

CARBON

Prof. Dr. Vicente J. Cortés

INDICE

1.	INTRODUCCION	2
2.	LA CARBOGENESIS. NOCIONES GENERALES.....	3
3.	COMPOSICION Y ESTRUCTURA DEL CARBON.....	5
4.	CLASIFICACION DE LOS CARBONES	7
	4.1. CLASIFICACIONES FISICO-QUIMICAS.....	7
	4.2. CLASIFICACION MICROSCOPICO-VISUAL	9
5.	ENSAYOS NORMALIZADOS.....	11
	5.1. ANALISIS INMEDIATO.....	12
	5.2. ANALISIS ELEMENTAL	14
	5.3. ANALISIS DE CENIZAS Y MINERALES	16
	5.4. PODER CALORÍFICO	16
	5.5. FORMAS DE AZUFRE, CLORO Y ELEMENTOS TRAZA	16
	5.6. PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS	17
	5.7. ANALISIS PETROGRAFICO.....	19
6.	INFLUENCIA DE LOS ANALISIS DEL CARBON EN LA OPERACION DE CENTRALES TERMICAS.....	20
	6.1. EFECTOS PRINCIPALES DE LAS CARACTERISTICAS DEL CARBON.....	20
	6.2. LIMITACIONES Y LINEAS DE DESARROLLO	22

1. INTRODUCCION

El carbón es un sólido oscuro, estratificado y combustible, resultado de la acumulación y enterramiento de materia vegetal desde las primitivas eras geológicas. Estos depósitos se convierten en carbón a través de unos cambios biológicos iniciales y posteriores efectos mecánicos de presión y temperatura en el seno de los sedimentos.

El carbón se caracteriza por ser el combustible fósil del que existe mayor cantidad de recursos, cifrándose en un 75% del total de las reservas estimadas. Así mismo cabe destacarse su amplia distribución geográfica, conociéndose yacimientos explotables prácticamente en todos los países.

La utilización como combustible del carbón puede remontarse a unos 1000 años A.C. en China. Existen referencias históricas de su utilización por griegos y romanos alrededor de 400 años A.C. La minería del carbón tuvo su origen en Alemania alrededor del siglo X, siendo la disminución de los bosques en Europa la que provocó un rápido incremento en esta minería durante el siglo XVI.

El siglo XVIII puede considerarse la "edad de oro" del carbón, de hecho su creciente utilización, en las fundiciones de hierro y como combustible de las máquinas de vapor, debe destacarse como la principal causa de la denominada "Revolución Industrial".

Posteriores desarrollos de sistemas de combustión, basados en combustibles líquidos y gaseosos, llevaron a una diversificación de las fuentes de energía, con la consiguiente reducción en la utilización del carbón como energía primaria.

La crisis del petróleo de los años 70, que motivó entre otros hechos un importante aumento de precios de los combustibles derivados de éste, ha potenciado en los últimos años la utilización del carbón, destacándose, principalmente, su aplicación en la generación de energía eléctrica.

Prácticamente todo el carbón se utiliza en procesos de combustión y coquizado. Así, tomando como base los datos de consumo de energía primaria en España de 1998 (Figura 1) puede observarse que, aproximadamente, un 80% del carbón se quema para generar electricidad o vapor para usos industriales y domésticos, mientras que, aunque en cantidades mucho menores, es asimismo significativo su empleo en los sectores siderúrgico, cementero y de fabricación de coque. El resto se utiliza en otras actividades de menor importancia relativa, como pueden ser la fabricación de pigmentos y materiales de relleno y la filtración de agua.

2. LA CARBOGENESIS. NOCIONES GENERALES

Se denomina carbogénesis al proceso de transformación por el cual se origina el carbón a partir de sustancias vegetales, fundamentalmente plantas superiores ("madera"), y, en menor grado, organismos inferiores como algas, esporas o pólenes. Este proceso consta de dos etapas principales, el estado bioquímico que determina el tipo del carbón y la fase geoquímica o metamórfica que condiciona el rango del carbón:

Fase bioquímica

Para que un carbón se forme, las sustancias vegetales de las que procede deben haber sido preservadas de las destrucciones totales oxidativa y microbiana. Es por este hecho por el que se postula que la génesis del carbón debió tener lugar en zonas pantanosas donde el agua cubrió o saturó los depósitos vegetales, limitando el acceso de oxígeno e inhibiendo la acción de los microorganismos que producen la putrefacción. Este agua tuvo que estar estancada, pues de lo contrario se habría repuesto el contenido de oxígeno, y además debió ser poco profunda, para permitir el crecimiento de una importante cantidad de materia vegetal.

En general, el proceso de descomposición (limitada) de estas sustancias vegetales depende del medio en que se desarrolla, principalmente, en relación a tres factores: contenido en nutrientes para bacterias y hongos, oxígeno y pH. Estas condiciones determinan, por un lado, el modo de descomposición, y, por otro, la clase de sustancias vegetales sobre las que se produce, ya que hay otras que son destruidas totalmente y, en consecuencia, no originan carbón.

Existen teorías de amplia aceptación que explican en función de estos parámetros la formación de los macerales (agregados orgánicos con propiedades físicas y químicas distintivas, en los que se distribuye la fracción orgánica del carbón) y, por tanto, de los diferentes tipos de carbón existentes. Los macerales serían, por tanto, los constituyentes del carbón (en su fracción orgánica), en el mismo sentido en el que los minerales son los constituyentes de las rocas inorgánicas.

Los macerales tienen tamaños desde 2 micras a varios centímetros y, a diferencia de los minerales, no están caracterizados por composiciones químicas bien definidas y uniformidad en el grado de cristalización.

No obstante estas diferencias, se consideran en general 3 grupos de macerales del carbón (Tabla I), en función de su origen:

- I) La vitrinita es producida a partir de "madera", entendiendo bajo esta denominación las partes estructurales de las plantas (tallos, troncos, raíces y hojas vasculares), siendo por consiguiente derivada de los constituyentes químicos principales de ésta (celulosa y lignina). El proceso de descomposición de la "madera" se produce por la acción de bacterias aerobias cerca de la superficie del depósito y bacterias anaerobias a una mayor profundidad, dando lugar a lo que se conoce como turba. Es el maceral mayoritario en los carbones existentes (>80%), siendo responsable de las propiedades de coquizado.
- II) La inertinita, en gran parte, es de una procedencia muy similar a la de la vitrinita, no obstante, se postula que los compuestos ligno-celulósicos originales debieron previamente haber sufrido procesos de deshidrogenación motivados por incendios (coquizado) o la acción bioquímica. El proceso de descomposición posterior debió ser fundamentalmente aeróbico por la acción de distintos hongos y bacterias. Este material se encuentra habitualmente muy finamente dividido y mezclado con vitrinita.
- III) La exinita o lipnitita tiene su origen en las sustancias vegetales más resistentes a la degradación, como son las resinas, cutículas, esporas, pólenes y algas (con altos contenidos en hidrógeno). En este caso el proceso de formación es básicamente anaerobio, denominándose putrefacción.

Fase geoquímica

Se estima que la fase bioquímica pudo terminar cuando los depósitos se encontraron a una profundidad superior a 10 metros. A este período relativamente corto, un millón de años como máximo, habría sucedido, en el transcurso de los 250 a 300 millones de años que nos separan del período carbonífero, una lenta transformación de la materia orgánica a profundidades variables, sometida, por tanto, a condiciones cambiantes de temperatura y presión. Es el estadio geoquímico, que determina el rango o evolución metamórfica del carbón.

Hoy en día se considera que la temperatura ha desempeñado el papel principal en la evolución geoquímica. La temperatura crece con la profundidad de 3 a 5 °C cada 100 m. Si las capas que se explotan en la actualidad a 700 m estuvieron en su día a 3000/4000 m, han podido encontrarse durante millones de años a temperaturas entre 150 y 200 °C. Es posible que estas temperaturas hayan sido suficientes para que reacciones químicas extremadamente lentas transformen profundamente la materia fósil. Se ha comprobado (regla de Hilt) que, en ciertos yacimientos, el rango del carbón se eleva regularmente con la profundidad de la capa, lo que refuerza la anterior suposición.

Este proceso de transformación afecta a determinadas propiedades del carbón, pudiendo observarse, entre otros, los siguientes efectos cuando el rango del carbón aumenta:

- a) Aumento del contenido en carbono.
- b) Aumento de las estructuras aromáticas.
- c) Aumento del poder calorífico (con una pequeña disminución para los carbones de muy alto rango).
- d) Disminución del contenido en volátiles.
- e) Disminución del contenido en oxígeno.

Estos hechos son utilizados, para caracterizar el rango de un carbón.

3. COMPOSICION Y ESTRUCTURA DEL CARBON

El carbón es una roca sedimentaria compuesta principalmente por una fracción orgánica (macerales) y, en menor proporción, por sustancias minerales, que contiene asimismo agua y gases en poros submicroscópicos. Estos compuestos orgánicos mayoritarios resultan de la formación y condensación de anillos polinucleares carbocíclicos (Figura 2), donde el carbono, hidrógeno y oxígeno son los elementos fundamentales, y el azufre y nitrógeno son complementarios.

En la Tabla II se incluye una comparación resumida de las composiciones del carbón y el petróleo.

La composición y estructura de un carbón dependen del proceso particular de carbogénesis que éste ha sufrido. En este sentido, para la caracterización de un carbón se hace referencia a su composición petrográfica, es decir, a la proporción y distribución de sus respectivos macerales y minerales constituyentes. De esta manera se distinguen, por ejemplo, los carbones húmicos, compuestos fundamentalmente de vitrinita y que dan lugar a la denominada serie ligno-hullera o natural (por pertenecer la mayoría de los carbones a ella), y los carbones sapropélicos, con una alta proporción de exinitas, como las ampelitas y bogues.

Además de esta clasificación inicial por tipos, se debe establecer el rango del carbón, o magnitud de la alteración metamórfica que éste ha experimentado, para la caracterización de su composición y estructura.

Estos hechos se ponen de manifiesto en el diagrama de Van Krevelen (Figura 3), donde se representan los combustibles naturales en función de los ratios atómicos oxígeno/carbono (abcisas) e hidrógeno/carbono (ordenadas). Sobre este diagrama los crudos petrolíferos se encuentran situados en una banda

estrecha sobre el eje Y, entre los valores 1,7 y 2,2. Una banda ligeramente más larga representa las composiciones elementales más frecuentes de los asfaltos naturales.

Los puntos representativos de la serie ligno hullera forman una especie de "galaxia" cuyo contorno es incierto aunque puede trazarse a groso modo. Esta "galaxia" toma forma de un paraguas cerrado, en el que el mango curvo representaría los carbones de mayor rango (antracitas) y el extremo correspondería a las composiciones elementales más frecuentes de la madera. La recta LC une los puntos representativos de la lignina de la madera (composición media) y de la celulosa.

Entre las bandas correspondientes a los combustibles petrolíferos y la "galaxia" ligno-hullera, que hacen referencia a los combustibles que podríamos denominar "normales", se pueden establecer los puntos representativos de algunos combustibles particulares intermedios entre ambas series. Estos combustibles de transición son los bogues y ampelitas que representan la evolución de las exinitas, con ratios H/C más elevados, para O/C semejante, que los correspondientes a la serie natural o de la vitrinita.

En función de lo expuesto en esta Figura, se toma como referencia aproximada para la definición del rango de un carbón el valor del ratio H/C, por lo que la serie natural, para rangos crecientes, sería la formada por la madera, turba, lignitos, hullas y antracitas (terminología francesa).

En la Tabla III se muestran las características medias de los principales tipos de carbones correspondientes a los estados sucesivos de la evolución ligno-hullera, estableciéndose la equivalencia entre las terminologías francesa y anglosajona. En esta Tabla se observa que la composición elemental de la fracción orgánica del carbón, reducida a tres elementos fundamentales, varía de una manera continua de la madera a las antracitas. De esta forma, el contenido en carbono aumenta del 50 al 95%, mientras que el de oxígeno cae del 44% de la madera al 6% de hullas grasas y 2% de las antracitas. Finalmente, es destacable que el contenido en hidrógeno disminuye lentamente de las turbas a los carbones grasos y posteriormente de manera rápida hasta las antracitas; se aprecia que, aproximadamente, hay un átomo de hidrógeno por cada uno de carbono en los lignitos, mientras que la proporción es de uno a dos en las hullas secas.

El rango de un combustible no debe confundirse con su edad geológica. La evolución ligno-hullera en función del tiempo no ha seguido un ritmo uniforme, y puede haberse acelerado o retardado según las condiciones particulares de cada yacimiento.

4. CLASIFICACION DE LOS CARBONES

Los carbones son clasificados para definir sus rendimientos en sus utilizaciones en determinadas áreas o aplicaciones y, por tanto, para establecer sus precios.

Hasta el siglo XIX, las clasificaciones se efectuaban en función de las apariencias visuales: carbones brillantes, negros, marrones, lampantes de llama corta, de llama larga, etc.

El incremento en los usos industriales hizo necesaria una clasificación más detallada, por lo que se han desarrollado numerosos sistemas basados en combinaciones de las características visuales y microscópicas así como de las propiedades físicas y químicas. El hecho de que los carbones estén compuestos únicamente de algunos elementos, en función de las similitudes existentes entre las sustancias de partida y los mecanismos de la carbogénesis, tiene como consecuencia que muchas de las propiedades físicas y químicas utilizadas sean afines.

4.1. CLASIFICACIONES FISICO-QUIMICAS

Clasificación de Seyler

La clasificación propuesta por Seyler se basa en la observación de que la proporción de dos elementos (carbono e hidrógeno) presentes en el carbón puede ser correlacionada con las propiedades de éste. En la Tabla IV se incluye un resumen de esta clasificación (normalmente se representa %H frente a %C, en base seca exenta de cenizas (Figura 4).

Las coordenadas rectangulares se corresponden con los porcentajes en peso de H y C del combustible puro, supuesto que éste se encuentra constituido exclusivamente por tres elementos fundamentales C, H y O, correspondiendo las rectas a 45° de la Figura a porcentajes constantes de oxígeno.

Los puntos que representan los diferentes tipos de carbón habituales se encuentran a lo largo de una banda estrecha. Las correlaciones se pueden efectuar también (Figura 5) con los volátiles y el poder calorífico superior (PCS).

Análogamente, sobre el diagrama de Van-Krevelen (Figura 3) se pueden trazar rectas de contenido en peso constante de C, H y O.

Los diagramas de Van-Krevelen y Seyler constituyen verdaderas cartas de combustibles que permiten situar un combustible nuevo y aproximar por tanto sus propiedades en función de otros próximos.

Es de señalar que los carbones obedecen a ciertas leyes según los tipos estructurales. De esta forma, el poder calorífico respecto al combustible puro puede expresarse, con un pequeño margen de error, en función del análisis

elemental. Se puede por tanto trazar con gran precisión sobre las cartas, curvas de igual poder calorífico (isocalas), válidas para combustibles de menos del 12% de cenizas y del 2% de azufre.

Asimismo, se pueden definir con precisión curvas de iguales características de combustión (volúmenes teóricos de aire y humos), ya que estas características dependen únicamente de la composición elemental; estas curvas coinciden sensiblemente con el haz de isocalas.

Más importante es el margen de variación, para una composición elemental dada, del índice de volátiles. Ello se deriva, sin duda, del carácter empírico del índice. No obstante, es posible trazar, aproximadamente, sobre las cartas las curvas medias de igual índice de volátiles (isovolvas). Estas curvas son poco precisas para los lignitos y turbas.

En la Figura 6 se representan las isocalas e isovolvas en las proximidades del origen del diagrama de Van-Krevelen. Constituyen dos haces casi ortogonales de curvas sensiblemente rectas. Hay que señalar que las isovolvas solo representan valores medios del índice de volátiles y su trazado es muy incierto a partir del índice 40.

Clasificación A.S.T.M.

Por su disposición ortogonal el poder calorífico y el índice de volátiles son, de cualquier forma, dos parámetros complementarios para caracterizar el carbón. Esta característica es aprovechada por Parr para establecer la clasificación A.S.T.M. utilizada en Estados Unidos (Figura 7).

En esta clasificación los carbones de rangos más elevados se especifican en base al carbono fijo (para volátiles $\leq 31\%$) en base seca, exenta de cenizas. Los de rangos inferiores se clasifican en función del poder calorífico en base húmeda, exenta de cenizas. Se produce un cierto solapamiento entre carbones bituminosos y subbituminosos, que se resuelve sobre la base de las propiedades aglomerantes y de desmenuzabilidad.

Otras clasificaciones

Existen otros sistemas de clasificación basados en el contenido en materia volátil, propiedades aglomerantes y coquizantes. Entre éstos destacan el denominado "Sistema Internacional de Clasificación" que clasifica los carbones en 15 clases asignándoles un código en función de cada una de las propiedades citadas con anterioridad.

En el Reino Unido se utiliza la clasificación NCB, compuesta de nueve clases, las cuatro primeras divisiones establecidas únicamente en función del contenido en materia volátil (códigos 100, 200 y 300 para contenidos inferiores al 32%), y las restantes basadas en las propiedades aglomerantes y coquizantes.

En la Figura 8, se incluye una comparación entre estas dos clasificaciones y la A.S.T.M.

4.2. CLASIFICACION MICROSCOPICO-VISUAL

Las primeras técnicas de clasificación de carbones estaban fundamentadas en la observación visual de sus características, posteriormente se desarrollaron técnicas petrográficas de caracterización a través de identificaciones microscópicas.

La petrografía del carbón consiste en el estudio sistemático, a nivel microscópico, de las proporciones y características de sus distintos constituyentes.

Debido a que estos constituyentes poseen, en general, propiedades químicas y físicas muy diferentes, su abundancia relativa y distribución espacial determinarán las propiedades globales del carbón en su utilización industrial.

Las técnicas petrográficas de caracterización del carbón consisten en determinar los distintos macerales (fracción orgánica) a través de la reflectancia de pequeñas muestras pulimentadas de carbón. De esta forma, la reflectancia de un maceral es la proporción (en porcentaje) de luz incidente que es reflejada, por una superficie plana y pulimentada de carbón, en condiciones específicas de iluminación (utilizando luz monocromática). Este porcentaje de reflectancia es establecido por comparación, con la proporcionada a partir de la misma fuente de luz, por aceites específicos a una temperatura fija.

La reflectancia se correlaciona con la aromaticidad de los compuestos orgánicos del carbón. Así, en general, la reflectancia aumenta con el rango del carbón para todos los macerales. Es por ello que, además de posibilitar la distinción de macerales, permite la identificación del rango del carbón (Tabla V), sobre todo para los carbones de mayor rango (bituminosos y antracitas).

La clasificación óptica más extendida actualmente es la realizada por Stopes-Heerlen, basada en una división inicial de los carbones en función de su apariencia visual (brillo, color, homogeneidad, textura y dureza) y una ulterior identificación microscópica de los constituyentes orgánicos (macerales) debido a su reflectancia, morfología, estructura y propiedades físicas.

De esta forma, la clasificación de Stopes tiene como principio la caracterización de distintos grupos, atendiendo en cada paso a un mayor detalle en la observación:

1^{er} Grupo: Caracterización visual: Los carbones se dividen en dos clases denominadas "carbones duros" y "lignitos y carbones pardos". A su

vez los carbones duros se dividen en húmicos (veteados) y sapropélicos (homogéneos con alta proporción de exinitas).

2º Grupo: Litotipos (terminación -eno): formaciones de macerales reconocibles a simple vista con tamaños superiores a 3 mm., se describen como (Tablas VI, VII y VIII):

Vitreño (del latín vitrum: vítreo): Brillante, negro, frágil (muy reactivo; constituido básicamente por vitrinita).

Clareno (del latín clarus: brillante): Semibrillante, negro, ligeramente estratificado (reactivo, formado por vitrinita y exinita).

Dureno (del latín durus: duro): Mate, negro o negro-grisáceo, duro, áspero (bastante inerte; con alta proporción de inertinita y, además, vitrinita y exinita).

Fuseno (del latín fusus: huso, alargado): Sedoso, negro, fibroso, friable (inerte; litotipo del carbón que “ensucia”; constituido por inertinita).

3^{er}. Grupo: Microlitotipos (terminaciones -ita): identificados al microscopio por su apariencia de secciones pulidas de carbón con bandas de al menos 50 micras de ancho y que no pueden contener, como impurezas, más del 5% en volumen de sulfuros minerales o del 20% en volumen de arcillas.

Los microlitotipos se dividen a su vez en monomacerales, bimacerales y trimacerales según están formados en proporciones superiores al 5% por uno, dos o tres grupos macerales (terminación -inita), respectivamente.

El litotipo más abundante en el carbón es el clareno (con presencias en el entorno del 50% del total), seguido del dureno (entre un sexto y un tercio), el vitreño (que puede llegar al 10 ó 15%) y, finalmente, el fuseno (minoritario, con típicamente sólo un 1-2% del total).

En función de la mayor o menor presencia de los litotipos mayoritarios (clareno y dureno), los carbones pueden diferenciarse en brillantes y duros.

De esta forma, los carbones con alta proporción de dureno son mates, duros y más fácilmente transportables. Adicionalmente, el dureno, al tener menor contenido en volátiles (Tabla VIII), tiende menos a coquizarse, por lo que los carbones con altas concentraciones de dureno se han utilizado tradicionalmente para producción de electricidad en centrales térmicas.

Por otro lado, los carbones brillantes, con mayores contenidos en clareno y

vitreno, han sido empleados en coquizado, dados sus mayores contenidos en volátiles.

En la Figura 9 se esquematiza la clasificación realizada por Stopes para los "carbones duros", ésta se complementa con el esquema incluido en la Figura 10 donde se caracteriza la composición de los distintos microlitotipos. De forma similar se caracterizan los "lignitos y carbones pardos".

5. ENSAYOS NORMALIZADOS

Existen múltiples ensayos que sirven de sustento a diversos sistemas de caracterización de los carbones; así en los últimos años se ha observado un paso de la composición química elemental, como criterio de clasificación, al empleo de criterios tecnológicos, directamente relacionados con la utilización a la que se destina el carbón (combustible o materia prima para la fabricación de gas o de coque metalúrgico).

De esta forma se define el grado de un carbón, o valor económico de éste, mediante las relaciones existentes entre sus principales características o propiedades y sus posibles utilidades. En este sentido, cabe hacer las siguientes consideraciones:

1. Es evidente que en el terreno de la combustión del carbón, el parámetro más importante es el poder calorífico determinado en bomba calorimétrica.
2. En el caso de tratamientos térmicos, alcanza gran importancia el comportamiento del carbón frente al calentamiento. Algunas especies se aglomeran, otras se hinchan de tal modo que obstruyen todos los pasos al gas de combustión; por consiguiente, las industrias productoras de coque se interesan más por el comportamiento del carbón en el calentamiento que por otros parámetros, puesto que la calidad del coque producido depende principalmente de aquella característica.

Por otro lado, de todas las industrias que procesan el carbón, las coquerías son en particular las más afectadas por los subproductos obtenidos, asfaltos y gases. Esto explica por qué el contenido en materias volátiles es otro de los parámetros de clasificación más importantes en este tipo de actividades.

Seguidamente, se analizan las principales propiedades del carbón especificadas para su utilización en centrales térmicas, realizándose, asimismo, una evaluación de su importancia en la operación de éstas. En la Tabla IX se resumen los análisis más usuales así como los valores indicativos para la aceptación de los carbones.

5.1. ANALISIS INMEDIATO

Comprende la medida del contenido en humedad, volátiles, cenizas y carbono fijo; es la forma más simple y generalizada de caracterizar un carbón debido a que se puede realizar con un equipo básico de laboratorio, aunque hoy en día existen equipos totalmente automáticos más complejos.

5.1.1. Humedad

Se determina generalmente por porcentaje de pérdida de peso al calentar una muestra en estufa a 105 °C. Por encima de esta temperatura aparecerían las pérdidas de agua quimisorbida, poco importantes para la mayoría de los carbones, pero apreciables para los lignitos y, de forma general, tanto mayores cuanto menor sea el rango del combustible. A medida que se aumentara la temperatura de calentamiento, se desprendería el agua ligada con motivo del inicio de las reacciones de pirólisis.

La humedad de un combustible es muy variable, en función de las condiciones de extracción y de su preparación mecánica, el tiempo en que ha estado expuesto a la acción atmosférica y las condiciones atmosféricas propias en el momento del muestreo. Si se permite que un carbón alcance el equilibrio, a una temperatura determinada con una atmósfera de humedad concreta, se obtiene una humedad de equilibrio o humedad estándar, característica del combustible, que varía en función del rango, según se detalla a continuación:

TURBAS	20-30%
LIGNITOS	15-25%
HULLAS	5%
ANTRACITAS	3%

Esta humedad, según normas A.S.T.M., se mide a 30 °C en presencia de aire y un 97% de humedad relativa.

Los contenidos en humedad de un carbón tienen efectos en distintos ámbitos:

- a) Los carbones de bajo rango, con mayores contenidos en humedad, tienen costes relativos de transporte más altos.
- b) La humedad actúa como un inerte, bajando las temperaturas de llama, evacuando entalpía de cambio de estado con los humos e incrementando el consumo de auxiliares (ventiladores).

- c) Un bajo contenido en humedad favorece la molienda e inhibe las posibles aglomeraciones.

5.1.2. Contenido en volátiles

Durante la fase inicial del proceso de combustión se desprenden del carbón volátiles, consistentes en distintas cantidades de hidrógeno, óxidos de carbono, metano y otros hidrocarburos de bajo peso molecular. El contenido en volátiles de un carbón constituye una importante propiedad de éste, proporcionando una indicación de su reactividad y facilidad de ignición. La medida de la cantidad de volátiles emitida es, en la práctica, una función de las características de la muestra de carbón y del proceso de combustión seleccionados. En este sentido, el ensayo propuesto por ISO para su determinación fija la temperatura (900 °C), la duración (7 min.) y el recipiente sobre el cual se debe depositar la muestra fuera del contacto del aire; se define como contenido en volátiles del carbón la pérdida de peso de la muestra en estas condiciones.

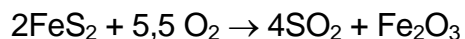
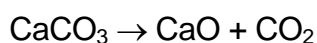
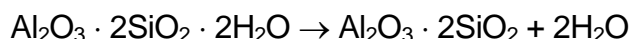
Este parámetro caracteriza la estabilidad de la llama tras la ignición así como la facilidad para la producción de ésta. En este sentido, los carbones de alto rango tienen pocos volátiles y arden muy lentamente, siendo crítica la estabilidad de llama.

Un contenido excesivamente alto en volátiles (superior al 30%) puede provocar problemas de seguridad en la molienda, debido a la aparición de igniciones espontáneas.

5.1.3. Cenizas

Es el residuo sólido tras una combustión completa de toda la materia orgánica y de la oxidación de la materia mineral presente en el carbón. No es nunca igual al contenido en sustancias minerales del combustible antes de la combustión pues éstas modifican sus formas de combinación.

De entre las múltiples reacciones químicas que intervienen las principales son la deshidratación del caolín y del yeso, la disociación de los carbonatos y la oxidación de las piritas. Por otro lado, ciertos constituyentes como los cloruros se volatilizan total o parcialmente. Las transformaciones químicas más importantes se representan, al menos teóricamente, por las ecuaciones:



Estas reacciones originan una pérdida de peso de los productos con respecto a los reactivos, de manera que, salvo en casos muy raros, el contenido

en cenizas obtenido por calcinación en presencia de aire es siempre una medida por defecto del contenido en sustancias minerales del carbón. Ello obliga a "normalizar" la temperatura y duración del ensayo.

Por consiguiente, las cenizas definen la calidad del carbón en la combustión al determinar el contenido en materia incombustible presente. A mayor contenido en cenizas, menor poder calorífico presentará el carbón bruto y mayores serán los sobrecostos de manipulación y tratamiento, así como los posibles problemas de erosión en los equipos de transporte y combustión.

Por otra parte, la descarga de las escorias a alta temperatura y estado pastoso en las calderas de escorias fundentes implica la extracción de cantidades sustanciales de calor sensible. No obstante, el extracoste de utilizar carbón lavado no siempre se justifica, aunque, de esta forma, las cantidades de cenizas depositadas en bancos de tubos son menores, así como son también inferiores las necesidades de soplado. Adicionalmente, un mayor contenido de cenizas requiere una eficacia superior para el equipo de depuración de partículas.

En este sentido, cabe destacar la importancia que los constituyentes de las cenizas tienen sobre el rendimiento de la caldera y su conexión con los procesos de ensuciamiento, escoriación y corrosión de las superficies calientes.

5.1.4. Contenido en Carbono Fijo

Este parámetro es calculado, obteniéndose por diferencia a 100 de la suma de los contenidos, en tanto por ciento, de humedad, volátiles y cenizas del carbón secado al aire.

Asimismo, el contenido en carbono fijo se emplea para estimar la cantidad de coque o "char" (productos de combustión intermedios) que se puede producir, así como el contenido de inquemados en las cenizas volantes.

5.2. ANALISIS ELEMENTAL

La composición elemental de la fracción orgánica del carbón se determina en base a métodos de oxidación, descomposición y/o reducción, siendo realizados estos análisis en la actualidad mediante equipos automáticos basados fundamentalmente en la técnica del infrarrojo (Figura 11).

Los elementos analizados son carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno (obtenido por diferencia). Adicionalmente, se consideran los datos de humedad y contenido en cenizas del análisis inmediato, con objeto de expresar los resultados del análisis elemental en tanto por ciento en peso y base seca exenta de cenizas.

Este análisis es necesario para los balances de materia y energía de la combustión, así como para realizar una aproximación del poder calorífico del carbón.

Los contenidos en carbono e hidrógeno permiten estimar el CO₂ y H₂O que se producirá en la combustión; normalmente estos dos elementos se encuentran en el carbón constituyendo hidrocarburos complejos, si bien una parte del carbono se encuentra como carbonatos inorgánicos.

El nitrógeno de los carbones está confinado principalmente entre los compuestos orgánicos. En los últimos años ha adquirido gran importancia debido a su papel en la formación de óxidos de nitrógeno, no obstante, debe destacarse que no existe una correlación simple entre el nitrógeno constituyente del carbón y los óxidos de nitrógeno emitidos en los gases de combustión.

El contenido en azufre del carbón está relacionado con distintos problemas medioambientales y de operación en las calderas:

- El azufre se oxida a SO₂, así un carbón con un 0,9% de azufre (22% de cenizas) provoca una concentración de SO₂ en humos (6% O₂) de aproximadamente 1875 mg/Nm³. Este valor se compara con los 400 mg/Nm³ fijados como límite en la Unión Europea para nuevas centrales de más de 500 MW.
- Una parte del SO₂, normalmente menos del 2%, se convierte a SO₃; gran parte de éste se transforma en sulfatos tras reabsorberse con los metales alcalinos de las cenizas. Estos sulfatos incrementan la tendencia al ensuciamiento y la corrosión de las superficies de transferencia de calor.
- Si se alcanzan temperaturas inferiores al punto de rocío ácido, el SO₃ se combina con el vapor de agua de los gases de combustión, generando ácido sulfúrico que provoca problemas graves de corrosión en las zonas frías de la caldera, principalmente en los conductos de gases de combustión y sistemas de tratamiento de éstos.

El contenido en oxígeno tradicionalmente se calcula por diferencia a 100 de la suma de los porcentajes de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre, aunque existen métodos para su determinación directa. Este parámetro puede ser utilizado como indicador del rango del carbón, siendo, además una medida de su grado de oxidación.

5.3. ANALISIS DE CENIZAS Y MINERALES

Las cenizas del carbón están constituidas por los residuos resultantes de la descomposición de silicatos, carbonatos, sulfuros y otros minerales debido a la temperatura. Su composición química suele expresarse en óxidos, empleándose como guía para identificar los tipos de minerales presentes originalmente en el carbón, fundamentalmente, silicoaluminatos:

SiO ₂ : 30 al 55%	MgO : 1 al 4%
Al ₂ O ₃ : 15 al 35%	K ₂ O + Na ₂ O : 1 al 4%
Fe ₂ O ₃ : 2 al 20%	SO ₃ : 1 al 3%
CaO : 2 al 15%	TiO ₂ : 0,5 al 2%

En menor porcentaje aparecen fósforo, manganeso, bario y trazas de numerosos metales como plomo, zinc, cobalto, germanio y zirconio.

5.4. PODER CALORIFICO

Es uno de los principales parámetros característicos de todo carbón. Se define como la cantidad de calor que se libera cuando se quema la unidad de masa de un carbón en condiciones normalizadas.

Este ensayo se realiza en laboratorio mediante una bomba calorimétrica, a través de la determinación de las diferencias de temperatura antes y después de que se produzca la combustión de la muestra. De esta forma se calcula el poder calorífico bruto a volumen constante (Poder Calorífico Superior), esto es, la energía total del carbón incluyendo el calor latente de condensación del vapor formado en el proceso. En la práctica el vapor de agua y otros compuestos (ácidos como HNO₃ y H₂SO₄) escapan directamente a la atmósfera sin condensar; la corrección del Poder Calorífico Superior debido a estas pérdidas se realiza en base a distintos factores como la humedad y los contenidos en oxígeno, hidrógeno, nitrógeno y azufre, obteniéndose el denominado Poder Calorífico Inferior (Neto).

5.5. FORMAS DE AZUFRE, CLORO Y ELEMENTOS TRAZA

El azufre se encuentra en los carbones, principalmente, en tres formas de combinación:

<u>Azufre sulfato</u> :	Combinado como sulfato inorgánico.
<u>Azufre pirítico</u> :	Es el que se encuentra como piritas (S ₂ Fe).
<u>Azufre orgánico</u> :	Es el que aparece en compuestos orgánicos.

El azufre sulfato se obtiene mediante extracción con ácido clorhídrico diluido y determinación gravimétrica del azufre en el extracto, ya que los sulfatos son solubles en este ácido a diferencia del azufre de piritas y orgánico.

Las piritas (FeS_2) son extraídas cuantitativamente con ácido nítrico diluido, determinándose posteriormente por volumetría o absorción atómica el hierro en el extracto. El azufre pirítico se obtiene por diferencia entre el hierro soluble en nítrico y el soluble en clorhídrico.

Finalmente, el azufre orgánico se determina por diferencia a 100 de la suma de los porcentajes de azufre sulfato y pirítico.

En la mayoría de las aplicaciones del carbón basta con el análisis del azufre total, en ocasiones, sin embargo, se realizan estas determinaciones para considerar los sistemas de tratamiento específicos del carbón, debido a que éstos pueden eliminar casi en su totalidad el azufre pirítico, pero tienen un bajo rendimiento sobre el azufre orgánico.

Por otra parte, la piritita es una de las sustancias que incrementan el riesgo de combustión espontánea del carbón ya que potencia su oxidación y subsiguiente calentamiento. Otro efecto perjudicial de la piritita es su característica de sustancia dura y pesada que interviene en los procesos de abrasión, principalmente de los molinos.

La determinación de cloro no suele realizarse como parte del análisis elemental, sin embargo pueden existir cloruros ligados a la fracción orgánica del carbón. Así mismo el cloro puede entrar en la composición del carbón en forma de cloruros minerales asociados a los estratos de agua salinas.

En los procesos de combustión el cloro se puede combinar con otros elementos minerales y contribuir a su deposición ocasionando problemas de corrosión. Asimismo, el cloro puede afectar al control del pH en los procesos de desulfuración de los gases de combustión.

El análisis de los elementos traza se realiza debido a condicionantes medioambientales, en base al creciente interés en el control de la materia particulada emitida con los gases de combustión, así como para la caracterización de las cenizas, recogidas en distintos puntos de la central, con vistas a su aprovechamiento o evacuación a vertederos.

5.6. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECANICAS

Para la evaluación comercial de un carbón es necesario caracterizar sus propiedades físicas. Existen múltiples ensayos en función de los requerimientos asociados a su empleo final, destacándose los siguientes:

Manejabilidad: Ensayos asociados a la facilidad de transporte, almacenamiento y tratamiento del carbón:

- Densidad aparente: Relación entre la masa y el volumen que ocupa (incluyendo los huecos dentro y entre las partículas), para el

apilamiento y transporte en cintas.

- Distribución de tamaños, antes de la pulverización, para asegurar el adecuado rendimiento de los molinos, y tras ella, para asegurar el rendimiento de la combustión.
- Friabilidad o desmenuzabilidad, para determinar la degradación de tamaños y el polvo generado en el manejo, apilamiento y molienda.

Molturabilidad (Índice Hardgrove). Este parámetro se utiliza para estimar la capacidad, rendimiento y energía requerida en el proceso de molienda, así como para definir el tamaño de partículas producido. Carbones con índices inferiores a 50 presentan dificultad, debido a su dureza, para su pulverización.

Esta determinación tiene como fundamento la aplicación de una cantidad definida de energía de molienda a una muestra del carbón a través de un pequeño pulverizador, para posteriormente determinar la variación de tamaño producida mediante tamizado. Para la calibración del sistema se emplean muestras de referencia de distintos índices Hardgrove.

Índice de Abrasividad: Se emplea para estimar el desgaste de los molinos. Consiste en la determinación de la pérdida de metal de las palas de un molino de referencia.

Índice de hinchamiento y aglomeración: Es un indicador del comportamiento del carbón cuando se calienta, haciendo referencia a las características de carbonización y de producción de especies intermedias ("char" o coque). Así un alto índice de hinchamiento sugiere que durante la combustión la partícula de carbón se expandirá para formar residuos porosos de poco peso, que serán emitidos con los gases de combustión y podrán contribuir, de esta forma, a unos elevados niveles de inquemados en las cenizas volantes.

La determinación del índice de hinchamiento consiste en la combustión en unas condiciones preestablecidas de una muestra de carbón en un recipiente característico, comparándose el coque residual obtenido con una serie de perfiles de referencia.

Fusibilidad de las cenizas: Medida de la fusión y reblandecimiento de las cenizas del carbón. Se realiza mediante la observación de la temperatura a la que se producen modificaciones en la forma de una pirámide triangular de cenizas, de tamaño establecido, que sufre un calentamiento progresivo en condiciones normalizadas de temperatura y atmósfera (oxidante o reductora).

Se definen distintas etapas en la transformación morfológica que la muestra experimenta con el aumento de temperatura, considerándose en

relación a esto las siguientes temperaturas:

- Temperatura de deformación inicial.
- Temperatura de reblandecimiento.
- Temperatura hemisférica.
- Temperatura de fluidez.

Las características de fusibilidad de las cenizas son importantes en la predicción de la formación de depósitos en las calderas (estos depósitos se denominan "slagging" (escoriación) cuando se forman en las paredes del hogar o "fouling" (ensuciamiento) cuando se originan en sobrecalentador y recalentador). Se han puesto a punto un cierto número de índices empíricos para correlacionar la escoriación y el ensuciamiento de sobrecalentador y recalentador con la composición química.

Viscosidad de las cenizas fundidas: afecta a la velocidad a la cual fluyen por las paredes los depósitos de éstas, con incidencia sobre el rendimiento de equipos de extracción como sopladores de paredes y de hollín.

5.7. ANALISIS PETROGRAFICO

Como se indicó en el tema anterior, una de las clasificaciones de los carbones es en función de su tipo (análisis microscópico). Como índice de éste se utiliza la medida de la reflectancia máxima de los distintos componentes orgánicos en una muestra pulverizada y pulimentada de carbón, sumergida en un aceite específico para mejora de contraste. Esta caracterización se basa en la diferente reflectancia de los macerales, mínima para la exinita, intermedia para la vitrinita y máxima en el caso de la inertinita.

Por otro lado, las propiedades ópticas del carbón varían, al igual que otros parámetros de éste, en función de la extensión del proceso metamórfico de la carbogénesis. De esta forma, la reflectancia, que aumenta con el incremento de la aromaticidad y el tamaño de las estructuras moleculares, puede ser empleada para la determinación no sólo del tipo, sino también del rango del carbón. En este sentido, se considera la denominada reflectancia de la vitrinita, parámetro que presenta como gran ventaja el determinar una propiedad característica del rango sobre un único maceral, con lo cual es aplicable para todo tipo de carbones al objeto de establecer su rango. La técnica de la reflectancia de la vitrinita ha sido correlacionada con resultados óptimos con propiedades del carbón tales como contenido en volátiles, ratio H/C, poder calorífico, índice de hinchamiento y fracciones tras coquizado.

Los constituyentes de los carbones que presentan altas reflectancias son

los que tienen una combustión más difícil. De esta manera, en términos generales, un carbón será más difícil de quemar si tiene una elevada proporción del maceral inertinita o si su rango es elevado.

6. INFLUENCIA DE LOS ANALISIS DEL CARBON EN LA OPERACION DE CENTRALES TERMICAS

6.1. EFECTOS PRINCIPALES DE LAS CARACTERISTICAS DEL CARBON

Existen múltiples análisis para caracterizar los carbones. Estos análisis se interpretan, en función de los distintos usos del carbón, desde los puntos de vista técnico (adaptabilidad a cada utilización particular) y económico (establecimiento de costes).

Las características del carbón, además de condicionar los costes de adquisición de éste, determinan los costes de inversión (o de capital) y de operación para las centrales térmicas, donde este combustible es utilizado para la producción de electricidad y en algunos casos, vapor (Figura 12).

De esta forma, la construcción de un grupo térmico, y sus costes asociados de inversión, estará determinada por las propiedades del carbón que se planea consumir en el mismo. Estas características del carbón influirán, por tanto, en el diseño y costes de los sistemas de transporte y almacenamiento, los molinos y ventiladores, la caldera y quemadores, y los sistemas de control ambiental. Adicionalmente, las propiedades del carbón influirán en los costes de operación del grupo térmico, a través de sus efectos en las 4 variables que estos costes operativos comprenden:

- I) Capacidad del grupo**, o ratio máximo de producción de potencia eléctrica y térmica, que el grupo es realmente capaz de proporcionar, en condiciones seguras, estables y compatibles con restricciones medioambientales. Este apartado incluiría los costes fijos de producción, como los asociados al personal de operación del grupo.
- II) Consumo específico del grupo**, o rendimiento energético del mismo, comprendiendo los consumos de auxiliares asociados (molinos, ventiladores, sistemas de control ambiental, gestión de residuos o efluentes).

- III) Mantenimiento**, esto es, actuaciones preventivas o correctivas que es necesario aplicar al grupo para asegurar sus máximas prestaciones.
- IV) Disponibilidad**, o potencialidad máxima de operación del grupo. Esta variable está estrechamente ligada al mantenimiento, tanto en sus aspectos preventivos como correctivos (revisiones periódicas y paradas o bajadas de carga forzadas). El coste de la disponibilidad se determina en función de las pérdidas de producción asociadas, o bien en base a los costes de la generación de reserva necesaria (inversión + combustibles + funcionamiento). Eventualmente, estos costes pueden incrementarse por los asociados a posibles penalizaciones, impuestas por la Administración, por no poder satisfacer la demanda del mercado.

En la Tabla X se presenta una comparación relativa de los costes operativos de capacidad de producción, mantenimiento y disponibilidad, frente a los costes de adquisición de carbón (éstos estrechamente ligados al rendimiento energético del grupo). Según puede observarse en esta tabla, los costes de adquisición del carbón suponen aproximadamente un 80% de los costes totales de generación (sin incluir los costes de inversión).

El resto hasta el 100% total, está constituido por los costes de capacidad de producción y mantenimiento (entre el 7 y 10%, para cada uno de ellos), y los costes de disponibilidad (3-4%).

La tremenda importancia relativa de los costes de combustibles pone de manifiesto el interés de orientar, en este sentido, las políticas de optimización de centrales térmicas. De esta forma, la identificación de nuevos ajustes operativos, que posibiliten mejoras en rendimiento, o, alternativamente, el consumo de carbones más baratos (con peores especificaciones) son una clara vía para la optimización de costes en estas instalaciones.

En la mencionada Tabla X se constata, igualmente, como una variación del contenido en cenizas del carbón del 15 al 20% determina una variación significativa de la distribución de costes detallada.

De esta forma, la decisión final sobre la utilización de un carbón con mayor o menor contenido en cenizas dependerá, finalmente, de los efectos concretos de esta variación para cada instalación particular y de la evolución de los precios del carbón, en función de sus especificaciones.

Dentro de este contexto, en las Tablas XI.A a XI.D se detallan los efectos más significativos de las propiedades del carbón sobre las características generales de operación del grupo térmico. En este sentido, se distinguen los efectos sobre los siguientes sistemas operativos:

- * Transporte y almacenamiento del carbón.

- * Molienda.
- * Ventiladores.
- * Quemadores y caldera
- * Control ambiental.

Finalmente, en la Tabla XII se resumen los efectos de las propiedades más importantes a analizar en el carbón, tanto sobre los diferentes sistemas o equipos de la central (haciendo especial énfasis en los relativos a control ambiental), como en las distintas variables de costes operativos comentadas con anterioridad (capacidad de producción, consumo específico, mantenimiento y disponibilidad). En concreto, se detallan las influencias más notables, en función de los hechos recogidos en apartados anteriores, de los siguientes parámetros del carbón:

- I Contenido en cenizas y composición de éstas.
- II Poder calorífico.
- III Contenido en azufre.
- IV Contenido en humedad.
- V Molturabilidad (Índice de Hardgrove).
- VI Contenido en materias volátiles.
- VII Temperatura de fusión de cenizas.
- VIII Contenido en sodio.
- IX Contenido en cloro.

Estos parámetros o propiedades son, en general, los de mayor utilización en la operación habitual de una central térmica, bien de forma directa, bien a través de correlaciones en las que estos parámetros intervienen.

6.2. LIMITACIONES Y LINEAS DE DESARROLLO

Pese a que se han establecido numerosas correlaciones empíricas entre las especificaciones del carbón y ciertos indicadores del funcionamiento de los distintos equipos de los grupos térmicos, los ensayos de caracterización del carbón presentan algunas deficiencias al objeto de definir las condiciones de operación. Estas carencias habitualmente asociadas a las diferencias entre las condiciones de ensayos y las de su utilización industrial, responden a hechos como los que seguidamente se detallan:

- a) Las medidas de composición de los carbones no explican los problemas reales en el almacenamiento y transporte del carbón.
- b) El rendimiento de los molinos, en el caso de carbones de bajo rango o mezcla de carbones, es difícilmente evaluable mediante las correlaciones de molturabilidad existentes.

- c) Características de la combustión, como son forma y estabilidad de llama, y producción de coque (char), no pueden ser determinadas con exactitud en base a los ensayos habituales del carbón.
- d) Las correlaciones establecidas para escoriación y ensuciamiento, son, en general, poco exactas.
- e) No existe una correlación aplicable entre la composición del carbón y la distribución de tamaños de las cenizas volantes.
- f) No es posible predecir, en base a los ensayos del carbón descritos, los niveles de emisión de NO_x .

En función de los aspectos anteriormente detallados y de la evolución del mercado eléctrico en los últimos años, se plantean actualmente diferentes líneas de desarrollo, al objeto de optimizar el funcionamiento de los grupos térmicos teniendo en cuenta las propiedades del carbón disponible en cada caso. Algunas de estas líneas serían las siguientes:

- I) Desarrollo de modelos empíricos específicos de cada grupo térmico, para los diferentes carbones o mezclas a alimentar al mismo. Estos modelos podrían construirse, o no, sobre los modelos generalistas desarrollados en los últimos años, cuya falta de especificidad determina, en la mayoría de los casos, la obtención de predicciones de operación manifiestamente mejorables.
- II) Establecimiento de caracterizaciones de efectos de carbón para nuevas condiciones de operación, tales como funcionamiento con baja generación de emisiones de NO_x , o antes frecuentes regulaciones de carga, o arranque y paradas del grupo.
- III) Evaluación de efectos de carbones y mezclas diferentes a los hasta ahora habitualmente utilizados, en función de posibles suministros de carbón alternativos y de las nuevas limitaciones medioambientales.
- IV) Aplicación de mejoras en la monitorización global de los procesos de utilización industrial de los carbones. En este sentido, el empleo, en los grupos térmicos, de técnicas fiables para la determinación de rendimientos globales e individuales de equipos, de vida residual en base a prácticas operativas de mantenimiento, o de equilibrado del proceso de combustión, posibilitará una evaluación más directa y precisa de los efectos reales de cambios en las propiedades del carbón alimentado.
- V) Potencialidad de utilización de carbones “más difíciles” (con peores especificaciones), a través de la mejora del control del proceso de combustión, tanto en sus aspectos de monitorización como de capacidades de regulación. Un ejemplo de esta línea sería la utilización eficiente de carbones con mayor

tendencia a la formación de inquemados, con un, en general, menor coste de adquisición, a través de la implantación de condiciones de combustión más equilibradas, que permitan la minimización de esta tendencia negativa.

TABLA I. FORMACION DE LOS MACERALES DE LOS CARBONES DUROS EN FUNCION DEL MEDIO Y LAS SUSTANCIAS VEGETALES DE PROCEDENCIA

MACERAL	SUSTANCIAS VEGETALES DE PROCEDENCIA	CARACTERISTICAS DEL MEDIO
Vitrinita	"Madera": troncos, raíces y hojas vasculares	Anaerobio/Aerobio
Inertita	"Madera": (coquizada o degradada bioquímicamente) y restos de hongos	Aerobio
Exinita	Resinas, cutículas, esporas, pólenes, algas	Anaerobio

TABLA II. COMPARACION CARBON-PETROLEO

PARAMETRO	CARBON	PETROLEO
ESTADO FISICO	SOLIDO	LIQUIDO
CONTENIDO EN MATERIA MINERAL	5-40% PESO	METALES 0,005 A 0,015% SALES 20 A 400 ppm (PESO)
CONTENIDO EN HUMEDAD	1-60% PESO	0,1 A 1%
CARBONO	65 A 95% PESO	84 A 87% PESO
HIDROGENO	3 A 6% "	11 A 14% "
OXIGENO	2 A 30% "	0,1 A 0,5% "
AZUFRE	0,2 A 11% "	0,04 A 6% "
NITROGENO	1 A 1,5% "	0,1 A 1,5% "

TABLA III. CARACTERISTICAS MEDIAS DE LOS COMBUSTIBLES DE LA SERIE LIGNO-HULLERA⁽¹⁾

TIPO	ANALISIS ELEMENTAL			RELACION ENTRE ATOMOS		PODER CALORIFICO ⁽²⁾		VOLATILES %
	C %	H %	O %	Y=H/C	X=O/C	SUPERIOR	INFERIOR	
MADERA	50,0	6,1	43,9	1,46	0,66	4.750	4.450	80
TURBAS	59,3	5,7	35,0	1,15	0,44	5.700	5.400	67
LIGNITOS	70,0	5,5	24,5	0,94	0,26	6.750	6.450	54
HULLAS:								
GRASAS ³	88,2	5,3	6,5	0,72	0,06	8.600	8.400	30
SEMIGRASAS ⁴	92,4	4,4	3,2	0,57	0,03	8.700	8.500	17
SECAS ⁵	93,5	3,8	2,7	0,48	0,02	8.650	8.450	9
ANTRACITAS	95,5	2,5	2,0	0,31	0,02	8.400	8.300	3

- (1) Características relativas al combustible puro.
- (2) Poderes caloríficos relativos al combustible puro "ficticio" (sólo C, H, O) en kcal/kg.
- (3) Asimilable a carbones ortobituminosos (Seyler) y bituminosos medios en volátiles (A.S.T.M.).
- (4) Asimilable a carbones semibituminosos (Seyler) y bituminosos bajo en volátiles (A.S.T.M.).
- (5) Asimilable a semiantracitas (Seyler y A.S.T.M.).

TABLA IV. CLASIFICACION DE SEYLER ⁽¹⁾

RANGO DEL CARBON	CARBONO (%)	HIDROGENO (%)	MATERIA VOLATIL (%)	PODER CALORIFICO MJ/Kg	FACTOR HINCHAMIENTO B.S.
Antracita	> 93,3	3,0-3,8	5-10	32,9	1
Carbonoso Semiantracita Semibituminoso	> 93,3	3,8-4,4	10-14	33,4	1
	93,3-91,2	4,4-5,0	14-20	33,7	3,5
Bituminoso Meta- Orto- Para-	91,2-89,0	4,4-5,4	20-28	33,5	9
	89,0-87,0	4,7-5,6	28-31	33,1	9
	87,0-84,0	4,9-5,7	31-36	32	6
Lignitoso Meta- Orto-	84,0-80,0	5,0-5,7	36-42	30,5	2
	80,0-75,0	5,0-5,7	42-49	28,4	1
Lignito	< 75,0	5,0-5,7	49-59	25	1

(1) Combustible puro: Base seca exenta de cenizas. Hipótesis: C+H+O= 100

TABLA V. RELACIÓN ENTRE RANGO DEL CARBÓN Y REFLECTANCIA DE LA VITRINITA

Rango del carbón	Porcentaje de Reflectancia Máxima
Subbituminoso	< 0,47
Bituminoso de Altos Volátiles C	0,47-0,57
Bituminoso de Altos Volátiles B	0,57-0,71
Bituminoso de Altos Volátiles A	0,71-1,10
Bituminoso de Medios Volátiles	1,10-1,50
Bituminoso de Bajos Volátiles	1,50-2,05
Semi-Antracita (aprox.)	2,05-3,00
Antracita (aprox.)	>3,00

TABLA VI. CLASIFICACIÓN STOPES-HEERLEN

MEGASCÓPICA	MICROSCÓPICA	
<i>Litotipos</i>	<i>Grupos Macerales</i>	<i>Ejemplos de Macerales</i>
Vitreno	Vitrinita	Collinita y telinita
Clareno	Vitrinita (dominante)	collinita y telinita
	Exinita	esporinita, cutinita, alginita y resinita
	Inertinita	fusinita, micrinita, esclerotinita y semifusinita
Dureno	Inertinita (dominante)	fusinita, micrinita, esclerotinita y semifusinita
	Vitrinita	collinita y telinita
	Exinita	esporinita, cutinita, alginita y resinita
Fuseno	Inertinita	fusinita

TABLA VII: PROPIEDADES TÍPICAS DE LITOTIPOS

Litotipos	Apariencia	Densidad específica	Contenido en cenizas	Dureza relativa
Vitreno	Bandas negras, brillantes y uniformes	Entorno a 1,3	0,5-1% (minerales de plantas)	2
Clareno	Bandas semibrillantes y laminadas	Entorno a 1,3	0,5-4%	3
Dureno	Mate Poco laminado	1,25-1,45	1-5%, mayormente 3-5%	7,5
Fuseno	Fragmentos como carbón vegetal (ensucia)	Blandos: 1,34-1,45 Duros: >1,6	5-10% o más	1

TABLA VIII: ANÁLISIS TÍPICO DE LITOTIPOS (CARBÓN BITUMINOSO)

Análisis	Vitreno	Clareno	Dureno	Fuseno
Humedad (%)	1,7	1,4	1,2	0,9
Volátiles (%)	34,6	37,6	32,2	19,1
Cenizas (%)	0,6	3,5	4,6	9,6
Carbono (% daf)	84,4	82,2	85,8	88,7
Hidrógeno (% daf)	5,4	5,7	5,3	4,0
Azufre (% daf)	1,0	2,3	0,9	1,0
Nitrógeno (% daf)	1,5	1,9	1,4	0,7
Oxígeno (% daf)	7,7	7,9	6,6	5,6
Poder Calorífico (kJ/kg)	31.600	31.600	32.300	31.700

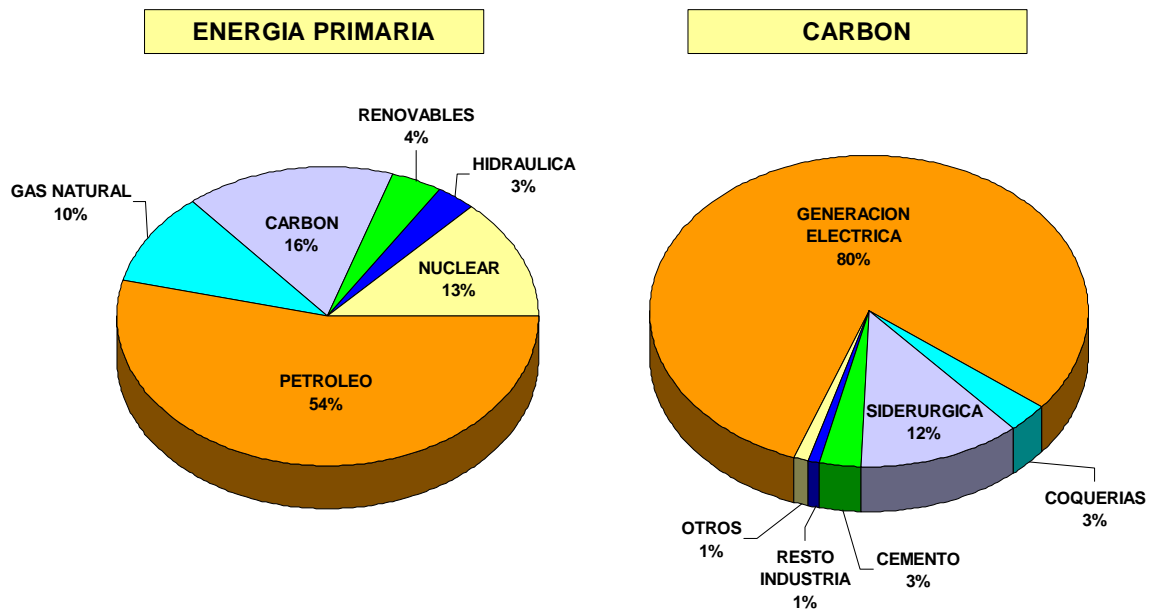


FIGURA 1. CONSUMO DE ENERGIA PRIMARIA EN ESPAÑA Y DISTRIBUCION DEL CONSUMO DEL CARBON

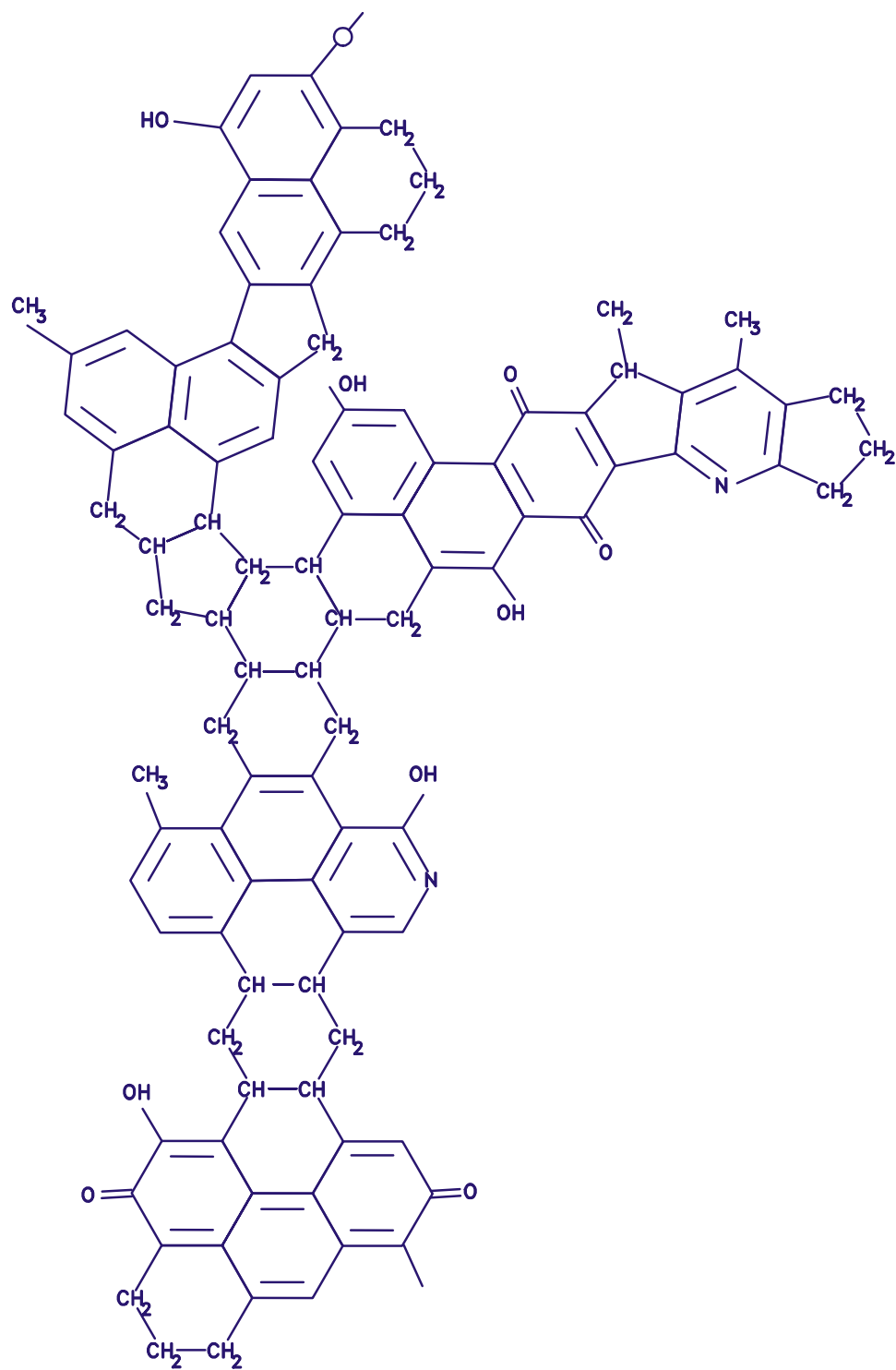


FIGURA 2. REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LAS MACROMOLECULAS DE CARBON

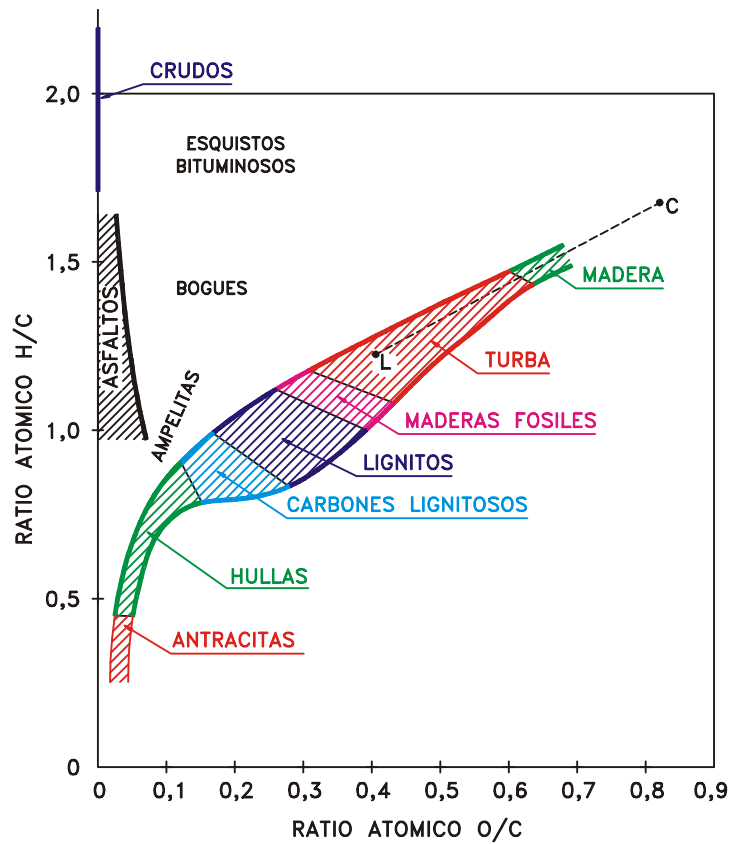


FIGURA 3. REPRESENTACION DE COMBUSTIBLES SEGUN VAN KREVELEN

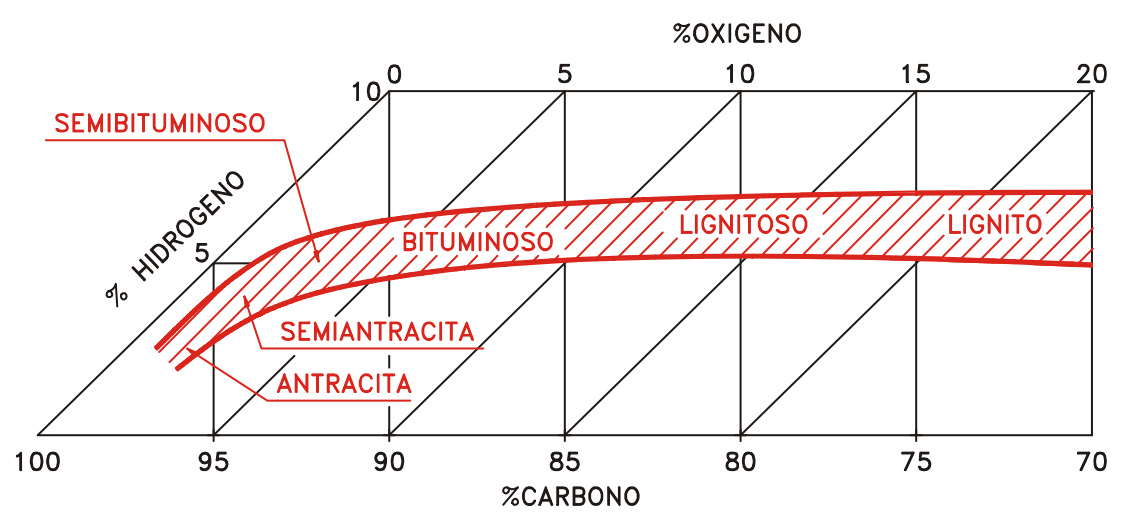
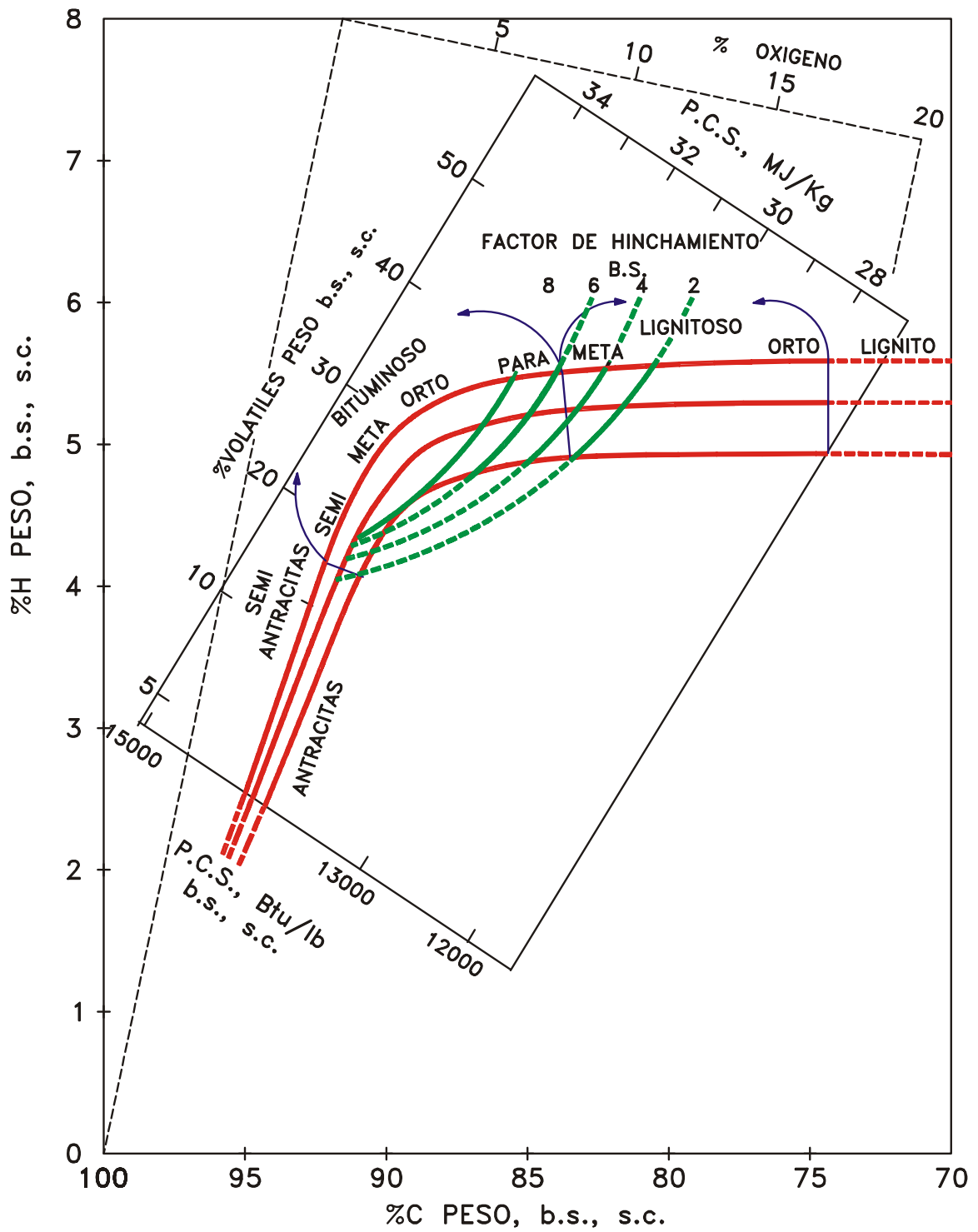
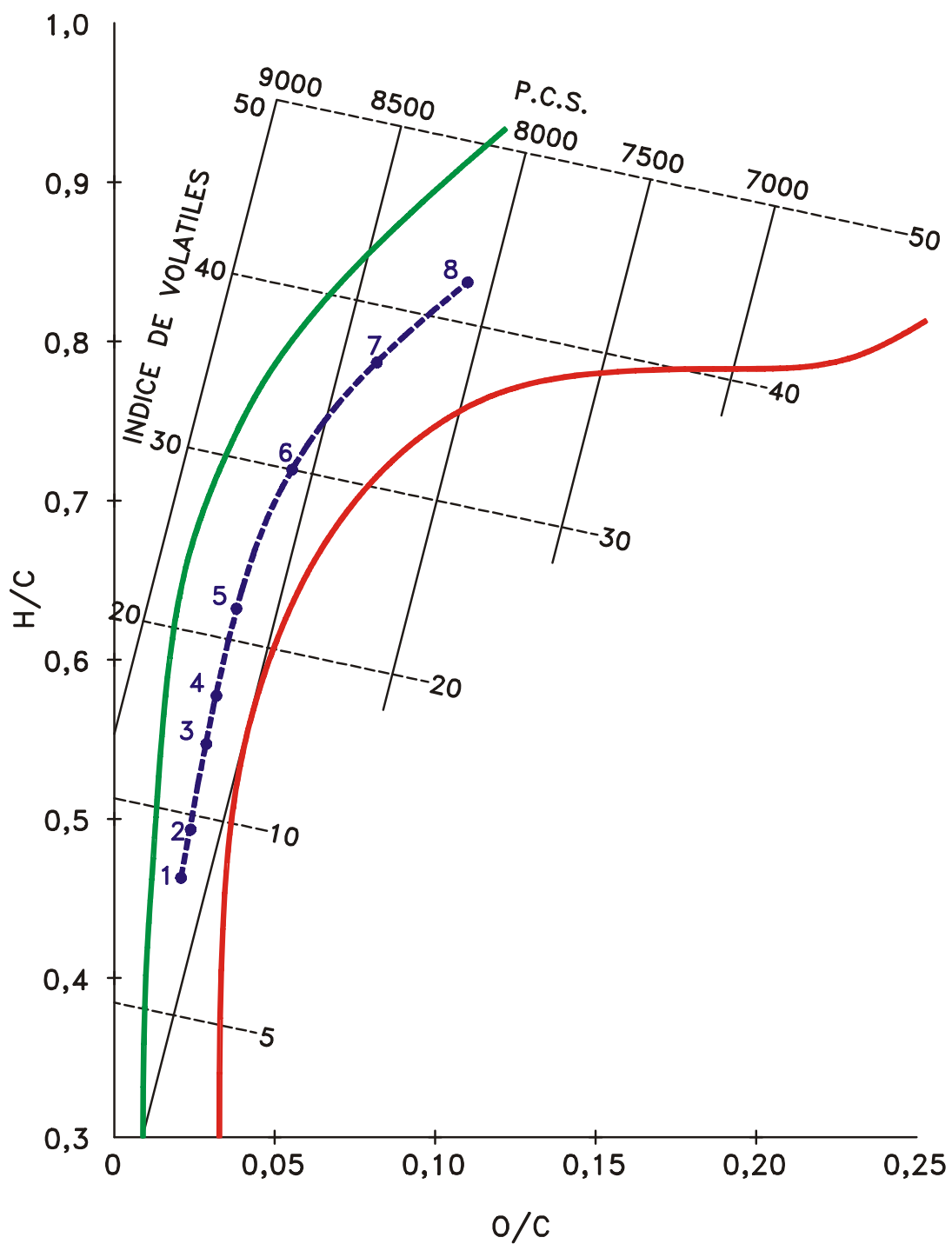


FIGURA 4. DIAGRAMA DE SEYLER

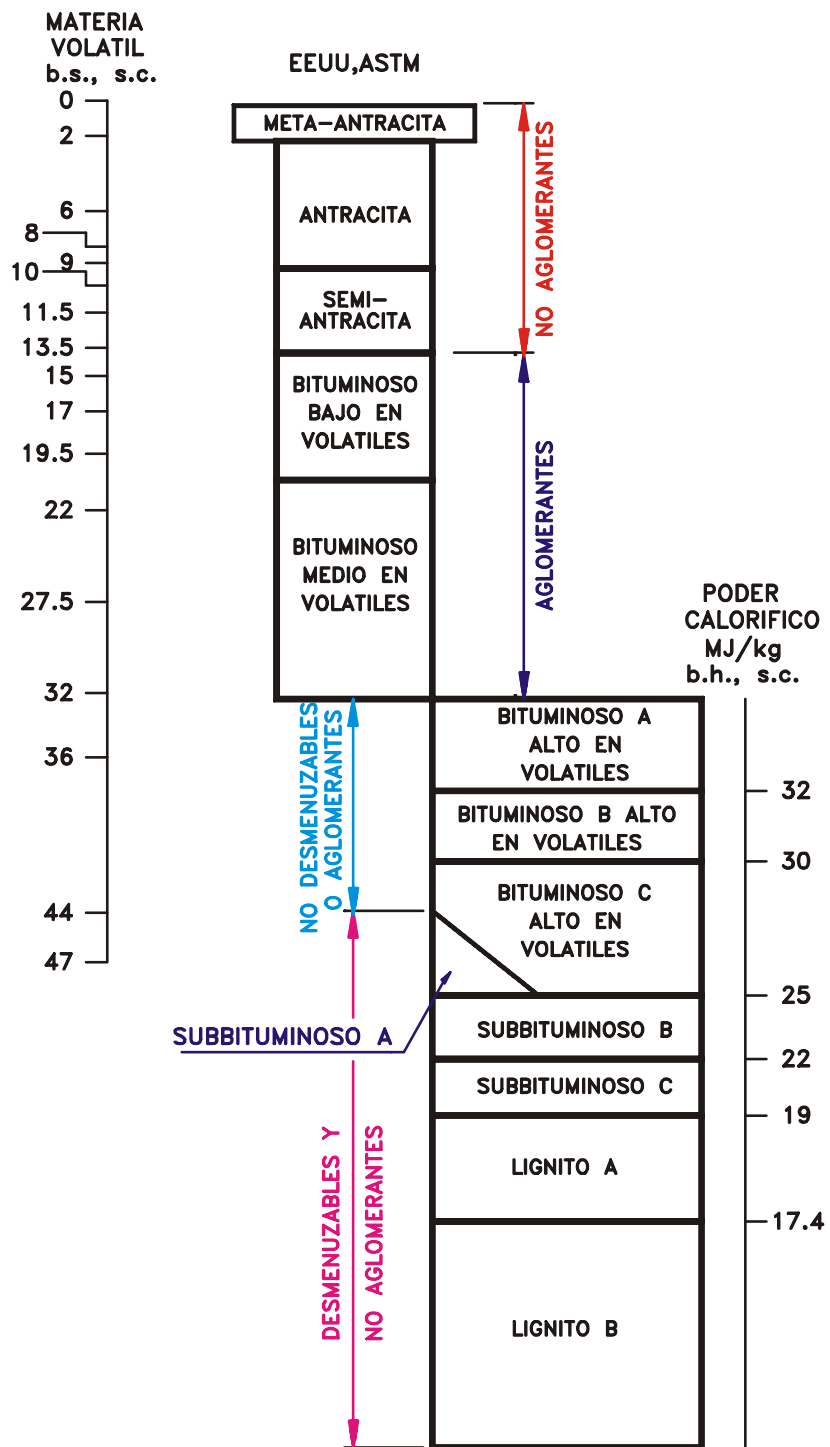


NOTA: b.s., s.c.: BASE SECA, EXENTO DE CENIZAS

FIGURA 5. DIAGRAMA DE SEYLER



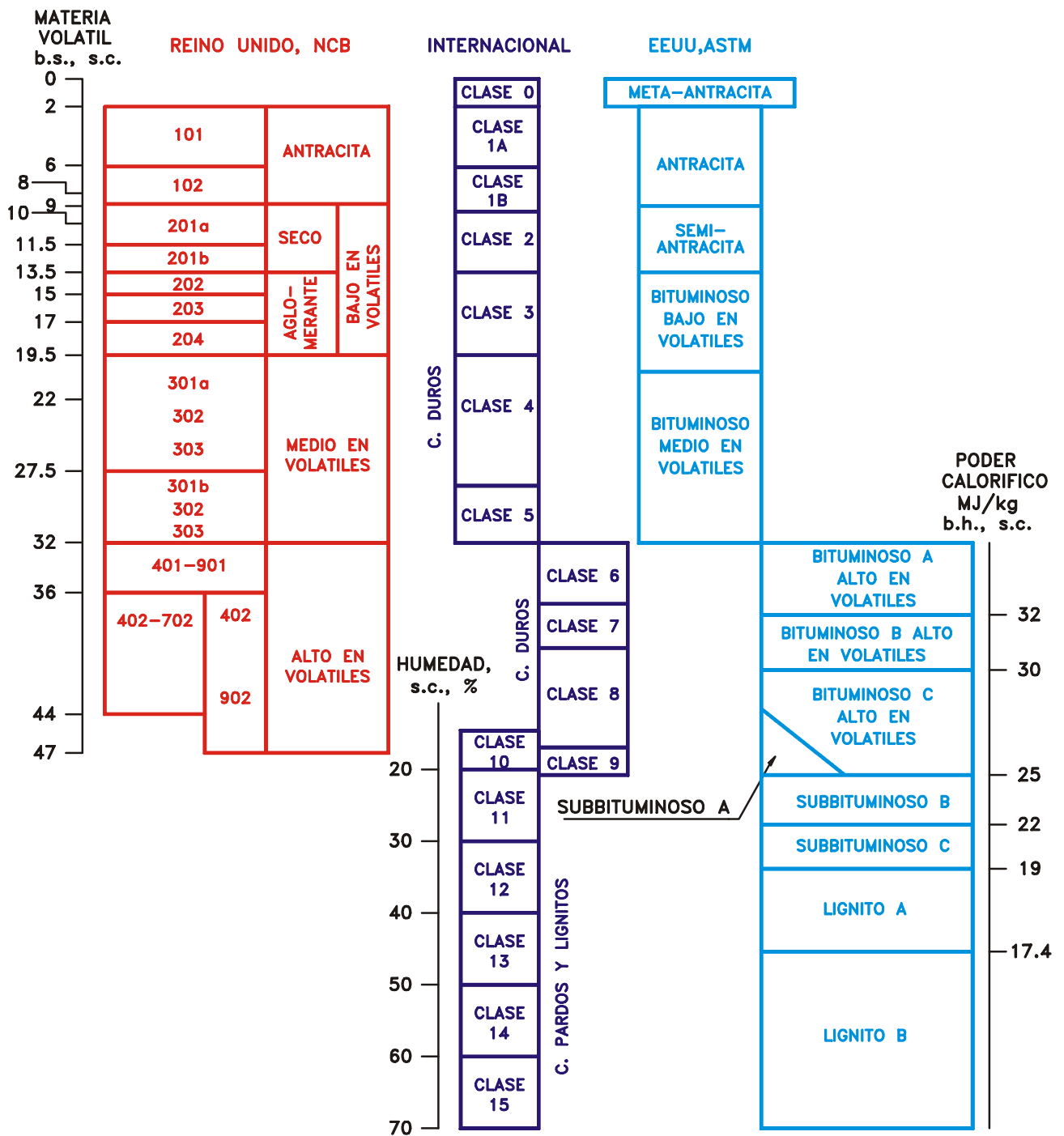
**FIGURA 6. ISOCALAS (7000 A 9000 Kcal)
E ISOVOLA (5% A 50% DE VOLATILES) DE LOS
CARBONES (VAN KREVELEN)**



b.s., s.c.: BASE SECA, EXENTA DE CENIZAS

b.h., s.c.: BASE HUMEDA, EXENTA DE CENIZAS

FIGURA 7. CLASIFICACION ASTM



b.s., s.c.: BASE SECA, EXENTA DE CENIZAS
 b.h., s.c.: BASE HUMEDA, EXENTA DE CENIZAS

FIGURA 8. COMPARACION ENTRE DISTINTOS SISTEMAS DE CLASIFICACION DE CARBON

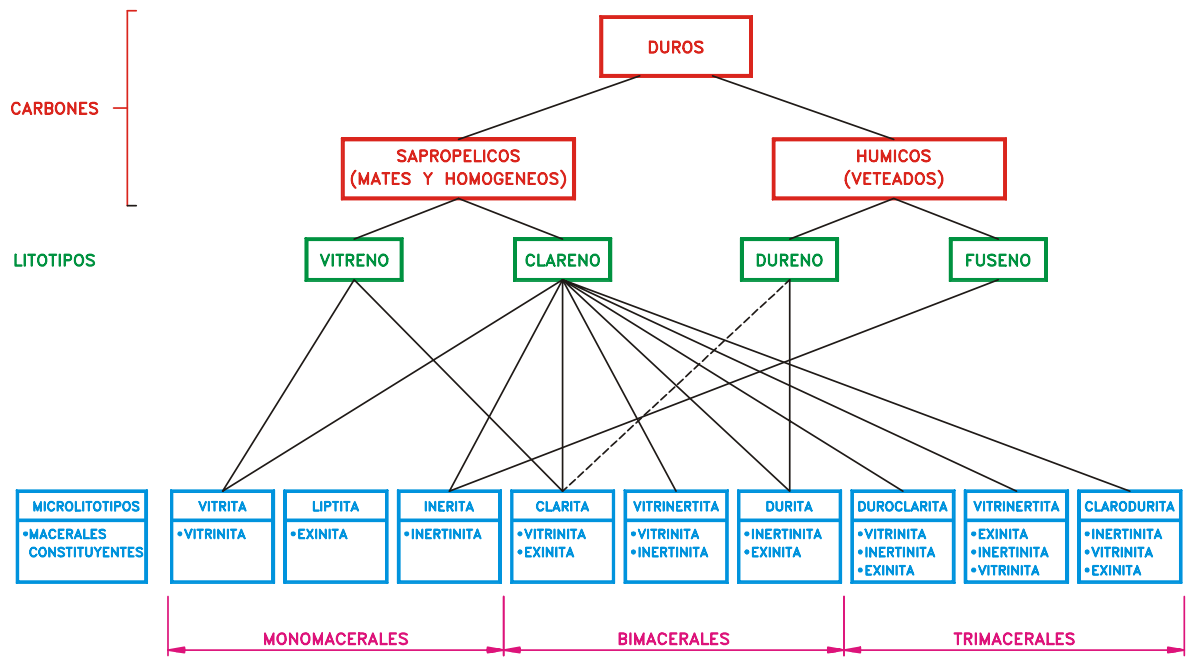


FIGURA 9. CLASIFICACION OPTICA DE LOS CARBONES DUROS

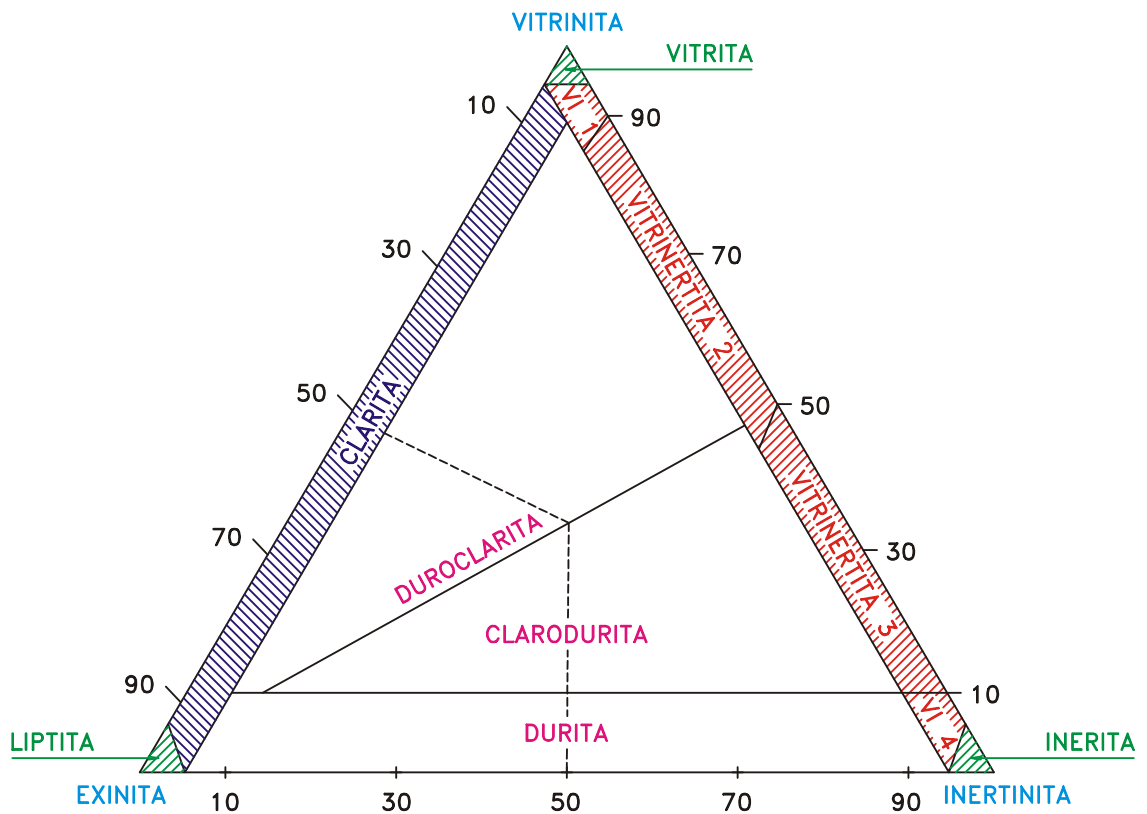


FIGURA 10. RELACION DE MACERALES EN LOS MICROLITOTIPOS

TABLA IX. ENSAYOS NORMALIZADOS Y REQUERIMIENTOS PARA CARBONES DE CENTRALES TERMICAS

PARAMETRO	ENSAYOS	UNIDADES (1)	VALORES OPTIMOS	LIMITES TIPICOS (2)	OBSERVACIONES
Poder calorífico		(c.r.) MJ/kg	Alto	Min 24-25 (23)	
Análisis inmediato	Humedad total	(c.r.) %	4-8	Máx. 12	Fuegos horizontales Fuegos verticales
	Cenizas	(b.s.) %	Bajo	Máx. 15-20 (30)	
	Materia volátil	(b.s.) %	20-35	Min. 20 (23)	
	Carbono fijo	(b.s.) %	15-20	Máx. 20	
Análisis elemental	Carbono	(b.s., s.c.) %			
	Hidrógeno	(b.s., s.c.) %			
	Nitrógeno	(b.s., s.c.) %			
	Azufre	(b.s., s.c.) %	Bajo	(0,8 - 1,1)	
	Oxígeno (por diferencia)	(b.s., s.c.) %			
Formas de azufre	Azufre total	(b.s.) %	Bajo	Máx. 0,5-1,0	f limitaciones espec.
	Pirítico				
	Como sulfato				
	Orgánico (por diferencia)				
Propiedades físicas	Moltrabilidad (Índice Hardgrove)		Alto	Min. 50-55 (min. 39)	
	Tamaño máximo	mm	130-40	50	f pulverizador
	Finos < 0,5 mm	%	(15 máx.)		f sistema transporte
	Índice de hinchamiento		Bajo	(Máx. 5)	
	Densidad				

(1) Expresión de resultados: c.r.: como se recibe; b.s.: base seca; b.s., s.c.: base seca, exenta de cenizas

(2) Valores usuales. Entre paréntesis otros valores aceptados.

Nota: f | función de

TABLA IX. (CONTINUACION)

PARAMETRO	ENSAYOS	UNIDADES (1)	VALORES OPTIMOS	LIMITES TÍPICOS (2)	OBSERVACIONES
Cloro		(b.s.) %	Bajo	Máx. 0,1-0,3 (0,5)	
Análisis químico de cenizas	SiO ₂ Al ₂ O ₃ TiO ₂ Fe ₂ O ₃ CaO MgO Na ₂ O K ₂ O SO ₃ P ₂ O ₅	% sobre peso de cenizas		(45-75) (15-35) (0,4-2,2) (1-12) (0,1-2,3) (0,2-1,4) (0,1-0,9) (0,8-2,6) (0,1-1,6) (0,1-1,5)	
Fusibilidad de las cenizas	Deformación inicial Reblandecimiento Hemisférica Fluidez	°C	Alta Alta Alta Alta	(> 1075) (> 1150) (> 1180) (> 1225)	En condiciones reductoras para calderas de escorias sólidas. Valores inferiores en calderas de escorias fundentes
Elementos traza	As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Se, Ti, Zn			Declaración de presencia	
Análisis petrográficos	Vitrinita Exinita Inertinita			55-80 5-15 10-25	

(1) Expresión de resultados: b.s.: base seca

(2) Valores usuales. Entre paréntesis otros valores aceptados.

TABLA X: COMPARACION RELATIVA DE COSTES DE CARBON FRENTE A COSTES DE OPERACION (EN FUNCION DE CONTENIDO EN CENIZAS DEL CARBON)

COSTES (% DEL TOTAL, EXCLUYENDO COSTES DE INVERSION)	CONTENIDO EN CENIZAS	
	15%	20%
CARBON (EN FUNCION DE RENDIMIENTO ENERGETICO)	83	77
CAPACIDAD DE PRODUCCION	7	10
MANTENIMIENTO	7	9
DISPONIBILIDAD	3	4
TOTAL	100	100

TABLA XI A: INFLUENCIA DE PROPIEDADES DEL CARBON EN LA OPERACION DE CENTRALES TERMICAS (I)

Operación	Características generales	Propiedades con influencia	Efecto
Transporte y almacenamiento del carbón	Poder calorífico	Humedad Cenizas Análisis elemental	Un 1% de reducción en el P.C. incrementa el consumo de carbón un 1%
	Fluidez	Humedad Distribución de tamaños Análisis de cenizas Densidad	Existe un valor específico para cada instalación a partir del cual se producen atascos
	Abrasión	Tamaños materia mineral % Cuarzo y Pirita	Deterioro de equipos de transporte y manejo del carbón
	Congelación	Tipos de humedad	Congelación a bajas temperaturas motivada por la humedad superficial
	Características pulverulentas	Humedad Distribución de tamaños Análisis de cenizas Porosidad	Aumento de costes de operación y mantenimiento para carbones pulverulentos
	Combustión espontánea	Rango Humedad Distribución de tamaños % Pirita	El poder calorífico del carbón almacenado decrece por combustión espontánea

**TABLA XI B: INFLUENCIA DE PROPIEDADES DEL CARBON
EN LA OPERACION DE CENTRALES TERMICAS (II)**

Operación	Características generales	Propiedades con influencia	Efecto
Molienda	Secado	Humedad Material volátil	Determinar el requerimiento de aire primario (consumo de auxiliares) Afecta a la posibilidad de incendios en molinos
	Carga del molino	Humedad total Molturabilidad Hardgrove Granulometría del carbón pulverizado	-3%/-1% de $Q_{\text{carbón}}$ por cada 1% de aumento de humedad -1% de $Q_{\text{carbón}}$ por cada 1% de reducción del índice Hardgrove Reducción del 0,35/0,90% de la fracción inferior a 75 μm si $Q_{\text{carbón}}$ aumenta un 1%
	Desgaste del molino	Tamaños materia mineral % Cuarzo y Pirita	1% de incremento en cenizas supone un extracoste aproximado de mantenimiento del 10%
Ventiladores	Caudal	Humedad	Su aumento incrementa el volumen de gases de combustión
		Tendencia a la escoriación	Su aumento incrementa el aire de exceso
		Carbono fijo	Su aumento incrementa el aire de exceso

**TABLA XI C: INFLUENCIA DE PROPIEDADES DEL CARBON
EN LA OPERACION DE CENTRALES TERMICAS (III)**

Operación	Características generales	Propiedades con influencia	Efecto
Quemadores y caldera	Estabilidad de combustión	Volátiles	Diseño especial de quemadores y hogar para estabilización de llama para volátiles (daf) < 25%
	Rendimiento	Ratio del combustible	Si ratio (Carbono fijo / Volátiles) pasa de 1,6 a 2,6, las pérdidas de rendimiento (por inquemados) aumentan un 0,06%
		Humedad	Un 1% de incremento de humedad baja un 0,25% el rendimiento de caldera
	Escoriación / Ensuciamiento	Análisis elemental de cenizas Temperaturas de fusión de cenizas Exceso de oxígeno (FeO/Fe ₂ O ₃)	Influye negativamente en el rendimiento, condicionando secuencia de sopladors y distribución de flujos de calor
	Corrosión	Análisis de cenizas	Alcalis y S aumentan corrosión Ca y Mg disminuyen corrosión (S)
	Abrasión	Análisis y granulometría de la materia mineral	Deterioro de quemadores
	Erosión	Análisis de cenizas (cuarzo, magnetita, corindón) Velocidad de gases	Deterioro de secciones convectivas: 5% de aumento de indisponibilidad si % cenizas pasa del 15 al 30%

**TABLA XI D: INFLUENCIA DE PROPIEDADES DEL CARBON
EN LA OPERACION DE CENTRALES TERMICAS (IV)**

Operación	Características generales	Propiedades con influencia	Efecto
Control Ambiental	Control de cenizas volantes	Cenizas	Su incremento es desfavorable
		Humedad	Su incremento es desfavorable
		Azufre	Su aumento es normalmente beneficioso
		Granulometría	Granulometrías más finas pueden conllevar problemas
		Metales traza (Se, As, Sb, Pb)	Bajo rendimiento de depuración de estos elementos nocivos
	Resistividad de cenizas	Condiciona depuración electrostática	
Control de SO ₂	Control de SO ₂	S	Su aumento determina mayores necesidades de control
		P.C.S.	Su aumento determina menores necesidades de control
		Cl	Si Cl pasa de 0,08 a 0,25%, se reduce un 12% el ratio Ca/S
Control de NO _x	Control de NO _x	N	Su aumento es desfavorable
		Volátiles	Su aumento es favorable
		P.C.S.	Su aumento es favorable
Cantidad y calidad de residuos sólidos	Cantidad y calidad de residuos sólidos	% Cenizas	Aumento proporcional de necesidades de transporte
		Análisis de cenizas	Posibilidad de aprovechamiento (< 5% C) Elementos traza determinan aprovechamiento y características de deposición en vertedero

TABLA XII: EFECTOS GENERICOS (POSITIVOS O NEGATIVOS) DEL AUMENTO DE PARAMETROS DEL CARBON EN EL FUNCIONAMIENTO DE UNA CENTRAL TERMICA

Funcionamiento	Análisis ^(a)								
	Cz	P.C.	S	Hum.	Molt.	M.V.	T _{fus}	Na	Cl
Almacenamiento y transporte	-	+	-	-		-			
Molinos	-	+	-	-	+	-			
Quemadores	-	-	-	-		+			
Caldera	-	+	-	-	+		+	-	-
Depuración de cenizas volantes	-		+	-	-				
Control SO _x		+	-			+		-	+
Control NO _x		+							
Calidad y cantidad de residuos	-	+	-		-		+		-
Capacidad	-	+	-	-	+/-	+/-	+	-	-
Consumo Específico	-	+	-	-	+	+	+	-	-
Mantenimiento	-	-	-	-	+	+/-	+	-	-
Disponibilidad	-	+	-	-	+	+/-	+	-	-

^(a)**Cz: Cenizas; P.C.: Poder calorífico; S: Azufre; Hum.: Humedad; Molt.: Molturabilidad (Índice Hardgrove); M.V.: Materia volátil; T_{fus}: Temperatura de fusión de cenizas; Na: Sodio; Cl: Cloro**

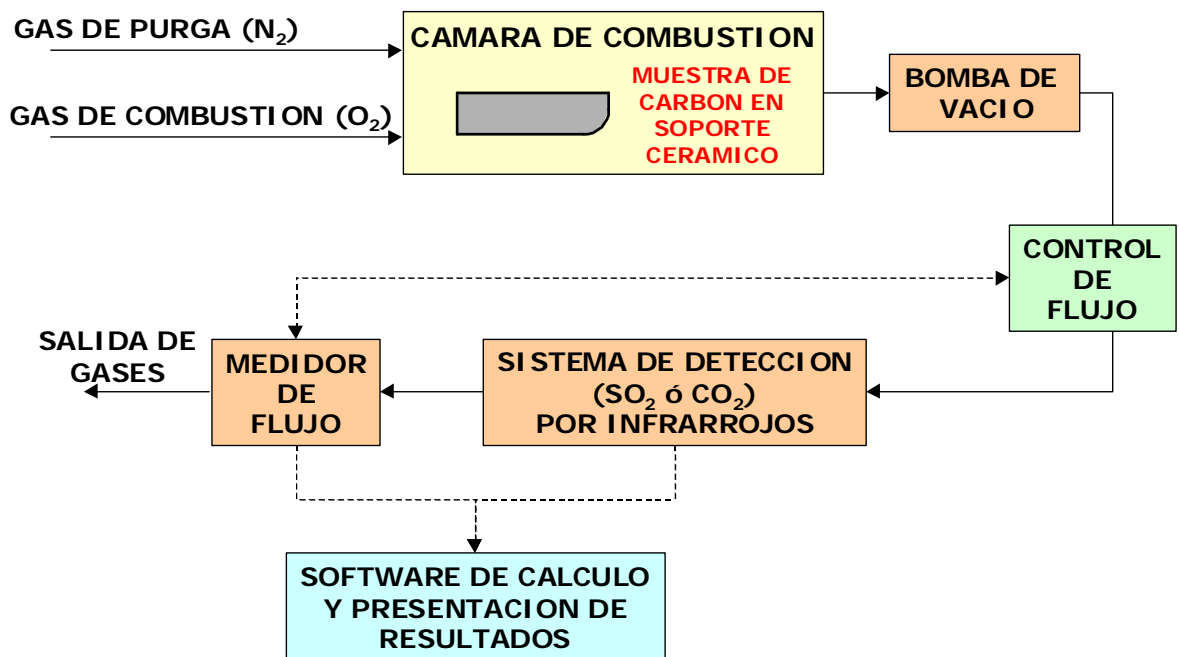


FIGURA 11: ESQUEMA DE DETERMINACION AUTOMATICA DE CARBONO O AZUFRE (ANALISIS ELEMENTAL)

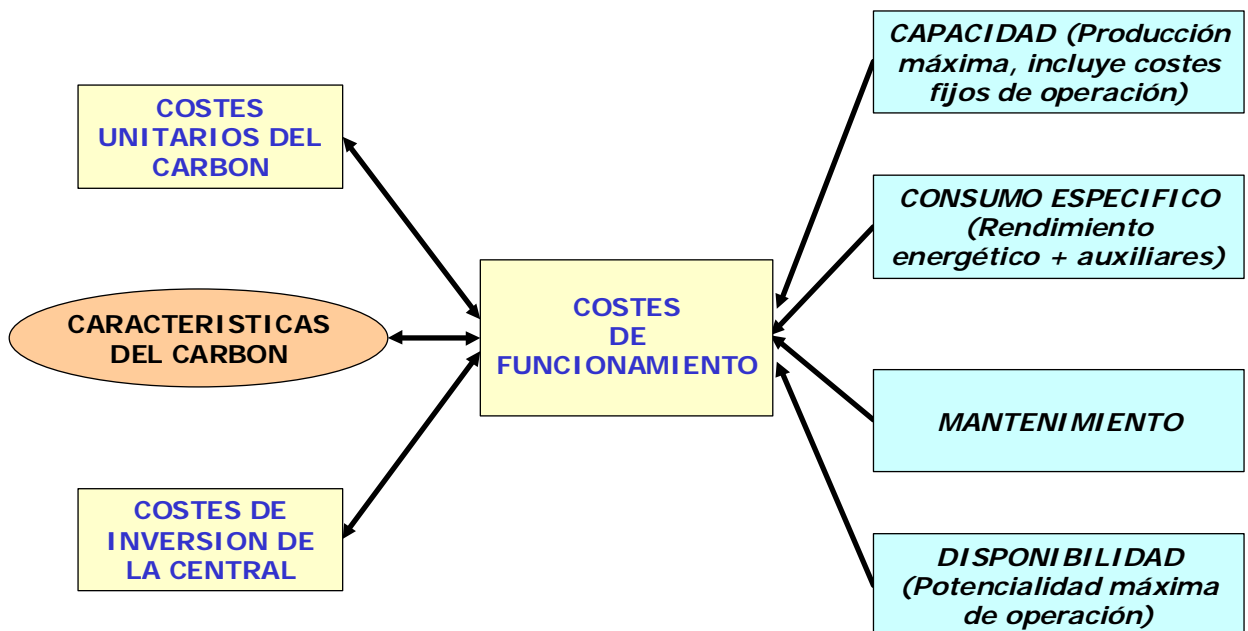


FIGURA 12. INFLUENCIA DE CARACTERISTICAS DEL CARBON EN COSTES DE CENTRALES TERMICAS