

COMBUSTIBLES

INDICE DE MATERIAS

1. INTRODUCCIÓN	1
2. FORMACIÓN DEL CARBÓN	2
3. CLASIFICACIÓN DE LOS CARBONES	3
TURBA	7
LIGNITO	7
SUBBITUMINOSO	7
BITUMINOSO	7
ANTRACITA	8
OTROS SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN	8
4. CARACTERIZACIÓN DEL CARBÓN	8
DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD	9
MATERIAS VOLÁTILES	10
CENIZAS	10
CARBONO FIJO	10
ANÁLISIS INMEDIATO	10
ANÁLISIS ELEMENTAL	11
PODER CALORÍFICO	11
COHESIÓN, FRAGILIDAD Y FRIABILIDAD	11
TRITURABILIDAD O GRINDABILIDAD	12
FORMAS DEL AZUFRE EN EL CARBÓN	13
INDICE DE HINCHAMIENTO AL CRISOL	13
TEMPERATURA DE FUSIÓN DE LAS CENIZAS	13
COMPOSICIÓN DE LAS CENIZAS	13
PERFILES DE COMBUSTIÓN	13
INDICE DE ABRASIVIDAD	14
INDICE DE EROSIVIDAD	15
VISCOSIDAD DE LAS ESCORIAS	15
5. COMBUSTIBLES DERIVADOS DEL CARBÓN	15
COQUE	15
CHARS Y LÍQUIDOS	16
COMBUSTIBLES GASEOSOS DERIVADOS DEL CARBÓN	17
GAS DE HORNO DE COQUE	17
GAS DE HORNO ALTO	18
GAS DE AGUA	18
GAS POBRE	19
SUBPRODUCTOS GASEOSOS DE LA GASIFICACIÓN	19
6. COMBUSTIBLES LÍQUIDOS	21
CARACTERIZACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES LÍQUIDOS	23

ANÁLISIS DE LOS COMBUSTIBLES LÍQUIDOS	24
PROPIEDADES DE LOS COMBUSTIBLE LÍQUIDOS	27
7. GAS NATURAL	28
8. OTROS COMBUSTIBLES	29
COQUE DE PETROLEO	29
EMULSIONES DE ACEITE	30
RESIDUOS DE MADERA	31
BAGAZO	33
OTROS RESIDUOS VEGETALES	34
RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS	34

COMBUSTIBLES

1. INTRODUCCIÓN

El consumo de energía primaria sigue aumentando siendo las fuentes de energía primaria los combustibles fósiles. La tendencia en la producción de energía primaria según sus fuentes, se muestra en la *figura 1*. Las reservas de combustibles fósiles se muestran en la *figura 2*

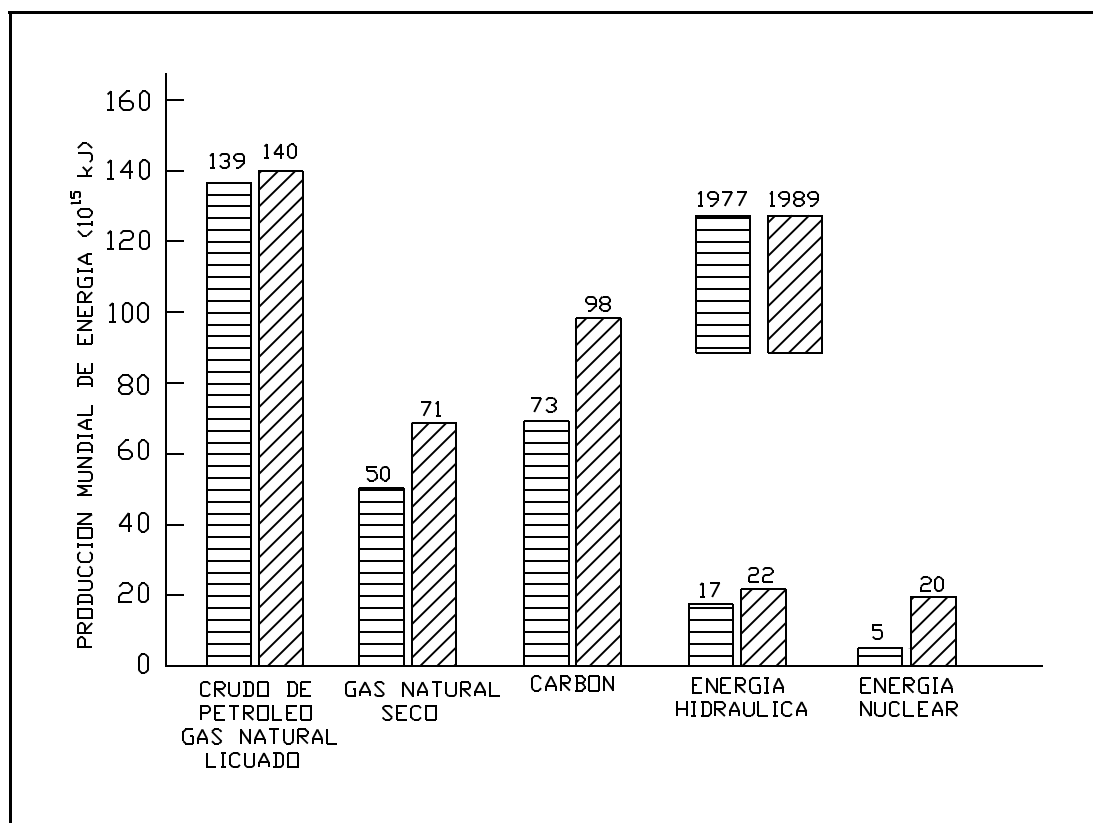


Figura 1: Tendencias en las fuentes primarias de suministro de energía

El carbón es la segunda fuente de energía más utilizada representando el 32 % del total de energía utilizada en el mundo. Es la fuente de energía más utilizada en la generación de energía eléctrica, las mayores reservas por tipo de carbón y localización son: Lignitos: USA y la CEI; subbituminoso: China, CEI, Australia y Alemania; bituminoso: China USA y CEI.

2. FORMACIÓN DEL CARBÓN

El carbón procede de plantas transformadas mediante procesos químicos y geológicos a lo largo de varios millones de años. Se forman capas de restos vegetales en lugares húmedos o cenagosos, en condiciones que evitan la exposición al aire y la descomposición. La acción bacteriana, la presión y temperatura, actúan sobre la materia orgánica y la transforman en carbón. Los procesos geoquímicos que transforman la materia orgánica en carbón reciben el nombre de *carbonización*. El primer producto de este proceso, *turba*, contiene troncos de árboles parcialmente descompuestos así como ramas y corteza y no se considera como un carbón. La turba se transforma progresivamente a lignito y puede llegar al estado de antracita, dependiendo

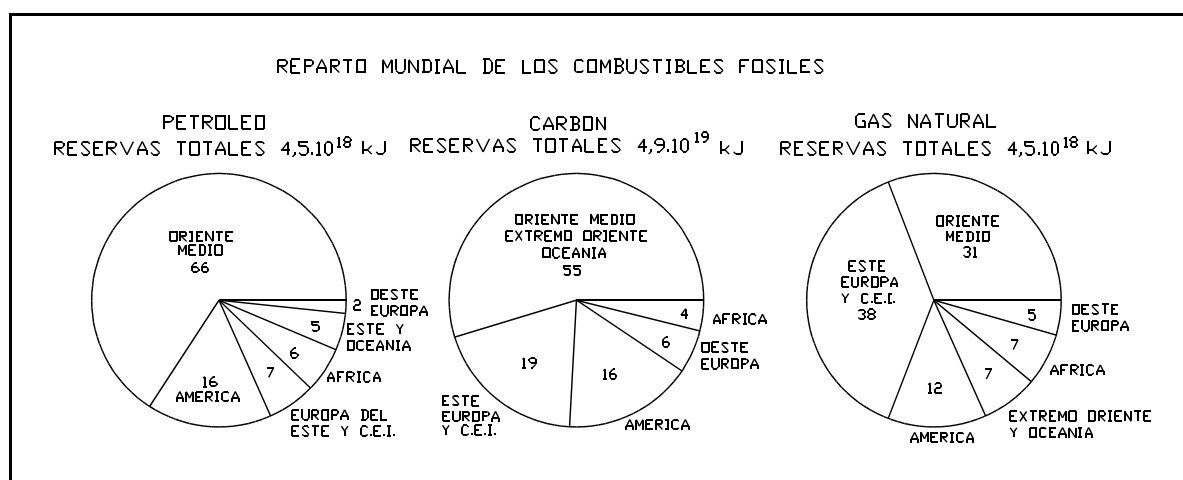


Figura 2: Reservas de combustibles fósiles y reparto mundial

de la progresión de los cambios geológicos. Durante la carbonización se producen varios procesos físicos y químicos, la temperatura y la presión a la que esté sometida la materia orgánica, determina los cambios químicos y estructurales. Estos cambios consisten en el aumento del contenido en carbono, pérdida de agua, oxígeno e hidrógeno y el aumento de resistencia a los disolventes. El proceso de carbonización se muestra esquemáticamente en la figura 3.

El carbón es muy heterogéneo y su composición química varía según el yacimiento, además de los principales constituyentes de la materia orgánica (carbono, hidrógeno y oxígeno) también contiene impurezas. Las principales impurezas son el azufre y las cenizas. Las cenizas proceden de la materia inorgánica que se incorpora durante la carbonización. También proceden de materia inorgánica, tal como sílice; que forma parte de la composición química de las plantas. Los iones inorgánicos en disolución y las partículas minerales en suspensión en las ciénagas donde comienza la formación del carbón, también son capturados por la materia orgánica durante la primera fase de la carbonización. Los lodos esquistos y piritas se depositan en los poros y grietas de las capas de carbón.

El azufre en el carbón aparece en tres formas: *Azufre orgánico* que forma parte de la estructura molecular del carbón; *azufre pirítico*, que se encuentra como mineral piritita y *azufre en forma de sulfatos*, que procede de los sulfatos de hierro. La principal fuente de azufre es el sulfato de hierro que se encuentra en el agua. El agua fresca admite una baja concentración de

sulfatos mientras que el agua salada admite una alta concentración de sulfatos, por lo tanto los carbones que tienen su origen en regiones que estaban cubiertas por el mar, tienen un contenido en azufre alto que puede alcanzar el 8 %.

Aunque el carbón es una mezcla compleja heterogénea y no un polímero o molécula biológica, generalmente los químicos lo representan como una fórmula estructural idealizada. Estas fórmulas sirven como modelos para ilustrar las reacciones del carbón entre las que se pueden incluir las de procesos tales como la combustión gasificación y licuación.

3. CLASIFICACIÓN DE LOS CARBONES

Como el carbón es una sustancia muy heterogénea con un amplio rango de composiciones, necesita algún sistema de clasificación. La forma más típica de clasificación del carbón es por rangos que está de acuerdo con el grado de carbonización. El rango indica la composición y la historia geológica del carbón.

El sistema de clasificación más usado es el establecido por la American Society for

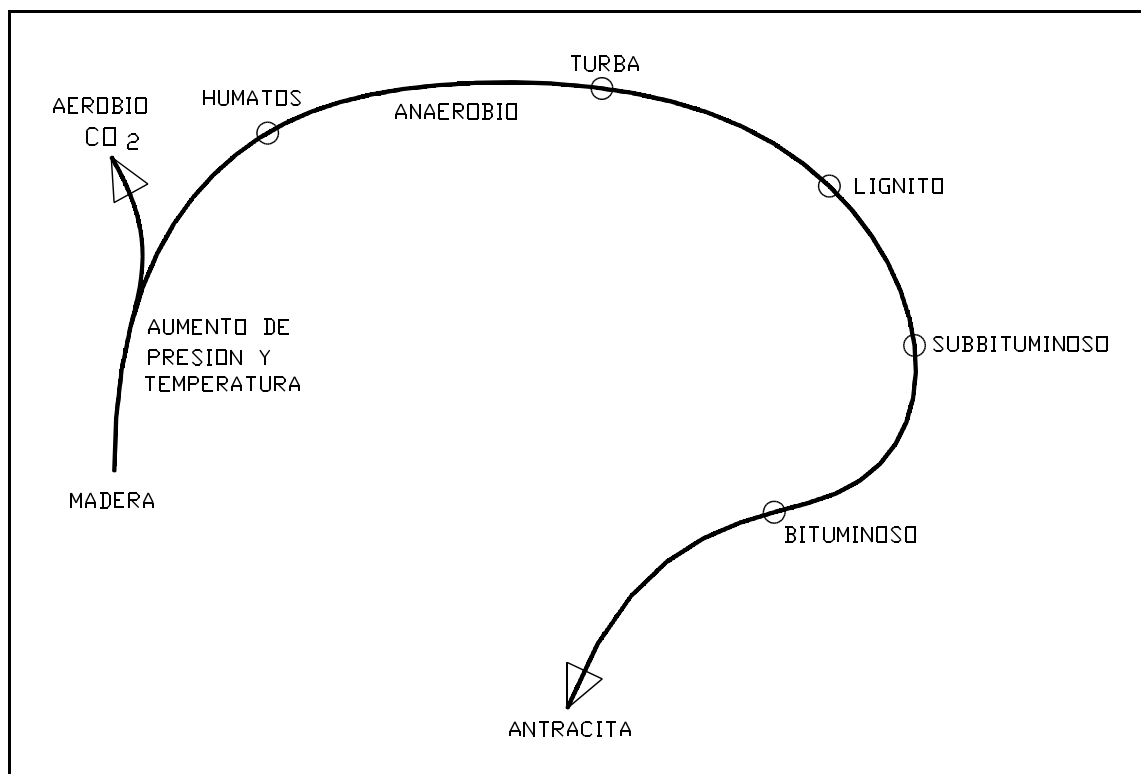


Figura 3: Fases de la evolución en la formación del carbón

Testing and Materials (ASTM). Esta clasificación utiliza como criterios de rango del carbón el contenido en materias volátiles y carbono fijo que se determinan en el análisis inmediato y el poder calorífico. Este sistema es útil para conocer las posibilidades de utilización del carbón y da información básica respecto a su comportamiento en la combustión.

Tabla 1: variación de la composición durante las distintas fases de la evolución

GRADO DE EVOLUCIÓN	COMPOSICIÓN % EN PESO SOBRE SECO			EVOLUCIÓN
	CARBONO	HIDROGENO	OXIGENO	
MADERA	49	7	44	AUMENTA LA AROMATIZACIÓN
TURBA	60	6	34	
LIGNITO	70	5	25	
SUBBITUMINOSO	75	5	20	DISMINUYE EL CONTENIDO EN OXÍGENO
BITUMINOSO	85	5	10	
ANTRACITA	94	3	3	

El sistema de clasificación es el que se muestra en la *tabla 2*. El análisis inmediato se basa en un procedimiento de laboratorio en el que se determinan la humedad y los contenidos en cenizas, carbono fijo y materias volátiles. En la *tabla 3* se muestra un ejemplo de análisis inmediato junto con el análisis elemental y el poder calorífico de un carbón.

Para los carbones de rangos más altos, se utiliza como criterio de clasificación los contenidos en carbono fijo y en materias volátiles determinados sobre limpio (sin cenizas) y seco utilizando las fórmulas desarrolladas por S.W. Parrin en 1906 y que se muestran desde la (1) a la (6). Los carbones de rangos más altos se clasifican teniendo en cuenta el poder calorífico sobre limpio y seco.

$$CF[s/(seco \text{ y sin cenizas})](\%) = 100 \frac{CF - 0,15S}{100 - (H + 1,08C + 0,55S)} \quad (1)$$

$$MV[s/(seco \text{ y sin cenizas})](\%) = 100 - CF[s/(seco \text{ y sin cenizas})](\%) \quad (2)$$

$$PC[s/(húmedo \text{ y sin cenizas})](\%) = 100 \frac{PC - 50S}{100 - (1,08C + 0,55S)} \text{ kJ/kg} \quad (3)$$

Fórmulas Aproximadas

$$CF[s/(seco \text{ y sin cenizas})](\%) = 100 \frac{CF}{100 - (H + 1,1C + 0,1S)} \quad (4)$$

$$MV[s/(seco \text{ y sin cenizas})](\%) = 100 - CF[s/(seco \text{ y sin cenizas})](\%) \quad (5)$$

$$PC[s/(húmedo \text{ y sin cenizas})](\%) = 100 \frac{PC}{100 - (1,1C + 0,1S)} \text{ kJ/kg} \quad (6)$$

Donde:

PC = Poder calorífico, kJ/kg

CF = Carbono Fijo, %

MV = Materias Volátiles, %

H = Humedad, %

C = Cenizas, %

S = Azufre, %

Todo para carbón sobre base húmeda y con cenizas.

NOTAS aclaratorias a la *tabla 2* de clasificación de los carbones:

^a: Esta clasificación no incluye algunos carbones, principalmente variedades no clasificadas que tienen propiedades físicas o químicas anómalas pero que no encajan dentro de los límites correspondientes a los rangos de los carbones bituminosos altos en volátiles y subbituminosos.

^b: Aquí humedad se refiere a la humedad inherente natural que no incluye el agua visible sobre la superficie del carbón.

^c: Si aglomera, se clasifica en el grupo de los bituminosos de bajos volátiles de la clase bituminosos.

^d: Los carbones con un contenido del 69 % o más de Carbono Fijo, sobre la base de seco y sin cenizas, se clasifican de acuerdo con su Carbono Fijo en lugar de su Poder Calorífico.

^e: Hay que tener en cuenta que en la clase bituminosos, puede haber variedades que no aglomeran y hay excepciones muy notables en grupo C de carbones bituminosos de altos volátiles.

Tabla 2: Clasificación de los Carbones según Rango^a (ASTM D 388)

Clase	Grupo	Carbono Fijo, % s/(seco y sin Cenizas)		Materias Volátiles, % s/(seco y sin Cenizas)		Poder Calorífico, kJ/kg s/(Húmedo ^b y sin Cenizas)		Carácter aglomerante
		Igual o Mayor que	Menor que	Mayor que	Igual o Menor que	Igual o Mayor que	Menor que	
I. Antracita	1. Metaantracita	98	-	-	2			No Aglomera
	2. Antracita	92	98	2	8			
	3. Semiantracita ^c	86	92	8	14			
II. Bituminoso	1. Carbón Bituminoso Bajo Volátiles	78	86	14	22			Generalmente Aglomera ^e
	2. Carbón Bituminoso Medio en Volátiles	69	78	22	31			
	3. Carbón Bituminoso A Alto en Volátiles	-	69	31	-	32500 ^d		
	4. Carbón Bituminoso B Alto en Volátiles	-	-	-	-	30200 ^d	32500	
	5. Carbón Bituminoso C Alto en Volátiles	-	-	-	-	26700 24400 ^e	30200 26700	Aglomera
III. Subbituminoso	1. Carbón Subbituminoso A	-	-	-	-	24400	26700	No Aglomera
	2. Carbón Subbituminoso B	-	-	-	-	22100	24400	
	3. Carbón Subbituminoso C	-	-	-	-	19300	22100	
IV. Lignito	1. Lignito A	-	-	-	-	14700	19300	No Aglomera
	2. Lignito B	-	-	-	-	-	14700	

Tabla 3: Ejemplo de Análisis Inmediato y Elemental de un Carbón

Análisis Inmediato		Análisis Elemental	
Componente	% en Peso	Componente	% en Peso
Humedad	2,5	Humedad	2,5
Materias Volátiles	37,6	Carbono	75,0
Carbono Fijo	52,9	Hidrógeno	5,0
Cenizas	7,0	Azufre	2,3
Total	100,0	Nitrógeno	1,5
Poder Calorífico		Oxígeno	6,7
30238 kJ/kg		Cenizas	7,0
		Total	100,0

TURBA

Es el primer producto en el proceso de la formación del carbón. Es un material complejo que contiene plantas parcialmente descompuestas y materia mineral. Su color va desde el amarillo al pardo oscuro, dependiendo de la edad geológica. La turba tiene un contenido en humedad superior al 70 % y un poder calorífico del orden de 7000 kJ/kg

LIGNITO

El lignito es el carbón de más bajo rango, es relativamente blando y de color que va desde pardo a negro, mientras el poder calorífico es inferior a 19300 kJ/kg. Los depósitos son geológicamente jóvenes y pueden contener partes reconocibles de las plantas. El contenido en humedad del lignito puede alcanzar el 30 % pero su contenido en materias volátiles también es muy elevado por lo que se quema con facilidad. El lignito se seca cuando se expone al aire y tiene tendencia a la combustión espontánea cuando está almacenado seco. El transporte a largas distancias de este carbón no es económicamente rentable porque tiene un contenido en humedad muy alto y un poder calorífico bajo.

SUBBITUMINOSO

El carbón subbituminoso es de color negro y puede presentar alguna textura propia de las plantas y nada del color pardo asociado con los lignitos de bajo rango. Los carbones subbituminosos no son coquizables, tienen un contenido en humedad relativamente alto (15 -30 %), cuando se almacena seco tiene también tendencia a la combustión espontánea. Aunque tienen un alto contenido en materias volátiles y se incendian fácilmente, los carbones subbituminosos generalmente tienen un contenido en cenizas más bajo y una combustión más limpia que los lignitos.

BITUMINOSO

El carbón bituminoso es el de uso más extendido en las calderas de generación de energía eléctrica. En general se presenta de color negro con bandas brillantes y mates. Los carbones

bituminosos típicos tienen poderes caloríficos entre 24500 y 36000 kJ/kg y contenidos en carbono fijo de entre el 69 y el 86 %. El poder calorífico es mayor y la humedad y los volátiles son menores que en los subbituminosos y en los lignitos. Los carbones bituminosos raramente presentan combustión espontánea durante el almacenamiento en seco. Su elevado poder calorífico y su alto contenido en materias volátiles hacen de los carbones bituminosos los más adecuados para la combustión en hogares de carbón pulverizado. Algunos tipos de carbones bituminosos, cuando son calentados en ausencia de aire, reblandecen y desprenden volátiles, formando un producto poroso, duro y negro conocido como coque. El coque es el combustible utilizado en los hornos altos de las plantas siderúrgicas.

ANTRACITA

La antracita es el carbón de más alto rango, es negro brillante duro y frágil, a penas tiene apariencia de capas. Tiene el contenido en carbono fijo más alto entre el 86 y el 98 %. Su bajo contenido en materias volátiles hacen que sea un combustible difícil de quemar. La mayor parte de las antracitas tienen un contenido en humedad muy bajo, del orden del 3 %. Su poder calorífico, del orden de 35000 kJ/kg, es ligeramente inferior al del mejor de los carbones bituminosos. La antracita suele tener un contenido en azufre bajo. Su bajo contenido en materias volátiles hacen que queme con una llama corta y limpia.

OTROS SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN

Hay otros sistemas de clasificación que tienen un uso restringido a Europa y son la International Classification of Hard Coals by Type y la International Classification of Brown Coals.

4. CARACTERIZACIÓN DEL CARBÓN

El criterio de clasificación del carbón según rangos, se basa en el análisis inmediato. Este análisis suministra también otras informaciones útiles como puede ser la selección de un carbón para generación de vapor, la evaluación del un equipo de combustión existente o el dato de partida para el diseño.

Debido a la gran variedad de contenidos en humedad y en cenizas de los carbones, la composición determinada por el análisis inmediato se puede expresar de distintas maneras. La forma más común es dar la composición sobre seco (sin humedad) y limpio (sin cenizas). En el análisis inmediato se determinan los porcentajes en peso, tal como se recibe en el laboratorio, de cada uno de los siguientes componentes: *Humedad*, *Materias Volátiles*, *Cenizas* y *Carbono Fijo*. Las humedades pueden ser muy variables. Para el análisis sobre seco se determina la humedad y esta se utiliza para corregir la cantidad de cada componente a la base seca. La cantidad de cenizas que se determinan en el análisis inmediato no coincide con la materia mineral del carbón (por ejemplo en el proceso de análisis se descomponen los carbonatos, los sulfuros...). Las fórmulas utilizadas para corregir por materia mineral y para determinar las materias volátiles, carbono fijo y poder calorífico sobre la base limpio son las mostradas en las ecuaciones (1) a (6)

Tabla 4: Ejemplos de carbones clasificados en el orden de la Clasificación por Rangos ASTM

Rango del Carbón		Análisis del carbón en base a la humedad de almacenamiento en pila						Rango	
Clase	Grupo	H	MV	CF	C	S	kJ/kg	por CF	por kJ/kg
I	1	4,5	1,7	84,1	9,7	0,77	29642	99,2	32212
I	2	2,5	6,2	79,4	11,9	0,60	30060	94,1	34607
I	3	2,0	10,6	67,2	20,2	0,62	27734	88,7	35677
II	1	1,0	16,6	77,3	5,1	0,74	34223	82,8	36282
II	2	1,5	20,8	67,5	10,2	1,68	31909	77,5	36014
II	3	1,5	30,7	56,6	11,2	1,82	30781	65,8	35421
II	4	5,8	36,2	46,3	11,7	2,70	27700	57,3	31886
II	5	12,2	38,8	40,0	9,0	3,20	26374	51,8	29374
III	1	14,1	32,2	46,7	7,0	0,43	25909	59,0	28083
III	2	25,0	30,5	40,8	3,7	0,30	21734	57,5	22664
III	3	31,0	31,4	32,8	4,8	0,55	19350	51,5	20443
IV	1	37,0	26,6	32,2	4,2	0,40	16873	55,2	17699

DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD

La humedad del carbón puede ser *superficial o libre, inherente o interna, y combinada*. Si se deja el carbón en capas finas en un local seco y bien ventilado pierde la *humedad libre* quedando una cierta cantidad de humedad, en equilibrio con la humedad ambiente, que es la *humedad inherente*. La humedad superficial la adquiere el carbón por adherencia del agua, debida a la tensión superficial, a la superficie exterior de los granos. La humedad inherente que también se puede llamar *higroscópica* queda retenida en las grietas y poros del carbón por fuerzas de absorción. Si se expone el carbón a una corriente de aire, la humedad superficial o externa se elimina pero la interna queda en parte. La cantidad de humedad no eliminada depende de la temperatura y de la humedad de la corriente de aire. Variando la temperatura o la humedad del aire, el carbón fija un nuevo equilibrio con una cantidad de humedad interna, distinto al que tenía anteriormente. La humedad externa del carbón es muy variable y es función del tratamiento que ha sufrido desde su extracción, mientras que la humedad interna es una característica del carbón siempre que se defina la humedad del aire y la temperatura. La humedad interna es mínima (2 a 3 %) para los carbones bituminosos (carbono fijo sobre limpio y seco de 85 a 90 %) y crece con la disminución del carbono fijo hasta alcanzar valores entre 30 y 40 % para ciertos lignitos (carbono fijo sobre seco y limpio entre 50 y 55 %). Existen otros muchos tipos de

humedad que se pueden considerar cuando se trata de caracterizar el carbón cuya definición y uso depende de la aplicación del carbón. La humedad inherente se puede considerar como una estimación de la humedad de almacenamiento. El método ASTM para la determinación de la humedad, define *la humedad total del carbón como la pérdida de peso de una muestra bajo condiciones controladas de temperatura, tiempo y caudal de aire*. La humedad total se puede calcular por la suma de la pérdida de peso (o resta de la ganancia) mediante el sacado con aire, más la humedad residual que se determina mediante secado en un horno de la muestra previamente secada con aire. La pérdida de humedad en aire da una indicación del secado requerido durante la manipulación y la pulverización.

MATERIAS VOLÁTILES

La determinación de materias volátiles se hace sobre la misma muestra, seca, sobre la que se determinó la humedad total, calentandola en atmósfera inerte, según una ley de calentamiento, hasta una temperatura determinada y durante un tiempo determinado; se produce una pérdida de peso que es lo que se considera como materias volátiles.

Cuando se desprenden por debajo de 600°C, el alquitrán de hulla se compone de hidrocarburos de la familia de las parafinas y olefinas, además de alcoholes, fenoles y agua. Cuando el desprendimiento se produce a unos 1.000 °C, el alquitrán de hulla formado a esas temperaturas contiene fundamentalmente hidrocarburos aromáticos, fenoles y algunos compuestos de nitrógeno, azufre y oxígeno. Esta variación de la composición indica que la mayoría de los compuestos del alquitrán de hulla se forman durante el desprendimiento de volátiles y no existen como tales en el carbón original. Se han identificado alrededor de 300 compuestos diferentes en el alquitrán de hulla, de los que unos 50 se separan y tienen un uso comercial. Algunos de los componentes son cancerígenos.

CENIZAS

La misma muestra, una vez determinadas las materias volátiles, se somete a atmósfera oxidante, debido a lo cual se produce la combustión de toda la materia combustible que aun permanece, quedando un residuo mineral inerte. El peso de este residuo mineral inerte es lo que se conoce como cenizas. Lo que se determina como Cenizas no corresponde exactamente con el contenido de sustancias minerales en el carbón, ya que como se ha mencionado anteriormente, durante el proceso seguido desde el comienzo del tratamiento de la muestra, se habrá desprendido el agua de hidratación de minerales como el yeso, se habrán descompuesto los carbonatos desprendiendo CO₂ y se habrán descompuesto los sulfuros desprendiendo SO₂.

CARBONO FIJO

Determinadas la humedad total, las materias volátiles y las cenizas, se suman estas tres y lo que falta para completar el peso de la muestra es lo que se considera como carbono fijo.

ANÁLISIS INMEDIATO

Mediante el análisis inmediato, una vez determinada la humedad total, se determina el contenido en materias volátiles, las cenizas y el carbono fijo. Los contenidos en materias volátiles y carbono fijo sin tener en cuenta las cenizas y la humedad (sobre base seca y limpia) son dos

indicadores del rango del carbón. El contenido en materias volátiles de un carbón, es un indicativo de la facilidad de su ignición y de la cantidad de combustible de apoyo que será necesario para la estabilización de la llama. El contenido en cenizas puede ser un indicativo de las condiciones bajo las cuales van a trabajar los sistemas de limpieza de humos y de escorias y cenizas.

ANÁLISIS ELEMENTAL

En el análisis elemental se determinan los contenidos en carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno. Este análisis, junto con el poder calorífico se utiliza para realizar los cálculos de combustión, como determinación de cantidad de combustible necesario, necesidades de aire de combustión, pérdidas, rendimiento de la caldera y emisiones de óxidos de azufre.

PODER CALORÍFICO

El poder calorífico que se determina mediante bomba calorimétrica adiabática se expresa en kJ/kg pero con distintos criterios, como pueden ser sobre bruto, sobre seco o sobre limpio. Este valor representa la cantidad de energía disponible para la producción de vapor. Y en consecuencia se utiliza para determinar la cantidad de combustible que debe de ser manipulada, pulverizada y quemada.

El *poder calorífico superior* (PCS) se define como el calor desprendido por la combustión de la unidad de masa de combustible, considerando como productos finales, las cenizas en forma de sólida; el CO₂, el SO₂, el nitrógeno y el oxígeno en forma gaseosa; y el agua en forma líquida. El *poder calorífico inferior* (PCI) se calcula partiendo del poder calorífico superior y es el calor producido por la unidad de masa de combustible cuando toda el agua de los productos finales permanezca en forma de vapor. El poder calorífico inferior, se calcula deduciendo 2396 kJ por kg de agua derivada del combustible, incluyendo la debida a la humedad del combustible y la debida a la combustión del hidrógeno (no se incluye la debida a la humedad del aire ya que ésta se suministra en la forma de vapor). La utilización de uno u otro de los poderes caloríficos depende de cada usuario.

COHESIÓN, FRAGILIDAD Y FRIABILIDAD

Son las propiedades de degradarse, de pasar a granulometrías inferiores por impacto o rozamiento. La cohesión es la propiedad positiva o de resistencia y la friabilidad y fragilidad las negativas. La friabilidad es la de degradarse por rozamiento y la fragilidad la de degradarse por impacto. Estas propiedades se pueden determinar mediante ensayos específicos. De ellas depende en gran medida la triturabilidad del carbón. Las antracitas se pueden considerar más frágiles y poco friables mientras que los lignitos pardos se pueden considerar más friables y poco frágiles.

Tabla 5: Clasificación de los tamices de la serie ASTM y equivalencia con la une 7050

ASTM				UNE 7050
Hilos/pulgada = Mallas = Nº Tamiz	Hilo + Luz mm	Luz mm	Hilo mm	Luz mm
3	8.467	6.350	2.117	6.300
3.5	7.257	5.660	1.597	5.000
4	6.350	4.760	1.590	
5	5.080	4.000	1.080	4.000
6	4.233	3.360	0.873	3.200
7	3.629	2.830	0.799	-
8	3.175	2.380	0.795	2.500
10	2.540	2.000	0.540	2.000
12	2.117	1.680	0.437	1.600
14	1.814	1.410	0.404	1.250
16	1.588	1.190	0.398	
18	1.411	1.000	0.411	1.000
20	1.270	0.840	0.430	0.800
25	1.016	0.710	0.306	-
30	0.847	0.590	0.257	0.630
35	0.726	0.500	0.226	0.500
40	0.635	0.420	0.215	0.400
45	0.564	0.350	0.214	-
50	0.508	0.297	0.211	0.320
60	0.423	0.250	0.173	0.250
70	0.363	0.210	0.153	0.200
80	0.318	0.177	0.141	0.160
100	0.254	0.149	0.105	
120	0.212	0.125	0.087	0.125
140	0.181	0.105	0.076	0.100
170	0.149	0.088	0.061	0.080
200	0.127	0.074	0.053	
230	0.110	0.062	0.048	0.063
270	0.094	0.053	0.041	0.050
325	0.078	0.044	0.034	0.040
400	0.064	0.037	0.027	

TRITURABILIDAD O GRINDABILIDAD

La triturabilidad depende de las propiedades anteriores y también de otras tales como la dureza y la resistencia mecánica. El ensayo Hardgrove para la determinación de la grindabilidad de un carbón es una medida empírica de la facilidad con la que es posible pulverizar el carbón. El método consiste en tomar una muestra de carbón, secado al aire, de 50 g, de tamaños comprendidos entre 1,19 y 0,59 mm (quedará entre los tamices 16 y 30 de la clasificación ASTM). La muestra se mete en un molino normalizado que se hace girar 60 vueltas, aportando así una cantidad de trabajo fija a la muestra. Se toma como Índice Hardgrove la cantidad de muestra, en tanto por ciento, que, después de sometida al molino, pasa el tamiz 200 ASTM (0,074 mm). Ver clasificación de los tamices en la *tabla 5*.

FORMAS DEL AZUFRE EN EL CARBÓN

El análisis ASTM de las formas de azufre en el carbón mide las cantidades de azufre pirítico y de azufre orgánico. Consiste en la determinación del azufre total y de la determinación del azufre en forma de sulfatos, determinando por diferencia el contenido de azufre pirítico.

INDICE DE HINCHAMIENTO AL CRISOL

Se determina calentando un gramo de carbón a una temperatura determinada, durante un tiempo determinado. Esta propiedad solo es útil para determinar las características aglomerantes del carbón. La forma o botón que toma la muestra una vez finalizado el ensayo, se compara con un conjunto de formas estándar. Las formas alargadas, indican altos índices de hinchamiento. Los carbones altamente oxidados tienen índices de hinchamiento bajos. Por lo cual el índice de hinchamiento también resulta útil para determinar el grado de oxidación.

TEMPERATURA DE FUSIÓN DE LAS CENIZAS

Las temperaturas de fusión de las cenizas se determinan preparando y calentando conos de cenizas de acuerdo con una norma. Se determinan, en condiciones oxidantes y reductoras las temperaturas a las cuales los conos de cenizas, debido al reblandecimiento, adquieren determinados perfiles. Las temperaturas de fusión son útiles para determinar las tendencias a la formación de escorias en el hogar, de las cenizas de los distintos carbones.

COMPOSICIÓN DE LAS CENIZAS

El análisis elemental de las cenizas se hace sobre una muestra según un método normalizado. Las cantidades de elementos presentes en las cenizas se dan como óxidos. La sílice (SiO_2), la alúmina (Al_2O_3), el óxido de titanio (TiO_2), el óxido ferroso-férrico (Fe_2O_3), el óxido de calcio (CaO), el óxido de magnesio (MgO), el óxido de sodio (Na_2O) y el óxido de potasio (K_2O) se determinan por absorción atómica. El resultado del análisis de las cenizas permite calcular su viscosidad en función de la temperatura así como los índices de escorificación y ensuciamiento de las calderas.

PERFILES DE COMBUSTIÓN

El ensayo utiliza la derivada termogravimétrica cuando se oxida una muestra bajo condiciones controladas. Una muestra de 300 mg con tamaños inferiores a 600 mallas (250 micras) se calienta a 15 °C/minuto en una corriente de aire, se mide continuamente la variación de peso y el perfil de combustión es el resultado de representar la velocidad de pérdida de peso en función de la temperatura. Los carbones que tienen perfiles de combustión similares, es de esperar que se comporten de forma similar en los grandes hogares. Comparando los perfiles de quemado de carbones desconocidos con el de carbones conocidos, es posible predecir el diseño del hogar, el tiempo de residencia, el exceso de aire y el ajuste de quemadores. Estos perfiles dan información sobre la temperatura de inicio de la combustión y la temperatura de finalización. El área encerrada por la curva es proporcional a la cantidad de material combustible de la muestra; la altura de la curva es una medida de la intensidad de la combustión. Los perfiles de combustión son especialmente útiles para una evaluación primaria de los nuevos combustibles para calderas, tales como chars u otros combustibles residuales de los procesos de tratamiento

del carbón. En la *figura 4* se muestran los perfiles de quemado de carbones de distintos rangos.

INDICE DE ABRASIVIDAD

La abrasividad del carbón es determinante en la vida de los elementos de manipulación,

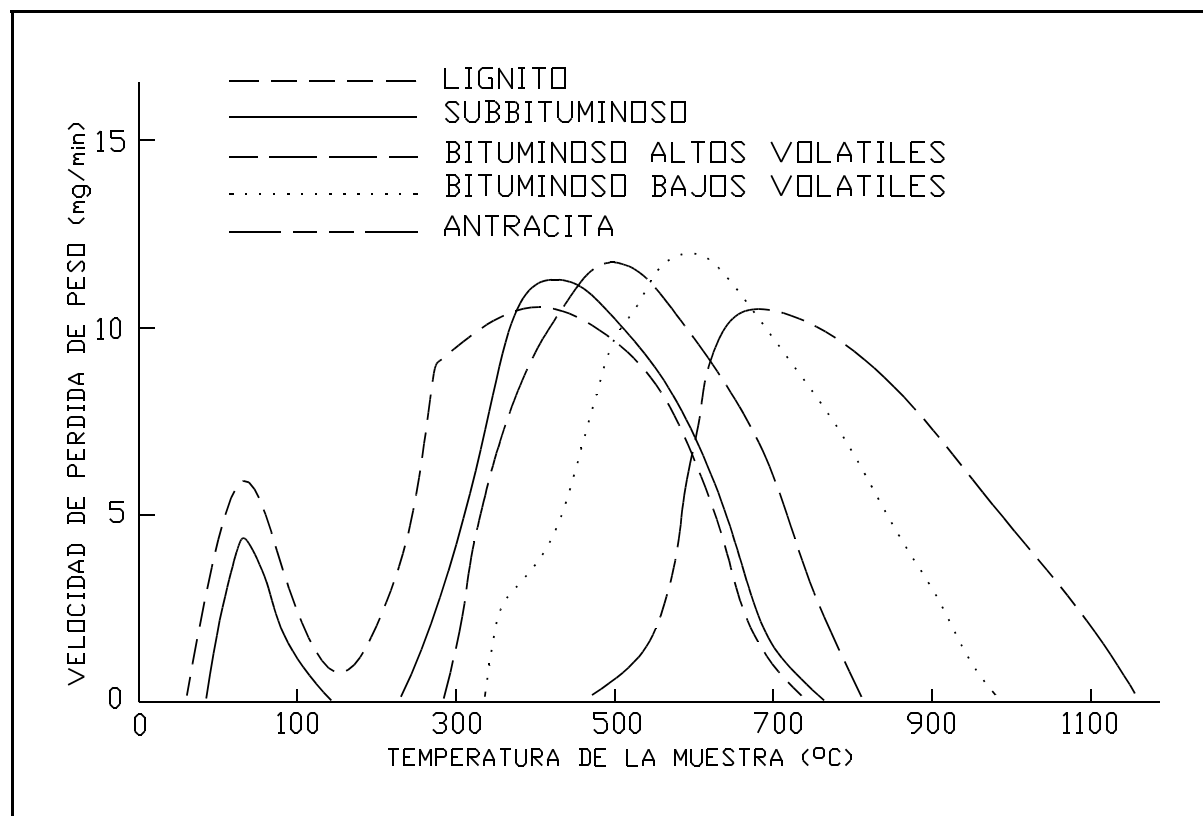


Figura 4: Perfiles de combustión de distintos carbones

de transporte y de molienda de los pulverizadores. A la abrasividad contribuye fundamentalmente el cuarzo contenido en el carbón. Existe un procedimiento para determinar el contenido de cuarzo en el carbón. Consiste en quemar el carbón, recogiendo todas las cenizas, las cuales se someten a lavado para eliminar todos los constituyentes solubles en ácido. Se hace una separación por tamaños del residuo y luego, de cada fracción granulométrica, se cuentan al microscopio 1000 partículas; la cantidad de estas partículas que son de cuarzo, dan una indicación de su contenido en el carbón y de la abrasividad del mismo.

Otro método de determinar la abrasividad consiste en tomar una muestra de carbón de tamaños inferiores a 6,35 mm que se pone en contacto con cuatro placas metálicas testigo, sujetas a un eje que se hace girar a 1440 rpm, dando un total de 12000 vueltas. La pérdida de peso de las placas metálicas que se utilizan como testigos es una indicación del índice de abrasividad.

INDICE DE EROSIVIDAD

La erosividad es lo que produce el desgaste de las líneas que van desde los pulverizadores a los quemadores y de los propios quemadores, debido a los impactos producidos por las partículas de carbón pulverizado arrastradas por el aire primario a velocidad relativamente alta. En las líneas y en los quemadores se producen impactos de las partículas de carbón pulverizado, sobre todo en las curvas y cambios de sentido. La medida de la erosividad, se puede realizar situando una probeta de acero en una corriente de carbón pulverizado en unas condiciones determinadas y midiendo después la pérdida de peso.

VISCOSIDAD DE LAS ESCORIAS

La viscosidad de las escorias se mide a varias temperaturas, en condiciones oxidantes y reductoras, usando un viscosímetro rotativo de alta temperatura. Los datos obtenidos de la medida de la viscosidad son útiles para predecir el comportamiento del combustibles en cuanto a formación de escorias y ensuciamiento de la calderas cuando se quema como carbón pulverizado.

5. COMBUSTIBLES DERIVADOS DEL CARBÓN

Debido a su abundancia y precio, la demanda de carbón como combustible para Centrales Térmicas de generación de energía eléctrica seguirá aumentando. Además la utilización de combustibles derivados del carbón, tales como subproductos líquidos y gases obtenidos en determinados procesos de tratamiento del carbón, los lodos de carbón y los char, son combustibles baratos que se pueden utilizar en lugar de los combustibles líquidos y gaseosos. Además está en continua investigación la obtención de combustibles limpios y eficientes derivados del carbón. De algunos de estos combustibles se tratará a continuación.

COQUE

Cuando se calienta el carbón en ausencia de aire, los componentes más volátiles del mismo se volatilizan y las moléculas de los componentes pesados se rompen, desprendiendo gases y alquitranes y quedando un residuo carbonoso. Algunas moléculas de los volátiles desprendidos también se rompen al entrar en contacto con el carbono caliente. El residuo carbonoso contiene las cenizas y parte del azufre que originalmente había en el carbón y recibe el nombre de *coque*. La cantidad de azufre y cenizas presente en el coque depende del proceso de coquización usado. La principal utilización del coque es la producción de arrabio en el horno alto y las fundiciones de hierro. Debido a que es un combustible que no desprende humo al quemarse, ha sido muy usado en calefacción. Los menudos de coque, tamaños inferiores a 15 mm no se pueden utilizar en el horno alto y se utilizan en la generación de vapor, en la *tabla 6* se muestra un análisis de menudos de coque. Aproximadamente el 4,5 % del carbón que se carga en los hornos de coque se usa como menudos de coque. Parte de los alquitranes obtenidos como subproductos en la fabricación del coque, se pueden quemar en equipos similares a los utilizados para quemar fueloleo.

Tabla 6: Ejemplo de Análisis Inmediato y Elemental de algunos residuos vegetales y de menudos de coque

Análisis Inmediato		
Componente	% en Peso	
	Residuos vegetales (Como bagazo de caña de azúcar)	Menudos de coque (Cribado)
Humedad	52,0	7,3
Materias Volátiles	40,2	2,3
Carbono Fijo	6,1	79,4
Cenizas	1,7	11,0
Total	100,0	100,0
Análisis Elemental		
Hidrógeno, H ₂	2,8	0,3
Carbono, C	23,4	80,0
Azufre, S	trazas	0,6
Nitrógeno, N ₂	0,1	0,3
Oxígeno, O ₂	20,0	0,5
Humedad, H ₂ O	52,0	7,3
Cenizas	1,7	11,0
Total	100,0	100,0
Poder Calorífico, kJ/kg	9304	27144

CHARS Y LÍQUIDOS

El char se produce en un proceso de carbonización que se puede llamar semigasificación, y que se puede considerar como una modificación del proceso normal de gasificación, en el que el carbón es calentado a una temperatura de 700 °C en ausencia de aire y a la presión atmosférica. Las condiciones son de tipo medio comparadas con aquellas a las que tiene lugar la gasificación convencional que son de 1075 °C en aire u oxígeno. En la semigasificación se obtienen tres productos:

- Un combustible gaseoso que se puede utilizar como sustituto del gas natural.
- Un combustible líquido con propiedades similares al diesel n° 2
- Un combustible Sólido parecido al coque llamado *char*.

El combustible sólido se puede pulverizar e incluso, una vez pulverizado, se puede mezclar con el combustible líquido para formar una suspensión que, como tal, puede ser utilizada como combustible en las calderas.

Las condiciones de trabajo de la semigasificación se produce un combustible líquido con

una alta relación hidrógeno/carbono (lo cual es característico de una fácil ignición y de una llama estable), alta fluidez y bajo contenido en azufre, si se compara con el carbón original. Aunque el char producido tiene un contenido en volátiles bajo, y la ignición resulta ligeramente más difícil que la del carbón original, en general, su comportamiento en la combustión es bastante parecido al del carbón original. La semigasificación aumenta el contenido de cenizas del char y reduce el poder calorífico entre un 5 y un 10 % con relación al carbón original. En la *tabla 7* se da la composición de varios char procedentes de la semigasificación del carbón de una cierta procedencia.

Tabla 7: Análisis de un carbón y de tres char procedentes del mismo

Carbón				Char 1				Char 2				Char 3			
H ₂ O	3,5	C	72,0	H ₂ O	2,4	C	75,6	H ₂ O	3,8	C	76,6	H ₂ O	2,4	C	77,5
MV	35,1	H	5,3	MV	21,6	H	3,7	MV	15,6	H	3,1	MV	12,1	H	2,5
CF	53,1	N	1,7	CF	65,7	N	1,8	CF	69,4	N	1,7	CF	73,2	N	1,8
CZ	8,3	S	2,2	CZ	10,2	S	1,8	CZ	11,1	S	1,8	CZ	12,3	S	1,8
		O	10,5			O	6,9			O	5,6			O	4,2
P.C. kJ/kg		13647		P.C kJ/kg		13359		P.C. kJ/kg		13224		P.C. kJ/kg		13131	

COMBUSTIBLES GASEOSOS DERIVADOS DEL CARBÓN

Hay varios combustibles gaseosos derivados del carbón, que pueden ser los procedentes de la gasificación o los subproductos de otros procesos. Todos estos combustibles fueron prácticamente reemplazados por el gas natural y los combustibles líquidos. Sin embargo las mejoras alcanzadas en los procesos de gasificación del carbón y el aumento de la utilización del carbón en las industrias química y de combustibles líquidos, pueden dar la vuelta a esta tendencia.

GAS DE HORNO DE COQUE

En el proceso de coquización, una gran parte del carbón se transforma en gas. Los productos con un determinado valor que pueden ser recuperados de este gas pueden ser sulfato amónico, aceites y alquitranes. La fracción del gas no condensable se la llama *gas de horno de coque* o *gas de batería de coque*. La composición de este gas depende de la naturaleza del carbón y del proceso de coquización (ver *tabla 8*). Parte del azufre presente en el carbón puede estar presente en el gas de horno de coque como sulfuro de hidrógeno o como disulfuro de carbono, que pueden ser eliminados mediante lavado. El gas de horno de coque contiene otras impurezas que se pueden depositar en las tuberías y en los quemadores. El gas quema con mucha facilidad debido a su alto contenido en hidrógeno libre y presenta muy pocos problemas cuando se utiliza como combustible en la generación de vapor.

Tabla 8: Análisis de combustibles gaseosos derivados del carbón

	Gas de horno de coque	Gas de horno alto	Gas de agua carburado	Gas pobre
Análisis, % en volumen				
Hidrógeno, H ₂	47,9	2,4	34,0	14,0
Metano, CH ₄	33,9	0,1	15,5	3,0
Etileno, C ₂ H ₄	5,2	-	4,7	-
Monóxido de Carbono, CO	6,1	23,3	32,0	27,0
Dióxido de Carbono, CO ₂	2,6	14,4	4,3	4,5
Nitrógeno, N ₂	3,7	56,4	6,5	50,9
Oxígeno, O ₂	0,6	-	0,7	0,6
Benceno, C ₆ H ₆	-	-	3,3	-
Agua, H ₂ O	-	3,4	-	-
Densidad respecto al aire	0,413	1,015	0,666	0,857
Poder calorífico, kJ/m ³				
A 16 °C y 1,02 bar	21983	-	19896	6073
A 27 °C y 1,02 bar	-	3122		

GAS DE HORNO ALTO

El gas de salida de los hornos altos en las factorías de fabricación de acero, se utiliza en hornos de la propia factoría, en máquinas de gas o en la generación de vapor. La calidad del gas de horno alto puede ser muy variable, pero generalmente tiene un alto contenido en CO y un poder calorífico muy bajo (Tabla 8). Aunque este gas puede ser usado en la generación de vapor, su contenido en cenizas da origen a depósitos que se adhieren fuertemente a las superficies de intercambio de calor, por lo que debe de preverse la limpieza de tales superficies.

GAS DE AGUA

El gas que se produce cuando se pasa una corriente de vapor de agua a través de un lecho de coque caliente, se llama gas de agua. El carbono del coque se combina con el agua produciendo H₂ y CO. Esta es una reacción exotérmica que tiende a enfriar el lecho de coque. A veces el gas se enriquece con aceite, haciéndolo pasar a través de un entramado de ladrillos calientes rociados con aceite. El aceite se craquea formando gas que se incorpora al gas de agua. Para enriquecer el gas de agua también se puede utilizar el gas de refinería. Este último enriquecimiento se puede hacer mezclando el gas con el vapor que atraviesa el lecho de coque o mezclándolo con el gas de agua una vez formado. El gas de agua enriquecido se llama *gas de agua carburado* (Tabla 8). En muchas aplicaciones el gas de agua carburado ha sido sustituido por el gas natural.

GAS POBRE

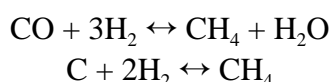
Cuando el carbón o coque se quema con defecto de aire mezclado con una determinada cantidad de vapor, el producto obtenido se llama *gas pobre*. Este gas, una vez limpio de cenizas y compuestos de azufre, se suele utilizar en las proximidades del lugar de producción, debido a su bajo poder calorífico.

SUBPRODUCTOS GASEOSOS DE LA GASIFICACIÓN

Los procesos de gasificación del carbón son una fuente de gas natural sintético. Hay gran cantidad de procesos en estado de desarrollo. El efluente gaseoso de la gasificación del carbón con oxígeno y vapor, está formado principalmente de H₂, CO, CH₄, CO₂ y vapor que no ha reaccionado. El gas estará diluido con N₂ en el caso de que se utilice aire como fuente de oxígeno. Aunque las reacciones que sufre el carbón durante la gasificación son complejas, generalmente se produce la reacción del vapor y el carbono para producir H₂ y CO. Se produce algo de CH₄ por la reacción del carbono y el H₂ y por cracking térmico de los hidrocarburos pesados del carbón. El CO₂ y el calor necesario para el proceso se producen por la reacción del carbono con el O₂. Finalmente la composición del gas se modifica mediante la reacción del CO con el vapor produciendo H₂ y CO₂.

El gas procedente de la gasificación del carbón se puede clasificar como de bajo de medio o de alto poder calorífico. El de bajo poder calorífico tiene entre 3900 y 7900 kJ/m³ normal y es producido en la gasificación con aire. Generalmente este gas se utiliza como un combustible de caldera en la propia planta o como combustible para alimentar una turbina de gas en un ciclo combinado. El gas de poder calorífico intermedio tiene entre 11800 y 17700 kJ/m³ normal y se obtiene cuando la gasificación se hace con oxígeno (sin nitrógeno). La utilización de este tipo de gas es similar a la del gas de poder calorífico bajo. El gas de poder calorífico alto tiene más de 35400 kJ/m³ normal y se usa como sustituto del gas natural. Este gas se obtiene mediante el mismo proceso que el de poder calorífico intermedio seguido de una metanación.

Las reacciones de metanación:



son favorecidas por altas presiones y bajas temperaturas.

Tabla 9: Propiedades de algunos combustibles carbón-agua

	A	B	C	D	E
Sólidos, %	75,3	69,3	69,4	69,9	74,9
Viscosidad a 100 °C, cSt	1589	1291	1292	415	423
P.C.S. s/bruto, %	24958	23051	23679	23679	26470
P.C.S. s/seco, %	33146	33262	34122	33867	35332
M.V. s/bruto, %	24,7	26,5	24,8	22,9	28,0
M.V. s/seco, %	32,8	38,2	35,7	32,7	36,4
Cenizas s/seco, %	7,9	6,3	5,9	6,9	1,8
Azufre s/seco, %	0,84	0,87	0,81	0,77	0,91
Distribución granulométrica					
< 75 μ , %	70	78	63	78	73
Diámetro medio, μ	59	44	67	48	53
Sauter Diámetro medio, μ	7	7	15	8	11
pH	8,6	7,6	7,3	8,1	6,0
Densidad, t/m ³	1,23	1,22	1,20	1,23	1,23
P.C.S. = Poder calorífico superior. M.V.= Materias volátiles					

COMBUSTIBLE CARBÓN-AGUA

El endurecimiento de la legislación medioambiental, en lo referente a emisiones de SO₂ y partículas, cuando se queman carbones bituminosos, ha propiciado un rápido desarrollo de las tecnologías de uso limpio del carbón. Una de esas tecnologías elimina el azufre y la materia mineral del carbón antes de la combustión. Con el objeto de alcanzar los niveles de eliminación de azufre compatibles con la legislación, debe de ser modificada la forma del carbón sólido de acuerdo con el tratamiento a que se adopte para la desulfuración. Los procesos de limpieza más avanzados obligan a triturar el carbón a tamaños muy finos, correspondientes a los tamaños de liberación de la piritita y de otros componentes minerales. El carbón limpio puede ser secado, peletizado o utilizado directamente como lodo que se puede manipular de forma parecida al fuel-oil con objeto de proceder a su combustión en una caldera.

Los lodos carbón-agua pueden ser un sustituto del fuel-oil en algunas instalaciones de combustión y en calderas de generación de energía eléctrica. La composición más típica de los lodos suele ser del 70 % de carbón pulverizado, 29 % de agua y 1 % de aditivos. Los lodos procedentes de carbones que han sufrido una depuración a fondo pueden contener partículas más finas y contenidos de sólidos inferiores (50 a 60 %). En la *tabla 9* se dan las propiedades de algunos combustibles carbón-agua.

Los lodos carbón-agua se pueden manipular de forma parecida al fuel oil n° 2, tienen una viscosidad del orden de 1000 cP. Forman suspensiones estables (las partículas de carbón no decantan) y se pueden transportar y almacenar durante varias semanas sin necesidad de agitación. La fluidez y estabilidad están influidas principalmente por la distribución de tamaños de las partículas de carbón y el tipo de aditivos. Para mantener la baja viscosidad de los lodos, es necesario que las partículas de carbón estén separadas por una película de líquido lubricante. Para que se alcance estabilidad es necesario que cuando el lodo se deposita en un tanque de almacenamiento se mantenga el carácter de un gel. Un *gel* es una suspensión coloidal en la que las partículas suspendidas están, organizadas en una disposición dispersa, pero definida tridimensionalmente, dando cierta rigidez y elasticidad a la mezcla, como en la gelatina. El gel evita que se produzca la decantación de las partículas. El tamaño de partícula y la química de los lodos deben de ser ajustadas cuidadosamente, durante la preparación de tal manera que la estructura de gel se rompa con facilidad (tixotropía) para que pueda ser bombeado y atomizarlo en el sistema de combustión.

Aunque los lodos carbón-agua están constituidos por partículas de carbón pulverizado y se manipulan y queman como fuel-oil, su combustión es diferente y necesitan quemadores especiales. El tipo de carbón utilizado para producir el lodo carbón-agua, afectará a la estabilidad de la ignición. La viscosidad del lodo puede afectar a la calidad de la atomización. Además el tamaño de las partículas de carbón y el contenido en agua, pueden influir en a la aparición de inquemados de carbono debido a que no se alcancen los tiempos de residencia necesarios.

6. COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

La teoría más extendida sobre el origen de los combustibles líquidos es la de su origen orgánico. A través de millones de años los ríos arrastraron lodos y arenas que fueron depositando. Estos depósitos se fueron transformando en rocas sedimentarias. Junto con la materia inorgánica, pequeños animales marinos fueron enterrados en el sedimento. A lo largo del tiempo, en condiciones de alta presión y fuera del contacto del aire, la materia orgánica que contiene carbono e hidrógeno se transformó en moléculas de hidrocarburos formando el petróleo. El petróleo formado emigra a lo largo de las capas sedimentarias acumulándose, debido a que su densidad es inferior a la de las rocas que lo contienen, en forma de bolsas en los anticlinales.

Comparados con el carbón, los combustibles líquidos derivados del petróleo, son fáciles de manipular y de quemar. La cantidad de cenizas que contienen estos combustibles es muy pequeña. En la mayor parte de los quemadores el combustible líquido se atomiza y se mezcla con el aire de combustión. En el estado atomizado, sus características se aproximan a las del gas natural. Debido a su bajo coste, el fuel-oil N° 2 (*tabla 12*) es el más utilizado en la generación de energía eléctrica. Es un subproducto de la destilación del petróleo. Su contenido en humedad está entre el 0,01 y el 0,5 %. Aunque su contenido en cenizas es muy bajo, estas contienen compuestos de vanadio, sodio y azufre que dan algunos problemas de operación, debidos fundamentalmente a su tendencia a la formación de depósitos fundidos sobre las superficies de intercambio de calor.

Tabla 10: Características de los gasoleos

Características	Unidades	Límites de especificación			Normas INTA	Normas ASTM/IP
		Gasóleo A	Gasóleo B	Gasóleo C		
Densidad a 15°C	Kg/L	0,825-0,860	0,825-0,860	0,900 máx.	150213A	D-1298
Color	-	2 máx.	Rojo (4)		150212A(5)	D-1500(5)
Azufre	% peso	0,3 máx.	0,3 máx.	0,3 máx.	150532A	D-1552
Índice de Cetano (1)	-	45 mín.	45 mín.	-		D-976
Destilación	°C	250 mín.	250 mín.	250 mín.	150227E	D-86
65 % recogido	°C	-	-	390 máx.		
80 % recogido	°C	350 máx.	350 máx.	-		
85% recogido	°C	380 máx.	380 máx.	Se anota		
Punto final						
Viscosidad cinemática a 40 °C	cSt	4,3 máx. (2)	4,3 máx. (2)	7,0 máx.	150216B	D-445
	cSt	5,2 máx. (3)	5,2 máx. (3)			
Pto. inflamación	°C	55 mín.	55 mín.	60 mín.	150234C	D-93
Cok Ramsbottom (sobre 10 por 100 de residuo)	% peso	0,2 máx.	0,2 máx.	0,35 máx.	150467A	D-524
Agua y sediment.	% vol.	0,1 máx.	0,1 máx.	0,1 máx.	150462C	D-2709
Corrosión 3 h 100 °C	-	1b máx.	1b máx.	3 máx.	150442B	D-130
Transp. y brillo	-	Cumple	Cumple	-	-	D-4176
Pto de obstrucción filtro frío (POFF)	°C	-8 máx. (2)	-8 máx. (2)	-6 máx.	150241A	IP-309
	°C	0 máx. (3)	0 máx. (3)			
Punto de enturbiamiento	°C	-1 máx. (2)	-1 máx. (2)	+4 máx.	150242C	D-2500
	°C	+4 máx.(3)	+4 máx. (3)			
Poder calorífico superior	kcal/kg	10500 mín.	10500 mín.	10300 mín.	150229C	D-240
	MJ/kg	43,96 mín.	43,96 mín.	43,18 mín.		

- (1) Se añadirán los aditivos necesarios para obtener un número de cetano de 50 mínimo.
- (2) En el período comprendido del 15 de septiembre al 31 de marzo.
- (3) En el período comprendido entre el 1 de abril al 14 de septiembre.
- (4) El tipo y cantidad a utilizar de colorante y agentes trazadores debe ser aprobado por el Ministerio de Industria y Energía, previo informe de la Delegación del Gobierno en CAMPSA.
- (5) Sólo Gasóleo A.

CARACTERIZACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

Se pueden considerar dentro de este grupo todos aquellos combustibles derivados del petróleo que son menos volátiles que la gasolina. Estos van desde los gasoleos que se utilizan en motores de combustión interna y en turbinas de gas, hasta los fuel-oil pesados para cuya manipulación se necesita calentamiento. Las fracciones más pesadas (fuel-oil) se suelen utilizar fundamentalmente para la generación de energía eléctrica. Los combustibles líquidos derivados del petróleo se pueden separar en dos categorías, destilados y residuales. Los destilados se vaporizan en el proceso de refinado del petróleo. Son generalmente limpios, no suelen contener sedimentos ni cenizas y su viscosidad es relativamente baja. Estos son los gasoleos A, B y C (tabla 10). Los gasoleos A y B se utilizan en automoción, como combustibles en motores diesel, mientras que el C se utiliza exclusivamente para quemar en hogares, dese las calefacciones domésticas hasta en centrales generadoras de energía eléctrica. En las centrales de generación de energía eléctrica su uso se restringe, como combustible principal, a centrales pequeñas, como algunas de las instaladas en Baleares o en Canarias. Como combustible de encendido, calentamiento o apoyo, lo utilizan todas las centrales que tengan como combustibles principales el fuel-oil o el carbón. La únicas centrales que no lo necesitan son las que utilizan como combustible principal el gas natural.

Tabla 11. Especificaciones del fueleleo 1

Características	Unidades de medida	Límite de especificación		Normas INTA	Normas ASTM
		Mínimo	Máximo		
Color negro					
Viscosidad, 100,C	cSt	-	25	15016B	D-445
Azufre	% peso	-	2,7 (1)	150532A	D-1 552
Punto de inflamación	°C	65	-	150234C	D-93
Agua y sedimento	% volumen	-	1,0	150462C	D-1796
Agua	% volumen	-	0,5	150456B	D-95
Potencia calorífica					
Superior	kcal/kg	10.100	-	150229C	D-240
	MJ/kg	42,29			
Inferior	kcal/kg	9.600	-	150229C	D-240
	MJ/kg	40,19			
Densidad					

(1) Cuando el contenido de azufre de esta calidad no supere el 1 % en peso, se denominará fueleleo n° 1 BIA. Los suministros de este tipo de combustible con bajo contenido de azufre, serán regulados por el Ministerio de Industria y Energía y la forma de distribución será establecida por la Delegación del Gobierno de CAMPSA.

Los combustibles residuales son los que no vaporizan en el proceso de refinado del crudo de petróleo. Contienen toda la materia inorgánica presente en el crudo, normalmente son de color negro, tienen alta viscosidad que obliga a calentarlos para reducir dicha viscosidad y hacerlos manipulables y posibilitar su pulverización en los quemadores. En las tablas 11 y 12 se muestran las propiedades de estos fuel-oil comercializados en España, Fueloleo n° 1 y Fueloleo n° 2.

Tabla 12: Especificaciones del fueleleo 2

Características	Unidades de medida	Límite de especificación		Normas INTA	Normas ASTM
		Mínimo	Máximo		
Color negro					
Viscosidad 100,C	cSt	-	37	15016B	D-445
Azufre	% peso	-	3,5	150532A	D-1 552
Punto de inflamación	°C	65	-	150234C	D-93
Agua y sedimento	% volumen	-	1,0	150462C	D-1796
Agua	% volumen	-	0,5	150456B	D-95
Potencia calorífica Superior	kcal/kg	9.900	-	150229C	D-240
	MJ/kg		41,45		
Potencia calorífica Inferior	kcal/kg	9.400	-	150229C	D-240
	MJ/kg		39.36		
Densidad					

ANÁLISIS DE LOS COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

Un análisis típico de combustibles líquidos debe de contener la siguiente información:

- Análisis elemental
- Densidad
- Poder calorífico
- Viscosidad
- Punto de fluidez
- Punto de inflamación o relámpago
- Agua y sedimentos

El *Análisis elemental* es similar al del carbón y debe de especificar los contenidos en carbono, hidrógeno, azufre, nitrógeno, oxígeno y cenizas. El contenido de azufre es una indicación del poder corrosivo del combustible. El azufre se oxida durante la combustión y forma óxidos de azufre que al reaccionar con el vapor de agua o los constituyentes de las cenizas forma ácidos o sales corrosivas como el sulfato potásico. Cuando estas cenizas se depositan sobre la superficie de los tubos del circuito agua-vapor, manteniéndose en estado de fusión, tales depósitos fundidos tienen un alto poder corrosivo. El vanadio contribuye a la oxidación del SO₂ a SO₃ actuando como catalizador, aumentando la proporción de sulfatos y rebajando el punto de fusión de las escorias, lo que aumenta la probabilidad de formación de depósitos fundidos corrosivos.

La *Densidad* se expresa en kg/m³. También se suele utilizar como medida la *Densidad relativa*, que es la relación entre la densidad a una determinada temperatura y la densidad del agua a 15 °C. Es muy normal expresarla a 15 °C (Densidad relativa 15/15 °C). En la industria del petróleo se suele expresar la *Densidad en grados API*, medida ideada por American Petroleum Institute y el National Bureau of Standards. La relación entre la densidad API y la densidad relativa viene dada por la fórmula:

$$Densidad \text{ grados API} = \frac{141,5}{Densidad \text{ relativa } 15/15^{\circ}C} - 131,5$$

De acuerdo con la fórmula, los líquidos más pesados tienen valores de densidad API más bajos.

El *Poder calorífico* de un combustible líquido expresa el calor liberado en la combustión completa de una unidad de combustible (kJ/kg). Lo mismo que para el carbón existen dos poderes caloríficos, el superior (PCS) y el inferior (PCI). Para obtener el PCS se supone que ninguna cantidad de agua queda en forma gaseosa en los productos finales de la combustión, los cuales se condensan y enfrían hasta la temperatura inicial. Por lo tanto en el PCS está incluido el calor de vaporización del agua formada durante la combustión. Para obtener el PCI se supone que ninguna cantidad de agua de la formada en el proceso de combustión queda en forma líquida. Los poderes caloríficos se determinan quemando en atmósfera de oxígeno una cierta cantidad de combustible en la bomba calorimétrica.

La *viscosidad* de un fluido es la medida de su resistencia interna a fluir. Aunque hay muchas escalas para medir la viscosidad, las más usadas son:

Segundos Saybolt Universal (SSU)

Segundos Saybolt Furol (SSF)

Viscosidad absoluta o dinámica, centipoises (cP)

Viscosidad cinemática, centistokes, (cSt)

La unidad de viscosidad dinámica en el sistema SI es (Pa.s) o (N.s/m²) o (kg/m.s)

La unidad de viscosidad dinámica en el sistema CGS (*llamada Poise, P*) es (dina.s/cm²) o (gr/cm.s)

La unidad SI de viscosidad dinámica es 10 veces la unidad CGS (*Poise, P*)

La unidad más utilizada para expresar la viscosidad absoluta o dinámica es el *Centipoise (cP)* que es la centésima parte del Poise. Como la mayoría de los manuales y tablas siguen expresados en esta unidad, parece que la situación va a continuar así durante algún tiempo.

La unidad de viscosidad absoluta o dinámica en el sistema SI es (Pa.s) = 10³.cP

La viscosidad cinemática es la relación entre la viscosidad dinámica y la densidad

La unidad de viscosidad cinemática en el sistema SI es (m²/s)

La unidad de viscosidad cinemática en el sistema CGS es el stoke (St) (cm²/s)

La unidad SI de viscosidad dinámica es 10⁴ veces la unidad CGS (St)

La unidad más utilizada para expresar la viscosidad cinemática es el *Centistoke (cSt)* que es la centésima parte del Stoke (St).

La unidad de viscosidad cinemática en el sistema SI es (m²/s) = 10⁶.cSt

La relación entre las viscosidades absoluta o dinámica y la cinemática es:

$$v(cSt) = \frac{\mu(cP)}{\rho\left(\frac{gr}{cm^3}\right)}$$

El *Punto de fluidez* es la temperatura más baja a la que el líquido fluye bajo condiciones estándar.

El *Punto de inflamación o relámpago*, es la temperatura a la que hay que calentar el combustible para que los vapores que desprende se inflamen al acercarlos una llama, sin que la combustión se mantenga de forma continua porque la velocidad de generación de gases es inferior a la de consumo de los mismos. El *Punto de inflamación permanente*, es la temperatura a la que hay que calentar el combustible para que los vapores que desprende se inflamen al acercarlos una llama, y ésta ya no se apaga porque se generan gases a la misma velocidad a la que se queman. Esta temperatura está entre 10 y 30 °C por encima de la anterior. El *Punto de*

autoencendido es la temperatura a la que hay que calentar el combustible para que los gases desprendidos autoenciendan sin necesidad de ningún tipo de iniciación. El ensayo para determinar estos valores, puede hacerse en vaso abierto o en vaso cerrado. En el segundo caso se obtienen valores más bajos porque se retienen vapores de componentes ligeros que en el caso de vaso abierto se escapan a medida que se van formando.

La cantidad de *agua y sedimentos* es una medida del grado en que se encuentra contaminado el combustible líquido. Los sedimentos normalmente son compuestos de calcio, sodio, magnesio y hierro. Los sedimentos de los combustibles más pesados también pueden contener carbono.

El análisis descrito del combustible es importante para el diseño de la caldera. El poder calorífico superior define la cantidad de combustible que es necesario para alcanzar la potencia calorífica de entrada a la caldera. El análisis elemental sirve para determinar el aire teórico necesario para la combustión completa y por lo tanto servirá para calcular el tamaño de la garganta de los quemadores. Del análisis elemental se saca la relación carbono/hidrógeno que es una indicación de la facilidad con la que se va a quemar el combustible así como de la cantidad de inquemados sólidos (carbono) que se van a producir. Si la relación C/H es superior a 7,5 es muy probable que haya problemas en la combustión. Considerando los contenidos de azufre y nitrógeno se puede hacer una estimación de las emisiones de óxidos de azufre y de nitrógeno. El contenido en cenizas puede ser una indicación de la emisión de partículas sólidas, y la composición de las cenizas una indicación de la tendencia al ensuciamiento y corrosión en la caldera. Cuando se trata de diseñar una caldera es necesario la siguiente información adicional:

- Residuo carbonoso
- Contenido en asfaltenos
- Análisis espectrográfico de cenizas
- Perfil de quemado
- Curva de destilación.

Se llama *Residuo Carbonoso* al residuo sólido que queda después de someter el combustible líquido a calentamiento en ausencia de aire. Los ensayos utilizados normalmente son el Conradson Carbon Test y el Ramsbottom Carbon Test. La cantidad de este residuo da una indicación de la tendencia del combustible a formar coque.

Los *Asfaltenos* están formados por cadenas largas de hidrocarburos con peso molecular alto. El contenido en asfaltenos de un producto petrolífero es el porcentaje en peso de material, excluidas las parafinas insoluble en n-heptano y soluble en benceno caliente. Su manipulación obliga a utilizar altas temperaturas así como gran cantidad de energía para su atomización, si se quiere obtener una combustión completa. Cuando el contenido en asfaltenos es alto, es muy probable que se produzcan problemas en la combustión y que aparezcan inquemados en los humos.

El *Perfil de Quemado* de un combustible líquido obedece a los mismos principios que el de un combustible sólido y da información sobre el exceso de aire y el tiempo de residencia necesarios para completar la combustión.

La *Curva de Destilación* sirve para determinar el número de fracciones y la cantidad de cada una que componen el combustible

PROPIEDADES DE LOS COMBUSTIBLE LÍQUIDOS

En la *tabla 13* se muestran los análisis típicos del fuel-oil y del gas-oil. Hay una correlación muy buena entre el poder calorífico y la densidad relativa de los combustibles líquidos derivados del petróleo. En la *figura 5* se muestra la relación entre el PCS y la densidad en grados API así como la de la densidad relativa también en función de la densidad en grados API. Se puede obtener una estimación más aproximada del poder calorífico superior de un combustible líquido, si se corrige el poder calorífico obtenido en la *figura 5* mediante la expresión:

$$\text{Poder Calorífico Corregido} = \frac{\text{PCS} [100 - (C + H + S)]}{100} + 40,5S$$

Tabla 13: Composición típica del fuel-oil y del gas-oil

Combustible	Densidad	Composición, % en peso					PCS, kJ/kg
		C	H	N	S	O	
Gas-oil	0,841	84,3	14,1	-	0,2	1,6	49395
Fuel-oil	0,967	84,0	11,3	2,1	0,9	3,0	42697

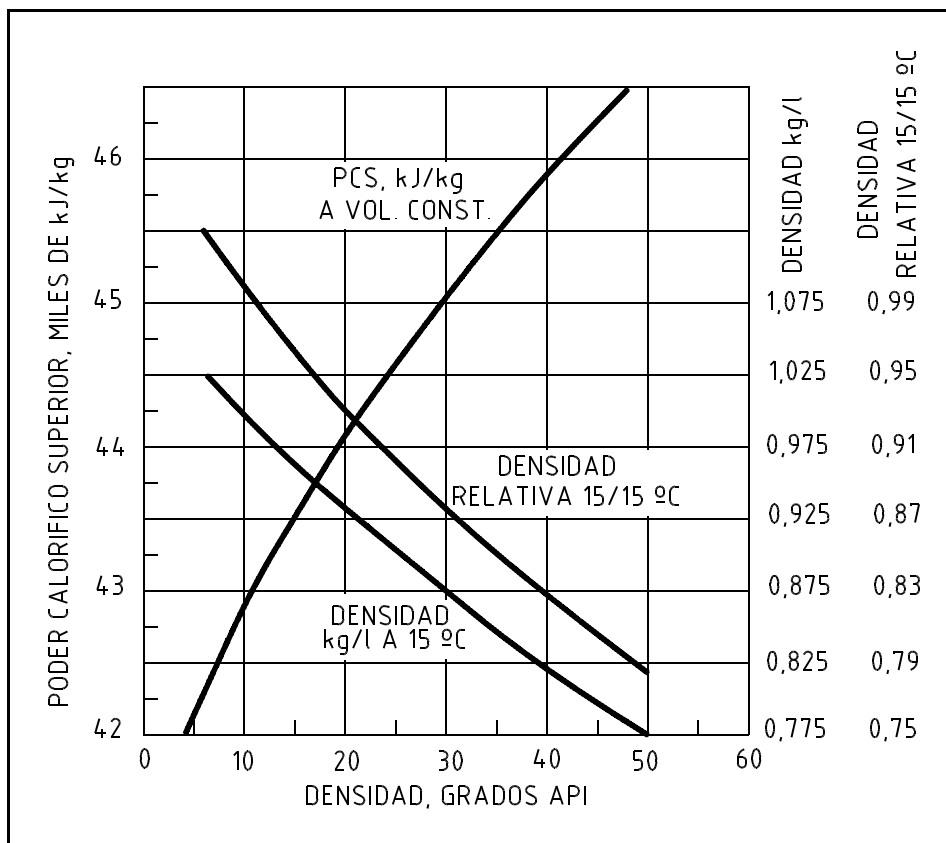


Figura 5: relación entre el PCS y la densidad

Se pueden utilizar los porcentajes en volumen de agua y sedimentos en lugar de los

porcentajes en peso, sin cometer errores importantes.

Es muy normal que los combustibles líquidos se vendan en unidades de volumen consideradas a 16 °C. En tal caso es necesario utilizar factores de corrección para reducir el volumen a cualquier otra temperatura al volumen a 16 °C. Los valores de los coeficientes de corrección para distintos valores de la densidad en grados API, se pueden obtener de la *figura 6*.

Los equipos de manipulación y de combustión se diseñan para la viscosidad máxima. Si se conoce la viscosidad de un derivado del petróleo a dos temperaturas, su viscosidad a cualquier

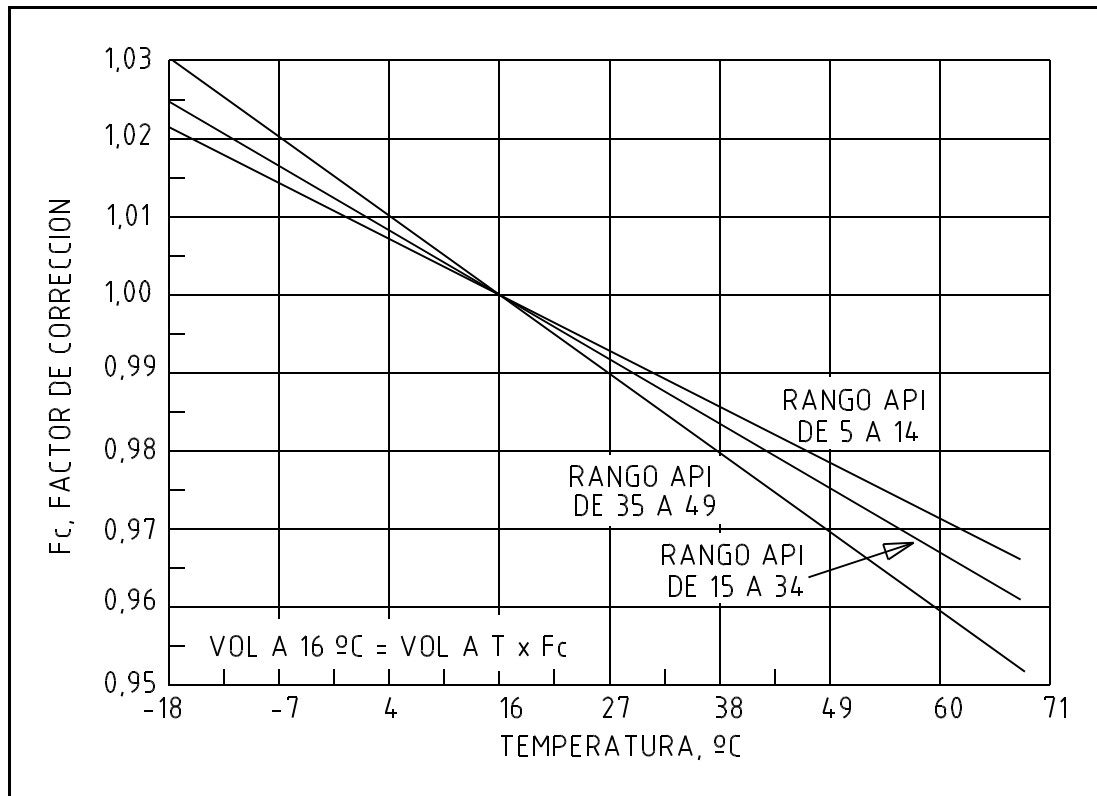


Figura 6: Factor de corrección del volumen por la temperatura

otra temperatura puede ser calculada con precisión mediante la carta ASTM que se muestra al final del capítulo. Si se conoce la viscosidad de un producto petrolífero para dos temperaturas distintas, se puede conocer la viscosidad a cualquier otra temperatura ya que estará siempre sobre la recta que une las dos conocidas.

7. GAS NATURAL

El gas natural se puede encontrar en los mismos yacimientos que el petróleo y en otras ocasiones en yacimientos separados. El metano es el principal componente del gas natural, en pequeñas cantidades contiene etano, propano y butano. Se pueden encontrar también otros hidrocarburos entre el pentano y el decano. También pueden estar presentes en el gas natural otros gases tales como CO₂, nitrógeno, helio y SH₂.

De todos los combustibles gaseosos el gas natural se puede considerar como el más deseable para la generación de vapor. Se transporta por tubería directamente a la instalación de combustión sin necesidad de almacenamiento intermedio. No contiene cenizas. Se mezcla fácilmente con el aire de combustión. Por otro lado como no contiene hidrógeno libre, resulta que

su combustión es más difícil que la de otros combustibles gaseoso manufacturados.

Su elevado contenido en hidrógeno hace que entre los productos de la combustión haya gran cantidad de vapor de agua. Esta presencia de vapor de agua en los productos de combustión hace que en ellos se pierda su calor latente de vaporización y que el rendimiento de la combustión sea relativamente bajo.

En la *tabla 14* se muestran las composiciones de gas natural de diversas procedencias

Tabla 14: Composición y propiedades de gases naturales de distintas procedencias

Procedencia	1	2	3	4	5
Composición, % en volumen					
H ₂	-	-	1,82	-	-
CH ₄	83,40	84,05	93,33	90,00	84,10
C ₂ H ₄	-	0,25	-	-	-
C ₂ H ₆	15,80	14,50	-	5,00	6,70
CO	-	-	0,45	-	-
CO ₂	-	0,70	0,27	-	0,80
N ₂	0,80	0,50	3,40	5,00	8,40
O ₂	-	-	0,45	-	-
SH ₂	-	-	0,28	-	-
Análisis elemental					
S	-	-	0,34	-	-
H ₂	23,53	23,30	23,20	22,68	20,85
C	75,25	74,72	69,12	69,26	64,84
N ₂	1,22	0,76	5,76	8,06	12,90
O ₂	-	1,22	1,58	-	1,41
Densidad relativa al aire	0,636	0,636	0,567	0,600	0,630
PCS, kJ/m ³	42065	41581	35918	38079	36290
PCS, kJ/kg	53893	53275	51351	50763	46892

8. OTROS COMBUSTIBLES

Mientras el carbón, el petróleo y el gas natural son las fuentes dominantes de combustible para la generación de vapor en las centrales productoras de energía eléctrica, existen otras posibles fuentes como la madera, derivados y subproductos de la industria de la madera, ciertos tipos de vegetación como el bagazo (residuo de aquellas cosas que se exprimen para sacar de ellas el zumo o licor) y los residuos urbanos.

COQUE DE PETRÓLEO

Los residuos pesados del proceso de cracking del petróleo, actualmente se tratan para

producir una cierta cantidad de hidrocarburos más ligeros y un residuo sólido que se puede utilizar como combustible. Las características de este residuo sólido (coque de petróleo) son muy variables, dependiendo del proceso utilizado.

El “delayed coking process” utiliza el líquido residual que es calentado y bombeado a un reactor donde el coque de petróleo formado se deposita como una masa sólida que luego se extrae por métodos mecánicos o hidráulicos. Hay algunos coques de esta procedencia que resultan fáciles de pulverizar y de quemar mientras que otros presentan dificultades.

El “fluid coke process” consiste en pulverizar el líquido residual en un lecho fluido de partículas finas de coque. El coque se extrae como gránulos formados por capas depositadas sobre las partículas finas originales. Este tipo de coque puede ser pulverizado, se puede quemar en hogar ciclón y también se puede quemar en lecho fluido. Cualquiera que sea el método de combustión utilizado, se necesita mezclarlo con otro combustible.

El “petroleum pitch process” es una alternativa a los procesos de coquización y produce combustibles de varias características.

El punto de fusión del coque de petróleo es muy variable y sus propiedades físicas van desde blando y pegajoso hasta duro y friable. Las breas de bajo punto de fusión es posible quemarlas como el fuel-oil, calentándolas previamente por encima del punto de fusión, mientras que las de alto punto de fusión deben de ser trituradas y pulverizadas como un combustible sólido para utilizarlas en un proceso de combustión.

Tabla 15: Análisis de distintos coques de petróleo

Análisis elemental % en peso sobre base seca				
	Delayed Coke		Fluid Coke	
Materias volátiles	10,8	9,0	6,0	6,7
Carbono fijo	88,5	90,0	93,7	93,2
Cenizas	0,7	0,1	0,3	0,1
Azufre	9,9	1,5	4,7	5,7
Poder calorífico, kJ/kg	34192	36518	32936	33239

EMULSIONES DE ACEITE

De forma parecida a lo que ocurre con los lodos carbón-agua, las emulsiones de aceite son posibles sustitutos del fuel-oil en algunos procesos de combustión. Recientemente se han aplicado este tipo de combustibles en calderas e incluso en motores diesel. Con el descubrimiento de grandes reservas de hidrocarburos pesados y betunes en Venezuela, se han hecho considerables esfuerzos para desarrollar sistemas que permitieran utilizar de forma comercial estos combustibles. Uno de los desarrollos que se ha realizado fue la utilización de emulsiones de aceite bituminoso. Las emulsiones de aceite están formadas por gotas de aceite de tamaño muy pequeño (del orden de micras) dispersas en agua. Se evita la coalescencia de las gotas de aceite mediante pequeñas cantidades de aditivos apropiados. Estos combustibles se caracterizan por un elevado contenido de azufre, asfaltenos y metales. El poder calorífico, el contenido en cenizas y la viscosidad de la emulsión son similares a las del fuel-oil. Uno de los problemas que se presentan al quemar estas emulsiones de aceites bituminosos es la formación de compuestos de vanadio corrosivos. Esto se produce por la oxidación de los compuestos metálicos contenidos en

el combustible.

MADERA

En la *tabla 16* se muestran los análisis, poderes caloríficos y análisis de cenizas de algunos tipos de madera. Tienen un poder calorífico relativamente bajo comparado con el carbón y los derivados del petróleo.

Las cortezas de madera pueden adquirir impurezas durante el transporte. Es una práctica común arrastrar los troncos hasta los puntos de carga, y durante esta fase del transporte, la superficie externa y la corteza, se pueden impregnar con materias minerales. Cuando los troncos se sumergen en agua salada, la corteza y la superficie, también se impregna de la misma. Las temperaturas de combustión de la corteza seca pueden ser lo suficientemente altas para que las impurezas adquiridas formen depósitos de escoria fundida sobre las paredes del hogar, a menos que el mismo tenga una gran superficie de paredes refrigeradas. Las partículas de arena cuando son arrastradas por la corriente de gases a través de los bancos de tubos producirán desgastes por abrasión. En algunos casos son necesarios colectores (ciclones u otro tipo) para separar de los humos los restos de cortezas que arrastran y que no están totalmente quemadas. Los materiales recogidos en estos colectores se vuelven a reinyectar en el hogar, por lo que, si contienen arena, el efecto abrasivo sobre los bancos de tubos se multiplica.

La corteza o madera con un contenido en humedad del 50 % quema con facilidad, pero con humedades superiores la combustión resulta difícil. Cuando el contenido de humedad alcanza el 65 %, la mayor parte del calor generado en la combustión se consume en vaporizar la humedad inherente y queda muy poco calor para la generación de vapor. La combustión de madera con estos niveles de humedad es más una forma de deshacerse de ella que una forma de aprovechamiento energético.

La madera triturada y las cortezas son muy voluminosas y requieren bastante equipamiento para manipulación y almacenamiento y es difícil que se pueda mantener un flujo continuo desde contenedores, tolvas y otras instalaciones hacia el hogar. Es difícil la alimentación continua de los hogares.

RESIDUOS DE MADERA

Son varias las industrias que utilizan la madera como materia prima y en las cuales se obtienen subproductos utilizables como combustibles. Las más importantes son las industrias de pasta y trementina. El aprovechamiento energético de los subproductos de la industria de la pasta de papel se sale del alcance de este texto.

Los residuos que quedan después de la destilación de la madera de coníferas para la producción de trementina, se pueden utilizar como combustibles. Los constituyentes más fácilmente combustibles se extraen durante la destilación, por lo que el residuo quemará peor que la madera. Varias de las propiedades e inconvenientes de este combustible coinciden con las de la madera.

Tabla 16: Análisis de maderas y sus correspondientes cenizas

Análisis inmediato				
Tipo de madera	Corteza de pino	Corteza de roble	Corteza de abeto*	Corteza de secoya*
Materias volátiles	72,9	76,0	69,6	72,6
Carbono fijo	24,2	18,7	26,6	27,0
Cenizas	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
Cenizas	2,9	5,3	3,8	0,4
Poder Calorífico	21004	19469	20329	19442
Análisis de cenizas, % en peso				
SiO ₂	39,0	11,1	32,0	14,3
Fe ₂ O ₃	3,0	3,3	6,4	3,5
TiO ₂	0,2	0,1	0,8	0,3
Al ₂ O ₃	14,0	0,1	11,0	4,0
Mn ₃ O ₄	Trazas	Trazas	1,5	0,1
CaO	25,5	64,5	25,3	6,0
MgO	6,5	1,2	4,1	6,6
Na ₂ O	1,3	8,9	8,0	18,0
K ₂ O	6,0	0,2	2,4	10,6
SO ₃	0,3	2,0	2,1	7,4
Cl	Trazas	Trazas	Trazas	18,4
Fusibilidad atmósfera reductora				
Deformación inicial	1193	1477		
Reblandecimiento	1227	1493		
Fluidez	1266	1504		

Tabla 16: Análisis de maderas y sus correspondientes cenizas (continuación)

Fusibilidad atmósfera oxidante				
Tipo de madera	Corteza de pino	Corteza de roble	Corteza de abeto*	Corteza de secoya*
Deformación inicial	1210	1471		
Reblandecimiento	1249	1499		
Fluidez	1288	1510		
* Transportado en agua salada				

BAGAZO

Las industrias de molido de caña de azúcar, normalmente utilizan bagazo para la producción de vapor. El bagazo es la pulpa seca que queda después de la extracción del jugo de la caña de azúcar. En temporada los molinos trabajan durante 24 horas diarias. El suministro de bagazo es suficiente para producir el vapor demandado por la planta mientras en la misma no se refine el azúcar. En consecuencia, mientras no haya otro tipo de mercado para el bagazo, no se realiza ningún esfuerzo para quemarlo de forma eficiente y los equipos de combustión se disponen de tal manera que el bagazo se quema tal como se recibe de los trituradores. En las plantas donde se refina el azúcar se necesita combustible suplementario para cubrir la demanda de vapor de la planta. En estos casos es necesario hacer algún esfuerzo para mejorar el rendimiento de combustión del bagazo. En la *tabla 6* se muestra un análisis del bagazo.

Tabla 17: Análisis de un residuo sólido urbano, el combustible derivado y un carbón bituminoso

Análisis, % en peso			
	Residuo bruto	Combustible derivado del residuos	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
Cloro	0,1	0,1	0
Agua	31,3	20,2	3,5
Cenizas	16,0	6,0	9,0
P.C.S. s/húmedo	11836	14421	30238

OTROS RESIDUOS VEGETALES

Las industrias alimentarias producen residuos vegetales que se pueden utilizar como combustibles. Tales incluyen las cascarras de las gramíneas, residuos (huesos) de todo tipo de frutos, residuos de la producción de café instantáneo, residuos de la industria del tabaco. De todos modos, el valor energético de los residuos combustibles de este tipo de industrias, se puede considerar insignificante en el computo general de la producción de energía.

RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Una de las fuentes de energía de mayor crecimiento en los últimos años en USA Japón y Europa son los residuos sólidos urbanos. Son una combinación de residuos comerciales y residenciales. Anteriormente se depositaban en determinados lugares donde rellenaban valles o depresiones de bajo valor. Actualmente hay una tendencia cada vez mayor a su aprovechamiento energético, ya sea quemándolos directamente en calderas apropiadas o procesándolos para obtener un combustible derivado. En la *tabla 17* se muestra la composición del residuo tal como se recibe y del combustible derivado de residuos y se comparan con un carbón bituminoso.