosos y los aceites minerales. La corteza arbórea y la madera pueden adquirir impurezas durante su transporte, ya que es una práctica bastante común el arrastrar por el suelo las maderas en rollo, por lo que se manchan e impregnan frecuentemente de impurezas. Cuando las maderas en rollo se sumergen en agua con sales, la corteza de las mismas puede absorber las sales disueltas en el agua, (ver Cap XXIX).

En la Tabla IX.17 se indican los análisis y poderes caloríficos de una serie de tipos de maderas, y la composición de sus respectivas cenizas.

Tabla IX.17.- Análisis de maderas y sus cenizas (Agua salada absorbida)*

	Análisis de maderas, % peso (s/seco)			
Tipos de maderas	*Pino*	*Roble*	*Abeto **	*Pino silvestre **
	Análisis inmediato			
Mater. Volátiles	*79,2*	*76*	*69,6*	*72,6*
Carbono fijo	*24,2*	*18,7*	*26,6*	*27*
Ceniza	*2,9*	*5,3*	*3,8*	*0,4*
	Análisis elemental			
Hidrógeno	*5,6*	*5,4*	*5,7*	*5,1*
Carbono	*53,4*	*49,7*	*51,8*	*51,9*
Azufre	*0,1*	*0,1*	*0,1*	*0,1*
Nitrógeno	*0,1*	*0,2*	*0,2*	*0,1*
Oxígeno	*37,9*	*39,3*	*38,4*	*42,4*
	Poder calorífico			
Btu/lb	*9030*	*8370*	*8740*	*8350*
kJ/kg	*21004*	*19469*	*20329*	*19442*
	Análisis de cenizas, % peso (s/seco)			
SiO_2	*39*	*11,1*	*32*	*14,3*
Fe_2O_3	*3*	*3,3*	*6,4*	*3,5*
TiO_2	*0,2*	*0,1*	*0,8*	*0,3*
Al_2O_3	*14*	*0,1*	*11*	*4*
Mn_3O_4	*trazas*	*Trazas*	*1,5*	*0,1*
CaO	*25,5*	*64,5*	*25,3*	*6*
MgO	*6,5*	*1,2*	*4,1*	*6,6*
Na_2O	*1,3*	*8,9*	*8*	*18*
K_2O	*6*	*0,2*	*2,4*	*10,6*
SO_3	*0,3*	*2*	*2,1*	*7,4*
Cl	*trazas*	*trazas*	*trazas*	*18,4*
	Temperatura fusión ceniza, °F			
Deform. inicial	*2.180/2.210°F*	*2.690/2.680°F*	-	-
Ablandamiento	*2.240/2.280°F*	*2.720/2.730°F*	-	-
Fluidificación	*2.310/2.350°F*	*2.740 /2.750°F*	-	-

Cuando se queman cortezas o maderas secas, la temperatura de combustión puede ser lo suficientemente elevada como para que las impurezas puedan:

- Rebajar la temperatura de fusión del refractario de las paredes del hogar utilizado

- Ensuciar las superficies termointercambiadoras de la caldera, a no ser que la unidad disponga de una superficie suficiente para la refrigeración del hogar

La arena que pasa a través de los bancos de caldera puede provocar erosión en los tubos, especialmente si la carga de arena en humos se incrementa como consecuencia de alguna recirculación de gases hacia el hogar. En algunos casos se suelen exigir depuradores o separadores, para reducir la descarga por la chimenea a la atmósfera de materiales no completamente quemados como madera, cortezas, etc.

La madera y las cortezas con un contenido en humedad < 50% arden bastante bien; sin embargo, cuando la humedad aumenta por encima de esa cantidad, la combustión se hace más difícil.

Con contenidos en humedad superiores al 65%, una gran parte del calor de la combustión se precisa para evaporar la humedad intrínseca y, por tanto, queda sólo una pequeña cantidad de calor para la generación de vapor. La madera cortada y la corteza, abultan mucho (son de baja densidad)

y requieren equipos relativamente grandes para su manipulación y almacenamiento.

SUBPRODUCTOS Y DESECHOS DE LA MADERA.- Hay industrias que utilizan la madera como materia prima, estando ubicadas en zonas donde hay subproductos o desechos de madera susceptibles de quemar.

Entre las industrias más importantes cuya materia prima es la madera, hay que reseñar las de la: $\begin{cases} \text{- } \textit{Pulpa (pasta de papel)} \\ \text{- } \textit{Trementina} \end{cases}$

En la producción de la trementina, el residuo que queda tras la destilación del vapor de agua de las maderas de coníferas, se puede utilizar como material combustible. Algunos de los constituyentes, los que arden con más facilidad, se eliminan durante el proceso de destilación, al final del cual queda un residuo que es algo más difícil de quemar. Las características de estos desechos de madera son las mismas que las de la madera pura, siendo los problemas implicados en su utilización similares a los de ésta.

EL BAGAZO Y OTROS DESECHOS VEGETALES.- El bagazo es la pulpa seca residual, que queda tras la extracción del jugo de la caña de azúcar. Las factorías que procesan la caña de azúcar utilizan el bagazo para la generación de vapor.

En las factorías en las que no se refina azúcar, el suministro de bagazo garantiza la demanda de vapor en la planta; en consecuencia, el equipo de combustión se diseña para quemar el bagazo tal como se recibe desde las correspondientes trituradoras.

En las factorías en las que se refina azúcar, para facilitar las mayores demandas de vapor se requieren combustibles suplementarios.

Las industrias de la alimentación y afines producen numerosos desechos vegetales que se pueden utilizar como combustible, disponibles en cantidades relativamente pequeñas, resultando insignificantes como cuota de participación en la producción total de energía, como:

- Cáscaras de granos diversos

- Residuos de la producción de resina furfurálica, procedente de las mazorcas de maíz y de otras cáscaras de granos

- Posos de café, procedentes de la producción del café instantáneo, y tallos de plantas del tabaco

RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.- Las basuras son residuos combinados, procedentes de los sectores residencial y comercial, generados en una localidad. La Tabla IX.18 muestra un análisis de basura bruta y del combustible derivado de la misma, en comparación con el de un carbón bituminoso. Debido a su poder calorífico relativamente bajo, junto con su naturaleza muy heterogénea,

se plantea un reto importante en el diseño del sistema integral de combustión que resulte idóneo para estos residuos.

Tabla IX.18

Análisis de residuos sólidos municipales, como combustibles derivados de basuras y carbón bituminoso

% en peso	Componentes		
	Residuos sólidos municipales	Combustibles derivados de basuras	Carbón bituminoso
Carbono	27,9	36,1	72,8
Hidrógeno	3,7	5,1	4,8
Oxígeno	20,7	31,6	6,2
Nitrógeno	0,2	0,8	1,5
Azufre	0,1	0,1	2,2
Cloruros	0,1	0,1	-
Agua	31,3	20,2	3,5
Ceniza	16	6	9
	Poder calorífico superior (húmedo)		
Btu/lb	5100	6200	13000
kJ/kg	11836	14421	30238

REFERENCIAS CAP IX.- FUENTES DE ENERGÍA

Wagoner C.L., Duzy A.F.- BURNING PROFILES FOR SOLID FUELS.- Technical Paper 67-WA-FU-4, American Society of Mechanical Engineers, ASME, New York, (1967)

Vecci S.J, Wagone C.L, Olson G.B.- FUEL AND ASH CHARACTERIZATION AND ITS EFFECT ON THE DESIGN OF INDUSTRIAL BOILERS.- Proceedings, Vol. 40, pp. 850-864, American Power Conference, (1978)

Farthing G.A.- PROPERTIES AND PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF WATER-COAL FUELS.- American Chemical Society National Meeting, Seatle, Washington, (1983)

Sala D.L. ; Babu S.P.; Bair W.J.- MILD GASIFICATION OF COAL: POTENTIAL OPPROTUNITIES FOR VALUE-ADDED USES.- Coal: Targets of Opportunity Workshops; Proceedings, Report CONF-880770-2, U.S. Department of Energy, Washington, D.C., (1988)

WEC.- SURVEY OF ENERGY RESOURCES.- World Energy Conference, London, U.K., (1989)

ESTIMATES OF U.S. COAL RESERVES BY COAL TYPE.- Report DOE / EIA-0529, U.S. Energy Information Administration, Washington, D.C. (1989)

B&W.- STEAM: ITS GENERATION AND USE.- 41th Edition, Chapter 8, The Babcock & Wilcox Company, Barberton, Ohio USA, (2005)