

Capítulo 3

Fuentes de energía no renovables (I) *El carbón*

3.1 LOS COMBUSTIBLES FOSILES

En el capítulo 1 se ha tratado el tema del consumo de energía primaria mundial según las distintas fuentes de energía primaria. Allí, se señaló que el 39,7% de la energía primaria se obtiene del petróleo, el 23,1% del gas natural y el 27,2% del carbón. Esto implica que el 90% de las necesidades mundiales de producción de energía se cubren a partir de transformaciones energéticas basadas en los combustibles fósiles. La energía nuclear cubre el 7,3% de la demanda mundial y la hidroeléctrica el 2,7%.

Estos datos de partida nos indican que el conocimiento de los procesos de transformación (generalmente por combustión) de la energía química de los combustibles en calor y posteriormente en trabajo (generalmente a partir de ciclos termodinámicos) son procesos fundamentales para entender las necesidades energéticas del mundo actual y la tecnología energética en todos sus aspectos: diseño, mejora y evaluación económica de procesos y su impacto medioambiental.

Sin embargo, considerar como fuentes de energía únicamente los combustibles fósiles es una visión demasiado restringida que propicia una visión muy parcial del problema del uso de la energía en el mundo actual.

En primer lugar, una parte importante de los combustibles fósiles y todos los combustibles nucleares se utilizan para la producción de energía eléctrica. Esto supone que a la hora de calcular costes de producción o de operación de una cierta actividad, industrial o comercial, el consumo de energía eléctrica tiene gran importancia, independientemente de cómo se haya generado esta energía.

Por otra parte, aunque el uso de energías renovables es muy pequeño a nivel mundial en la actualidad, la preocupación social por el medioambiente, así como el encarecimiento y el agotamiento de importantes recursos fósiles, ha favorecido el diseño de medidas políticas y económicas en caminadas a aumentar la cuota de las energías renovables en el consumo de energía primaria a nivel mundial en general y de los países de la UE en particular.

Otro problema a favor de la potenciación de las energías renovables es el problema del autoabastecimiento energético. Actualmente, España se auto abastece con apenas el 30% de la energía que consume.

Los combustibles fósiles se originan por la fosilización de compuestos de carbono. Estos compuestos, de fórmula química $C_x(H_2O)_y$, fueron producidos por plantas vivas en el proceso de la fotosíntesis, convirtiendo así la energía solar en energía química:



La mayor parte de los combustibles fósiles se originaron durante el periodo carbonífero de la era paleozoica, hace unos 325 millones de años. Por efecto de las altas presiones y el calor, en ausencia de oxígeno, se transformaron en compuestos de hidrógeno y carbono, con fórmula química general C_xH_y , aunque en algunos casos existen fracciones significativas de otros elementos, principalmente O, N, S, además de agua y materia mineral incombustible en el caso del carbón. Según el proceso de transformación, el combustible fósil generado puede encontrarse en estado sólido (carbón), líquido (petróleo) o gas (gas natural).

Antes de describir las propiedades generales que caracterizan a los combustibles fósiles para su uso energético, vamos a repasar el concepto de combustible y la clasificación de estos.

Se denomina *combustible*, a cualquier sustancia que reacciona químicamente con un agente oxidante para obtener fundamentalmente energía en forma de calor. Esta definición no incluye a los combustibles nucleares cuyo fundamento para la obtención de calor obedece a otras causas.

Según sea el estado físico de esas sustancias, los combustibles se clasifican en *sólidos*, *líquidos* y *gaseosos*. Por su origen, se clasifican en *naturales* y *artificiales*. Los combustibles (no nucleares) se clasifican de forma global como se muestra en la página siguiente.

En el caso del carbón, existen numerosos sistemas de clasificación según diferentes tipos de propiedades químicas y físicas todavía sin definir. Por ello, se expondrá en un apartado posterior una de las clasificaciones más utilizadas a nivel industrial, la norma ASTM D 388-92a.

Los combustibles contienen energía en forma acumulada, y esta energía se libera durante la reacción química (denominada combustión) con el agente oxidante, manifestándose como energía térmica. La energía térmica también se libera durante las reacciones nucleares, cuando el núcleo de un elemento pesado como el uranio o el plutonio es bombardeado en un reactor nuclear por neutrones generalmente lentos. La fisión del núcleo a fragmentos más pequeños está acompañada por un defecto de masa que se manifiesta como energía térmica. Al material que contiene el elemento pesado a menudo se le conoce como el combustible nuclear, aunque no ocurra reacción química alguna en el proceso.

SÓLIDOS	Naturales	Carbones	Antracitas: contienen del 86 al 92% de carbono fijo (CF) con Pcs=31.500 kJ/kg aprox., arde con llama corta amarilla que cambia a azul cuando se consumen los volátiles.
			Hulla bituminosa: impregnada en betún. CF entre 60 y 86% Pcs = 27.000-34.000 kJ/kg, humedad libre > 4%
			Hulla subbituminosa: CF de 30 a 40%. Pcs=19.000-32.000 .
			Lignitos: Pcs< 20.000 kJ/kg
			Turbas: poco usadas por su elevada humedad y bajo Pcs.
			Grafitos: no se usan por ser difícilmente inflamables.
			Alquitranes o betunes: Pcs de 38.000 a 42.000.
			Maderas: Pc de 8.000 a 17.000 kJ/kg. Recién cortada w=60%;seca w=20% Pcs, y la inflamabilidad dependen del contenido en resinas, gomas y aceites.
			Vegetales secos
		Fabricados	Aglomerados de hulla y lignitos (briquetas) Pcs=20.000-38.000 kJ/kg.
			Coque: es el residuo de la destilación seca de hullas: puede ser coque de gas o coque de alto horno, según su origen.
			Carbón vegetal
			Breas de hulla o de petróleo: empleadas más bien en usos industriales.
			Residuos sólidos industriales y urbanos: Pcs de 800 a 4.000 kJ/kg.
		LÍQUIDOS	Naturales
Fabricados	Naftas, gasolinas, gasoil, fuel-oil, queroseno.		
	Residuos líquidos industriales lejías negras, aceites y disolventes usados y mezclados		
	Biocombustibles		
GASES	Natural	Gas natural (GN): metano con algo de etano, propano, aire, vapor de agua y otros gases.	
		Fabricados	Gas de alto horno: Principalmente CO.
	Gas de gasógeno: Pcs de 3.300 a 9.600 kJ/m ³		
	Gas de coque: Pcs similar		
	Gas de refinería (GLP): se comercializan separadamente etano, propano, butano y aire propanado.		
		Residuos industriales y urbanos: principalmente metano.	

3.2 PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS COMBUSTIBLES FOSILES

De la definición dada en 3.1 de combustible, se desprende que la propiedad fundamental de las sustancias combustibles es su poder calorífico, es decir, la cantidad de energía liberada en forma de calor que puede desarrollarse por la combustión de la unidad de combustible (1 kg., 1 m³, etc.). Precisamente esta propiedad permite expresar las cantidades de energía en unidades equivalentes de combustible. En el cuadro siguiente se presenta una relación de distintas unidades energéticas, expresando su equivalencia en julios

Símbolo	Unidad	Factor de conversión a	
		kJ	kcal
quad	Quad = 10 ¹⁵ BTU	1,055.10 ¹⁵	
MWa	Megavatios año	3,1536.10 ¹⁰	7,532.10 ⁹
tep	Tonelada equivalente de petróleo	4,1868.10 ⁷	10.10 ⁶
m ³ petróleo	Metro cúbico de petróleo	3,7.10 ⁷	
tec	Tonelada equivalente de carbón	2,9302.10 ⁷	7.10 ⁶
bbl	Barril equivalente de petróleo	5,9.10 ⁶	
tet	Tonelada equivalente de trilita	4,2.10 ⁶	
GJ	Gigajulio	1,00.10 ⁶	238.845,9
th = therm	100.000 BTU	1,055.10 ⁵	25.198
m ³ g.n.	Metro cúbico equivalente de gas natural	3,6.10 ⁴	8.600
te = termia	Termia 1.000	4.186,8	1.000
kWh	Kilovatio-hora	3.600	860
CV-h	Caballo de vapor-hora (francés)	2.648	632,46
HP-h	Caballo de vapor-hora (británico)	2.685	641,30
cf	Pie cúbico equivalente de gas natural	1.055	251,982
kcal	Kilocaloría	4,1868	1
BTU	British Thermal Unit	1,055	0,25198
kJ	Kilojulio	1	0,2388

Unidades energéticas habituales y sus equivalencias en kJ y kcal según SI

Dado que normalmente los combustibles se compran de acuerdo con unas especificaciones que limitan sus propiedades, es necesario conocer al detalle éstas, con objeto de comprobar que se cumplen las especificaciones indicadas por el suministrador.

Las **propiedades** más relevantes de los combustibles son: la **composición** (y contenido de impurezas), la **entalpía estándar de reacción** (usualmente llamada poder calorífico, en valor absoluto); la densidad, viscosidad y coeficiente de dilatación (para almacenamiento y transporte); la entalpía de vaporización (conviene que sea baja); la presión de vapor (conviene que sea alta para que no haya que gasificar artificialmente); los **límites de ignición** (por chispa), **autoinflamación** y **extinción**, la toxicidad y la compatibilidad con otros materiales (tubos, juntas, válvulas, bombas, etc.).

En los carbones es importante la granulometría y el contenido de humedad y cenizas. El fuel-oil hay que precalentarlo para que fluya bien y se atomice mejor. En ambos casos, el contenido de azufre puede hacer inservible el combustible, por los problemas de contaminación. El manejo de los GLP requiere depósitos a presión y es caro, y al ser su densidad mayor que la del aire requiere ventilación

de seguridad, aunque su uso es muy limpio y no contamina. El gas natural no es cómodo de almacenar (depósitos criogénicos) y hay que canalizarlo (gran coste de infraestructura)

A continuación vamos a tratar el estudio de algunas de las propiedades y características fundamentales de los combustibles, debiendo destacarse que según el tipo de combustible unas u otras tendrán mayor importancia, como es el caso de la viscosidad, fundamental para combustibles líquidos y de poca importancia para combustibles gaseosos. Por ello estudiaremos por separado las propiedades y características de los combustibles sólidos, líquidos y gaseosos.

3.3. PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS COMBUSTIBLES SÓLIDOS

El carbón (con sus variantes), la madera (biomasa), los residuos sólidos, etc. son representantes típicos de combustibles sólidos.

Aunque el carbón desempeñó en su día un papel primordial entre todos los combustibles, hoy en día ha sido desplazado por los combustibles líquidos y gaseosos. Sin embargo, como las reservas de carbón siguen siendo las más importantes de todos los combustibles (con excepción de los nucleares), van cobrando importancia las nuevas tecnologías de hidrogenación y gasificación, que permiten obtener combustibles líquidos y gaseosos a partir de aquella forma sólida. Por todo ello, dentro de los combustibles sólidos se hará fundamentalmente referencia al carbón, debido al limitado mercado de los demás.

En España se queman antracitas en las centrales termoeléctricas de Anllares y Narcea. Se queman lignitos en Puentes, Meirama, Escatrón y Andorra. En las restantes se queman hullas, combustibles líquidos y/o gas natural, que también se va añadiendo a alguna de las citadas en primer lugar.

Los carbones también *se clasifican por el tamaño*, según:

- **todo uno**: mezcla según llega de la mina
- **galleta** de 22 a 45 mm
- **galletilla** de 12 a 22 mm
- **granza**, de 10 a 12 mm
- **grancilla**, de 6 a 10 mm
- **menudos** < 6 mm.

3.3.1 Análisis de combustibles

Los combustibles industriales contienen *elementos combustibles*: carbono, hidrógeno y azufre; y *materias no combustibles* (agua, silicatos, caliza, yesos y nitrógeno, principalmente). Los elementos combustibles se queman; los no combustibles se funden o pulverizan quedando después de la combustión una parte como cenizas y escorias en el lugar donde se verificó la combustión, y otra parte

acompañando a los humos en forma de cenizas volantes. En particular, el agua existente y la formada en la combustión, se evaporan y acompañan a los demás gases productos de combustión, constituyendo lo que se denomina como **humos**, que consisten, principalmente, en vapor de agua, monóxido de carbono, anhídrido carbónico y óxidos de azufre y de nitrógeno, que arrastran las cenizas más finamente pulverizadas. La utilidad de un combustible depende de varias características que se conocen como **propiedades del combustible**.

3.3.1.1 Análisis elemental

La primera propiedad que interesa es el *contenido en elementos combustibles*. Estos se determinan por el *análisis químico del combustible*, que entonces se llama **análisis elemental**, obteniéndose el contenido en peso de cada distinto elemento químico que entra en la composición del combustible.

Como en todo caso no tiene interés conocer el contenido individualizado de elementos no combustibles, estos se determinan en bloques como sigue:

- **Humedad**

El agua está presente siempre en el carbón, así, puede constituir un contenido superficial adquirido en el lavado, transporte y almacenamiento, o puede permanecer ocluida en los poros o combinada químicamente. La humedad contenida en un combustible sólido como el carbón, puede considerarse integrada por dos tipos diferentes

- Primera fracción de humedad o **humedad libre**. Es el agua superficial retenida por las fuerzas de tensión superficial que empapa la masa del combustible, también denominada **humedad libre, superficial o añadida**, desaparece mediante secado al aire a la temperatura ambiente ($\leq 45^{\circ}\text{C}$), en un local seco y ventilado
- Segunda fracción de humedad o **humedad intersticial, higroscópica**, también llamada **humedad en los poros**. Es el agua retenida en los poros, o contenida en el combustible en equilibrio con la humedad del aire ambiente, o que forman parte de la estructura sólido-cristalina del combustible, que no se evapora mediante secado al aire ambiente y es necesaria una temperatura algo mayor (entre $105-110^{\circ}\text{C}$) para eliminarla.

En algunos carbones, ciertas pérdidas de peso entre 100 y 185°C se deben a la pérdida de **agua de hidratación** (combinada). El secado a altas temperaturas debe realizarse en atmósfera de N_2 para evitar la autocombustión del carbón.

- **Cenizas**, donde se agrupan todos los demás materiales no combustibles, distintos del agua.

Expresión de los resultados de un análisis en distintas bases

La mayoría de las determinaciones de un análisis se realizan en el laboratorio secando la muestra hasta su equilibrio con la atmósfera del laboratorio. En estas condiciones los resultados se dan en base seca (referida a aire seco). En el Anexo Cuadro 3.1 se presenta un formato estándar del resultado del análisis de un suministro de carbón.

En ciertos casos según donde se tomen las muestras para el análisis puede resultar más conveniente y significativo expresar los resultados en fracciones másicas (y) corrigiendo a otras bases, es decir, los **tipos de análisis** pueden ser:

- Referido a **como se recibe**, (y), o sea con toda su humedad libre
- Referido a **como se quema**, (y), o sea en la situación en que se toma el combustible del parque o los depósitos para llevarlo a la caldera, normalmente con menos humedad que como se recibe.
- Referido a **base seca**, (y'), o sea habiendo eliminado toda la humedad libre
- Referido a base **sin cenizas**, (y^a), o sea descontando la materia mineral incombustible
- Referido a **material combustible**, (y''), o sea después de retirar toda la humedad y las cenizas

Así se determinan, además de **c, h, s, n y o**, las cenizas (**a**) y la humedad libre (**w**).

Luego, en el análisis de un combustible se cumple (en tanto por uno en peso o fracción másica):

$$c + h + s + n + o + a + w = 1 \quad (3.1)$$

El análisis de combustible seco, es decir, sin humedad, w, resultará:

$$c' + h' + s' + n' + o' + a' = 1 \quad (3.2)$$

y el análisis de material combustible, es decir, sin humedad y si cenizas, dará el resultado:

$$c'' + h'' + s'' + n'' + o'' = 1 \quad (3.3)$$

Para aproximar más la realidad de la combustión industrial se introdujo el concepto de **materia mineral** agrupando el material que no va arder y para lo que se harán las correcciones apropiadas sobre el resultado del análisis elemental. La **fórmula de Parr** dice:

$$\text{Materia mineral} = w + 1,08 a + 0,55 s \quad (3.4)$$

Las relaciones entre las fracciones másicas (y = c, h, s, n, o, a, w) calculadas con las distintas bases pueden obtenerse como sigue:

$$y' = \frac{y}{1 - w} \quad y^a = \frac{y}{1 - a} \quad y'' = \frac{y}{1 - w - a} \quad (3.5)$$

El procedimiento para la realización del análisis elemental está normalizado, debiéndose poner especial atención a la trituración previa de la muestra, para asegurar la representatividad de la muestra analizada. Así pues, en el análisis elemental determinaremos además de la humedad y cenizas, el contenido en peso de cada elemento químico que entra en la composición, como:

- **Carbono total** (ISO 625-1975). El carbono procede de la sustancia orgánica y de los carbonatos minerales. Será la suma del carbono fijo y del contenido en las materias volátiles (conceptos que desarrollaremos al describir el análisis inmediato de un carbón). El carbono fijo, o carbono sin combinar, es el que no destila cuando se calienta un carbón.
- **Hidrógeno** (ISO 625-1975). El hidrógeno está presente en la sustancia orgánica en forma de humedad y agua de hidratación o de constitución de los silicatos de la materia mineral. El análisis químico descompone el agua en hidrógeno y oxígeno.
- **Azufre** (UNE 32-008 y 32-009). La mayoría de los carbones contendrán azufre, que únicamente puede determinarse por análisis químico. El azufre está presente en tres formas; como piritita o marcasita, como compuestos sulfurados orgánicos o como sulfatos inorgánicos. La presencia del azufre en forma de piritita ocasionará problemas en la molienda del carbón, dada la abrasividad de ésta. El azufre sólo tiene su plena potencia calorífica cuando se encuentra en estado libre. En porcentajes elevados podrá formar escorias muy perjudiciales. Durante la combustión, el azufre como impureza forma óxidos, que corroen piezas de hornos y calderas, siendo además muy contaminantes sus emisiones a la atmósfera.
- **Nitrógeno** (UNE 32-013). El nitrógeno se encuentra en todos los carbones, ligado a combinaciones orgánicas, en pequeños porcentajes. Al ser inerte no produce ningún efecto perjudicial, excepto que obliga en su manipulación a gastar energía. Al igual que las cenizas, disminuye la cantidad de energía disponible por unidad de masa de combustible.
- **Oxígeno**. El contenido en oxígeno se estima por diferencia a 100 de la suma de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre total y cenizas corregidas exentas de azufre. El oxígeno rebaja la potencia calorífica del combustible, aunque contribuye a las necesidades del aire de combustión.

El resultado del análisis elemental se presenta p.ej., de la siguiente forma:

Análisis elemental	Muestra seca %	Carbón puro %
Carbono	83,46	85,86
Hidrógeno	4,73	4,59
Nitrógeno	1,55	1,59
Azufre total	0,58	0,59
Ceniza	2,80	-
Oxígeno	6,88	7,08
Total	100,0	99,71

3.3.1.2 Análisis inmediato de un combustible sólido

Si bien actualmente, muchos laboratorios disponen de modernos y caros equipos de laboratorio que realizan el análisis elemental de forma fácil y rápida, es frecuente en la práctica, cuando no se disponen de estos equipos, realizar este solamente a largos intervalos y el análisis de los combustibles sólidos que se realiza de forma continuada es otro análisis simplificado que se conoce en la industria como **análisis inmediato**.

Este análisis consiste en separar:

- la **humedad total**, w_t ,
- el **contenido en combustibles volátiles**, V , que es la masa de materiales combustibles que se gasifica en el calentamiento previo a la combustión (principalmente monóxido de carbono),
- el **carbón fijo**, CF , que es la masa de materiales combustibles que queda en forma sólida hasta la combustión, y
- las **cenizas**, a

cumpliéndose que: $w_t + V + CF + a = 1$ (3.6)

Naturalmente se ve que las definiciones de cada uno de estos componentes son indeterminadas, por lo que es preciso normalizar su proceso de determinación para que este análisis sea repetitivo y tenga un valor industrial.

En España existen las siguientes normas relativas a estos procedimientos:

- Norma UNE 32-102. Partes 1 y 2. Lignitos duros, hullas y antracitas. Toma y preparación de muestras.
- Norma UNE 32-001. Hulla y antracita. Determinación de la humedad total.
- Norma UNE 32-019. Combustibles minerales sólidos. Determinación del contenido en material volátil.
- Norma UNE 32-004. Determinación de las cenizas.

En resumen, las normas consisten en limitar de alguna forma el proceso de separación de cada fracción. Habitualmente se procederá, como sigue:

1) Humedad libre. Es la disminución de peso de la muestra colocada en el interior de un horno o estufa de secado durante un tiempo fijado y a temperatura no superior a 45°C. Se supone que lo único que se volatiliza es la humedad libre que se evapora en su totalidad.

2) Humedad higroscópica. Es la disminución en peso de la muestra mantenida entre 105-110°C durante un tiempo de 100 a 150 minutos. La suposición hecha es similar a la anterior.

Por tanto, para la determinación del contenido de humedad de un combustible, se procederá:

Se secará primeramente una masa m al aire o en estufa, a continuación se pesará para obtener la humedad superficial. Para obtener la humedad en los poros, se secará seguidamente en la estufa de secado, quedando una masa m_1 de combustible seco. La suma de las masas perdidas, ambas referidas a la masa m será la humedad total, w_t .

$$w_t = \text{Humedad total} = \frac{m - m_1}{m} \quad (3.7)$$

3) Volátiles. Es la pérdida de peso que experimenta una muestra seca, m_1 al calentarla en ausencia del oxígeno en un horno, durante 7 minutos a $925\text{ }^\circ\text{C}$. La pérdida en peso se obtiene después de enfriada la muestra y el porcentaje en volátiles se calcula teniendo en cuenta la humedad original del carbón.

Se determina, por tanto, sometiendo al combustible seco a un proceso de pirólisis, mediante el cual se desprenden las materias volátiles y quedando un residuo sólido, de masa m_2 , que recibe el nombre de coque.

$$V = \text{Índice de materias volátiles} = \frac{m_1 - m_2}{m} \quad (3.8)$$

Las materias volátiles están constituidas por combinaciones de carbono, hidrógeno y otros gases

Del contenido en materia volátil depende:

- La *velocidad de combustión* de un carbón pulverizado, ya que en un combustible rico en volátiles, éstos se desprenden rápidamente, produciendo una disminución de masa y formándose alquitranes y gases que arden rápidamente, por tanto deben esperarse menores inquemados, mientras que los pobres en volátiles arden despacio.
- La *longitud de la llama*, siendo tanto más larga cuanto mayor sea dicho contenido.
- El *tamaño de partícula* adecuado para la combustión pues podrá ser mayor cuanto mayor sea el porcentaje de volátiles.

En principio se podría esperar un aumento del poder calorífico con un incremento en el contenido en volátiles. Esto sucede hasta un contenido en volátiles del 20 % aproximadamente. Para contenidos más elevados el poder calorífico decrece, debido a que una parte de las materias volátiles está formada por combinaciones de oxígeno y nitrógeno no combustibles.

4) Cenizas. Es el peso del resto de masa (m_3) después de incinerar el residuo (el coque) de **3)** a $825\text{ }^\circ\text{C}$, temperatura a la que los carbonatos se han descompuesto y el yeso no. Se define así un contenido en cenizas fijas inferior al contenido real en minerales no combustibles del carbón bruto, y también distinto del residuo resultante en las condiciones reales de utilización o **contenido de cenizas efectivo**.

5) Carbono fijo. Es el resto de peso de la muestra. Es decir, la fracción residual del carbón pirolizado para obtener las materias volátiles, después de descontadas las cenizas,

Se determinará quemando el coque obtenido en la determinación de volátiles, con lo que queda un residuo incombustible m_3 que son las cenizas

$$CF = \text{Carbono fijo} = \frac{m_2 - m_3}{m} \quad (3.9)$$

El horno para efectuar estos ensayos será de mufla, eléctrico, cerrado o con salida de humos. Las muestras de 1 o 2 gramos, según la norma a aplicar, se ensayan en crisoles o cápsulas normalizadas.

Además, debido a su interés medioambiental en la mayoría de los análisis inmediatos también se suministra el contenido en azufre del carbón

3.3.2 Poder calorífico de un carbón

El poder calorífico, representa la característica más importante en la selección y utilización de un combustible.

La energía liberada en las reacciones (combustión) de oxidación (muy exotérmica) de una unidad de combustible (masa para combustibles sólidos o líquidos y volumen, en c.n., para combustibles gaseosos) se incorpora a los productos de la reacción en forma de energía térmica, elevando fuertemente su temperatura. Con instrumentos llamados **calorímetros**, se puede medir la energía térmica que es preciso retirar a presión constante de los productos de la combustión para conseguir que recuperen la temperatura que tenían inicialmente el combustible y el oxígeno con el que se oxida. Esta energía térmica se llama **poder calorífico del combustible, Pc**.

Al determinar el poder calorífico de un combustible en un calorímetro y llevar los productos de la combustión a condiciones normales (0°C , 760 mm.Hg), puede observarse que el vapor de agua contenido en los humos condensa sobre las paredes del calorímetro, cediendo 597,2 kcal/kg. (2500 kJ/kg.), calor que se suma al calor producido en la reacción de combustión, esta suma recibe el nombre de **poder calorífico superior** del combustible, **Pcs**., que se define pues, como la energía liberada en la combustión cuando el combustible y comburentes están inicialmente a 0°C y hasta que los productos de la combustión recuperan esta temperatura de 0°C .

En la práctica industrial no resulta aconsejable tomar energía térmica de los humos producto de la combustión cuando su temperatura baja de unos 150°C , pues el gradiente de temperaturas resulta pequeño para que la transmisión de calor (en estos casos por conducción y convección) tenga lugar de forma económica y rápida, consiguiéndose además no bajar hasta el punto de rocío ácido.

El valor del Pcs disminuido en esa cantidad de energía térmica no recuperable industrialmente (cuantificada fundamentalmente por el calor de condensación del vapor de agua) tiene utilización técnica y se denomina **poder calorífico inferior, Pci** del combustible

La diferencia entre Pcs y Pci no es muy significativa en el caso del C o S. Con un calor específico de 840 J/kg.K para el CO_2 , o de 630 J/kg.K para el SO_2 , el salto de 125°C representa solamente 100 u 80 kJ/kg de humos respectivamente. En cambio en el caso del H_2 la diferencia es muy importante porque el vapor de agua resultante de la combustión, con un valor para c_p de 1,9 kJ/kg.K además se condensa entre los 150°C y los 25°C , entregando al medio ambiente unos 2260 kJ/kg de

humos, a presiones alrededor de una atmósfera. Y como por kg de H₂ resultan 9 kg de vapor de agua, la diferencia entre los P_{cs} y P_{ci} resulta finalmente de alrededor de 22.500 kJ/kg de H₂.

Existen diversos **métodos de determinación del poder calorífico**, métodos que pueden ser clasificados en analíticos, aproximados o experimentales.

La aplicación de los métodos analíticos, requiere el conocimiento de la composición elemental del combustible, así como de los calores de reacción de sus componentes, y mediante consideraciones químicas básicas pueden obtenerse fácilmente los valores de los P_{cs} y P_{ci}, debiendo tener muy presente para el cálculo que todo el oxígeno del combustible se considera unido al hidrógeno en forma de agua en estado líquido, que recibe el nombre de **agua de constitución**.

Existen una serie de **fórmulas empíricas** para determinar el poder calorífico de un carbón, a las que se atribuye un error no superior al 1,5 % y que están basadas en el análisis elemental del combustible, referido a base seca.

La más conocida es la del físico francés **Dulong** (1785-1838) quien estableció un procedimiento sencillo para determinar el P_{cs} de un combustible, sentando que las energías liberadas por los distintos elementos simples que componen el combustible se adicionan linealmente.

$$P_{cs} = 33900 c + 143000 (h - o/8) + 10500 s \quad \text{kJ/kg de combustible tcsq} \quad (3.10)$$

en la que c, h, o y s representan el tanto por uno en masa de C, H₂, O₂ y S respectivamente presente en el combustible, como resulta de su análisis químico. El termino (h-o/8) representa solamente el hidrógeno libre, o sea el que no está en el combustible ya oxidado, formando agua.

La formula de Dulong fue establecida para el carbón y considera que todo el O₂ está formando agua. Los coeficientes tomados se corresponden con los valores que se admitían cuando Dulong estableció la formula en el siglo pasado. Se emplea con buena aproximación para cualquier combustible (gas, liquido o sólido) siempre que con un análisis químico se pueda determinar su composición.

A partir de P_{cs} se puede calcular el P_{ci} restando el calor de condensación y enfriamiento del agua contenida en los humos que, como se ha visto, es la única energía a tener en cuenta. Así se obtiene:

$$P_{ci} = P_{cs} - 2500 \cdot w_{IH} = P_{cs} - 2500 (9h + w) \quad \text{kJ/kg combustible tcsq} \quad (3.11)$$

siendo $w_{IH} = (9h + w)$ = contenido en vapor de agua de los humos en forma de humedad total, expresado como kg de agua en los humos por kg de combustible tcsq; w = humedad libre o superficial del combustible (la que se elimina por secado al aire a temperatura ambiente) en tanto por uno en peso, y se ha tomado el valor de 2500 kJ/kg para aproximar el calor de condensación y enfriamiento del agua a temperaturas próximas a 0°C.

Debe tenerse en cuenta además, que si los humos salen de la instalación a temperatura distinta y superior a 0°C, es evidente que estos humos se llevan parte del calor generado en la combustión, dependiendo la cuantía de esta parte, del calor específico, masa y temperatura de cada uno de los productos de la combustión, por lo que si se descuenta al Pci el calor sensible de los humos quedará la cantidad de calor útil que realmente puede ser utilizada.

También puede utilizarse directamente la **formula derivada de Dulong**:

$$P_{ci} = 33100 c + 120600 (h - o/8) + 9600 s - 2500 w_{TH} \text{ kJ/kg combustible tcsq} \quad (3.12)$$

donde $w_{TH} = (9h + w)$ = contenido en vapor de agua de los humos en forma de humedad total, expresado como kg de agua en los humos por kg de combustible, se ha supuesto que los humos se abandonan alrededor de unos 100°C y se tiene en cuenta la condensación de la humedad del combustible

La fórmula de Dulong da buenas aproximaciones con bajos contenidos en material volátiles. Para carbón con contenidos medios y altos de material volátiles se emplea la **fórmula de Vondracek (I)**:

$$P_{cs}'' = [32900 + 3700(1 - c'')^{1/4}] c'' + 90000 (h'' - 0,1 o'') + 10500s'' \quad (3.13)$$

en kJ/kg de material combustible (sin cenizas ni humedad).

Muy empleada para carbones con $0,45 \leq c'' \leq 0,90$ es la **formula de Vondracek (II)**:

$$P_{cs}'' = (37300 - 2600 c'') c'' + 113000 (h'' - 0,1 o'') + 10500 s'' \quad (3.14)$$

también en kJ/kg de material combustible.

Las relaciones entre los poderes caloríficos superiores calculados con las distintas bases de análisis, pueden obtenerse como sigue:

$$P_{cs} = (1 - w) \cdot P_{cs}' \quad P_{cs} = (1 - a) \cdot P_{cs}^a \quad P_{cs} = (1 - w - a) \cdot P_{cs}'' \quad (3.15)$$

A partir del análisis inmediato, es posible calcular el poder calorífico por fórmulas aproximadas, como la **fórmula de Goutal**:

$$P_{cs} = 4,1868 (82 CF + \alpha V) \text{ kJ/kg de combustible} \quad (3.16)$$

siendo:

CF = contenido en carbono fijo en tanto por ciento en peso

α = poder calorífico superior de los volátiles en kcal/kg, dividido por 100

V = contenido de volátiles en tanto por ciento en peso

Goutal tabula α en función del contenido de volátiles en tanto por ciento del combustible puro V'' (combustible supuesto sin cenizas ni humedad total):

V''	5	10	15	20	25	30	35	40	55
α	150	130	117	109	103	96	89	80	70

Tabla 3.2 Valores del coeficiente " α " en la fórmula de Goutal

donde:
$$V'' = 100 V / (V + CF) \quad (3.17)$$

Como se ve en la tabla, el poder calorífico de los volátiles disminuye al aumentar su proporción. Ello es debido a que una parte de los volátiles está constituida por combinaciones de oxígeno y nitrógeno, no combustibles.

Para cada tipo de carbón se establece la curva apropiada a partir de los análisis elementales que se repiten periódicamente para ir corrigiendo según varía el origen del carbón.

El inconveniente principal de la fórmula de Goutal estriba en la inexactitud de la determinación del carbono fijo y de las materias volátiles, por lo que sólo debe aplicarse cuando se desee conocer de forma aproximada el poder calorífico de un combustible sólido, no debiendo aplicarse nunca para un balance térmico.

La relación entre % de materias volátiles V y los tanto por uno en peso de c y h (h_L =hidrógeno libre) obtenidos en el análisis elemental es “*de forma aproximada*” la siguiente:

$$V = 1061 h_L - 124 c + 84,15 \quad (3.18)$$

A partir de V (en %) y Pcs (kJ/kg) se pueden determinar también “*de forma aproximada*” los contenidos de hidrógeno y carbono

$$c = (Pcs / 71.000) - (V / 462) + 0,434 \quad (3.19)$$

$$h = (Pcs / 607.000) + (V / 1.450) - 0,0286 \quad (3.20)$$

Para calcular el poder calorífico también se emplea la **fórmula de Schuster**

$$Pcs'' = 33500 + V'' (293 - 6,91 V'') \text{ kJ/kg de material combustible} \quad (3.21)$$

Evidentemente se tiene que

$$Pcs = Pcs'' (1 - w - a) \text{ kJ/kg de combustible tcsq} \quad (3.22)$$

aunque para mayor precisión se suele corregir con el **factor de Schaff, f**, resultando

$$Pcs = Pcs'' (1 - w - f a) \text{ kJ/kg de combustible tcsq} \quad (3.23)$$

con un valor medio de $f = 1,1$ para las hullas, y variando entre 0,63 y 0,95 para los lignitos, siendo igual a la unidad para el coque metalúrgico

En el Tabla 3.3 (En el anexo), se recogen los poderes caloríficos inferiores medios de los carbones, y los intervalos de variación de sus componentes en el análisis inmediato.

El poder calorífico se mide con instrumentos llamados **calorímetros** que son recipientes en los que se realiza la combustión y están dispuestos de forma que se pueda medir la elevación de temperaturas de masas cuya capacidad calorífica es conocida. Para sólidos y líquidos se utiliza el calorímetro de Emerson o la bomba Maiher y para gases se utiliza el calorímetro Junkers

3.3.3 Estudio de las cenizas

Se llama **cenizas**, al residuo resultante de la combustión completa de un combustible. Las cenizas pueden clasificarse en dos tipos bien diferenciados, las cenizas *inherentes* y las *adventicias*.

Las **cenizas inherentes** proceden de las materias sólidas, no combustibles, contenidas en los vegetales y animales origen de los combustibles. A estas se unen las **cenizas adventicias** que proceden de las materias minerales estériles que llevan frecuentemente mezclados los combustibles y que han sido añadidas durante los procesos de extracción.

Como se acaba de ver, las cenizas proceden de la materia mineral estéril constituyente de las materias vegetales ó animales que dieron lugar a los combustibles, así como de las añadidas en los procesos de extracción, pudiendo diferenciarse por tanto en:

- Materia mineral que forma parte de los tejidos vegetales, íntimamente mezclada con la materia orgánica, en proporción inferior al 1%, es la **materia mineral de constitución**.
- Materia mineral procedente de esqueletos animales y de sedimentos depositados en el curso de la formación del combustible, finamente dispersos en el seno de la materia orgánica, es la **materia mineral de depósito**.
- Materia mineral extraña a la materia orgánica, procedente de rocas intercaladas en los depósitos o venas de combustible, en el caso de combustibles sólidos puede ser separada, al menos en gran parte durante los procesos de lavado, es la **materia mineral de extracción**.

La materia mineral está constituida por minerales complejos, en los que dominan generalmente los silicatos hidratados (arcillas y esquistos) y los carbonatos (de calcio, hierro, etc.), con menores cantidades de sulfuros (piritas) y de sulfatos, así como de sales alcalinas.

De hecho, el contenido en materia mineral que se obtiene en el análisis de un carbón, es inferior al real, en un orden del 10 al 12%, debido a que en el curso de la combustión, las materias minerales pierden sus constituyentes volátiles o combustibles, (agua de hidratación de las arcillas y esquistos, dióxido de carbono de los carbonatos, azufre de los sulfuros minerales).

La diferencia entre la materia mineral inicial y las cenizas recibe el nombre de **pérdida al fuego**. A partir de 400 °C las arcillas y esquistos bituminosos pierden su agua de cristalización y el carbonato de hierro comienza a descomponerse liberando dióxido de carbono. Este proceso continúa

con los carbonatos de magnesio y de calcio. En atmósfera oxidante el azufre de las piritas desaparece bajo forma de anhídrido sulfuroso y el hierro se oxida.

El conjunto de estas pérdidas responde a la media del 10% de la masa inicial de materia mineral, pero esta cifra puede ser ampliamente sobrepasada en determinados carbones.

Las cenizas reducen el poder calorífico del combustible y por tanto el rendimiento térmico de un horno o caldera debido a que las cenizas y escorias dificultan la transmisión de calor, bajando la temperatura de combustión y reduciendo la cantidad de calor que podría extraerse de un carbón, a la vez que dificultan el contacto entre combustible y comburente, presentando en general el inconveniente adicional (si funden a temperaturas relativamente bajas), de formar escorias que pueden atacar las paredes refractarias de los hogares. La presencia de piritas, en los carbones, agudiza el problema de ataque al refractario, ya que en determinadas condiciones se produce ácido sulfúrico. Su eliminación de los hogares resulta costosa. Si se quema el carbón en hogares de parrilla, además de las consideraciones anteriores, las cenizas reducen el tiro, causan una combustión irregular y pueden estropear la parrilla si se producen escorias en cantidad suficiente.

Su presencia encarece el proceso de combustión porque aumenta la proporción de inquemados, el desgaste de haces tubulares, molinos y ventiladores, así como los gastos de eliminación de polvo y escoria, disminuye la capacidad de las parrillas, y, en general, también encarece la construcción de la caldera. Especialmente es de notar que un elevado contenido de cenizas encarece el transporte de carbón.

El estudio de las cenizas es muy importante para predecir el comportamiento del combustible. Para ello se definen dos propiedades, la fusibilidad y el poder aglutinante, que es preciso analizar para conocer con la mayor exactitud posible su comportamiento durante la operación de combustión.

- La **fusibilidad** ó temperatura de fusión de las cenizas es importante desde el punto de vista del mantenimiento del combustible sobre las parrillas o para el correcto funcionamiento de los hogares de lechos fluidos. Las cenizas demasiado fusibles se aglomeran y obstruyen los pasos de aire, atacan las barras y envuelven el material combustible que es arrastrado inquemado. Las cenizas poco fusibles no valen para hogares de lechos fluidos. Igualmente es importante para la conservación de los haces tubulares pues las cenizas volantes se adhieren a los tubos si su estado es viscoso.

La temperatura de fusión de las cenizas, depende fundamentalmente de su composición, siendo la alúmina la que proporciona un punto de fusión más alto, mientras que la existencia de óxidos de manganeso, de hierro, etc. en las cenizas, reducen la temperatura de fusión. Algunos carbones al quemarse muestran una cierta tendencia a producir escorias de gran tamaño, debido básicamente al óxido férrico que contienen y que durante la combustión se reduce a óxido ferroso, que se combina con las cenizas.

- El **poder aglutinante** es importante para juzgar la capacidad del carbón para mantenerse sobre la parrilla el tiempo suficiente para su apropiada combustión. Se ensaya preparando un cilindro de carbón pulverizado amasado con arena y glicerina, que se coquifica. La carga de rotura caracteriza bien el poder aglutinante.

2.3.4. Temperaturas de inflamación e ignición

Los combustibles sólidos no inician la combustión en el aire por debajo de determinada temperatura, distinta para cada combustible, denominada **temperatura de inflamación**, que se define como la menor temperatura a la que se inflaman los vapores emitidos por el carbón al ponerlo en contacto con una llama que si es retirada no hace posible mantener la combustión. En el caso del carbón, el proceso que tiene lugar cuando se calienta, es el siguiente; pérdida de humedad, destilación de volátiles, descomposición de estos en moléculas sencillas y principio de la combustión. Los gases simples (H_2 , CH_4 , CO) tienen puntos de inflamación relativamente altos (580 a 750 °C), el del coque está entre 400 y 700 °C, mientras que en los alquitranes, se sitúa entre 200 y 300 °C. Además el encendido puede aparecer en distintos momentos según sea la descomposición de los gases, es por tanto un fenómeno muy complejo. La temperatura de inflamación depende también del tamaño de los granos de combustible, y en general, es de unos 250°C para los lignitos y hacia 500°C para las hullas.

Se denomina **temperatura de ignición**, a la temperatura, superior a la de inflamación, a la que la llama originada por la combustión de los vapores inflamables es duradera y persistente.

Nos determinan la cantidad mínima de energía a aportar a un carbón para que se encienda, energía que se suele aportar con un combustible de apoyo, principalmente en los grandes hogares.

3.3.5. Propiedades físicas del carbón

Propiedades reológicas del carbón. Proporcionan información sobre el comportamiento del carbón durante su preparación para su combustión:

- **Dureza**

Indica su resistencia a la abrasión producida en el rozamiento con otros materiales en un movimiento de deslizamiento. Es una propiedad que influye en los molinos y demás instalaciones, produciendo desgastes importantes. Se determina con el ensayo de dureza Heywood : Pirita 5,71 ; Antracita 1,75 ; Hulla antracitosa 1,10 ; Hulla vaporosa 0,29. Asimismo, puede medirse mediante ensayos de microdureza, como el ensayo Vickers a nivel microscópico, que consiste en medir la huella creada por un penetrador.

- **Abrasividad**

Mide el poder de desgaste sobre paredes metálicas (de tolvas, molinos, conductos, quemadores, etc.). Tiene una gran significación económica y esta ligada a la dureza del carbón y a su composición, principalmente a la existencia de impurezas más que por el carbón mismo. Como elementos más

abrasivos se encuentran la pirita, sílice y arenisca, que podrán acompañar al carbón según su naturaleza.

- **Resistencia a la compresión**

Es importante ya que nos determina la cantidad de carbón que puede apilarse en tolvas y parques. Los valores medios están entre 250 y 750 kg/mm².

- **Cohesión, friabilidad y fragilidad**

Marcan la degradación, es decir, el paso a granulometrías menores por impacto o rozamiento.

La medida de la cohesión y la friabilidad, f, están relacionadas por:

$$\text{Cohesión (\%)} = 100 - f (\%)$$

Cuando T es el tamaño inicial y t el tamaño final, la friabilidad viene dada por:

$$\%f = 100 \cdot (T-t)/T$$

- **Triturabilidad, molturabilidad o grindabilidad**

Es una propiedad que marca la facilidad con la cual puede molerse o pulverizarse un carbón, para su uso en quemadores.

La Ley de Rittinger es la medida de la triturabilidad ("el aumento de superficie al moler es directamente proporcional a la energía empleada"). En general, la molturabilidad depende básicamente del contenido en volátiles del carbón.

En la **figura 3.5** (En el Anexo) se recoge la relación entre contenido en volátiles y molturabilidad.

Para su medición se realiza el ensayo de Hardgrove, norma UNE 32106, el cual nos proporciona un índice característico, denominado **Índice de Hardgrove**, cuya determinación se verifica así:

En un molino de bolas de laboratorio, de características definidas, se muele una muestra de carbón previamente calibrada entre 0,6 y 1,2 mm y se compara el resultado obtenido, expresado por la fracción que atraviesa un tamiz de malla 74 μ , con la fracción dada por el carbón de referencia, que tiene por índice 100.

Este índice es de gran importancia práctica, ya que el caudal de un molino industrial de carbón es sensiblemente proporcional al índice de Hardgrove

- **Finura de molienda**

La finura de molienda se valora haciendo pasar una muestra de carbón pulverizado por un tamiz de un determinado ancho de malla. El residuo retenido en el tamiz se denomina **rechazo** y se expresa en tanto por ciento del peso total de la muestra. La finura óptima de molienda depende del contenido en materias volátiles del carbón.

El tamiz normalmente usado en España para el carbón pulverizado es el DIN 0,09, que tiene un ancho de malla interior de 90 micras.

3.4. CLASIFICACIÓN DE LOS DISTINTOS TIPOS DE CARBÓN. Norma ASTM.

Una de los sistemas de clasificación del carbón más utilizados a nivel industrial es la del ASTM (American Society for Testing Materials), pues las propiedades utilizadas para clasificar el carbón por este sistema son muy sencillas de determinar (básicamente análisis inmediato y poder calorífico) y la terminología derivada de esta norma (antracita, bituminoso, subbituminoso, lignito) es de uso muy extendida.

En la norma ASTM D 388-92a los carbones son clasificados según su rango en orden decreciente (en cuatro rangos, antracitas, bituminosos, subbituminosos y lignitos) según su %CF'' (en base seca y sin cenizas), %V'' (en base seca y sin cenizas) y Pcs'' (sin humedad libre y sin cenizas) y su carácter aglomerante. No todas las propiedades se utilizan para definir todos los rangos. Los carbones se clasifican en antracíticos y bituminosos de bajo y medio contenido en V de acuerdo con su %CF y contenido en V. Si el CF es menor del 69%, se clasifican en bituminosos de alto contenido en volátiles, subbituminosos o lignitos según su poder calorífico inferior. Sin embargo, no todos los carbones existentes pueden clasificarse así (como se reconoce explícitamente en la misma norma), ya que puede ocurrir, que ciertos tipos de carbones no cumplan las condiciones definidas para ningún rango, pues la variabilidad de las propiedades del carbón es muy grande, y existen grandes diferencias tanto en composición como poder calorífico entre carbones procedentes de distintos yacimientos y, en casos extremos, entre distintas vetas del mismo yacimiento.

El rango es una descripción cualitativa de la madurez geológica o grado de carbonificación y no una propiedad objetiva, existiendo diversidad de opiniones acerca de qué parámetros medibles del carbón indican mejor su rango. El **carácter aglomerante** referido al carbón, según indica la misma norma, es la propiedad de reblandecerse una masa de carbón cuando se calienta hasta temperaturas de unos 400°C en una atmósfera no oxidante y presentar un aspecto de masa sólida cuando la misma muestra se enfría a temperatura ambiente.

En la tabla 3.4 (en el Anexo) se reproduce la clasificación ASTM de los carbones según su rango.

A efectos de calcular el Pcs, el contenido en volátiles y el carbono fijo a partir del análisis inmediato, la norma propone unas fórmulas que difieren un poco de las mostradas en las expresiones (3.5) y (3.15) para cambiar de base el análisis inmediato, y que se muestran a continuación. Se llaman **fórmulas de Parr**, y contienen diversas correcciones, para tener en cuenta que parte del azufre y el agua de constitución de algunos minerales que forman las cenizas, se han eliminado durante la combustión de la muestra para el análisis elemental.

La validez de estas correcciones para cualquier tipo de carbón es discutible, y también podrían hacerse correcciones parecidas de otros conceptos. Sin embargo, si aparecen explícitamente en las normas deben utilizarse en caso de litigio para la determinación del rango. Las **fórmulas de Parr** son:

- **Carbono fijo en base seca y sin cenizas, CF''_{ASTM}** .

$$CF''_{ASTM} = \frac{CF - 0,15s}{1 - (w + 1,08.a + 0,55.s)} \quad (3.24)$$

- **Volátiles en base seca y sin cenizas, V''_{ASTM}** : se calcula por diferencia con el carbono fijo corregido, ya que el carbón en base seca y sin cenizas únicamente se compone en cuanto a análisis inmediato de volátiles y carbono fijo.

$$V''_{ASTM} = 1 - CF''_{ASTM} \quad (3.25)$$

- **Pcs sin cenizas, Pcs^a_{ASTM}** , calculado en BTU/lbm: (1 Btu/lbm = 2,326 kJ/kg).

$$Pcs^a_{ASTM} = \frac{Pcs - 5000.s}{1 - (1,08.a + 0,55.s)} \quad (3.26)$$

3.5. Norma UNE 9-205-87 CÁLCULOS RELATIVOS A LA COMBUSTIÓN

Dada la existencia de diferentes formulas empíricas (como las ya citadas y otras) que conducen a definiciones y valores del poder calorífico no coincidentes, la **Norma UNE 9-205-87** establece las definiciones fundamentales a adoptar por los técnicos, con el fin de unificar criterios sobre los términos y/o conceptos **aplicables en los cálculos relativos a la combustión** de los productos combustibles.

Esta norma se aplicara a la combustión de cualquier combustible industrial sólido, líquido o gaseoso, compuesto por carbono (c), hidrogeno (h), oxigeno (o), nitrógeno (n), azufre (s) y cenizas (a), cuya composición, en tanto por uno en peso, se representa por los símbolos en minúsculas. Esta norma presupone la combustión completa del combustible con un volumen de oxigeno en el aire de combustión superior al estequiométrico.

El poder calorífico de un combustible queda definido por el número de unidades de calor liberadas por la unidad de masa o de volumen del combustible, quemada en un calorímetro en condiciones previamente establecidas. Es decir:

- El poder calorífico de un combustible sólido o líquido es su capacidad de combustión referido a la unidad de masa, que en la practica industrial suele ser el kilogramo; se expresa en kJ/kg.

- El poder calorífico de un combustible gaseoso es la cantidad de calor liberada por la unidad de volumen de dicho gas, y se suele expresar en kJ/m³ de gas en condiciones normales (a 0°C de temperatura y 760 mm de columna de mercurio).

Los valores de poder calorífico que se utilizan normalmente son los siguientes:

Poder calorífico superior (Pcs'). Es la cantidad total de calor de un combustible, incluyendo el calor latente del agua formada por la combustión del hidrogeno contenido en dicho combustible seco.

Poder calorífico inferior (Pci'). Es la cantidad de calor que resulta al restar del poder calorífico superior el calor latente del agua formada por la combustión del hidrogeno contenido en el combustible seco.

Poder calorífico según se quema (Pcq) Es la cantidad de calor correspondiente al peso de combustible seco contenido en 1 kg de combustible tcsq, expresado en kcal en las condiciones en que se introduce en el hogar de combustión.

Poder calorífico útil (Pcu). Es la cantidad de calor que resulta al restar del Pcq el calor necesario para evaporar, en la combustión, la humedad del combustible según se quema.

NOTA: Como la humedad de un combustible es variable según las condiciones en las que llega al hogar, se tomaran como valores característicos de un combustible su Pcs. y Pci. **referidos a base seca**, es decir, exentos de humedad, y serán variables los valores de Pcq y Pcu en función de la humedad total del combustible w, según se quema.

Cálculo del poder calorífico según análisis químico

En el caso de combustibles líquidos o sólidos en base seca, una vez conocida su composición química, y al ser verdaderamente combustibles solo los elementos carbono, hidrógeno y azufre, su poder calorífico superior se puede obtener aplicando la fórmula siguiente:

$$Pcs' = 8000 c' + 34.160 h' + 2.500 s' \text{ kcal/kg comb. seco} \quad (3.28)$$

Y si el valor así obtenido se resta el calor latente del agua formada por la combustión del hidrógeno, se obtendrá el poder calorífico inferior de dicho combustible. Teniendo en cuenta que 1 kg de hidrógeno proporciona 9 kg de agua, y tomando como calor latente de condensación del vapor de agua 600 kcal/kg, resulta:

$$Pci' = Pcs' - (9 \times 600) h' = Pcs' - 5.400 h' \text{ kcal/kg comb. seco} \quad (3.29)$$

Si el combustible según se quema tiene un tanto por uno de humedad (w), la cantidad de combustible real será (1- w) en kg/kg de combustible tcsq, y sus valores Pcq y Pcu vendrán dados por:

$$Pcq = Pci' \cdot (1 - w) \text{ kcal/kg de combustible tcsq} \quad (3.30)$$

$$Pcu = Pcq - 600 \cdot w \text{ kcal/kg de combustible tcsq} \quad (3.31)$$

Los combustibles gaseosos, en la practica industrial, suelen ser mezclas (con componentes tales como H₂, CO, CH₄, C₂H₆, C_mH_n, CO₂, N₂ y O₂). y los poderes caloríficos están relacionados directamente con los correspondientes a cada componente y con su proporción en la mezcla. Así, el Pcs será igual a la suma de los poderes caloríficos superiores de cada componente multiplicados por el tanto por uno de cada componente en la mezcla gaseosa; y para obtener el Pci. de la mezcla se seguirá esta mismo procedimiento, pero utilizando en esta ocasión los poderes caloríficos inferiores de cada uno de sus gases combustibles componentes.

En la tabla 5.1 (del Anexo al capítulo 5) pueden verse expresados los poderes caloríficos superior e inferior de diversos gases combustibles, expresados en kcal/m³N.

3.6. INTERCAMBIABILIDAD DE CARBONES

Cuando se diseña una instalación de combustión para carbón, se parte de un combustible de diseño. Las características del carbón especificado influyen en el diseño tanto de la caldera como de los equipos auxiliares como molinos, ventiladores y sistemas de limpieza de gases.

Como se ha mencionado anteriormente, el carbón no es un compuesto químico bien definido y las propiedades de los carbones pueden variar en un amplio rango. Como ejemplos se pueden citar:

- Pcs de 8.000 a 30.000 kJ/kg
- Los contenidos de humedad, cenizas y volátiles pueden variar del 5 al 40%
- Azufre, del 0,1 al 7%

Las instalaciones industriales en general tienen una vida útil elevada (25 años o más), es posible que se den circunstancias que obliguen a utilizar en la instalación carbones distintos al de diseño. Para evaluar a priori si es posible cambiar un tipo de carbón por otro, el proceso normal es estudiar una serie de propiedades del carbón. Si el combustible parece razonablemente similar, se realizan una serie de pruebas en la instalación para ver si se detectan problemas de operación. Entre las propiedades que se comprueban, las más importantes son:

- *Rango del carbón*: se pueden considerar intercambiables carbones del mismo rango o similar, o bien una mezcla de carbones cuyo análisis corresponda con un rango similar.
- El *poder calorífico* debe ser similar, pues está relacionado con la cantidad de combustible necesaria y por tanto con el dimensionamiento del sistema de transporte y tratamiento del combustible y distribución espacial de temperaturas en el hogar.
- El *contenido en volátiles* debe ser parecido, pues está relacionado con la facilidad de ignición del carbón y con la característica de la llama.
- El *contenido en ceniza* debe ser tal que sea posible la evacuación de la misma por el sistema existente.
- La *humedad* del carbón tiene influencia en el funcionamiento del sistema de molienda y en la capacidad de secado del combustible.
- *Triturabilidad* del carbón (facilidad para ser molido). Si ambos carbones presentan un índice de Hardgrove similar (tritabilidad similar), puede suponerse un tamaño semejante del carbón pulverizado, en la instalación de molienda existente. Si el índice de Hardgrove del carbón sustituto fuera menor, el tamaño de carbón pulverizado será mayor, con los consiguientes problemas relacionados con la producción de inquemados. Sin embargo, la utilidad de este índice es muy discutible, ya que las condiciones del ensayo no reproducen la situación real en la instalación.

- *Temperatura de fusión de las cenizas*: La propensión de las cenizas y la escoria a fundirse producen ensuciamiento de las superficies de transferencia de calor. Si las cenizas del carbón alternativo presentan menores temperaturas de fusión que las del carbón original, existe la posibilidad de mayor ensuciamiento. En todo caso se trata de nuevo de un ensayo de laboratorio y no está claro hasta que punto reproduce las condiciones reales de funcionamiento.
- *Propiedades eléctricas de la ceniza*. Si la ceniza es de alta resistividad, pueden aparecer problemas si el sistema de limpieza de gases es un precipitador electrostático.
- El *contenido en azufre* del carbón sustituto, debe estar en un rango tal que la emisión de SO₂ cumpla con la normativa vigente, con los equipos de limpieza de gases disponibles. Si aumenta el contenido de azufre también puede reducirse la temperatura de rocío ácido, y, si en el circuito de recuperación de calor se alcanzan temperaturas lo suficientemente bajas, puede condensar ácido sulfúrico y producir problemas de corrosión.

3.7. ALMACENAMIENTO, PREPARACIÓN Y TRANSPORTE DEL CARBÓN

El almacenamiento, la preparación y el transporte de los combustibles comprende las etapas necesarias a efectuar en la planta consumidora, para recepcionar el combustible, almacenarlo y situarlo en las condiciones técnicas (de granulometría, presión, temperatura o viscosidad) requeridas por el quemador con objeto de conseguir una combustión lo más optimizada posible.

Se indican a continuación los elementos y equipos que constituyen una instalación completa para los combustibles habituales. Esta instalación es diferente según sea el combustible, pudiendo variar desde una instalación simple como la necesaria para el gas natural, hasta una instalación compleja como la que corresponde al fuelóleo, o todavía más compleja como es el caso de un combustible sólido como el carbón.

El carbón debe almacenarse con objeto de poseer reservas suficientes que permitan el funcionamiento normal de la instalación, ya que es difícil, por no decir imposible que el combustible llegue al mismo ritmo con que se consume, a este inconveniente debe añadirse, que si la instalación trabaja en forma continua, es necesario prever el consumo nocturno y el del fin de semana, así como las variaciones que se producen en el consumo a lo largo del periodo de funcionamiento. Debe analizarse también la seguridad de suministro y su uniformidad que depende fundamentalmente de la distancia y el medio de transporte, (ferrocarril, camión, cintas transportadoras, etc.), a lo que en ocasiones debe añadirse la distribución local.

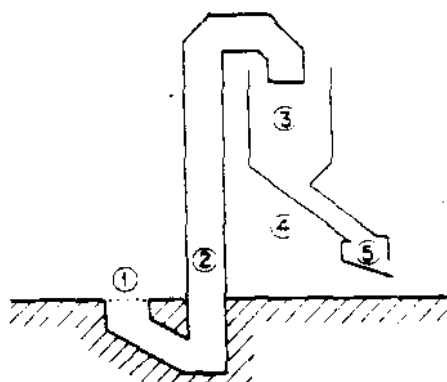
Es evidente que el coste del transporte puede llegar a ser una parte importante del coste total del combustible, motivo por el cual las grandes instalaciones consumidoras de carbón se ubican en las proximidades de las minas, con medios de comunicación adecuados, con lo que se consigue paliar en parte los efectos de las posibles irregularidades y costos del transporte.

3.7.1. El movimiento y manejo del carbón

Los problemas implicados en el manejo de combustibles sólidos han aumentado al aumentar el tamaño de las plantas consumidoras, y aunque las operaciones a realizar en una planta pequeña y en una grande son similares, los métodos pueden variar.

La descarga es una operación sencilla cuando el carbón está seco, si la humedad superficial es alta, se tendrán que utilizar atizadores por la parte superior de la carga, para poder comenzar a mover el carbón. Si además de ser la humedad alta, la temperatura es muy baja, el carbón se puede congelar, convirtiéndose en una masa compacta; en este caso pueden emplearse sistemas de calentamiento, que utilizan vapor, aceite caliente, etc.; sistemas mecánicos, como la "barra de cizalla", que se eleva mecánicamente y se deja caer libremente sobre la masa de carbón para quebrarla, ó bien se transmite una acción vibratoria al vehículo de transporte con el mismo objeto, Si por el contrario la temperatura es alta, un viento fuerte puede arrastrar los finos de carbón, para evitarlo se emplean pulverizadores de aceite a fin de fijarlos al resto del carbón. Los aceites empleados no influyen en la combustión.

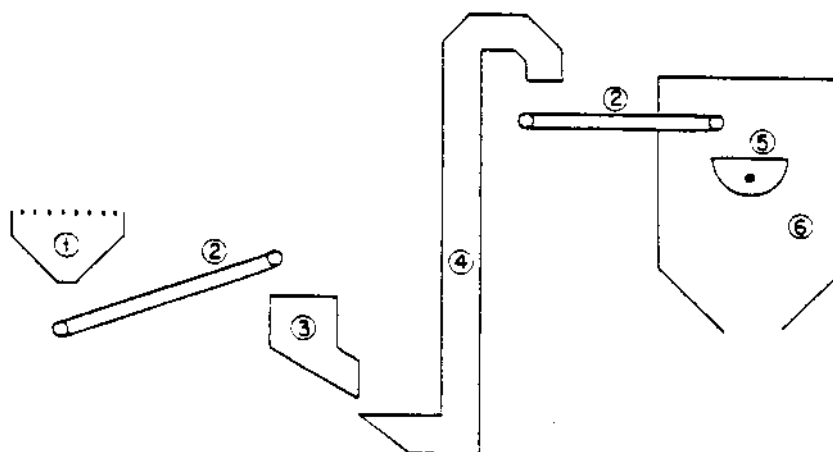
El tamaño de la planta, junto a razones económicas, define el grado de mecanización de la instalación. El movimiento de carbón, en plantas pequeñas se realiza mediante cintas transportadoras ó tornillos sin fin, tanto para la descarga de vehículos, como para el llenado de silos, con auxilio de la mano de obra necesaria. En plantas que consumen más de 10 t/día, es necesaria la mecanización total, constituida por una tolva de entrada, un elevador hacia el silo, y un alimentador del hogar, como se indica en la figura 3.6; si además existe un molino de combustible, es necesario colocar un separador magnético.



1. Tolva de entrada, con parrilla.
2. Elevador.
3. Silo,
4. Alimentador.
5. Tolva alimentación hogar

Fig. 3.6

En plantas más grandes se incluyen además un quebrantador, un separador magnética y un silo dividido en varios compartimentos, figura 3.7, que se alimentan mediante un transportador de tornillo que distribuye el carbón a lo largo del silo.



- | | | |
|-----------------------|-----------------|------------------------------|
| 1. Tolva con parrilla | 3. Quebrantador | 5. Transportador de tornillo |
| 2. Alimentador | 4. Elevador | 6. Silo de compartimento |

Fig. 3.7

En plantas muy grandes, con consumos de más de 3000 t/día, la instalación es básicamente la misma, incluyendo una báscula.

3.7.2 Almacenamiento exterior

En las grandes instalaciones consumidoras de carbón, éste no puede pasar directamente al silo ó silos de almacenamiento, sino que queda en el exterior, sometido a la acción de los agentes atmosféricos.

En este caso, los cambios que pueden afectar al carbón almacenado son:

- Pérdida en el valor térmico con reducción del valor de coquización.
- Reducción del tamaño medio de las partículas.
- Aumento de la temperatura de ignición.
- Pérdidas por combustión espontánea.
- Pérdidas por erosión del viento y del agua.

Oxidación del carbón

Todos los constituyentes del carbón comienzan a oxidarse superficialmente, cuando están expuestos al aire, por absorción de oxígeno. Esta absorción de oxígeno va acompañada de un desprendimiento de calor y aumento de temperatura; la elevación de temperatura se cree que es debida una reacción exotérmica en cadena, aunque hay evidencias de que la acción de las bacterias produce también la elevación de temperatura.

Esta elevación de temperatura es lenta inicialmente y puede llegar a ser imperceptible si existe una buena ventilación que disipe el calor desprendido. A medida que aumenta la temperatura crece la velocidad de absorción del oxígeno, aumentando con ello el desprendimiento de calor y por

consiguiente la temperatura. En este proceso de calentamiento existe una **temperatura crítica**, (que varía según las condiciones entre 50 y 80°C), a partir de la cual la temperatura sigue creciendo de una manera rápida e irreversible, hasta producir la combustión espontánea. Sin embargo, normalmente se alcanza el equilibrio, al igualarse las cantidades de calor producidas y las disipadas, a una temperatura inferior a la crítica. En esas condiciones la temperatura se estaciona y a continuación comienza a descender, al disminuir la cantidad de oxígeno absorbido. Por debajo de la temperatura crítica no se forman cantidades apreciables de óxidos de carbono, mientras que por encima comienza un desprendimiento apreciable de óxidos de carbono y de vapor de agua que dan origen a una combustión lenta.

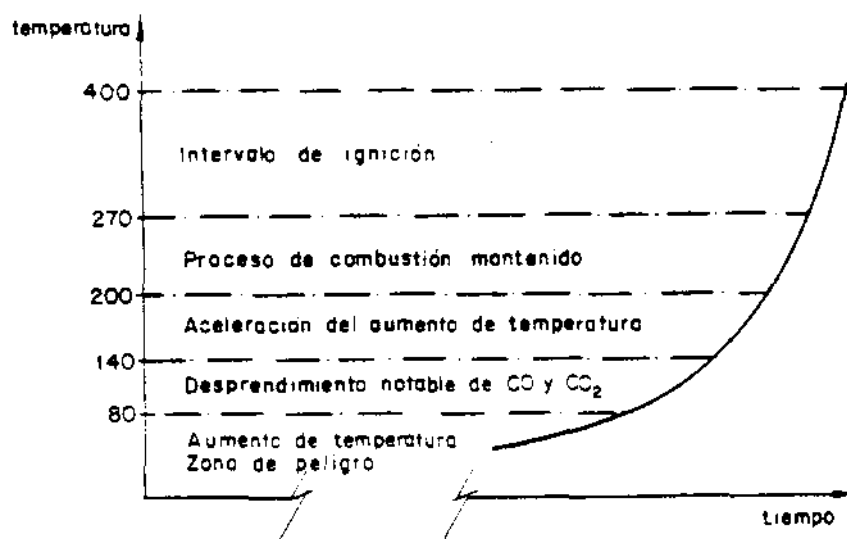


Fig. 3.8. Oxidación de una muestra de carbón fino calentado externamente y expuesto a una corriente de aire

La oxidación del carbón depende; (1) del tipo de carbón, (2) del tamaño de éste y del área superficial, (3) de la temperatura ambiente, (4) de los constituyentes del carbón, (piritas, cenizas, humedad), y (5) de la duración del almacenamiento.

- (1)- Los carbones que, como la antracita, contienen poco oxígeno y se oxidan lentamente, mientras que los que tienen alto contenido de oxígeno, como la turba, se oxidan fácilmente.
- (2)- La oxidación del carbón es esencialmente una acción superficial, bajo este punto de vista, el carbón de tamaño más fino ofrece mayor superficie que la misma cantidad en tamaños más gruesos.

La disipación del calor producido se realiza mediante el aire que atraviesa el carbón almacenado por ventilación natural, de lo que se deduce:

- Las pilas de carbones gruesos ofrecen poca superficie y buena ventilación, no presentando problemas de autocombustión.

- Las pilas de carbón fino ofrecen mucha superficie y poca ventilación, además el aire no encuentra un paso regular, por lo que la ventilación natural es deficiente, existiendo por tanto peligro de combustión espontánea, este peligro puede eliminarse de dos formas:

- Estableciendo una ventilación adecuada y suficiente, lo que es difícil.
- Eliminando toda ventilación, con lo cual cesa el proceso por falta de oxígeno.

Sin embargo no se recomienda la supresión de la ventilación en los montones pequeños ó de poca altura, pues entonces las condiciones de ventilación son buenas. El último razonamiento es válido también para las mezclas de carbonos gruesos y finos, ya que los finos decantan, produciéndose entonces una ventilación natural adecuada en las zonas de carbón grueso y existiendo en la zona de finos el peligro reseñado anteriormente. El carbón fino almacenado, ó con gruesos uniformemente repartidos en capas sucesivas, presenta menos peligro de combustión espontánea que la mezcla de diferentes tamaños.

(2)- *Reducción del tamaño medio de las partículas.* La acción atmosférica sobre el carbón almacenado produce una degradación del carbón en cuanto a tamaños, apareciendo trozos más pequeños, y finos, que en consecuencia provocan un aumento de superficie. Esta desintegración no continua indefinidamente, sino que llega hasta un determinado grado debido a la disposición del carbón en los diferentes planos de almacenado.

(3)- *Pérdidas de potencia calorífica y poder coquizante.* Si un carbón almacenado se calienta normalmente, la pérdida de poder calorífico es sólo del 0,5 al 1% por año; sin embargo cuando se calienta de forma anormal, la pérdida de poder calorífico puede alcanzar valores notables. La explicación de esta pérdida se encuentra en la actualidad limitada a la reducción de tamaño que se produce en el almacenado y que aumenta posteriormente las pérdidas a través de las parrillas.

El poder coquizante de un carbón, disminuye rápidamente en el almacenamiento al perder volátiles, su disminución es mayor durante los tres primeros meses que posteriormente, existiendo además una nueva disminución al aumentar la temperatura.

(4)- Las piratas reaccionan con el oxígeno y el agua, formando ácido sulfúrico, y sulfato de hierro, desprendiendo calor. Este proceso se cree que acelera más la degradación del carbón en cuanto a tamaños, que el aumento de temperatura ó que la acción atmosférica.

Los carbonos que se almacenan secos pueden absorber humedad del ambiente, en este proceso de condensación se desprende calor, que puede acelerar el proceso de oxidación. Por otro lado un carbón con alto contenido en cenizas posee menos tendencia a oxidarse que el mismo carbón con bajo contenido en ellas.

(5)- *Duración del almacenado.* La combustión espontánea en un parque de almacenamiento se suele presentar entre el primer y cuarto mes después de producido el almacenamiento. Sin embargo,

para poder considerar que no existe peligro de combustión espontánea, deben transcurrir un mínimo de ocho meses y no existir calentamiento apreciable.

Como el proceso de deterioro tiene la máxima intensidad en los primeros meses, decreciendo luego, resulta evidente que debe emplearse en primer lugar el carbón recién llegado con lo que se evitarán las pérdidas reseñadas anteriormente, a la vez que se consigue un ahorro de tiempo y costo al no tener que manipular el carbón almacenado.

En resumen:

- Es más fácil almacenar carbón con bajo contenido de oxígeno, como las antracitas.
- En climas cálidos es difícil almacenar lignito de tamaño pequeño con alto contenido de piritas.
- El carbón recién quebrado ó molido se oxida fácilmente.
- Para evitar la combustión espontánea, el calor procedente de la oxidación del carbón se debe mantener a bajo nivel ó eliminarse.
- Una vez que se establezca una pila segura, el grado de oxidación disminuye notablemente.

Elección del suelo

Se han analizado hasta el momento los inconvenientes que presentan los parques de almacenamiento y las causas que los producen, a continuación se analizarán las condiciones que deben cumplir para disminuir al máximo estos inconvenientes.

El suelo ideal es de hormigón, arcilla dura, ceniza ó yeso muy compactado, pues el suelo debe ser firme y sin material de relleno suelto, nivelado y con un buen drenaje. El lugar debe estar protegido de los vientos reinantes, las mareas, los desbordamientos de los ríos y a ser posible de la humedad. Así mismo, el suelo debe quedar completamente limpio antes de almacenar el carbón, eliminando todo tipo de materia vegetal y de restos orgánicos que puedan ser causa de una combustión espontánea. Finalmente, el lugar elegido no debe estar cruzado por tuberías de fluidos calientes, (vapor, agua sobrecalentada, etc.), ni tuberías de gases a presión ó de otros combustibles.

Almacenamiento de carbón en cantidades pequeñas

Se realiza normalmente en pilas cónicas, cuyo peligro de combustión espontánea proviene más de la altura de la pila que de la masa de carbón acumulada.

Cuando el almacenamiento es mayor, las pilas se realizan de forma alargada, con el eje longitudinal en sentido de la dirección predominante del viento, para reducir la ventilación.

La antracita en partículas, no requiere ninguna precaución especial, pudiendo llegarse a pilas de 9m. de altura. Los carbones bituminosos y similares se clasifican normalmente por tamaños antes de formar las pilas, que pueden alcanzar alturas de hasta 5m., aunque la altura idónea es de 2,5 a 3m., ya que entonces se encuentra dentro del marco de las condiciones de seguridad, pero a pesar de esto sufrirán una degradación en cuanto a tamaños, así como pérdidas en el poder calorífico y en el poder

de coquización. Los tamaños menudos de carbón bituminoso, una vez apilados, deben compactarse mediante la maquinaria adecuada.

Los carbones del tipo del lignito se deben almacenar en pequeños montones y ser completamente compactados; solamente en caso de almacenamiento para menos de dos ó tres meses, pueden formarse pilas sin compactar, pero tratándolas con aceite pesado, en razón a 5 litros por tonelada.

Cuando entra carbón nuevo en un parque de almacenamiento, aquel se puede acumular sobre las pilas ya existentes, siempre que ya hayan sobrepasado el momento crítico; en general la altura puede incrementarse en 0,5m. por cada tres meses de almacenamiento estático.

Para evitar la ventilación natural al máximo posible, se suele recurrir a encerrar las pilas de carbón en el interior de recintos construyendo tabiques con los trozos más grandes de carbón, y en almacenamientos permanentes se llegan a construir tabiques bajos, de mampostería, alrededor de las pilas, con el mismo objeto.

Almacenamiento de carbón en grandes cantidades

La antracita es un carbón muy seguro que se puede almacenar en grandes pilas que por si solas admiten el drenaje; el apilamiento debe terminarse con los tamaños más grandes para evitar pérdidas.

El carbón bituminoso debe almacenarse en múltiples capas horizontales con un espesor, cada una, de 30 a 60 cm. y que deben compactarse a fin de eliminar las posibles bolsas de aire, mediante motoniveladora. La cumbre y las laderas del almacenamiento se cubren con una capa unos 30 cm., de finos, distribuida uniformemente, para evitar la ventilación natural, pudiéndose reducir ésta, aun más, humedeciendo esta capa, pues el agua rellena los espacios por los que puede pasar el aire. Sobre esta capa se coloca una última, también de unos 30 cm., de espesor, constituida por trozos de carbón bituminoso de gran tamaño.

El lignito se almacena de la forma indicada para el carbón bituminoso, con la salvedad de que las capas no deben sobrepasar los 30 cm., de espesor, para asegurar una buena compactación. Con este tipo de carbón debe revisarse periódicamente el almacenamiento para mantenerlo en las condiciones adecuadas.

Atenciones del almacenamiento

La combustión espontánea se produce de 1 a 2 m. de la superficie del carbón, en lugares donde la ventilación es superficial y el espesor de la capa evita la disipación del calor, por ello, deben tomarse temperaturas en distintos puntos con una frecuencia semanal, al menos durante los cuatro primeros meses del almacenamiento, debiendo construirse, con dichas temperaturas, gráficos que permitan seguir su evolución con el tiempo, para poder determinar si se sobrepasa ó no la temperatura crítica.

En todo caso, debe realizarse una inspección visual diaria, para comprobar que no existen puntos calientes en el almacenamiento; cuando el clima es húmedo ó ha llovido, las zonas calientes se detectan por: Un secado rápido de la superficie, y un color más claro del carbón superficial. En un día húmedo o frío, columnas de vapor y olor a gas son señales de un calentamiento ó de una entrada de aire.

En el caso de que se detecte una elevación excesiva de temperatura, se pueden tomar las siguientes medidas:

- Pulverizar agua sobre la zona afectada durante varios días.
- Introducir agua por medio de mangueras, con objeto de llegar al foco caliente.
- Cubrir la cumbre y la ladera próxima al punto caliente con una capa hermética de asfalto, para evitar la entrada de aire.

Si no se consigue con estas medidas bajar la temperatura, se debe extraer el carbón caliente y esparcirlo en el suelo, cuando no se puede usar inmediatamente; posteriormente puede volverse a almacenar.

3.7.3. Silos

Su misión no es solo almacenar el carbón, sino también operar eficazmente como parte del sistema, para un suministro continuo de combustible al hogar. Su capacidad debe ser para una carga máxima de 30 horas de trabajo, pero cuando la instalación esta automatizada y la planta trabaja en servicio continuo, el almacenamiento debe ser para tres días, (para tener en cuenta el fin de semana).

Los materiales con que se puede construir el silo son: hormigón armado, planchas de acero sin forrar, ó forradas con hormigón resistente a los ácidos, ó caucho, ó planchas de acero inoxidable. Cuando el silo se construye de acero se debe revisar con frecuencia, para comprobar los efectos de la corrosión. En su diseño se deben evitar los puntos muertos, figura 2.9, a causa de la tendencia del carbón a la combustión espontánea.

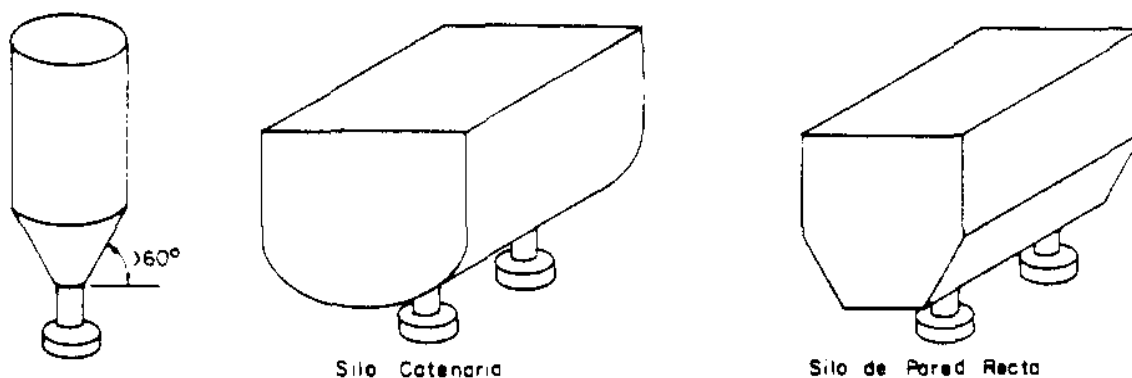


Fig. 3.9

El carbón fino y húmedo tiende a formar chimeneas desde la parte alta a la baja del silo; en general todos los carbones producen atascamientos, que según los estudios realizados tienden a iniciarse cuando existe una humedad superficial del 5 al 6%. Para obligar a que el combustible fluya continuamente se pueden utilizar lanzas de aire, pero lo más práctico es colocar sistemas que rompan las posibles bóvedas que se puedan formar. De todas maneras el ángulo de salida de la tolva debe ser mayor de 60° con la horizontal.

El silo debe colocarse de forma tal que el flujo de combustible sea lo más vertical posible y alejado de toda fuente de calor, ya que existe peligro de explosión si se produce un fuego en el silo, por lo que deben tomarse medidas especiales antiincendios y vigilarse la temperatura interior. En caso de peligro se introduce en el silo vapor, dióxido de carbono ó nitrógeno; cuando el sistema de protección montado es de vapor ó de dióxido de carbono, después de su uso debe vaciarse totalmente el silo, (preferentemente quemando a continuación su contenido), para evitar recalentamientos al llenarse de nuevo. Si el silo contiene carbón pulverizado, el aire de transporte debe ser frío por el mismo motivo.

Durante todo el proceso de apagado y vaciado debe vigilarse atentamente la hermeticidad de la instalación, para que no se produzca ninguna aportación de aire, no permitiéndose la entrada de personal alguno al silo hasta que esté totalmente vacío éste y se hayan disipado los gases generados.

3.7.4. Transporte

Ciñéndose al transporte interior del combustible sólido en las instalaciones, los medios de transporte en el interior de la planta son:

- **Transporte por cintas**, con las cuales se realiza el transporte en sentido horizontal, o se consigue transportarlo a pequeñas elevaciones, pues la pendiente máxima recomendada se encuentra entre los ángulos de 18 a 20°.

- **Transporte por elevadores de cangilones**, se utilizan para elevar el carbón en un trayecto vertical, como puede ser el llenado de los silos.

- **Transporte por tornillos sinfín**, se emplea para el transporte del combustible tanto horizontal como verticalmente, con la gran ventaja de poder regular el caudal de combustible. Por este último motivo se utiliza en las instalaciones de carbón pulverizado.

- **Transporte por tubería**, desde los silos a las tolvas de los hogares, el carbón cae por tuberías que deben mantener recorridos cortos y en los que no se debe realizar reducciones de sección, Cuando dos corrientes de carbón se tienen que reunir, la unión debe realizarse bajo el ángulo mínimo, para evitar cambios repentinos de dirección.

- **Transporte neumático**, se utiliza para el carbón pulverizado, la velocidad del aire debe ser suficiente para que no se deposite el carbón que la corriente lleva en suspensión, siendo normales velocidades comprendidas entre 15 y 25 m/s, con una tasa de transporte de 300 a 500 g/m³.

En las instalaciones actuales de carbón pulverizado, el molino recibe el carbón con una cierta humedad y debe secar el carbón, al mismo tiempo que lo muele, hasta que tenga una humedad que no exceda del 3%. Para ello se emplea el propio aire de transporte, que se introduce caliente en el molino con temperatura que no debe exceder de 300°C y con la condición que la temperatura de salida de la mezcla carbón-aire, no exceda de los valores siguientes:

Lignito	50°C
Carbón bituminoso, con alto contenido en materia volátil.	65°C
Carbón bituminoso, bajo contenido en volátiles	65 - 80°C
Antracita.	95°C
Coque de petróleo	95-120°C

La mezcla carbón-aire que sale del molino, pasa a un separador de gruesos, que vuelven al molino, mientras que el resto entra en un separador de finos que alimenta el silo de almacenamiento. Lógicamente la corriente de aire arrastra un contenido de carbón comprendido entre el 5 y el 10% del original, que debe ser retenido en los filtros, de donde se recuperará. En los sistemas directos de alimentación de quemadores, el aire primario de combustión, es el propio aire de transporte, con lo que se reducen las pérdidas, a la vez que se eliminan los filtros, silo y separador de finos.

3.7.5. Alimentación y combustión industrial de combustibles sólidos

Los combustibles sólidos pueden quemarse sobre parrillas, ó en estado pulverizado, inyectándolo entonces en el hogar, mediante una corriente de aire que lo transporta en suspensión.

Se denomina **aire primario**, al necesario para la combustión que pasa a través de la capa de carbón depositada sobre las parrillas, ó que entra directamente con el combustible en el caso de carbón pulverizado.

Aire secundario, es el que entra ó se inyecta por los laterales de la cámara de combustión y que se utiliza para quemar la materia volátil que se desprende del carbón. En los quemadores de carbón pulverizado se emplea para imprimir un movimiento rotacional al carbón que se encuentra en suspensión en la corriente de aire primario.

Se utiliza **aire terciario**, en aquellos casos en que la combustión se realiza en tres etapas, provocándose esta nueva admisión de aire para que la materia volátil no escape sin quemar, mezclada con los gases de combustión.

Como es sabido, una cantidad de aire en exceso es inevitable, pero debe procurarse que sea la menor posible ya que se producen pérdidas debidas al exceso de aire que es preciso calentar, aumentando la cantidad de gases calientes que salen por la chimenea.

En las calderas que emplean carbón el porcentaje de anhídrido carbónico es del orden del 10 al 14%. Cuando este porcentaje es superior al 14%, es probable que queden en los gases de combustión monóxido de carbono e hidrógeno sin quemar, lo que disminuye el rendimiento. (El porcentaje de CO₂ puede sobrepasar el 14% debido a un menor porcentaje de nitrógeno y oxígeno en los humos, producido por no aportar el aire necesario para la combustión completa, lo que provoca la existencia de gases combustibles en los humos).

En los hornos es a menudo necesario mantener una atmósfera reductora dentro del hogar, para lo cual se añade aire comburente en cantidad insuficiente para la combustión completa, de forma que se consiga la aparición de pequeñas cantidades de monóxido de carbono, (hasta un 2%).

En general, cuando se quema carbón, el exceso de aire no debe superar el 50% y en las condiciones más favorables puede ser solo del 30%.

Toda reacción química requiere un tiempo para completarse. Por tanto para la combustión de la materia sólida y de la correspondiente materia volátil debe darse un cierto **tiempo de permanencia**. Para que la combustión sea rápida, debe mezclarse el combustible y el aire comburente lo más íntimamente posible, si no se hace así la llama será larga y sobrepasará la longitud del hogar.

El movimiento turbulento es el que consigue una mezcla más íntima y rápida del aire y de la materia volátil. En el movimiento laminar las corrientes de aire y materia volátil se difunden lentamente una en otra.

En los hogares de carbón, el aire secundario se introduce a veces mediante toberas, el chorro de aire se dirige desde las paredes hacia abajo, con un cierto ángulo, de forma que incida sobre la superficie de carbón ardiendo, para realizar así una buena mezcla con la materia volátil que se desprende.

El humo se forma a partir de los alquitranes destilados del carbón que escapan antes de que se produzca su combustión completa, apareciendo dos tipos; el humo pardo, formado por alquitranes desprendidos del carbón frío, al añadir éste sobre superficies calientes durante la carga, siendo estos humos fáciles de quemarse completamente, y el humo negro, consistente en partículas de carbón procedentes de la destilación a alta temperatura. Para eliminar éste último, no basta una combustión con exceso de aire, siendo necesario elevar la temperatura de la llama.

Así pues, para eliminar el humo se necesita, una mezcla adecuada de aire y combustible, y una temperatura elevada de la llama. La composición de los productos de la combustión depende de las constantes de equilibrio de las diferentes reacciones químicas que se deben considerar a partir de la composición del combustible. La velocidad de reacción aumenta al aumentar la temperatura, pero al

aumentar ésta también se produce un aumento de los fenómenos de disociación, en general, absorben energía, lo que hace descender la temperatura de la llama, por otra parte, en el ambiente en que se desarrolla la llama se producen una serie de pérdidas por convección y radiación, que también hacen bajar la temperatura de la llama.

Como consecuencia de todo lo anterior, se desprende que la temperatura de la llama disminuye por el exceso de aire, por las reacciones de disociación y por el ambiente en que se desarrolla, deduciéndose que si se quiere elevar la temperatura de la llama será preciso precalentar el aire comburente.

Debe destacarse que la velocidad de reacción en la llama se duplica ó triplica cada 10°C de aumento de su temperatura. La combustión del carbón se realiza en tres fases diferentes, en la primera, por efecto del calor, se produce el desprendimiento de la materia volátil; en la segunda, la materia volátil arde en fase gaseosa; por último, en la tercera fase se quema el residuo de carbono que queda en forma sólida.

Cuando se calienta carbón a alta temperatura se produce un desprendimiento de hidrocarburos, anhídrido carbónico, hidrógeno, vapor de agua y alquitranes que constituyen la materia volátil. La liberación de esta materia volátil depende de la velocidad de calentamiento de la masa de carbón y de la superficie que esta masa tenga, por ello en la actualidad se están desarrollando técnicas de combustión basadas en el carbón pulverizado, ya que la superficie que presenta a la destilación es máxima. El coque obtenido, en estado sólido, arde más despacio, pues prácticamente es carbono puro.

3.8 LA GASIFICACIÓN DE COMBUSTIBLES SÓLIDOS

La gasificación es un proceso termoquímico por el que se transforma el carbón en un gas combustible (gas de síntesis), mediante oxidación parcial con aire, oxígeno o vapor de agua.

A diferencia de los procesos de combustión de carbón, la gasificación se realiza con defecto de oxígeno. De esta forma, el gas combustible obtenido está compuesto principalmente de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂), y conserva la mayor parte de la energía del combustible inicial.

A nivel industrial, la gasificación de carbón no es un proceso novedoso, sino largamente conocido y empleado. A comienzos del Siglo XIX ya era usado para la producción del gas ciudad, empleado para calefacción e iluminación.

Posteriormente la gasificación ha sido ampliamente utilizada para la síntesis de productos químicos como amoníaco, urea, metanol y gasolinas.

Recientemente, ha cobrado un gran interés la aplicación de la gasificación a la generación de electricidad en ciclos combinados. Esto es debido a que esta tecnología posibilita el uso de carbón como combustible en las modernas centrales de ciclo combinado, de forma limpia y eficiente.

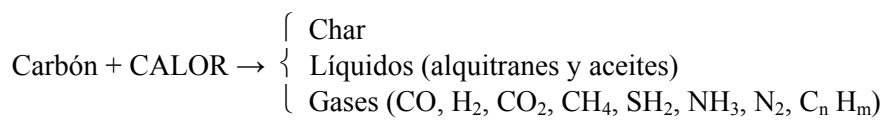
3.8.1 Fundamentos de la gasificación

3.8.1.1 Química de la gasificación

En el proceso de gasificación se producen simultáneamente un gran número de reacciones químicas en serie y en paralelo, pudiéndose distinguir tres etapas fundamentales:

• Pirólisis

Tras el secado y calentamiento, en el que se desprenden volátiles, se produce la pirólisis o descomposición térmica del carbón. En este proceso, se origina una fracción gaseosa rica en H₂, y un residuo carbonoso (“char”).

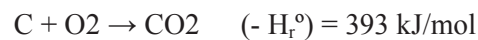
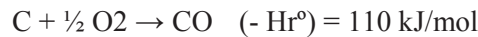


• Combustión

Los gases originados se queman, consumiéndose la mayor parte del oxígeno alimentado al gasificador. Las reacciones son exotérmicas, y desprenden el calor necesario para producir las reacciones de gasificación.

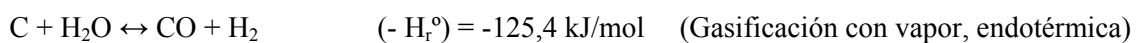
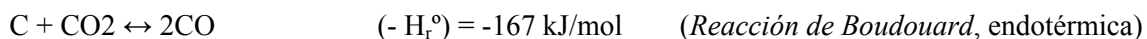


A su vez, el residuo carbonoso reacciona parcialmente con el oxígeno no consumido, hasta que éste se agota.

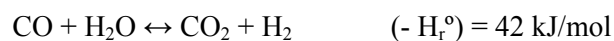


• Gasificación

Una vez consumido todo el oxígeno, se producen las reacciones entre los gases de combustión (CO_2 y H_2O) y el char, generando CO y H_2 . Las reacciones de gasificación tienen lugar como consecuencia de que se alimenta únicamente entre 1/3 y 1/5 del oxígeno teórico requerido para la combustión total.



La relación en que se van a encontrar CO y H_2 , principales componentes del gas final, está determinada por la reacción de equilibrio agua-gas:



La composición final del gas de síntesis depende de las condiciones de presión y temperatura, que a su vez depende de los diferentes equilibrios que se establecen según el combustible y los agentes gasificantes (aire u oxígeno, vapor de agua) empleados.

A elevadas temperaturas, disminuyen las concentraciones de H_2O y CO_2 , mientras que aumentan las de CO y H_2 . En cambio, al aumentar la presión, disminuyen las concentraciones de CO y H_2 , aumenta la de H_2O , y apenas varía la de CO_2 .

Además, en los procesos a baja temperatura se producen cantidades apreciables de especies como metano (CH_4), alquitranes, aceites y fenoles.

3.8.1.2 Compuestos contaminantes del carbón

Por las condiciones reductoras en que se produce la gasificación, el azufre del carbón no se convierte en SO_2 , sino en H_2S y COS . De forma similar, el nitrógeno del carbón se transforma en NH_3 y HCN . Estas especies contaminantes se pueden eliminar con facilidad mediante procesos de lavado con agua y absorción con disolventes, obteniéndose así un gas de síntesis limpio.

3.8.1.3 Balance energético de la gasificación

El valor del gas de síntesis radica en que contiene la mayor parte de la energía química presente en el carbón inicial. En los gasificadores modernos, con elevada conversión del combustible, se puede establecer de forma aproximada este reparto de la energía alimentada con el combustible:

- Poder calorífico del gas de síntesis: 75% del poder calorífico del carbón.

- Calor sensible en el gas de síntesis: 15%. Esta energía se recupera en el enfriamiento del gas, mediante la producción de vapor.
- Calor en el residuo sólido (escoria fundida y ceniza seca), y pérdidas de calor al ambiente: 10%.

3.8.1.4 Tecnologías de gasificación

Existe un gran número de sistemas de gasificación diferentes. En función del régimen de flujo, se puede hablar de tres tipos de gasificadores:

- **Lecho fijo.** El carbón se alimenta seco por la parte superior del reactor, y desciende lentamente reaccionando con los gases que fluyen en contracorriente a través del lecho. En su camino descendente, el carbón experimenta de forma sucesiva los procesos de secado, calentamiento, pirólisis, gasificación y combustión. Las cenizas pueden extraerse secas o fundidas. El gas producto tiene baja temperatura (400-500°C), y contiene cantidades importantes de alquitranes y aceites.
- **Lecho fluidizado.** Las partículas de combustible se introducen en un flujo ascendente de gas, en el que se encuentran suspendidas mientras se produce la reacción. La temperatura de operación es inferior a la de fusión de las cenizas del combustible (800-1.050°C), para que éstas se puedan descargar en forma seca o aglomerada.
- **Lecho arrastrado.** El carbón y los agentes gasificantes fluyen en la misma dirección, con velocidades muy superiores a las que se dan en el resto de tipos de gasificadores. La alimentación del carbón pulverizado, que puede ser seca (con nitrógeno) o húmeda (en mezcla con agua), se realiza a través de quemadores de oxidación parcial. La temperatura de operación es muy elevada (1.200-1.600°C), y las cenizas se extraen fundidas por la parte inferior.

Los tres tipos de gasificadores estaban ya desarrollados en los años 1950. Sin embargo, en los años 1970 y 1980 se adaptaron los diseños para trabajar en condiciones de alta presión, permitiendo aumentar la capacidad de producción y el rango de aplicaciones posibles. En la figura se puede observar un esquema de los tres tipos de gasificadores.

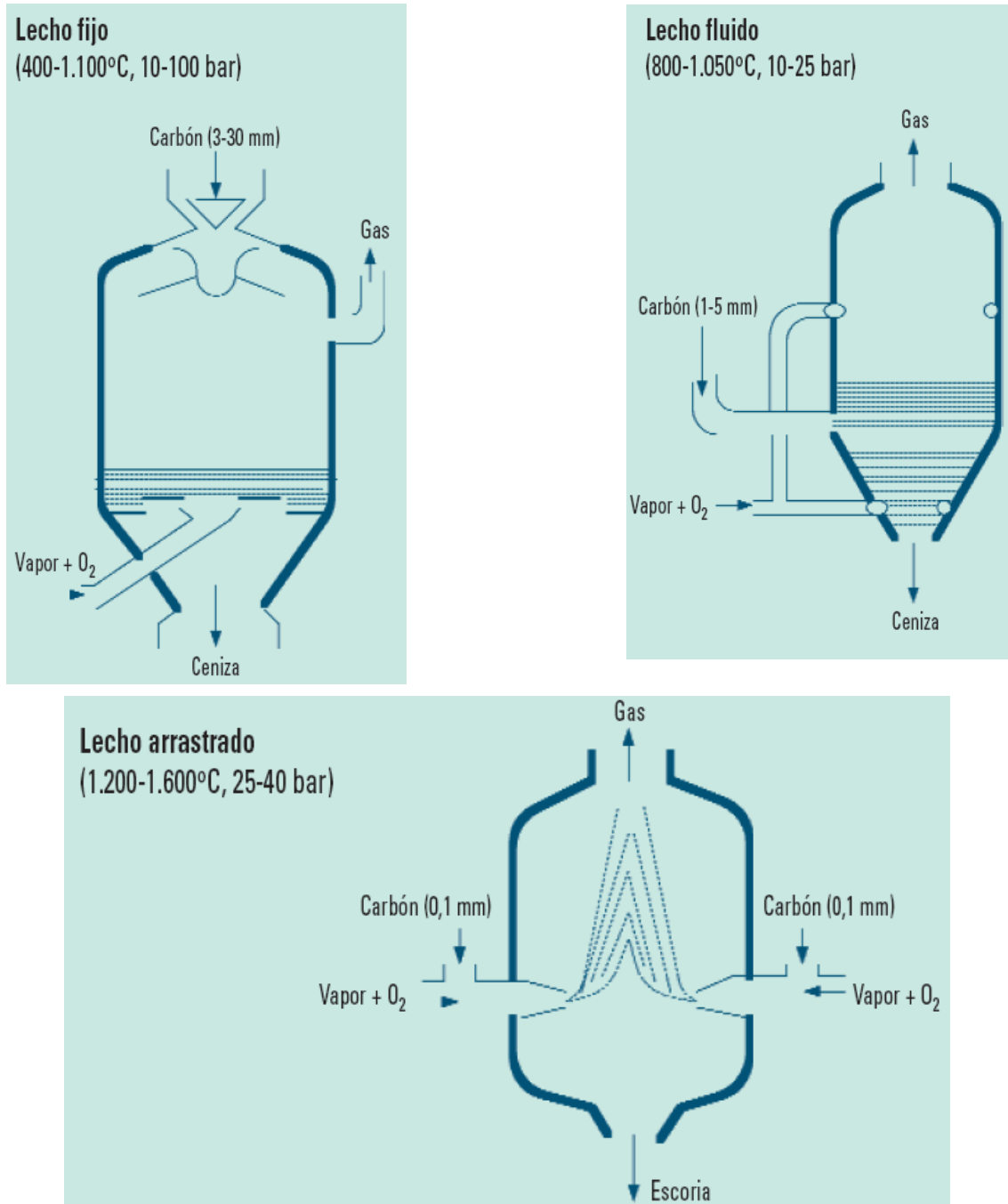


Fig. 3.10. Tipos de gasificadores.

3.8.2 Interés de la gasificación. Aplicaciones

La gasificación permite transformar combustibles sólidos, de bajo valor y potencialmente contaminantes, en un gas limpio que por su facilidad de transporte, presión, composición y contenido energético presenta múltiples aplicaciones. Es por tanto un proceso intermedio, en el que se confiere valor añadido a la materia prima utilizada, habilitándola para ser empleada en la obtención de diferentes productos:

- **Electricidad**, de forma limpia y altamente eficiente, mediante la utilización del gas de síntesis sustituyendo al gas natural en ciclos combinados (**centrales de Gasificación Integrada en Ciclo Combinado - GICC**), o incluso en pilas de combustible de alta temperatura.
- **Producción de hidrógeno**, consumido en refinerías y, en el futuro, en pilas de combustible para automoción y producción de electricidad.
- **Productos químicos**. El gas de síntesis se emplea para la obtención de amoníaco (producto base para la fabricación de fertilizantes), urea, metanol y, a través del proceso Fischer-Tropsch, para la obtención directa de gasolinas.

Mediante la combinación de diferentes unidades de proceso, de forma modular, se puede adaptar el diseño básico de una central GICC a una configuración de planta multi-productos, que pueda ajustarse de forma óptima a las demandas del mercado en cada momento.

En la Figura 3.11 se han resumido las distintas posibilidades existentes en una planta de gasificación.

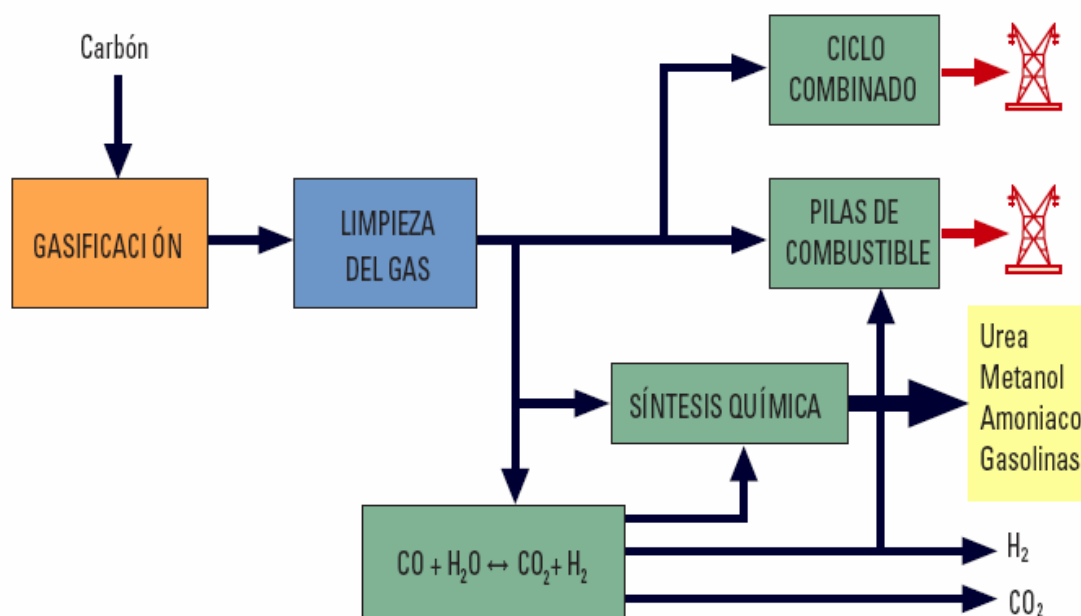


Fig. 3.11 Aplicaciones de la gasificación.

En la actualidad existen más de 130 plantas de gasificación en el mundo, con una capacidad de producción superior a 400 millones de Nm^3 de gas de síntesis al día, equivalentes a más de 43.000 MW térmicos. La evolución de la capacidad de gasificación instalada, a nivel mundial, se muestra en la Figura 3.12.

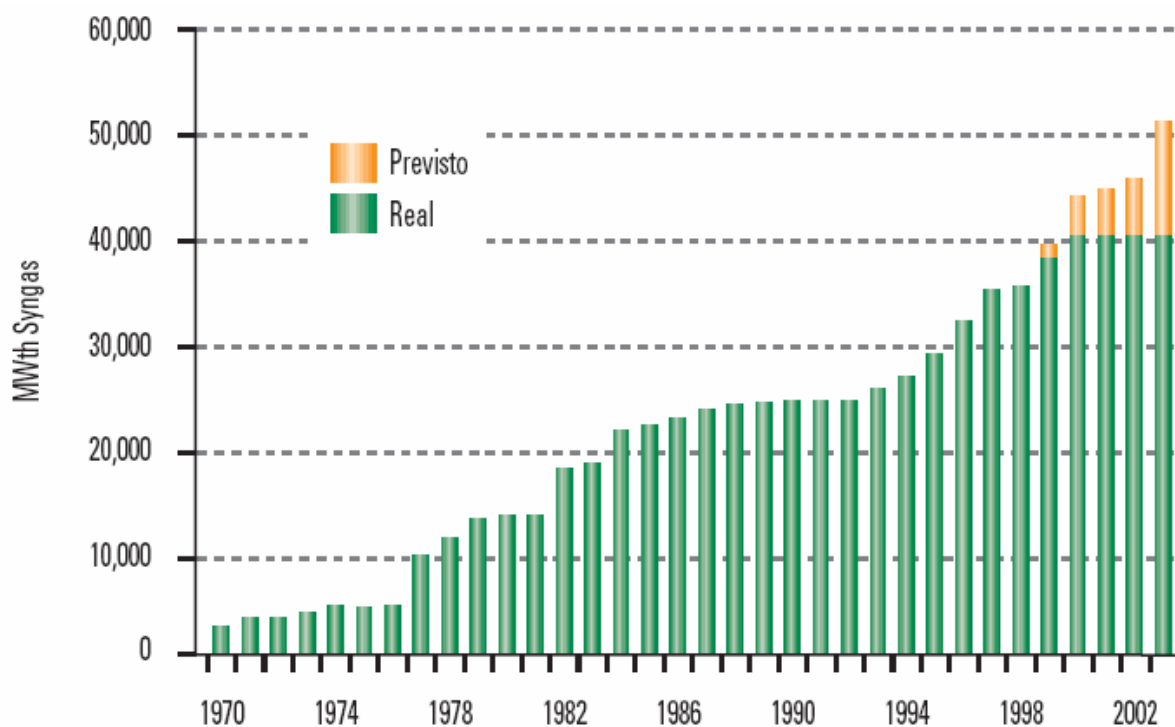


Fig. 3.12. Evolución de la capacidad mundial de gasificación.

3.8.3 Unidades de fraccionamiento de aire (ASU)

Para mantener las altas temperaturas necesarias en todo proceso de gasificación, se requiere un agente oxidante, que puede ser aire, oxígeno o aire enriquecido en oxígeno.

Inicialmente, los primeros gasificadores, que eran de lecho fijo y a presión atmosférica, empleaban aire. Sin embargo, con el desarrollo industrial del proceso Linde-Frankl en la década de 1930, las plantas de producción de oxígeno mediante destilación del aire en condiciones criogénicas se convierten en un sistema económico. Desde ese momento se vuelven a construir muy pocos gasificadores con aire, puesto que el hecho de emplear oxígeno tiene las ventajas de:

- Poder calorífico del gas de síntesis muy superior (9-13 MJ/Nm³ frente a 4,5 MJ/Nm³).
- Por no estar diluido con N₂, el caudal de gas de síntesis es mucho menor (50% aprox.), reduciéndose por tanto radicalmente las dimensiones y los costes de las unidades de recuperación de calor y limpieza del gas.

El proceso de una Unidad de Fraccionamiento de Aire (ASU) actual, junto con los productos que pueden obtenerse, se muestra en el esquema adjunto.

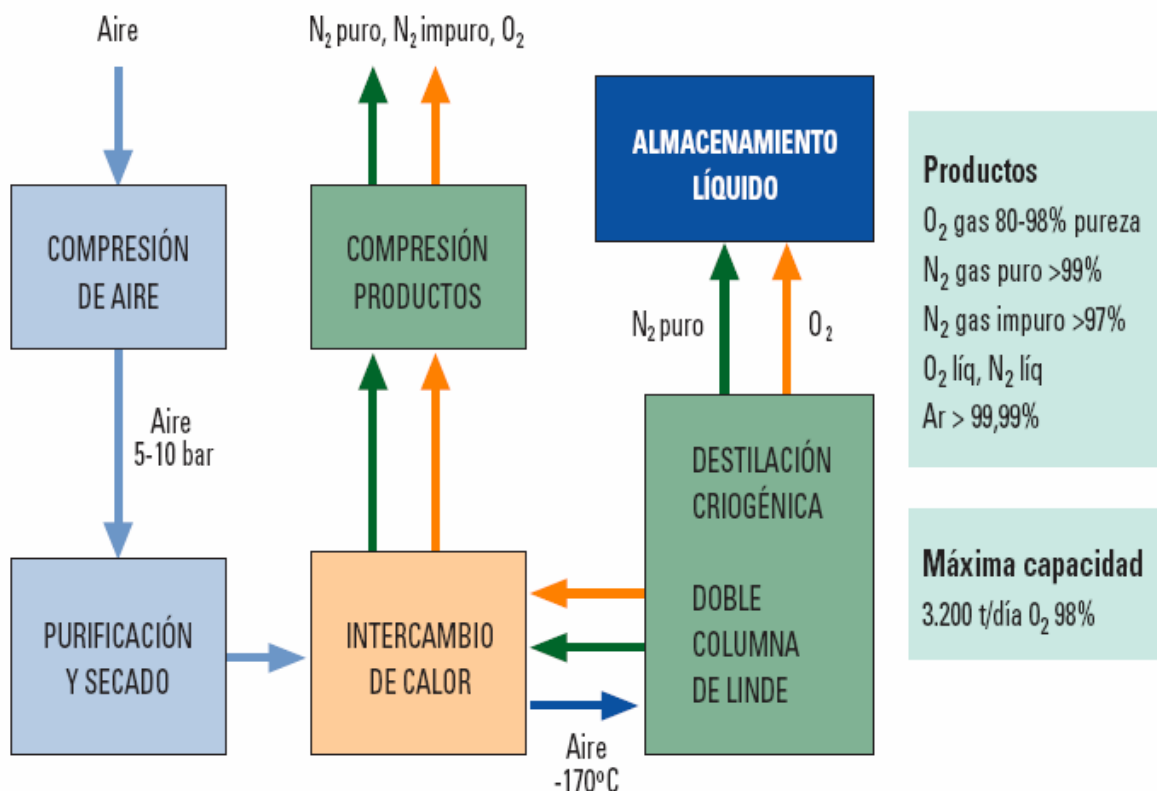


Fig. 3.13. Esquema y productos de una Planta de Fraccionamiento de Aire.

En Centrales GICC, la ASU representa el 10-15% del coste de inversión total, y sus aspectos relevantes son:

- Consumos eléctricos de los compresores de aire y productos. Constituyen prácticamente el 100% de los costes de operación de la ASU, y en las aplicaciones GICC representan el 50-90% del consumo de auxiliares total.
- El arranque de la unidad exige un proceso de pre-enfriamiento hasta alcanzarse las condiciones criogénicas y de estabilidad de productos (entre 3 horas y 3 días según su estado sea frío o caliente).

Una alternativa de futuro para la producción de O₂ son las membranas cerámicas de transporte iónico, membranas que a alta temperatura (>700°C) transportan iones de oxígeno selectivamente. Se han presentado estudios en los que se manifiesta un gran potencial de ahorro en costes de inversión y operación, pero el nivel de desarrollo actual es aún el de plantas piloto.

3.8.4 La integración de la tecnología GICC en el uso de combustibles

La tecnología GICC permite el uso de combustibles sólidos (carbón, coque de petróleo, biomasa, residuos) o líquidos en una Central Térmica con la eficiencia y los beneficios ambientales propios de los ciclos combinados. Para ello, supone la integración de las tres tecnologías anteriores, de forma que el combustible es gasificado con el oxígeno producido en una Planta ASU, y el gas sintético

producido es enfriado, y limpiado exhaustivamente de partículas sólidas y contaminantes para su combustión en la turbina de gas de un ciclo combinado.

Por producirse la limpieza del gas antes de su combustión, las Centrales GICC tienen un comportamiento ambiental muy superior al de las centrales térmicas de carbón clásicas, en las que la limpieza de gases se realiza tras la combustión, de forma por tanto menos efectiva y más costosa que en las GICC.

Existen múltiples variaciones sobre el esquema básico de un GICC, siendo el aspecto fundamental del diseño el grado de integración entre las unidades. Se puede hablar de tres niveles de integración:

- Integración de los sistemas agua-vapor de la Isla de Gasificación y del Ciclo Combinado. El agua de alimentación de calderas se precalienta en una sección de la caldera de recuperación del ciclo combinado (HRSG) y se envía a Gasificación, donde se produce vapor saturado por intercambio de calor con el gas crudo. Este vapor saturado se exporta a la HRSG, para su sobrecalentamiento y expansión en la turbina de vapor, generando electricidad adicional.
- Integración lado nitrógeno entre ASU y Ciclo Combinado. El N_2 impuro, subproducto de la ASU, es comprimido y mezclado con el gas de síntesis para reducir las emisiones de NO_x y aumentar la potencia en la turbina de gas.
- Integración lado aire entre ASU y Ciclo Combinado. De forma parcial o total, el aire comprimido que requiere la ASU es extraído del compresor de la turbina de gas.

En la Figura 3.14 se presenta una configuración típica de central GICC, y los distintos niveles de integración posibles.

La integración de los sistemas agua/vapor es normal en todas las Centrales GICC en operación. Por el contrario, la integración entre ASU y CC es una opción mucho más discutida. Los diseños altamente integrados suponen una mayor eficiencia de la Central, puesto que se reducen los consumos de auxiliares de los compresores de aire y productos de la ASU. Sin embargo, implican tiempos de arranque más largos, en los que se consume el combustible de apoyo (gas natural en la mayoría de los casos).

De las centrales GICC con carbón en operación, en Europa se ha primado el diseño altamente integrado por su mayor eficiencia, mientras que en Estados Unidos, con precios de combustible inferiores, se ha preferido la mayor disponibilidad y flexibilidad que ofrece el diseño no integrado.

Actualmente se tiende a diseños en los que el aire que necesita la ASU provenga en parte del compresor de la turbina de gas y en parte de un compresor independiente. Esto proporciona la flexibilidad necesaria para arranques más rápidos, y un consumo auxiliar intermedio entre las dos opciones.

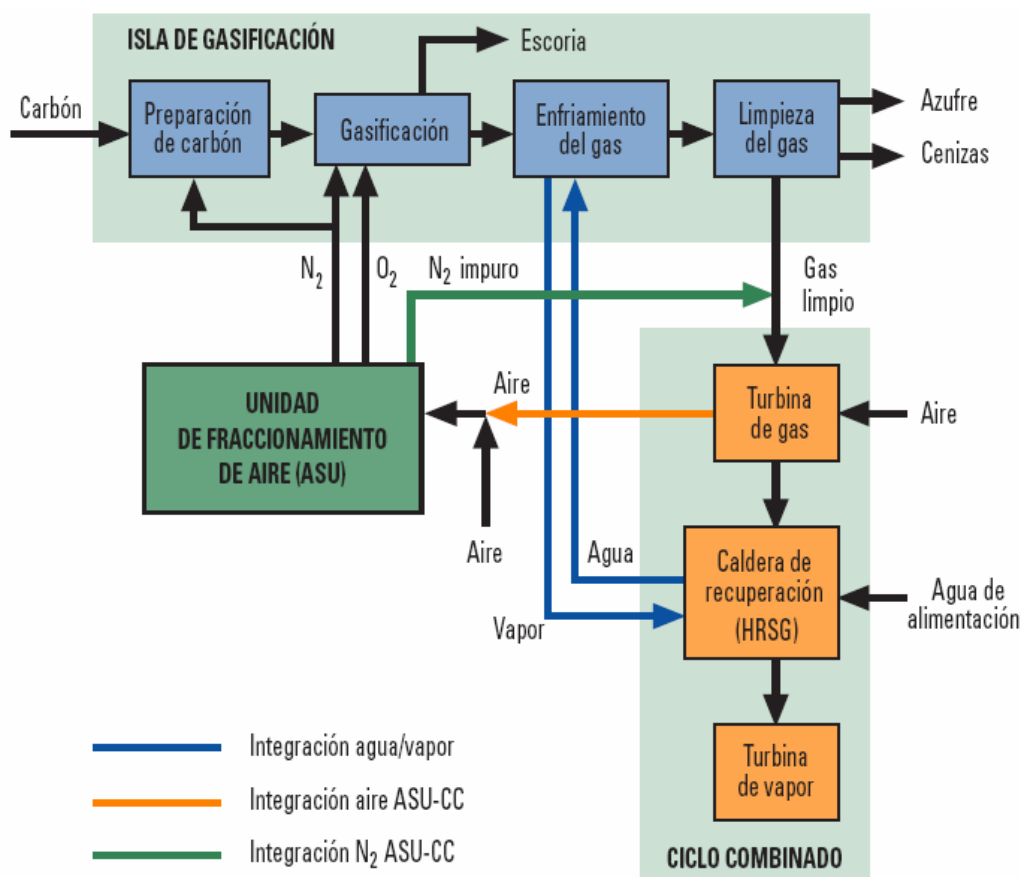


Fig. 3.14 Diagrama de bloques y opciones de integración para una central GICC.

3.8.5 Ventajas de la tecnología GICC

3.8.5.1 Mejor eficiencia que en otras tecnologías

La tecnología GICC presenta eficiencias superiores al resto de tecnologías comerciales de generación eléctrica a partir de carbón, como se puede observar en la tabla comparativa adjunta.

Tecnología		Eficiencia bruta, %PCI	Eficiencia neta, %PCI
GICC (según proceso de gasificación)	ELCOGAS-Lecho arrastrado, seco	47,1%	42,2%
	SHELL (alim. seca)	48,3%	43,1%
	TEXACO (no integrado)	51,6%	41,2%
	E-GAS™	44,5%	39,2%
	MITSUBISHI-aire (año 2006)	48,0%	42,0%
PC, carbón pulverizado (con FGD, ESP y quemadores bajo NOx)	Subcrítica (165 bar, 540°C)	37,5%	36,0%
	Supercrítica (240 bar, 565°C)	41,1%	39,6%
AFBC, combustión en lecho fluidizado atmosférico		37,5%	36,0%
CCGN, ciclo combinado de gas natural, tecnología F de turbina de gas		57,3%	56,0 %

Tabla 3.3 Eficiencias actuales de tecnologías de centrales térmicas.

Además, hay que considerar que la tecnología GICC tiene un importante potencial de mejora, beneficiándose de la progresiva adaptación de turbinas de gas más avanzadas a esta aplicación. Así, para el 2010, se esperan alcanzar eficiencias netas de hasta el 49% (tecnología H de turbina de gas), frente a 42-45% para centrales de carbón pulverizado ultra-supercríticas (310 bar, 593°C, doble recalentado).

3.8.5.2 Medioambiente

Los valores de elevada eficiencia y disponibilidad de combustibles de la tecnología GICC llevan aparejados de forma indirecta importantes beneficios medioambientales: baja emisión de CO₂ y otros contaminantes por kWh producido, menor consumo de recursos y posibilidades de emplear energías renovables mediante cogasificación.

A diferencia de las centrales térmicas clásicas, en las plantas GICC se trata un caudal de gas reducido y a presión, lo cual permite mayor efectividad en el proceso de limpieza.

De esta forma en una central GICC, además de presentar un buen comportamiento en cuanto a emisión de contaminantes atmosféricos regulados (SO₂, NO_x, partículas), se puede hablar de un impacto contaminante global muy limitado: los residuos sólidos son subproductos comerciales, tiene un bajo consumo relativo de agua, y emite menores cantidades de CO₂, mercurio y metales pesados que otros procesos basados en carbón.

En la Tabla 3.4 se comparan las emisiones medias para distintas tecnologías de centrales térmicas con combustibles fósiles.

Tecnología		Emisiones g/kWh				Subproductos/ Residuos sólidos, g/kWh (*)
		SO ₂	NO _x	Partículas	CO ₂	
GICC (según proceso de gasificación/ turbina de gas)	ELCOGAS / SIEMENS V94.3	0,07	0,40	0,02	727	
	SHELL / SIEMENS V94.2	0,10	0,05	0,02	712	
	TEXACO / GE 7F	0,13	0,35	0,02	745	Escoria: 21,0 Ceniza: 2,0 Azufre: 4,0
	E-GAS TM / GE 7FA	0,14	0,37	0,02	783	
	MITSUBISHI (2006, objetivos propuestos)	0,02	0,013 (con SCR)	0,01	730	
PC, carbón pulverizado	Subcrítica. $\eta_{\text{neto}}=36,0\%$ FGD (90%), LNB (50%), ESP (99,2%)	2,50	2,30	0,30	852	Cenizas: 27,4 Yeso (FGD): 19,6
	Supercrítica. $\eta_{\text{neto}}=39,6\%$ FGD (95%), SCR (95%), ESP (99,2%)	2,15	1,10	0,27	774	Cenizas: 25,0 Yeso (FGD):18,8
AFBC Con filtros ciclónicos (96%) $\eta_{\text{neto}}=36,0\%$		1,40	0,80	0,10	852	Mezcla cenizas-yeso- caliza: 52,9
CCGN, $\eta_{\text{neto}}=56,0\%$ 0,007		0,54	0,02	350	–	

(*) Con combustibles similares en cuanto a contenido en cenizas y azufre.

Tabla 3.4 Emisiones y producción de residuos de diferentes tecnologías.

Contaminantes atmosféricos: SO₂, NO_x y partículas

Las emisiones de SO₂ y NO_x, gases relacionados con la lluvia ácida, son comparables o inferiores a las obtenidas en un ciclo combinado con gas natural (CCGN). El azufre, presente en el gas de síntesis como H₂S, es recuperado en más del 99%, transformándose en ácido sulfúrico o azufre sólido puro para su venta.

Debido a la atmósfera reductora en que se desarrolla el proceso de gasificación, el gas de síntesis no contiene NO_x, sino amoníaco (NH₃) en baja proporción, que se elimina en el proceso de lavado. En la turbina de gas, además de quemadores de bajo NO_x, se utilizan sistemas adicionales como la saturación del gas o la mezcla con nitrógeno, para limitar la temperatura de llama y prevenir la formación de NO_x térmico.

En cuanto a las partículas sólidas, éstas se extraen del gas de síntesis mediante filtros y/o lavado con agua antes de la combustión del gas, por lo que sus emisiones son irrelevantes.

Gas de efecto invernadero, CO₂

Sustituir grupos de carbón por modernas unidades GICC permitiría disminuir sus emisiones de CO₂ hasta en un 20%, contribuyendo a alcanzar los objetivos de reducción mundial de emisiones de CO₂.

Adicionalmente, mediante la reacción agua-gas $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$, se puede incrementar la producción de hidrógeno, y capturar el CO₂ de forma directa, utilizando procesos comerciales y habituales en la industria de síntesis química. La captura del CO₂ del gas a presión, en el proceso GICC, resultaría mucho más económica que su extracción de los gases de combustión de plantas convencionales de carbón pulverizado, o ciclos combinados de gas natural.

Consumo de agua

Debido a que únicamente el ciclo de vapor requiere refrigeración, el consumo específico de agua para la operación de una planta GICC es aproximadamente la mitad que el de una planta convencional con sistema de lavado de gases.

Otros contaminantes: cloro, mercurio, metales pesados

Los compuestos de cloro se extraen del gas mediante lavado con agua, obteniéndose como sales posteriormente en el tratamiento del agua residual.

Las emisiones de metales pesados se reducen drásticamente respecto a otros procesos, puesto que en un GICC estos elementos se capturan prácticamente en su totalidad en la escoria, que es un sólido inerte vitrificado, no lixiviable.

En el caso del mercurio, existe una preocupación creciente por las emisiones de este elemento en centrales de carbón, estando prevista su regulación en Estados Unidos a partir del año 2004. El

reciente estudio ‘The cost of Mercury Removal in an IGCC Plant’ (19), realizado por Parsons Inc. para el US DOE, concluye que la tecnología GICC es capaz de reducir la emisión de mercurio a un coste mucho menor que las centrales de carbón pulverizado (PC, pulverised coal), mediante absorción sobre un lecho de carbono activo. Para GICC el coste sería de 0,25 \$/MWh, frente a 3,10 \$/MWh para centrales PC.

Subproductos sólidos

Las centrales térmicas de combustión (PC, AFBC) producen residuos sólidos (escoria, ceniza volante, pasta de yeso de las unidades de desulfuración FGD) que no pueden calificarse (excepto la ceniza volante) como subproductos de valor comercial, suponiendo un perjuicio económico y ambiental. En GICC, por el contrario se obtienen subproductos comerciales:

- El azufre se recupera puro en estado elemental o como ácido sulfúrico, ambos productos con mercado.
- Por las condiciones reductoras en que se produce la gasificación, los residuos sólidos (escoria principalmente) se obtienen bajo una matriz vítrea (no soluble), pudiéndose valorizar como subproductos útiles con múltiples aplicaciones: fabricación de materiales cerámicos, producción de fibra de vidrio, relleno para carreteras o fabricación de materiales de construcción como cementos, tejas o ladrillos.

La valorización de estos residuos, junto con el ahorro de su eliminación o tratamiento, representa un menor coste de producción de entre 0,8 y 0,9 €/MWh (0,08-0,09 cts.€/kWh) para un GICC, comparado con otros procesos basados en carbón con tratamiento de gases.

Valor económico potencial de las menores emisiones de Centrales GICC

Los mercados de derechos de emisión tienen como objetivo la reducción de las emisiones globales de distintos contaminantes. Para ello, se establecen niveles de emisiones inferiores a los límites legales, y las instalaciones que los sobrepasan deben adquirir créditos o derechos de emisión de las centrales con emisiones inferiores a dichos niveles.

De esta forma, la diferencia entre las emisiones de distintas centrales se traduce en un valor económico, beneficio para la central más limpia y coste añadido para la que tiene mayores emisiones.

Tomando como referencia las propuestas de mercados de derechos de emisión existentes en Europa y Estados Unidos, se presenta una estimación del valor económico potencial de la reducción de emisiones que permite una Central GICC como la de ELCOGAS en España.

Por tonelada no emitida de cada contaminante, se han considerado estos precios: 50 €/t CO₂ (valor medio considerando referencias 20-25 de la bibliografía), 700 €/t SO₂, 1.000 €/t NO_x (26), obteniéndose los resultados de la Tabla 3.5.

Contaminante	Reducción emisiones GICC respecto media CT Carbón España		Valor económico potencial	
	g/kWh	t/año	cts. €/kWh	€/año
SO ₂	12,03	25.287	0,84	17.700.000
NOx	2,7	5.675	0,27	5.675.000
CO ₂	194	408.000	0,97	20.390.000
TOTAL	-	-	2,08	43.765.000

Cálculo de valores absolutos anuales: Central 300 MW, factor producción anual 80%. 2.102 GWh/año.

Tabla 3.5. Estimación del valor económico potencial de la reducción de emisiones que permite un GICC.

Disponibilidad de combustibles

La tecnología GICC permite la utilización limpia y eficiente de carbón, que como combustible presenta importantes ventajas frente al gas natural y los derivados del petróleo: