XVIII.- GASIFICACIÓN DEL CARBÓN

pfernandezdiez.es

Introducción	*657*
Química de los procesos de gasificación	*659*
Reacciones de gasificación	*659*
Reacciones exotérmicas y endotérmicas	*659*
Etapas de las reacciones	*660*
Clasificación de los procesos de gasificación	*661*
- Lecho agitado (fijo) (contracorriente)	*663*
- Lecho fluidificado o de mezcla (contracorriente)	*664*
- Flujo arrastrado o lecho suspendido (equicorriente)	*665*
Tecnologías prácticas	*665*
Gasificador de lecho agitado	*665*
Gasificador de lecho fluidificado	*666*
Gasificador de flujo arrastrado	*666*
Gasificador primitivo a presión atmosférica	*667*
Gasificadores primitivos presurizados	*667*
Gasificador de flujo arrastrado, ventajas e inconvenientes	*669*
Gasificadores modernos	*671*
Gasificador Texaco	*671*
Gasificador Shell (SCGP).	*672*
Gasificador Dow	*673*
Gasificador Winkler de alta temperatura (HTW)	*674*
Gasificador Conoco Phillips E-Gas	*674*
Gasificador Lurgi de escoria fundida BGC, y Lurgi Mark IV	*675*
Gasificador British Gas Lurgi (BGL)	*676*
Gasificador Siemens (GSP/Noell)	*676*
Gasificador GTI (U-Gas), de lecho fluidificado	*676*
Gasificador KBR Transport	*677*
Líneas en desarrollo	*678*
Materiales del refrigerador de gas sintético	*678*
Servicio como economizador, vaporizador y sobrecalentador	*679*
Limpieza de los productos de gasificación	*680*
Composición del gas producto	*680*
Purificación del gas	*682*
Procesos convencionales.	*682*
Eliminación de ácido	*683*
Proceso Claus	*684*
Emisiones de NOx	*685*
Procesos en desarrollo	*685*
Filtros de material cerámico	*685*
Filtros de lecho granular	*685*
Desulfuración en caliente	*686*
Efluentes acuosos	*687*
Descarga de sólidos	*687*
Gasificación del carbón para generación de energía	*688*
Planta energética de ciclo combinado	*688*
Ventajas de la planta de ciclo combinado	*690*
Eficiencia de un ciclo combinado	*691*
Referencias	*694*

La gasificación del carbón es un proceso que transforma el carbón desde su estado sólido, en un combustible gaseoso (compuesto fundamentalmente por CO e H_2), también conocido como syngas, mediante una oxidación parcial, al que hay que retirar una serie de sustancias indeseables, como son los compuestos de S y la ceniza del carbón original, mediante técnicas bien desarrolladas. El resultado es una fuente energética gaseosa, limpia y transportable.

Cuando un carbón se quema, su energía química se libera en forma de calor; el O_2 del aire se combina con el C y el H_2 del carbón, produciendo CO_2, H_2O y energía térmica. En condiciones normales, cuando hay $aire_{exceso}$, toda la energía química del carbón se convierte en calor y el proceso normal es la combustión; sin embargo, si el O_2 disponible se reduce, se libera menos calor del carbón y en la reacción aparecen nuevos productos gaseosos, como el H_2, CO y CH_4 que contienen también energía química.

Si el objetivo es maximizar la energía química de los subproductos gaseosos, parece lógico continuar con la reducción del O_2 disponible; no obstante, se alcanza un punto a partir del cual un porcentaje del carbón ya no se convierte en gas, quedando sin reaccionar parte del C y dando lugar a un proceso ineficiente.

Cuando el suministro de O_2 se controla de forma que se produzca calor y un nuevo combustible gaseoso, conforme se consume el carbón, el proceso se conoce como gasificación.

Los primitivos procesos de gasificación del carbón, que suministran *gas de síntesis* como materia prima para la industria química, se comercializaron a lo largo de la década de 1950.

Mejoras en los diseños de los gasificadores de segunda y tercera generación se desarrollaron y permitieron construir grandes unidades comerciales para la producción de gas sintético en los años 1980.

La primera planta de ciclo combinado con gasificación integrada que se instaló en el mundo, fue la de Buggenum (250 MW), en Holanda; esta planta, típica en la industria del petróleo, es del tipo *soplada con O_2*, y utiliza un proceso frío de separación de gas ácido. La gasificación de carbón para la generación de energía eléctrica tuvo su primera unidad de demostración en USA, en la planta energética Cool Water de 92 MW, California, y de 155 MW en Plaquemine, Louisiana.

XVIII.1.- QUÍMICA DE LOS PROCESOS DE GASIFICACIÓN

Reacciones de gasificación.- La reacción exotérmica entre el carbono y el oxígeno proporciona la energía térmica necesaria para impulsar la pirólisis y reacciones de gasificación de carbón. En contraste con las reacciones de combustión que tienen lugar con exceso de O_2, la gasificación consiste en una combustión incompleta con deficiencia de O_2, apareciendo el CO y el H_2 como gases combustibles procedentes de esta combustión.

Sólo una fracción del C presente en el carbón se oxida por completo para formar CO_2.

El calor desprendido por la combustión parcial facilita la mayor parte de la energía necesaria para romper los enlaces químicos en el carbón y la elevación de la temperatura de todos los productos involucrados hasta su temperatura de reacción.

La química del proceso de la gasificación del carbón es compleja, por lo que aquí sólo se discuten algunas de las reacciones más importantes.

Reacciones exotérmicas

Combustión de carbono: $\begin{cases} C + O_2 = CO_2 \text{ (Combustión con Oxígeno) (- 394 kJ/mol)} \\ C + \frac{1}{2}\, O_2 = CO \text{ (Gasificación con Oxígeno) (-111 kJ/mol)} \end{cases}$

Intercambio gas-agua: $CO + H_2O = CO_2 + H_2$ *(Reacción de desplazamiento) (- 41 kJ/mol)*

Metanización: $\begin{cases} CO + 3\, H_2 = CH_4 + H_2O \text{ (Metanización) (- 206 kJ/mol)} \\ C + 2\, H_2 = CH_4 \text{ (Gasificación con Hidrógeno) (- 75 kJ/mol)} \end{cases}$

Reacciones endotérmicas

Reacción Boudouard: $C + CO_2 = 2\, CO$ *(Gasificación con anhidrido carbónico) (172 kJ/mol)*

Reacción vapor-carbono: $C + H_2O = CO + H_2$ *(Gasificación con vapor de agua) (131kJ/mol)*

Liberación de hidrógeno: $2\, H \text{ (carbón)} = H_2$ *(gas)*

Las reacciones de metanización son importantes en sistemas de baja temperatura y se favorecen con las altas presiones. Las otras ecuaciones son predominantes en sistemas de gasificación a alta temperatura. La combinación de estas reacciones libera inicialmente el calor suficiente por las reacciones de combustión del C, para facilitar energía a las reacciones endotérmicas.

El S contenido en el carbón se convierte en sulfuro de hidrógeno H_2S, y una pequeña cantidad de S forma también sulfuro de carbonilo COS.

Las altas temperaturas y las altas presiones favorecen la conversión del nitrógeno a N_2, mien-

tras que las condiciones contrarias favorecen la formación de algo de NH_3 y pequeñas cantidades de HCN.

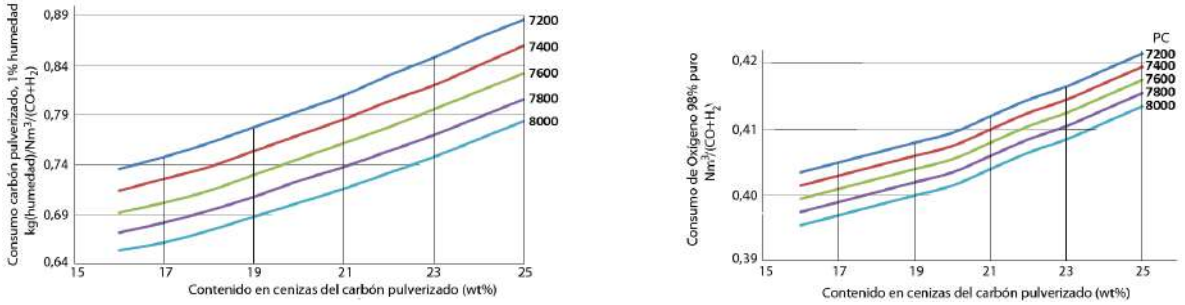


Fig XVIII.1ab.- Consumo de carbón pulverizado y de Oxígeno, en función del contenido de ceniza y potencia calorífica

En los procesos de baja temperatura, inferior a 1200ºF (650ºC), las breas, los aceites y los fenoles no se destruyen ni descomponen y, por lo tanto, salen con el gas bruto.

Etapas de las reacciones.- Durante el proceso de gasificación hay dos etapas principales de reacción, la de $\begin{cases} \text{- } desprendimiento\ de\ volátiles \\ \text{- } gasificación\ del\ subcoque\ (char) \end{cases}$

La primera (pirólisis) es una etapa de transición, en la que se liberan los compuestos volátiles de los compuestos orgánicos por debajo de 1112ºF (600ºC); el carbón se convierte en subcoque de carbono fijo (char), conforme se eleva la temperatura; los débiles enlaces químicos se rompen y se forman breas, aceites, fenoles y también gases hidrocarburados.

La segunda es una etapa en la que el subcoque (char) que queda tras la desvolatilización, se gasifica por medio de una reacción con O_2, H_2O, CO_2 e H_2.

Los gases reaccionan entre sí para producir la mezcla final; el tipo de proceso de gasificación tiene una notable repercusión sobre los productos de la desvolatilización:

- En los gasificadores de lecho fijo y de lecho agitado, estos productos salen del gasificador con el gas producto objeto del proceso, debido a las bajas temperaturas y a la falta de O_2

- En procesos de lecho fluidificado y de flujo arrastrado, las elevadas y uniformes temperaturas provocan el fraccionamiento térmico (craking) de los hidrocarburos, fragmentando las moléculas más complejas en otras más simples

- También hay O_2 disponible para reaccionar con los productos de la desvolatilización, produciendo H_2 , CO y CO_2 , reacciones que, en un proceso de flujo arrastrado son más completas

El objetivo básico de la gasificación es convertir el carbón en gas combustible que contenga el máximo poder calorífico. Si el gas producido se utiliza para la síntesis química, en lugar de para la

combustión, su composición se tiene que ajustar a la estequiometría del producto sintetizado. Por ejemplo, el H_2 para la producción de gas de síntesis se obtiene mediante $\begin{cases} \text{- } la\ reacción\ vapor\text{-}C \\ \text{- } el\ intercambio\ agua\text{-}gas \end{cases}$

La reacción del intercambio *agua-gas* se potencia:

- *Mediante un suministro adicional de vapor en el lecho de combustible*
- *En una etapa independiente de conversión catalítica situada aguas abajo*

produciéndose así, en cualquier caso, más H_2.

La influencia del producto final puede modificar la elección del proceso de gasificación.

Cuando el único producto requerido es el H_2 hay que disminuir el CO_2 que es un producto inevitable, como procedente de la descomposición del agua mediante su reacción con el C.

En el caso de producción de *gas natural sintético* (GNS), en procesos de lecho agitado a baja temperatura y alta presión, una gran parte del metano se puede producir en el lecho de combustible, mediante la hidrogenación del C, según la reacción: $C + 2\,H_2 = CH_4$

La totalidad del metano no se puede producir directamente por hidrogenación, por lo que una fracción del metano se tendrá que producir de forma indirecta en una etapa catalítica independiente, por ejemplo mediante la reacción: $CO + 3\,H_2 = CH_4 + H_2O$

XVIII.2.- CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE GASIFICACIÓN

Los procesos de gasificación del carbón se pueden clasificar según cuatro tipos de reactores, Fig XVIII.2, en la que se muestran también los perfiles de temperatura:

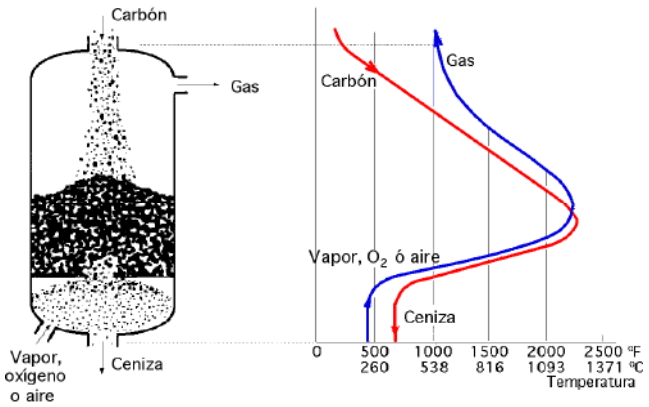
- *Lecho agitado (fijo) o de contracorriente*
- *Lecho fluidificado o de mezcla en contracorriente*
- *Flujo arrastrado o suspendido (equicorriente)*
- *Flujo Transport*

La ubicación de las entradas de carbón, vapor y oxidante se señalan convenientemente, al igual que las salidas de gas sintético y de ceniza.

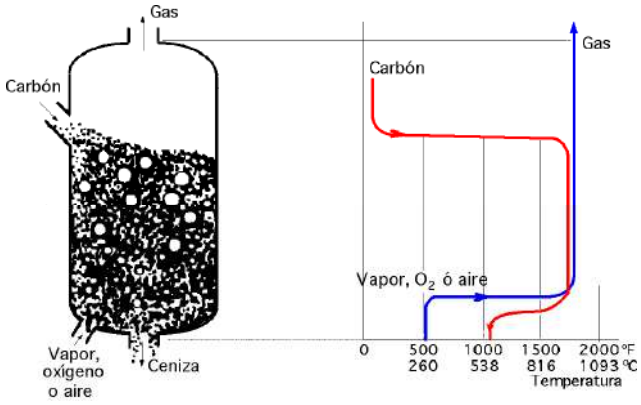
La Tabla XVIII.1 resume las características más importantes de cada uno de los gasificadores, según el tipo de ceniza que tienen en el fondo, en $\begin{cases} \text{- } seca \\ \text{- } fundida \end{cases}$

Si la temperatura se mantiene por debajo del punto de fusión de la ceniza, ésta se evacúa seca.

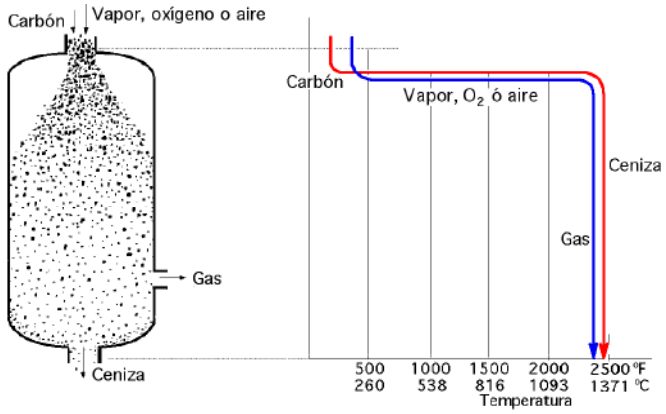
La ceniza se puede manipular también en estado fundido y evacuar como ceniza líquida.



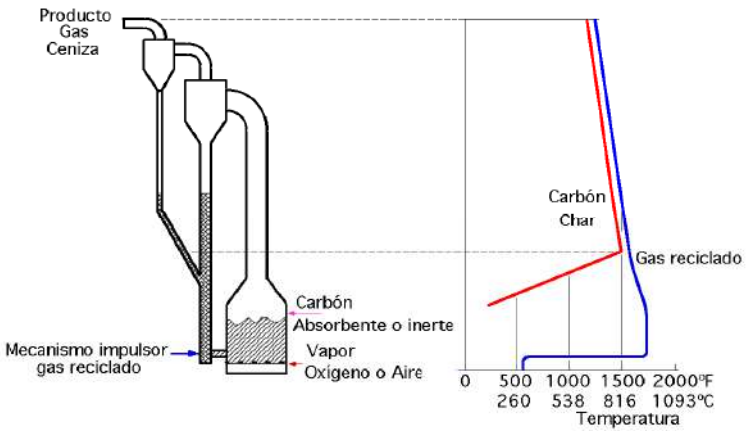
a) Gasificador de lecho agitado



b) Gasificador de lecho fluidificado



c) Gasificador de lecho arrastrado o suspendido



d) Flujo Transport

Fig XVIII.2.- Configuración de reactores para gasificación del carbón

Tabla XVIII.1.- Características de los gasificadores

	LECHO AGITADO	
Carbón alimentado	*Ceniza SECA*	*Ceniza FUNDIDA*
Tamaño	*Bruto < 2" (51 mm)*	*Bruto < 2" (51 mm)*
Aceptabilidad finos	*Limitada*	*Mayor que con seca*
Aceptabilidad aglutinante	*Sí (con modificaciones)*	*Sí (con modificaciones)*
Rango preferido carbón	*Bajo*	*Alto*
Operación:		
Temperatura salida gas	*Baja = 800÷1200°F (427-649°C)*	*Baja = 800÷1200°F (427-649°C)*
Requisito oxidante	*Bajo*	*Bajo*
Requisito vapor	*Alto*	*Alto*
Peculiaridad clave	*Hidrocarburos líquidos en gas bruto*	
Tecnología clave	*Utilización de finos e hidrocarburos líquidos*	
	LECHO FLUIDIFICADO	
Carbón alimentado	*Ceniza SECA*	*Ceniza FUNDIDA*
Tamaño	*Triturado< 0,25" (6,4 mm)*	*Triturado < 0,25" (6,4 mm)*
Aceptabilidad finos	*Buena*	*Mejor*
Aceptabilidad aglutinante	*Posible*	*Sí*
Rango preferido carbón	*Bajo*	*Cualquiera*
Operación:		
Temperatura salida gas	*1700 ÷ 1900 °F (927-1038°C)*	*1700 ÷ 1900 °F (927-1038°C)*
Requisito oxidante	*Moderado*	*Moderado*
Requisito vapor	*Moderado*	*Moderado*
Peculiaridad clave	*Gran reciclado de subcoque (char)*	
Tecnología clave	*Conversión de carbono*	
	FLUJO ARRASTRADO	***FLUJO TRANSPORT***
Carbón alimentado	*Ceniza FUNDIDA*	*Ceniza SECA*
Tamaño	*Pulverizado: 100 mesh (149 micras)*	*Pulverizado: 1/16"*
Aceptabilidad finos	*Ilimitada*	*Mejor*
Aceptabilidad aglutinante	*Sí*	*Sí*
Rango preferido carbón	*Cualquiera*	*Cualquiera*
Operación:		
Temperatura salida gas	*Alta > 2300°F (1260°C)*	*1500 a 1900°F (815 a 1039°C)*
Requisito oxidante	*Alto*	*Moderado*
Requisito vapor	*Bajo*	*Moderado*
Peculiaridad clave	*Gran energía en gas bruto caliente*	*Inventario control de carbón*
Tecnología clave	*Refrigeración gas bruto*	*y arrastre de agua*

Lecho agitado.- En el gasificador de lecho agitado, Fig XVIII.2a, o gasificador de lecho fijo, una columna o lecho de carbón triturado se soporta por medio de una parrilla comprendiendo el proceso una serie de reacciones en contracorriente, como:

- En la parte superior del gasificador el carbón se calienta y seca, y el gas producto se refrigera

- A medida que el carbón desciende, se calienta más y se desprende de los volátiles en la zona de carbonización

- Por debajo de la zona de carbonización el carbón desvolatilizado se gasifica mediante su reacción con vapor y CO_2

Las temperaturas más altas se alcanzan en la zona de combustión, cerca del fondo del gasificador.

La reacción entre el subcoque (char) y el vapor, junto con la presencia de $vapor_{exceso}$, mantiene la temperatura en la zona de combustión por debajo de la temperatura de fusión de la ceniza.

Las características de un gasificador de lecho agitado son las siguientes:

- *Produce* { *- hidrocarburos líquidos, como breas y aceites* / *- un contenido relativamente alto de gas metano*
- *Tiene limitada posibilidad de manipular partículas finas*
- *Requiere etapas especiales para manipular carbones aglutinantes*
- *Necesita poco oxidante*

Tabla XVIII.2.- Composición del fuel SYNGAS de algunas instalaciones y del Gas natural

SYNGAS	*PSI*	*Tampa*	*El Dorado*	*Pernis*	*ILVA*	*Schwarze Pumpe*	*Sarlux*	*Fife*	*Exxon Singapur*	*Valero Delavare*	*Gas natural*
H_2	24,8	37,2	35,4	34,4	8,6	61,9	22,7	34,4	44,5	32	Trazas
CO	39,5	46,6	45	35,1	26,2	26,2	30,6	55,4	35,4	49,5	--
CH_4	1,5	0,1	0	0,3	8,2	6,9	0,2	5,1	0,5	0,1	93,9
C_2H_6	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	3,2
C_3H_8	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0,7
C_4H_{10}	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0,4
CO_2	9,3	13,3	17,1	30	14	2,8	5,6	1,6	17,9	15,8	1
$N_2 + Ar$	2,3	2,5	2,1	0,2	42,5	1,8	1,1	3,1	1,4	2,2	0,8
H_2O	22,7	0,3	0,4	--	--	--	39,8	--	0,1	0,4	--
Btu/ft^3	209	253	242	210	183	317	163	319	241	248	939
kJ/m^3	8224	9962	9528	8274	7191	12492	6403	12568	9477	9768	35000
Temperatura	570°F	700°F	250°F	200°F	400°F	100°F	392°F	100°F	350°F	570°C	
	330°C	371°C	121°C	96°C	204°C	38°C	200°C	38°C	177°C	299°C	
H_2/CO	0,63	9,8	0,79	0,98	0,33	2,36	0,74	0,62	°1,26	0,65	
Diluyente	*Vapor*	N_2	N_2/*vapor*	*Vapor*	--	*Vapor*	*Humedad*	*Agua*	*Vapor*	H_2O/N_2	

Las diferencias principales entre los distintos gasificadores de lecho agitado se refieren a las:

- *Condiciones de la ceniza (sólida o seca, líquida o fundida)*
- *Previsiones de diseño para manipular finos, carbones aglutinantes y líquidos hidrocarburos*

Lecho fluidificado.- El gasificador de lecho fluidificado, Fig XVIII.2b, es un reactor que mezcla en contracorriente las partículas del carbón alimentado, con las partículas que se encuentran en gasificación. Aunque el gasificador tiene un lecho discreto, las partículas de carbón troceado se mantienen en constante movimiento, por medio del flujo ascendente de los gases.

El lecho fluidificado se mantiene por debajo de la temperatura de fusión de la ceniza, para evitar su aglutinación y solidificación, que podrían conducir a la pérdida de la fluidificación.

Las partículas de subcoque (char) arrastradas por el gas bruto caliente, se recuperan y reciclan hacia el gasificador.

Las principales características de un gasificador de lecho fluidificado son:

- *Tiene un importante reciclado de subcoque*
- *Sus características operativas son temperaturas uniformes y moderadas*
- *Requiere* { *pasos especiales para obtener una alta conversión del C, con carbones de alta calidad* / *medios especiales para manipular carbones aglutinantes* / *aportes de O_2 y vapor moderados*

Las principales diferencias que existen entre los distintos gasificadores de lecho fluidificado radican en las $\begin{cases} \textit{- condiciones de la ceniza seca o aglutinada} \\ \textit{- previsiones de diseño para el reciclado del subcoque (char)} \end{cases}$

Un lecho fluidificado aglutinado contiene una zona caliente en la que las partículas de ceniza se agrupan en pequeñas bolitas antes de su evacuación; la operación con ceniza aglomerada facilita la gasificación de los carbones de alto rango. Los gasificadores de lecho fluidificado y ceniza seca operan más eficientemente con carbones de baja calidad.

Flujo arrastrado.- El gasificador de flujo arrastrado, Fig XVIII.2c, (o de lecho suspendido), es un reactor en equicorriente; consiste en un sistema de dos fases de sólidos finamente divididos y dispersos en un gas; las partículas de carbón pulverizado reaccionan con el $\begin{cases} \textit{vapor} \\ \textit{oxidante} \end{cases}$, en un tiempo de residencia muy corto y tiene las siguientes características:

- Puede gasificar carbones de cualquier $\begin{cases} \textit{- tipo} \\ \textit{- característica aglutinante} \\ \textit{- cantidad de finos} \end{cases}$

- Requiere una notable recuperación de calor debido a la gran cantidad de calor sensible en el gas bruto

- Es operativo con alta temperatura de escorificación (alto punto de fusión de la ceniza)

- Precisa una gran cantidad de oxidante

- Requiere de medios especiales para evitar el arrastre de ceniza fundida hacia las superficies termointercambiadoras situadas aguas abajo

Las principales diferencias entre las diversas clases de gasificadores de flujo arrastrado se encuentran en el sistema de alimentación de carbón en $\begin{cases} \textit{- lechada} \\ \textit{- fase densa} \end{cases}$, y en las configuraciones de diseño para refrigerar el gas bruto y el calor sensible.

XVIII.3.- TECNOLOGÍAS PRÁCTICAS

Gasificador de lecho agitado.- La primera planta de gasificación de carbón con lecho agitado soplada con O_2, a escala industrial, se construyó en 1936. La configuración de un gasificador de ceniza seca y lecho agitado se representa en la Fig XVIII.3.

- Es una unidad cilíndrica de alta presión, que opera entre $\begin{cases} \textit{350 ÷ 450 psig} \\ \textit{2410 ÷ 3100 kPa} \end{cases}$

- La carcasa principal del gasificador está rodeada de una camisa de agua de refrigeración

- El carbón calibrado entra por la parte superior a través de una tolva esclusa y desciende hacia el lecho, bajo el control de una parrilla giratoria

- La temperatura de la zona de combustión próxima al fondo de la vasija, es del orden de 2000°F (1093°C); el gas sale de la zona de secado y desvolatilización a 1000°F (538°C)

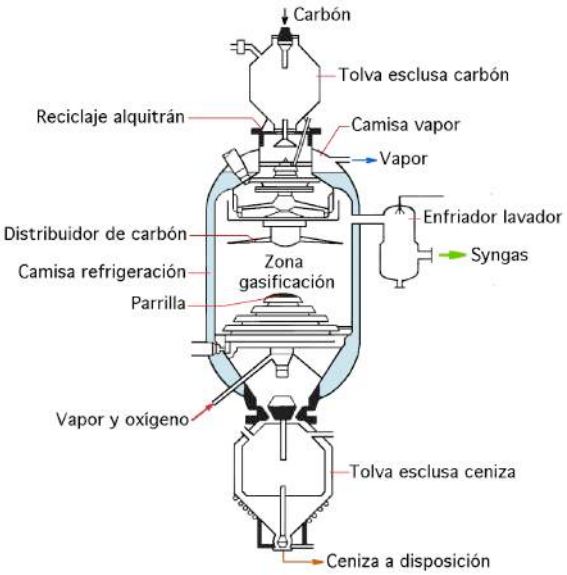


Fig XVIII.3.- Gasificador de lecho agitado y ceniza seca

El proceso de lecho agitado tiene una capacidad limitada; un gasificador con un diámetro de 13,1 ft (4 m) tiene una capacidad nominal de secado del orden de 14,9 m^3N/s, equivalente a unas 600 Ton/día de carbón puro, sin humedad ni cenizas.

La eficiencia del gas frío es del orden de 80% y puede llegar hasta el 89% si se incluyen líquidos hidrocarburos; viene dada por la expresión:

$$\textit{Eficiencia del gas frío} = \frac{\textit{Poder calorífico superior del gas sin S a 60°F}}{\textit{Poder calorífico superior del carbón alimentado}}$$

Gasificador de lecho fluidificado.- Fue la primera unidad comercial de gasificación del carbón, y constituyó la aplicación inicial de la tecnología de lecho fluidificado. El primero de estos gasificadores se puso en operación en Leuna, Alemania, en el año 1926, Fig XVIII.4; en la actualidad estas unidades se han reemplazado por,

- *gasificadores de flujo arrastrado*
- *unidades presurizadas de lecho agitado*

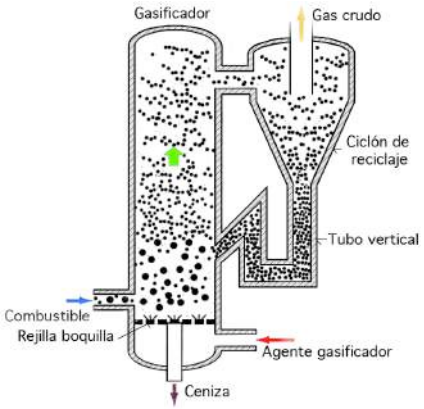


Fig XVIII.4.- Gasificador Lurgi de lecho fluidificado circulante

Gasificador de flujo arrastrado.- Esta tecnología comenzó como un proceso a presión atmosférica, para producir gas combustible o gas de síntesis, a partir de combustibles carbonados sólidos o líquidos. El desarrollo original a nivel de laboratorio lo realizó F. Totzek a finales de los años 1930, en la empresa Heinrich Koppers GMBH, de Essen, Alemania.

La primera planta comercial de gasificación de flujo arrastrado se construyó en Francia, en 1949; la mayor parte de las que se construyeron están aún operativas; su principal aplicación es la producción de H_2 para la síntesis del NH_3. En la Fig XVIII.5 se presenta el esquema del gasificador Totzek-Koppers de flujo arrastrado a presión atmosférica, en el que:

- El carbón se pulveriza y alimenta por medio de transportadores de tornillo, a través de quemadores opuestos, hacia el interior del gasificador que tiene una sección horizontal elíptica

- El combustible se oxida, produciendo una temperatura en la zona de llama de 3500°F (1927°C); las pérdidas de calor y las reacciones endotérmicas reducen la temperatura de los gases a 2700°F (1482°C)

- El gas producto caliente se enfría aún más, mediante el apagado, que consiste en un enfriamiento rápido con agua hasta 1700°F (927°C), para solidificar las partículas de ceniza líquida arrastradas, antes de

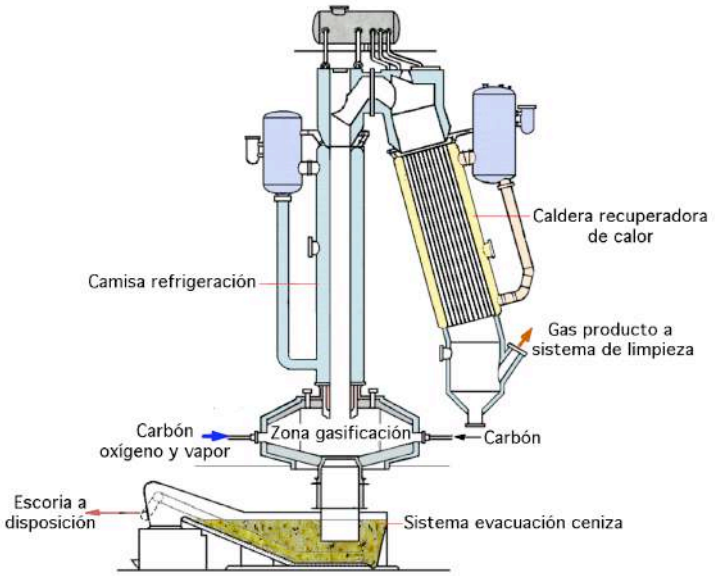


Fig XVIII.5.- Gasificador de flujo arrastrado Totzek-Koppers

que los gases entren en la caldera de recuperación de calor, (caldera de gases de escape)

La eficiencia del gas frío del gasificador Totzek-Koppers soplado con O_2 era del 67%, que parece algo baja, pero hay una fracción de la energía del carbón que se convierte en calor, que se recupera por medio de la camisa de refrigeración y de la caldera de recuperación de calor. La combinación de estas fuentes de energía junto con las últimas mejoras introducidas incrementa la eficiencia total hasta un 90%.

La mayoría de los gasificadores utilizan un diseño de doble cabezal, mediante el equipamiento de dos quemadores dispuestos en oposición, que tienen una capacidad total de 4,73 m^3N/s, equivalente a 210 Ton/día de carbón puro, sin agua ni ceniza.

Gasificador primitivo a presión atmosférica.- El primer gasificador del tipo de flujo arrastrado a presión atmosférica fue diseñado y construido por B&W, Fig XVIII.6, y se puso en marcha en 1951 en la planta del U. S. Bureau of Mines, Morgantown, USA, en las siguientes condiciones:

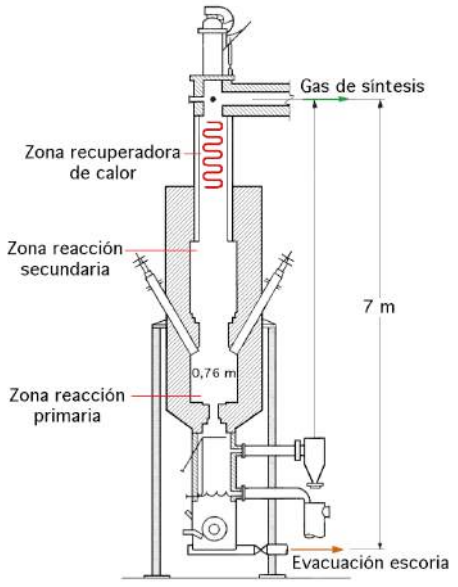


Fig XVIII.6.- Gasificador primitivo soplado con O_2

- Estaba alimentado con O_2 soplado

- Podía gasificar $\begin{cases} 500\ lb/h \\ (0{,}06\ kg/seg) \end{cases}$ *de carbón, produciendo 147,3 m^3N/día de gas de síntesis (syngas)*

El revestido de refractario, comprendía dos zonas de reacción:

- Zona primaria, temperaturas superiores a 3000°F (1650°C)
- Zona secundaria en la que se operaba a 2200°F (1204°C)

Esta unidad llegó a operar con éxito durante 1200 horas.

Gasificadores primitivos presurizados.- El primer gasificador de fuego descendente, se caracterizaba por una alimentación axial de $\begin{cases} 500\ lb/h \\ 0{,}06\ kg/seg \end{cases}$ de carbón, con alimentadores tangenciales de vapor y de O_2.

La unidad diseñada para operar a 450 psig (3100 kPa) funcionó durante el período 1950-70.

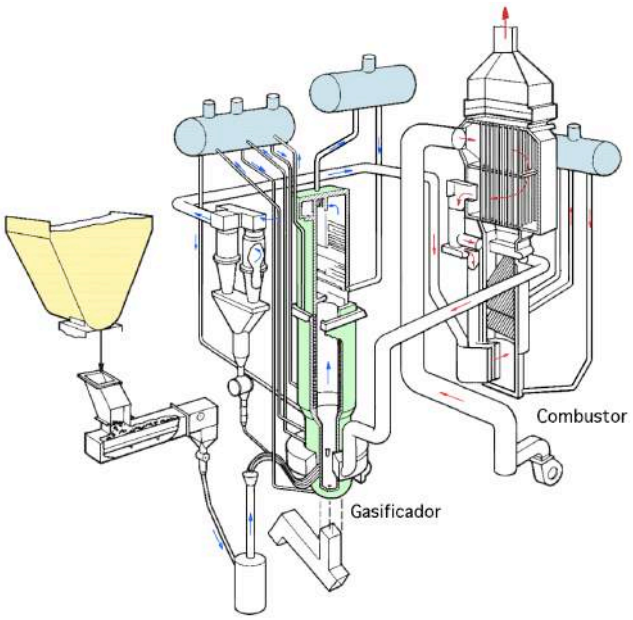


Fig XVIII.7.- Planta piloto de gasificación presurizada en Alliance, Ohio, USA

En 1955 comenzó a operar en Belle, West Virginia, USA, un gasificador a escala industrial, de dimensiones $\begin{cases} diámetro = 15\ ft\ (4{,}6\ m) \\ altura = 88\ ft\ (26{,}8\ m) \end{cases}$; se diseñó para gasificar 16 Ton/día de carbón, produciendo 7,75 m^3N/s de CO y de H_2.

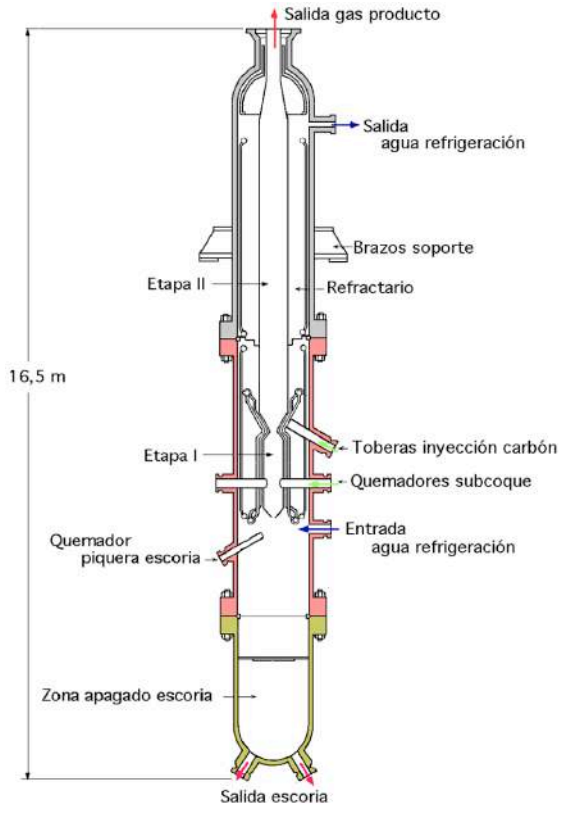


Fig XVIII.8.- Gasificador Bygas de B&W

La zona de gasificación estaba revestida de refractario, y el suelo y las paredes estaban refrigeradas por agua. El gasificador operó durante más de un año, hasta su puesta fuera de servicio, debido al bajo coste del gas natural disponible en el mercado.

En 1960, se construyó una unidad piloto en el centro de Alliance, Ohio, USA., Fig XVIII.7, que estaba alimentada con aire; se utilizó en un programa conjunto con General Electric, para el estudio de ciclos combinados con turbinas de gas y vapor. La unidad tenía un gasificador de 3 Ton/h, con:

- *reciclado del subcoque*
- *equipo mecánico de limpieza de gas*
- *un combustor ciclón refrigerado por gas*

La instalación se mantuvo funcionando tres años, y con ella se estudiaron los gasificadores de fuego vorticial y piqueras de escoria horizontales y verticales

En 1976 se construyó un gasificador, Fig XVIII.8, de 5 Ton/h y 1500 psig (10.340 kPa), para la

planta piloto Bygas, en Homer City, Pennsylvania,USA, con el que se demostró la producción de gas natural sintético a partir del carbón.

Gasificador de flujo arrastrado.- La combustión y el funcionamiento de un gasificador de flujo arrastrado con alimentación de carbón pulverizado, son similares a las de una caldera de carbón pulverizado. La Fig XVIII.9 representa un diseño de gasificador presurizado de 850 a 1000 Ton/día con una caldera recuperadora de calor residual; este gasificador, construido con una pared de vasija de 2" (51 mm) de espesor, está diseñado para funcionar a una presión relativamente baja, del orden de 50 psig (345 kPa); la temperatura de la zona de combustión es de 3400ºF (1870ºC), y el gas que sale de la unidad tiene una temperatura de 1800ºF (982ºC).

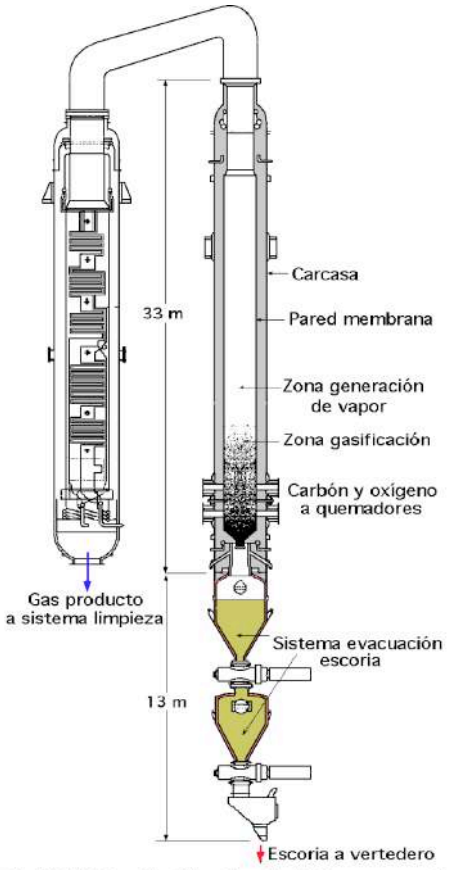


Fig XVIII.9.- Gasificador de flujo arrastrado 1000 Ton/día

El cerramiento de la pared membrana estanco a gases facilita un espacio anular que separa el reactor de gasificación y la vasija presurizada, por lo que ésta, a temperatura relativamente baja, no está en contacto con los gases corrosivos producidos.

En la parte inferior de la unidad, que es la zona de gasificación, los tubos están recubiertos con refractario, a fin de soportar las altas temperaturas necesarias para mantener fluida la escoria.

Las calderas convencionales con combustores ciclón que tienen ceniza fluida, utilizan este tipo de superficies claveteadas revestidas de refractario.

VENTAJAS.- Las que caracterizan a los gasificadores de flujo arrastrado, pueden ser:

a) Insensibilidad a las características del carbón.- *Diversos gasificadores de lecho agitado o de lecho fluidificado pueden aceptar carbones aglutinantes, finos y de cualquier rango. Con alimentación del carbón en fase densa, en contraposición a las lechadas, estos gasificadores se acomodan rápidamente a amplias variaciones del contenido en humedad del carbón.*

b) Fácil manipulación y mezcla, que permiten unidades de gran tamaño.- *Al igual que en las calderas de carbón pulverizado, el tamaño de una unidad se puede incrementar añadiendo quemadores; la alta velocidad del flujo permite tratar, en un gasificador de dimensiones dadas, una cantidad elevada de carbón por hora.*

c) Rápida respuesta al control.- *Esto se debe a su baja densidad de sólidos, comparada con la de otros tipos de gasificadores.*

d) Escoria granular densa, que se reutiliza fácilmente.- *Es un material similar al que correspon-*

de a calderas con piquera de escoria, que se ha utilizado como relleno para carreteras; no crea problemas de contaminación del aire o del agua.

e) Alta producción de gas de síntesis (CO + H_2) y baja de CO_2 y H_2O.- *El gas obtenido en un gasificador con lecho agitado y fondo seco contiene, en volumen, 60% de H_2O y 10% de CO_2, en contraste con el 2% de cada uno de estos componentes, para el caso de un gasificador de flujo arrastrado con alimentación seca.*

f) No genera líquidos hidrocarburados.- *No hay presencia de breas, aceites y fenoles, por lo que se evitan los problemas de manipulación asociados a la presencia de estos productos, así como los requisitos de tratamientos especiales para el agua de lavadores. La reinyección del subcoque que no ha reaccionado es más simple que en el caso de un flujo que cuenta con presencia de breas.*

g) Alta fiabilidad ya que no hay partes móviles en el hogar.*- Se ha eliminado la parrilla rotativa, porque el carbón pulverizado*
- *se dispersa a través del gasificador*
- *se calienta rápidamente hasta los niveles de temperatura de ablandamiento*
- *no entra en contacto con las partículas contiguas de carbón*

h) Pared membrana refrigerada, que reduce el mantenimiento.- *La duración de un gasificador de este tipo, dotado con tubos claveteados revestidos de refractario, está probada en combustores ciclón y en las calderas con piqueras para escoria fundida, lo que contrasta con los mayores requisitos de mantenimiento de los gasificadores recubiertos de refractario no refrigerados.*

INCONVENIENTES.- Las que caracterizan a los gasificadores de flujo arrastrado, son:

a) No son económicos para tamaños muy pequeños.- *Debido a su alta capacidad de gasificación, para una vasija de tamaño dado se requieren pocos gasificadores para llegar a una determinada producción de gas; la reducción del tamaño del gasificador requiere una evaluación detallada de:*

- Los parámetros de escala para la vasija presurizada

- El equipo de preparación del carbón (pulverizadores)

- El equipo correspondiente a la recuperación de calor

b) Apenas produce metano.- *La producción de metano se favorece generalmente con gasificadores de lecho agitado, de menos temperatura y mayor presión.*

c) El control del flujo del carbón es más complejo.- *El mantenimiento de condiciones uniformes de liberación de calor y de escorificación requiere un preciso control de los flujos de carbón. Los sistemas de alimentación de carbón pulverizado en fase densa necesitan, por seguridad, dispositivos de inertización. La alimentación de carbón y el reciclado del subcoque se simplifican, posibilitando mayores presiones con las lechadas de carbón, aunque éstas conllevan penalizaciones por $C_{inquemado}$.*

d) La reducción de carga se limita con algunos carbones.- *En general, es posible reducir la carga hasta el 25% de la nominal; para algunos carbones con alta temperatura de fusión de la ceniza, el mantener una adecuada escorificación fluida puede ser difícil a cargas bajas.*

e) Régimen relativamente alto de O_2 y de recuperación de calor.- *Estas características están*

asociadas con la alta temperatura propia del proceso de flujo arrastrado. Los costes de la recuperación de calor exceden a los de los lechos fluidificados o agitados. Como las paredes del gasificador y la caldera recuperadora de calor absorben el 85% de la energía liberada como calor sensible (que representa el 25% de la energía del carbón), se estima que en la mayoría de los carbones la eficiencia total de la energía química recuperada del gasificador es del orden del 96%.

XVIII.4.- GASIFICADORES MODERNOS

Las nuevas generaciones de gasificadores de carbón, fabrican gas de síntesis para la industria química.

- Los gasificadores de $\begin{cases} \text{- flujo arrastrado operan en un campo que cubre desde } 800 \div 1650 \text{ Ton/día} \\ \text{- lecho fluidificado de alta temperatura, } 580 \text{ Ton/día} \end{cases}$

- Los desarrollos recientes más significativos de la gasificación de carbón para producción de energía eléctrica, se encuentran en los gasificadores de flujo arrastrado soplados con O_2

Se utilizan diversos sistemas de alimentación de carbón, secos y en lechada.

Gasificador Texaco.- Este proceso de gasificación de carbón, de flujo arrastrado, se representa en la Fig XVIII.10.

- Es de flujo descendente de materias primas, y se alimenta con una lechada de carbón-agua de 60÷65% de sólidos en peso y oxígeno

- Opera a presión, hasta 900 psi (6200 kPa), y está revestido con refractario

- El gas bruto sale de la unidad entre $\begin{cases} 2300 \div 2700^{\circ}F \\ 1260 \div 1482^{\circ}C \end{cases}$ *y está separado de la escoria*

- El gas sintético se refrigera mediante una caldera radiante, seguida de una caldera de convección que genera vapor saturado a 1600 psi (11031 kPa), que son los refrigeradores de gas sintético

Existen diversas opciones para la refrigeración del gas:

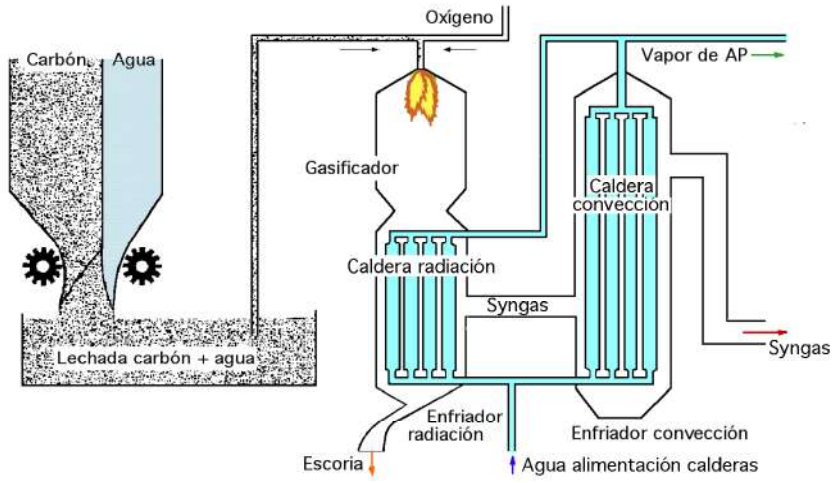


Fig XVIII.10.- Gasificador de carbón de flujo arrastrado Texaco

a) Utilizando los refrigeradores de radiación y convección con lo que se facilita la máxima eficiencia

b) Sustituir el refrigerador radiante por un enfriamiento rápido con agua y eliminar el refrigerador de convección para minimizar el coste de la instalación

c) Emplear sólo el refrigerador radiante, que facilita una recuperación parcial del calor del gas sintético, y tiene un coste y una eficiencia intermedia entre los anteriores

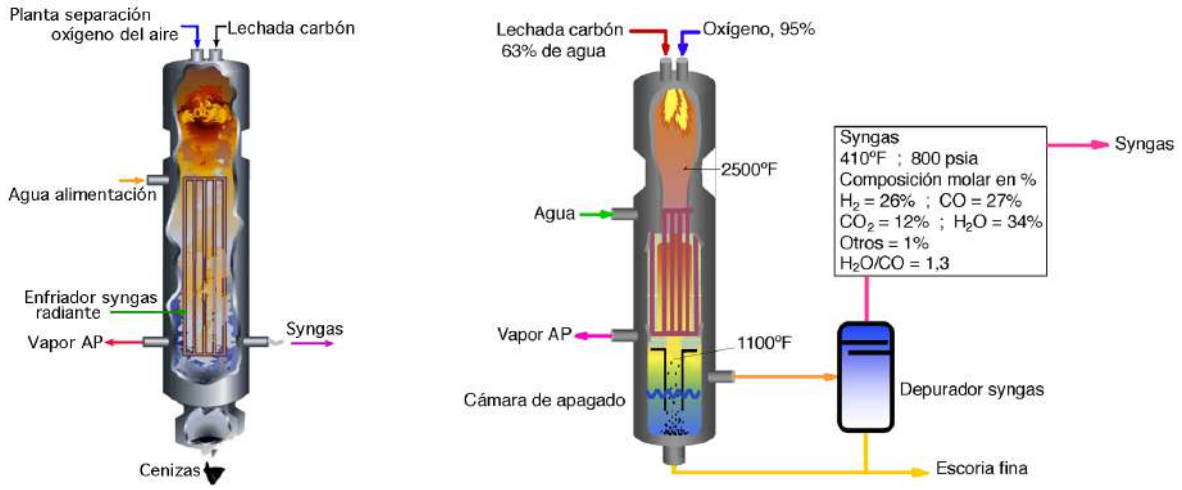


Fig XVIII.11.- a) Gasificador PHR de carbón de flujo arrastrado; b) Gasificador GE Energy (Chevron-Texaco)

La eficiencia de gas frío, para el proceso mostrado en la Fig XVIII.12, es del 77%; si a la energía del gas combustible obtenido se añade la energía del vapor producido, la eficiencia sube al 95%.

La conversión del C se define como el %C que existe en el carbón, convertido en gases o en productos líquidos (breas). La conversión global de C con carbones Pittsburg nº 6 y 8, es de 96,9% y 97,8%, respectivamente.

Gasificador Shell (SCGP).- Este proceso de gasificación de carbón se muestra en la Fig XVIII.12

- El carbón se pulveriza, se seca y se alimenta a tolvas-esclusas para mantener su presurización, siendo la presión de operación de 350 psi (2.410 kPa), menor que la del Texaco

- Las paredes membrana están refrigeradas por agua

- Los quemadores están dispuestos en oposición y en una configuración en el reactor similar a la del diseño Koppers-Totzek

- El gas bruto sale de la unidad entre $\begin{cases} 2500°F \div 3000°F \\ 1371°C \div 1649°C \end{cases}$ *y la mayor parte de la ceniza sale a través de la piquera de escoria en estado fundido*

- El gas sintético contiene una pequeña cantidad de $C_{inquemado}$ *y una significativa fracción de ceniza fundida*

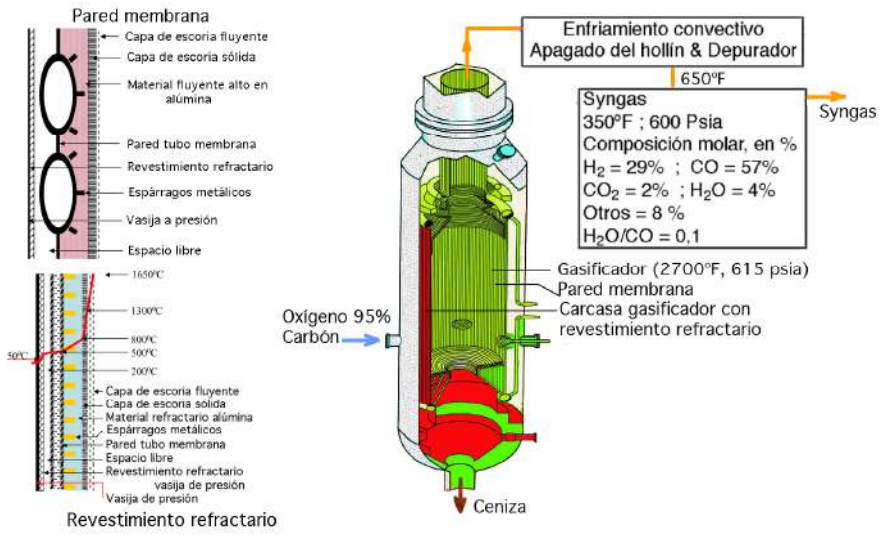


Fig XVIII.12.- Proceso típico con refrigerador de gas sintético y gasificador Shell (SCGP)

Para mantener las partículas de ceniza independientes, el gas caliente de salida se enfría rápidamente con gas reciclado frío. Posteriormente tiene lugar un enfriamiento en el refrigerador de gas sintético, que consta de secciones de radiación y de convección.

- Con el gas bruto caliente se puede obtener algo de sobrecalentamiento en el vapor

- La eficacia de gas frío del gasificador Shell es del orden del 80%, como mínimo

- La recuperación combinada de energía química y térmica es de un 97%

- La eficiencia se reduce { *- con el secado de carbones de alimentacin de baja calidad* / *- cuando la combustión directa del carbón no se emplea para el secado*

- El efecto del secado del carbón puede rebajar la eficiencia al 94%

- Para la mayoría de los carbones, se consigue procesar más del 99% del C

Gasificador Dow.- Es una unidad de gasificador escorificador de flujo arrastrado, de dos etapas, alimentado con lechada de carbón; incluye una caldera pirotubular, un sobrecalentador y un economizador, para recuperar el calor del gas.

- Los carbones se llevan al estado de lechada, con agua, que contiene una carga de sólidos del orden de 50÷55% en peso.

- Aproximadamente el 75% de la lechada se gasifica con O_2 en la primera etapa

- El gas caliente que sale de la primera etapa, a unos 2600°F (1427°C) se utiliza para gasificar el 25% del carbón restante, en la segunda etapa.

- Ambas etapas cuentan con revestimiento refractario y no están refrigeradas.

- El primer reactor es similar a la unidad Koppers-Totzek, con dos quemadores en oposición y con evacuación de escoria.

Estas características aseguran una { *alta conversión del C* / *óptima evacuación de la escoria*

La inyección directa de la lechada de carbón en la entrada correspondiente a la segunda etapa, enfría rápidamente el gas caliente y gasifica el carbón adicional, facilitando una temperatura de salida del gas del orden de 1900ºF (1038ºC).

- Esto elimina la necesidad de una caldera radiante, requiriendo aguas abajo una menor recuperación de calor

- No se precisa energía para el reciclado del gas extinguido, o para la compresión de grandes volúmenes de gas frío, asociada al reciclado

Gasificador Winkler de alta temperatura (HTW).- Está basado en la tecnología Winkler de lecho fluidificado, relativa a la gasificación del reactivo lignito bituminoso alemán, con ceniza seca. El reciclado de los finos arrastrados por el gas bruto da lugar a una mejor conversión del C; la operación a la presión de 130 psig (896 kPa) para un diámetro dado del gasificador, facilita un régimen de producción de gas de síntesis que es más del doble del obtenido a presión atmosférica.

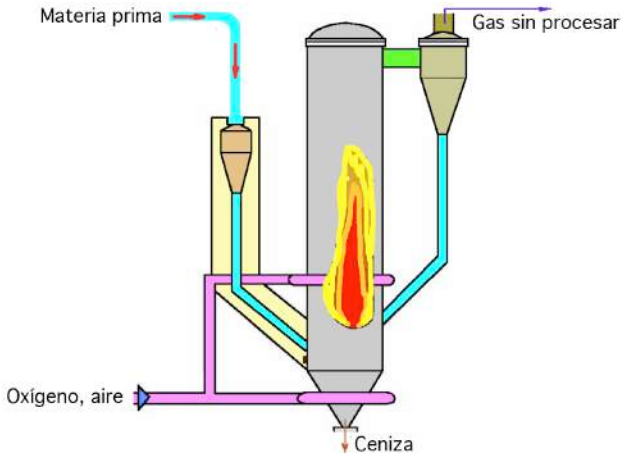


Fig XVIII.13.- Gasificador Wincler de alta temperatura

Desde 1986, en la planta de lignito bituminoso de Barrenrath, en Huerth, Alemania, opera una unidad HTW que procesa 1,6 millones de Ton/año de lignito seco, produciendo 800.000 Ton/año de metanol; permite el empleo de carbones no aglutinantes para lograr una alta conversión del C, 95%, con lignitos bituminosos alemanes.

El lecho opera a temperaturas de $\begin{cases} 1400 \div 1500^{o}F \\ 760 \div 816^{o}C \end{cases}$; la eficiencia del gas frío es del 82% cuando se sopla O_2.

Gasificador Conoco Phillips E-Gas.- Se muestra esquemáticamente en la Fig XVIII.14, y en principio fue desarrollado por Dow Chemicals en Louisiana desde 1987 hasta 1995. Se trata de un gasificador de dos etapas con un 80% de la alimentación en la primera etapa (inferior). El gasificador se alimenta con una lechada agua-carbón y oxígeno, está recubierto de material refractario, y lleva un sistema de eliminación continua de la escoria y de partículas secas. El proceso de E-Gas es interesante para una amplia gama de carbones, coque de petróleo, carbón bituminoso y mezclas. Comercialmente, Conoco Phillips ofrece una

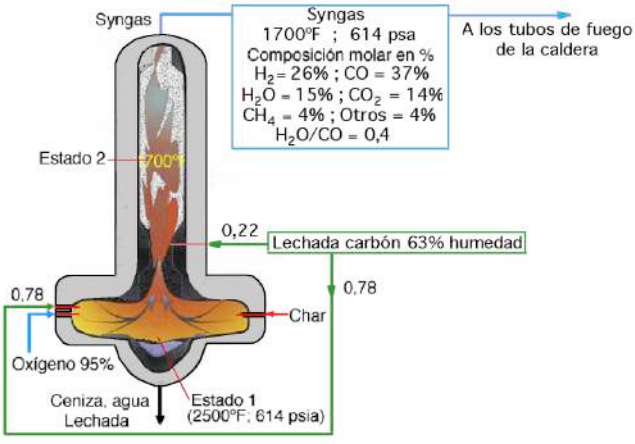


Fig XVIII.14.- Gasificador Conoco Phillips E-Gas

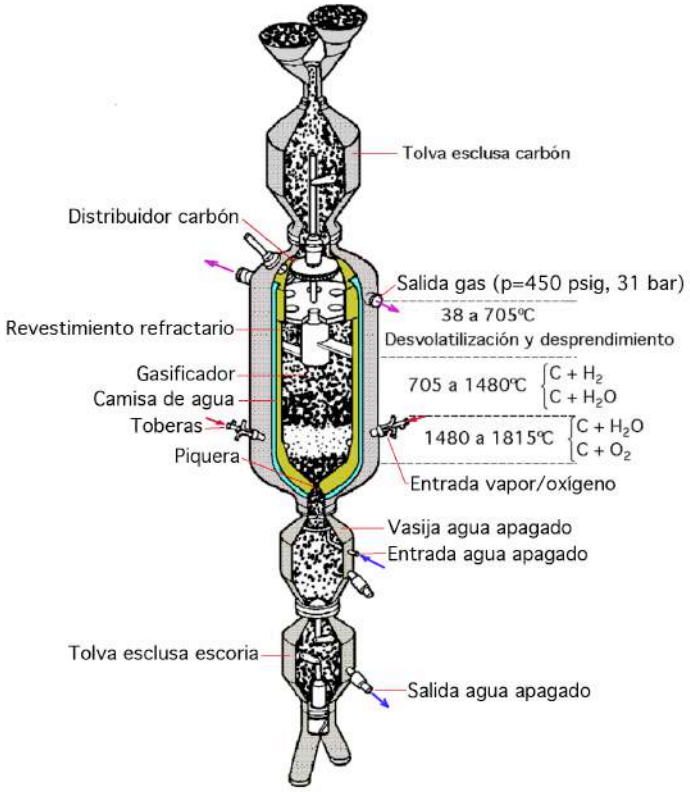


Fig XVIII.15a.- Gasificador Lurgi de escoria fundida BGC

excelente tecnología de gasificación; existe una planta operativa que genera 590 MW_t Syngas, y otras 6 plantas en proyecto

Gasificador Lurgi de escoria fundida BGC.- La Fig XVIII.15a, muestra un esquema que es muy parecido al escorificador Lurgi de ceniza seca (BGL). La diferencia radica en que en la unidad Lurgi BGC la ceniza del carbón fluidifica, pudiéndose utilizar carbones de alta y baja calidad. Las breas y los aceites se reinyectan, con lo que la eficiencia del gas frío llega al 88%, llegando al 90%, cuando se tienen en cuenta líquidos hidrocarburados. Una ventaja de la escorificación del carbón consiste en que el requerimiento de vapor es sólo un 15% del necesario en el Lurgi convencional, cuando gasificaba carbón bituminoso.

Gasificador Lurgi Mark IV.- Es una extensión del gasificador original de lecho móvil desarrollado por Lurgi. Como se muestra en la Fig XVII.15b, tiene un sistema de alimentación seco con tolvas de bloqueo para proporcionar el sellado de presión; es un gasificador de fondo seco, y funciona con carbones de bajo rango. Existen ocho plantas operativas en todo el mundo, incluyendo una en Dakota del Norte que produce 18.600 MWt de Syngas en 14 gasificadores, divididos en dos grupos de 7 gasificadores. Originalmente se diseñó con una unidad de repuesto en cada grupo cuando operaban los 7 gasificadores.

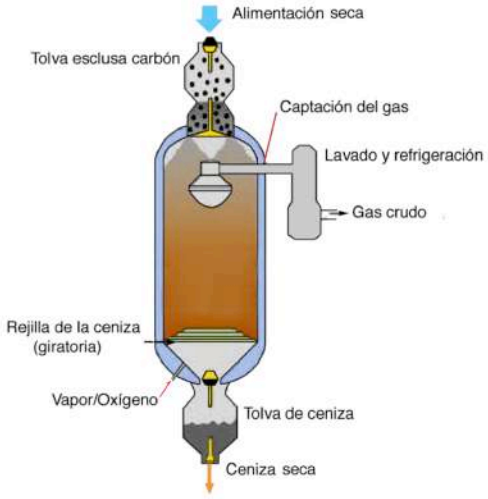


Fig XVIII.15b.- Gasificador Lurgi Mark IV de alimentación seca y ceniza seca

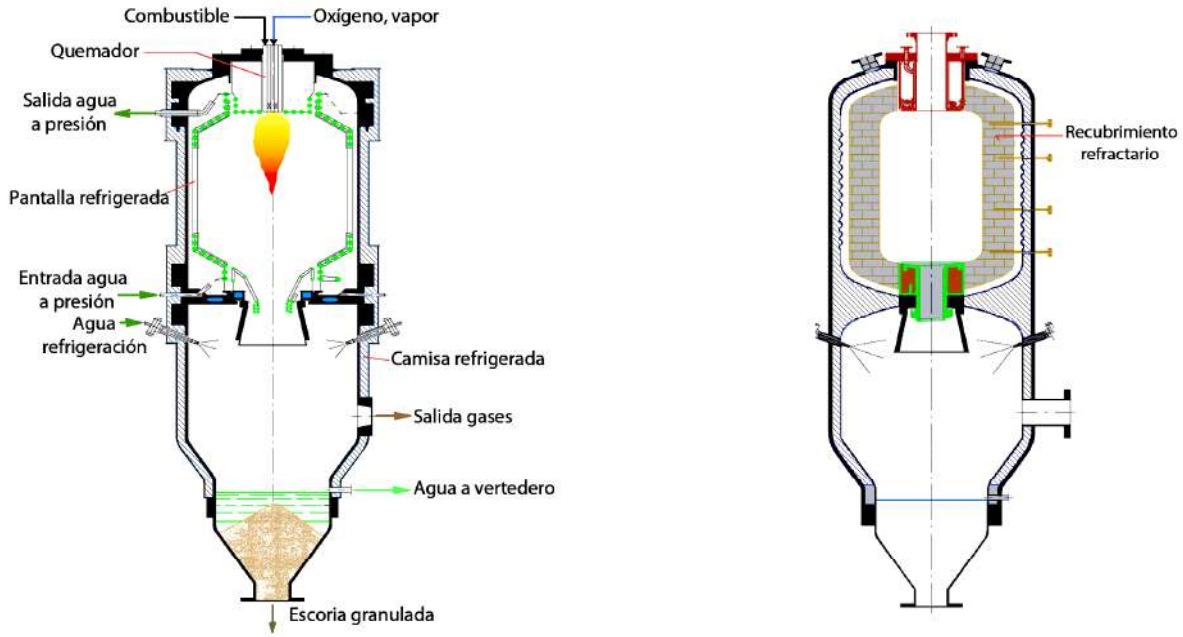


Fig XVIII.15c.- Gasificador British Gas Lurgi BGL

Gasificador British Gas Lurgi (BGL).- El gasificador de diseño modular British Gas Lurgi, se muestra en la Fig XVIII.15c, y fue desarrollado por British Gas durante el período 1958-1965 en la Estación de Investigación del Gas, Consejo Midlands; el gasificador tenía 13 ft y producía 100 Ton/día de Syngas. El gasificador era de alimentación seca, soplado con oxígeno, y llevaba un revestimiento refractario. Admitía una amplia gama de carbones, incluyendo mezclas de combustibles, neumáticos y residuos de madera. Una planta de demostración operó entre 1986/1990, y la primera planta comercial se construyó en Schwarze Pumpe operando entre 2000/2005.

Gasificador Siemens.- Fue desarrollado inicialmente en 1975 para carbones de baja calidad y residuos en el Deutsches Brennstoffinstitut en Freiberg, Alemania, e hizo la primera demostración en Schwarze Pumpe en 1984; con una potencia térmica de 200 MW, la tecnología se comercializa bajo el nombre de GSP por el Grupo de Noell y más tarde, en 2006, bajo el nombre Future Ener-gy fue comprado por Siemens.

El gasificador, como se muestra en la Fig XVIII.16, admite combustible seco y oxígeno, y la parte superior lleva una pantalla refrigerada que conforma la pared del gasificador. Es apto para una amplia variedad de materias primas, desde carbones bituminosos hasta carbones de bajo rango. Una planta operativade 787 MWt Syngas y otra en proyecto



a) Gasificador con pantalla refrigerada, sistema de alimentación seca, carbones antracita, bituminosos, subbituminosos y lignito, contenido de cenizas > 3%

b) Gasificador recubierto de refractario, sistema de alimentación húmeda, coque de petróleo, betunes, alquitranes y petróleo, asfaltenos y biomasa, contenido de cenizas < 3%

Fig XVIII.16.- Gasificadores Siemens (GSP/Noell)

Gasificador GTI (U-Gas de lecho fluidificado).- Es un gasificador de lecho fluidizado que incorpora un sistema de alimentación en seco Fig XVIII.17, y que puede operar con todo tipo de car-

bones y mezclas carbón/biomasa. Es altamente eficiente, ya sea con inyección de aire o con oxígeno. Existen dos plantas operativas que producen 520 MWt Syngas.

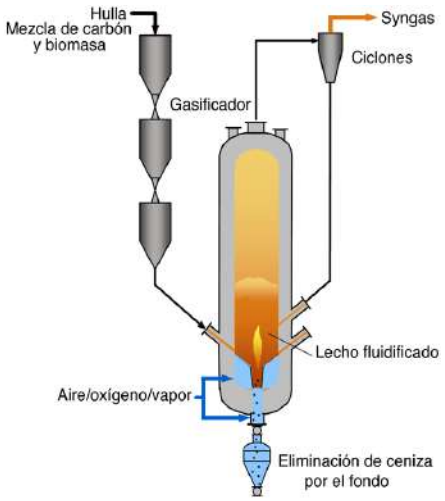


Fig XVIII.17.- Gasificador GTI (U-Gas)

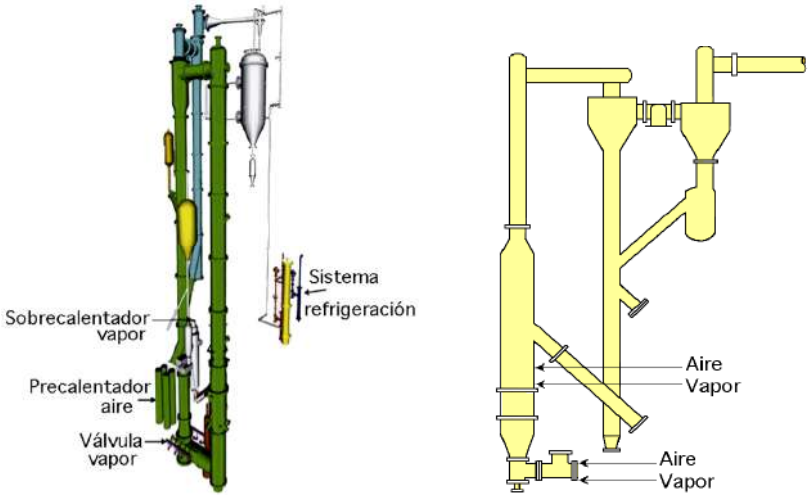


Fig XVIII.18ab.- Gasificador KBR Transport

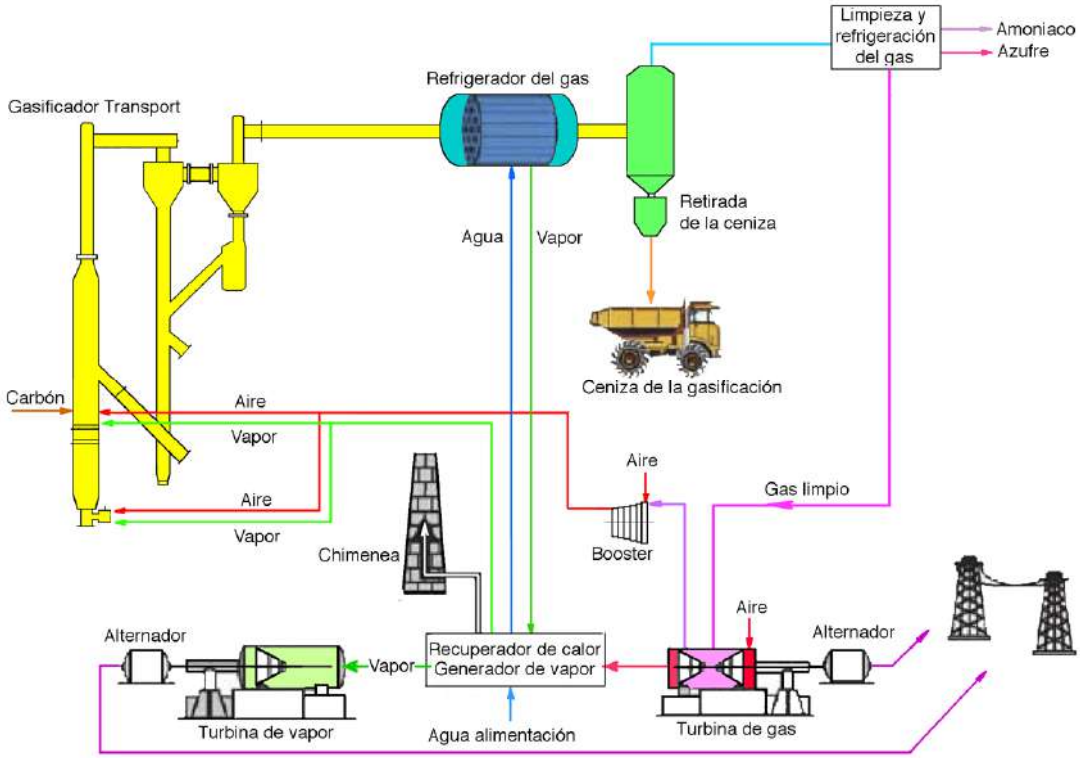


Fig XVIII.19.- Proceso experimental de Orlando, gasificador Transport KBR; 3300 Tons/día carbón subbituminoso; 285 MW

Gasificador KBR Transport.- Es un gasificador que funciona con oxígeno para la generación de energía, y con aire soplado para combustibles y productos líquidos, Fig XVIII.18. Su diseño, de alta fiabilidad, está basado en años de experiencia en la construcción y diseño de unidades FCC *en la crakización catalítica* para la industria petrolera. Utiliza carbones de bajo rango, como PRB y lignitos. Planta experimental de 285 MG (IGCC), Orlando FL, Fig XVIII.19

XVIII.5.- LÍNEAS EN DESARROLLO

Durante las últimas décadas, la principal aplicación de la gasificación ha sido la producción de materias primas para la industria química. Respecto a los gasificadores para la generación de energía eléctrica, todavía en fase de desarrollo, existe un buen número de unidades piloto y de demostración. Hasta 1992 sólo había dos plantas de demostración, del tipo de ciclo combinado con gasificación de carbón en USA: $\begin{cases} \text{- } Cool\ Water\ de\ 92\ MW,\ en\ California \\ \text{- } Plaquemine\ de\ 155\ MW,\ en\ Louisiana \end{cases}$

Muchos de los equipos que configuran una planta de ciclo combinado con gasificación integrada cuentan con una experimentada tecnología; el sistema es mucho más complejo que una planta convencional de vapor, por lo que la integración completa de la planta tiene una mayor repercusión sobre las características funcionales y operativas de la misma.

Los componentes físicos a añadir al gasificador para constituir el sistema, comprenden al menos:

- *Refrigeradores (enfriadores) de gas*
- *Paredes de agua o recubrimientos de refractario*
- *Quemadores*
- *Sistemas de* $\begin{cases} \text{- } evacuación\ de\ ceniza\ sólida\ (seca)\ o\ líquida\ (fundida) \\ \text{- } alimentación\ de\ combustible \\ \text{- } reciclado\ de\ subcoque/subproductos\ que\ no\ reaccionan \end{cases}$
- *Separadores-colectores de partículas*

Materiales del refrigerador de gas sintético.- Los fallos en los materiales del refrigerador de gas sintético representan un alto porcentaje del tiempo que permanecen fuera de servicio las plantas de ciclo combinado con gasificación integrada, por lo que hay que prestar mucha atención a la selección de materiales para estos refrigeradores.

Las diferencias entre los refrigeradores de gas sintético y las calderas que queman carbón son:

- El gas sintético es muy reductor y corrosivo, lo que significa un medio ambiente diferente a la hora de cualificar materiales; las capas protectoras de óxido que se forman en los aceros de baja aleación de las calderas, no se configuran fácilmente en los refrigeradores por la presencia de H_2S y HCl.

- Como consecuencia de la elevada presión de operación en el lado de gases $\begin{cases} 300 \div 600\ psi \\ 2070 \div 4140\ kPa \end{cases}$ *, el punto de rocío del gas bruto en el refrigerador es siempre mucho más alto que en la caldera, que suele operar a presión atmosférica, lo que es riguroso cuando el gas sintético tiene un alto contenido en vapor, lo que ocurre en el caso de un sistema de alimentación con lechada carbón-agua. Hay que tomar precauciones para impedir la operación por debajo del punto ácido de rocío y para evitar la corrosión durante los períodos fuera de servicio.*

- La presurización que precisa una vasija envolvente para los diversos termointercambiadores, complica la disposición general del diseño, lo que requiere una especial atención para asegurar el acceso a las inspec-

ciones y reparaciones. Los aceros de baja aleación no son adecuados para los refrigeradores de gas, debido a la excesiva corrosión provocada por los sulfuros y cloruros.

La *velocidad de sulfuración* depende de la presión parcial del H_2S, siendo el régimen corrosivo tanto mayor cuanto más S tengan los carbones; se forman capas de sulfuro de hierro FeS y mezclas sulfuro-óxido, que generalmente son menos protectoras que las capas de óxido. La excesiva corrosión que presentan los aceros de baja aleación en los refrigeradores de gas, ha obligado a sustituirlos por aceros inoxidables. Los valores de la corrosión han de ser inferiores a 0,1 mm/año, para poder alcanzar una vida de 25 años. El efecto de los *cloruros* presentes en el gas sintético no está con claridad. El régimen de sulfuración en un gas sintético que tiene de $300 \div 500$ ppm de HCl, es variable y, en general más elevado, debido a la formación del cloruro de hierro $FeCl_2$ y a la fisuración por fatiga térmica.

La presencia de HCl en el gas sintético aumenta su punto de rocío desde $\begin{cases} 54°F \div 90°F \\ 30°C \div 50°C \end{cases}$

Si se producen condensaciones, los cloruros aceleran en gran medida la corrosión acuosa durante los períodos fuera de servicio.

Servicio como economizador.- Los economizadores deben operar siempre por encima del punto de rocío del gas sintético, para evitar la corrosión. Se utilizan aceros de baja aleación. Para carbones con un elevado contenido en S, se puede necesitar un revestimiento cromado para alcanzar los 25 años de vida de servicio.

Servicio como vaporizador.- Las recomendaciones para materiales destinados a refrigeradores de gas, utilizados como vaporizadores, con vapor entre $\begin{cases} 1500 \div 2500\ psi \\ 103{,}4 \div 172{,}4\ bar \end{cases}$ y $\begin{cases} 600°F \div 660°F \\ 316°C \div 349°C \end{cases}$, se recogen en la Tabla XVIII.3

Tabla XVIII.3.- Recomendaciones para materiales destinados a refrigeradores de gas

Carbón	*Buen control de la corrosión en períodos fuera de servicio*	*Reducido control de la corrosión en períodos fuera de servicio*
Bajo S (< 1%) Bajo Cl (< 0,05%)	*Acero de baja aleación (T-11) cromado o chapado con SS-304*	*T-11 revestido con Cr-V o chapado con SS-311*
Alto S (> 1%) Alto Cl (> 0,1%)	*Acero de baja aleación (T-11) chapado con SS-310*	*T-11 chapado con 25-30% Cr + 3-4% Mo*

Servicio como sobrecalentador.- Hay poca experiencia para seleccionar los materiales destinados al refrigerador de gas sintético bruto, para servicio como sobrecalentador; los aceros aleados con un 25% de Cr, parecen idóneos para temperaturas hasta 1000ºF (538ºC); sin embargo estos aceros desarrollan una costra rica en S, que puede ser no protectora.

La adición de Va $\begin{cases} \text{- disminuye el contenido en S y el espesor de la costra} \\ \text{- incrementa el contenido en } Cr_2O_3 \\ \text{- forma una película más protectora} \end{cases}$

Limpieza de los productos de gasificación.- El gas bruto de carbón que sale del gasificador se somete a tratamiento para eliminar impurezas, cuyo nivel depende del uso final que vaya a tener. Por ejemplo, el gas que se emplea para la generación de energía eléctrica se quema en el combustor de una instalación de turbina de gas, que forma parte de una planta de ciclo combinado; el gas bruto de carbón se debe limpiar para $\begin{cases} \textit{- evitar el ensuciamiento y corrosión de la turbina} \\ \textit{- cumplimentar los requisitos exigidos sobre emisiones} \end{cases}$

Si el gas de carbón se va a utilizar para la síntesis química, necesita un refino especial.

Si el proceso de gasificación se combina con otros procesos de limpieza de gas, emite menos contaminantes que un sistema convencional de cualquier tipo de combustión de carbón.

Las emisiones de SO_2, NO_x y partículas sólidas en suspensión, se pueden reducir mediante un gasificador soplado con O_2, acoplado a procesos convencionales de purificación.

XVIII.6.- COMPOSICIÓN DEL GAS PRODUCTO

La composición del gas resultante depende de $\begin{cases} \textit{- el proceso de gasificación} \\ \textit{- las condiciones de operación} \\ \textit{- el carbón utilizado} \end{cases}$

El gas procedente de una unidad soplada con O_2 consta de CO, H_2, CO_2, CH_4 y H_2O.

Cuando se emplea aire como oxidante, el N_2 es un componente importante.

El S del combustible se convierte en sulfuro de hidrógeno H_2S y en sulfuro de carbonilo COS

El N_2 del combustible se convierte en amoniaco NH_3 y en cianuro de hidrógeno HCN.

Se pueden presentar otras impurezas que incluyen $\begin{cases} \textit{- cloruros} \\ \textit{- compuestos coloidales de álcalis} \\ \textit{- metales pesados} \end{cases}$

En el gas bruto hay hidrocarburos pesados cuando procede de procesos gasificadores a baja temperatura. La gasificación con soplado de aire produce un gas con bajo poder calorífico, debido a la dilución con N_2, entre 3,5÷7,9 MJ/m^{3}N. Las unidades sopladas con O_2 producen gas con un poder calorífico de 10,6÷7,9 MJ/m^{3}N.

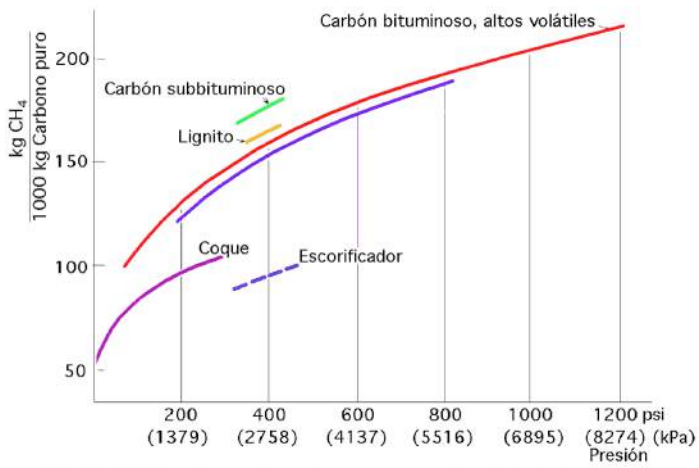


Fig XVIII.20.- Formación de metano en función de la presión

Las reacciones de $\begin{cases} \textit{- intercambio del gasificador} \\ \textit{- metanización} \end{cases}$ son imprescindibles para producir un gas (gas natural sintético) con elevado poder calorífico, del orden de 39,3 MJ/m^{3}N.

La Fig XVIII.20 indica el efecto de la presión de operación sobre el metano producido en un gasificador Lurgi, para diversos tipos de combustible, mientras que la composición del gas bruto, en

función del tipo de gasificador y oxidante, se indica en la Tabla XVIII.4.

Tabla XVIII.4.- Composición del gas bruto, en función del tipo de gasificador y del oxidante, observándose los contrastes entre diferentes condiciones de gasificación

Tipo gasificador	*Lecho agitado ceniza seca*	*Lecho agitado ceniza fundida*	*Lecho fluidificado*	*Flujo arrastrado alimentación lechada*	*Flujo arrastrado alimentación seca*
Oxidante Combustible	*Aire Subbituminoso*	*Oxígeno Bituminoso*	*Oxígeno Lignito (3)*	*Oxígeno Bituminoso*	*Oxígeno Bituminoso (3)*
Análisis combustible					
% peso C	*41,1*	*61,2*	*56,9*	*61,2*	*66,1*
% peso H	*4,6*	*4,7*	*3,8*	*4,7*	*5*
% peso N	*0,8*	*1,1*	*0,8*	*1,1*	*1,2*
% peso O	*20,5*	*8,8*	*15,9*	*8,8*	*9,5*
% peso S	*0,6*	*3,4*	*1*	*3,4*	*3,7*
% ceniza	*16,1*	*8,8*	*9,6*	*8,8*	*9,5*
% humedad	*16,3*	*12*	*12*	*12*	*5*
HHV Btu / lb	*11258*	*11235*	*9914*	*11235*	*12128*
(kJ / kg)	*26189*	*26136*	*23063*	*26136*	*28213*
Alimentación combustible	*Seca*	*Seca*	*Seca*	*Lechada 65% peso = Sólido*	*Seca*
Presión operación { *psi*	*295*	*465*	*145*	*615*	*365*
kPa	*2034*	*3206*	*1000*	*4240*	*2516*
Gas bruto					
% vol CO	*17,4*	*46*	*48,2*	*41*	*60,3*
% vol H_2	*23,3*	*26,4*	*30,6*	*29,8*	*30*
% vol CO_2	*14,8*	*2,9*	*8,2*	*10,2*	*1,6*
% vol H_2O	*{1}*	*16,3*	*9,1*	*17,1*	*2*
% vol N_2	*38,5*	*2,8*	*0,7 (4)*	*0,8 (4)*	*4,7 (4)*
% vol $CH_4 + C_nH_m$	*5,8*	*4,2*	*2,8*	*0,3*	
% vol H_2S + SCO	*0,2*	*1,1*	*0,4*	*1,1*	*1,3*
% vol NH_3 + HCN	*{2}*	*0,3*	*{2}*	*0,2*	*0,1*
HHV Btu / lb	*196*	*333*	*309*	*278*	*297*
(MJ / m^3N)	*7,7*	*13,1*	*12,2*	*10,9*	*11,7*

Notas: (1) análisis seco; (2) no explicitado ; (3) combustible seco ; (4) incluido argón

- El poder calorífico del gas procedente de gasificadores de lecho agitado, varía mucho entre gasificadores soplados con aire y gasificadores soplados con oxígeno, y puede influir bastante en las características de combustión del gas

- El gas bruto de un gasificador de lecho agitado contiene cantidades significativas de NH_3 y de condensables orgánicos pesados, como breas, aceites y fenoles; tiene un poder calorífico mayor que el de flujo arrastrado, debido a un mayor contenido en metano

- Los dos tipos de gasificadores de flujo arrastrado más desarrollados producen cantidades despreciables de compuestos orgánicos, debido a la alta temperatura de funcionamiento

- Uno de los procesos se alimenta con lechada y produce un gas con bajo contenido en CO y altos contenidos en H_2 , CO_2 y H_2O, en comparación con el proceso de alimentación en seco

Parámetros del combustible y de operación, tales como { *- la composición del combustible* / *- la presión de operación* / *- las entradas de vapor y oxígeno* }, influyen en la composición final del gas bruto.

PURIFICACIÓN DEL GAS.- Para obtener un producto de calidad comercial hay que eliminar las impurezas que existen en el gas bruto. Los procesos empleados para purificar el gas de carbón destinado a la producción de energía eléctrica, se pueden clasificar:

- Como convencionales (cuando el gasificador esté soplado con O_2)

- En desarrollo (cuando el gasificador esté soplado con aire)

El *gas bruto* (gas ácido por su contenido en H_2S y CO_2) que procede de gasificadores soplados con O_2, primero se refrigera y después se trata para eliminar la acidez. Los procesos de eliminación en frío se desarrollaron para la limpieza del gas producto destinado para la síntesis química y para los gasoductos de gas natural. Los gasificadores soplados con aire se limitan a obtener el gas destinado a la generación de energía eléctrica, debido a que el N_2 propio del gas producto no es adecuado para la síntesis química.

El *gas combustible de bajo poder calorífico* procedente de una unidad soplada con aire, cuando se utiliza en una turbina de gas de alta eficiencia, se tiene que quemar caliente para mantener una combustión estable y evitar las pérdidas térmicas y de eficiencia asociadas a la refrigeración del gas.

Procesos convencionales.- El objetivo fundamental de la eliminación de ácido es separar los compuestos de S que hay en el gas combustible. Para eliminar los materiales indeseables (breas y aceites) que podrían contaminar los disolventes empleados para la eliminación del ácido, el gas bruto procedente de gasificadores de lecho agitado requiere de un tratamiento previo de varias etapas, Fig XVIII.21; mediente una etapa de $\begin{cases} \text{- apagado (extinción o enfriamiento rápido)} \\ \text{- refrigeración} \end{cases}$, se eliminan las breas pesadas y las partículas para su reciclado hacia el gasificador.

Las etapas finales de refrigeración condensan y eliminan los aceites ligeros y el agua.

El *tratamiento previo* de los gases brutos de más alta temperatura procedentes de gasificadores de lecho fluidificado y de flujo arrastrado, es más simple; el gas se enfría por apagado o por su paso a través de un termointercambiador y a continuación se eliminan las partículas.

a) Los aparatos de eliminación seca de partículas, como los ciclones o los filtros cerámicos, se utilizan para facilitar un producto que se recicla con el fin de mejorar la conversión del C y minimizar el agua a sumidero

b) Los aparatos de eliminación húmeda de partículas, como el lavador Venturi, aseguran que no pase partícula alguna al sistema de eliminación de ácido

c) Las emisiones finales de partículas aguas abajo de la instalación, son inferiores a $\begin{cases} 0{,}01\ lb/10^6\ Btu \\ 4{,}3\ g/GJ \end{cases}$

El lavado con agua implica una refrigeración adicional del gas bruto, y elimina trazas de impurezas de metales y condensables, como amoníaco NH_3, cianuro de hidrógeno HCN, cloruros y álcalis.

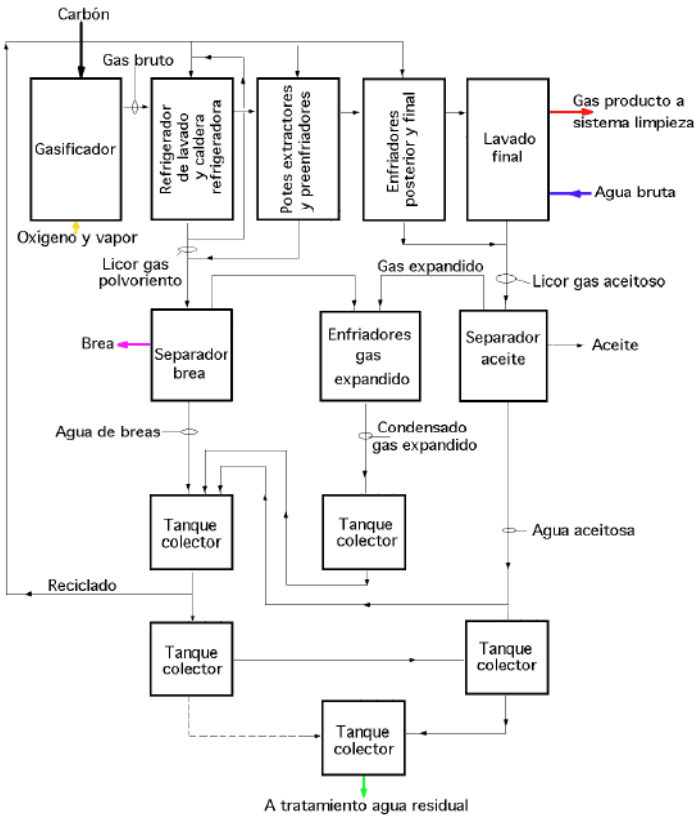


Fig XVIII.21.- Esquema de demostración del proceso de planta de lecho agitado con gas ácido

Eliminación de ácido.- Los compuestos de S que hay en el gas bruto procedente de un gasificador, se eliminan más eficientemente que el SO_2 contenido en los humos de una caldera convencional que quema carbón. A título de ejemplo, un depurador húmedo de una planta convencional de vapor que quema carbón, procesa un volumen hasta 150 veces el que correspondería a un sistema comparable de eliminación de ácido, situado aguas abajo de un gasificador de 500 psig (3450 kPa); ésto se debe a las diferencias de presión y contenido de N_2 que hay entre ambos.

Los procesos de *eliminación de ácido* por disolventes están orientados a:

- *Reducir el consumo energético*
- *Optimizar las operaciones de planta*
- *Cumplimentar la legislación medioambiental más exigente*

y se distinguen por los tipos de disolventes que usan, que pueden ser químicos, físicos o una combinación de ambos.

- Los *procesos con disolventes químicos* emplean $\begin{cases} - \text{ aminas} \\ - \text{ carbonatos alcalinos} \end{cases}$ que reaccionan con el gas ácido. En un proceso con amina, el disolvente pobre, entre $\begin{cases} 80 \div 120°F \\ 27 \div 49°C \end{cases}$, circula en una torre de absorción en contracorriente con el gas; el disolvente se combina con el $\begin{cases} - \text{ sulfuro de hidrógeno } (H_2S) \\ - \text{ sulfuro de carbonilo } (COS) \\ - \text{ dióxido de carbono } (CO_2) \end{cases}$,

para formar un disolvente rico, que se regenera mediante la aplicación de calor y reducción de presión, produciéndose gas ácido concentrado.

Los factores decisivos en la elección del proceso de eliminación son:

- *La preferencia del disolvente por el H_2S y el COS, respecto al CO_2*

- *La resistencia del disolvente frente a la degradación por ciertos componentes del gas*

- Los *disolventes físicos* sitúan el gas ácido en solución, incrementando la solubilidad cuando decrecen las temperaturas del disolvente. La regeneración es similar a la de los procesos químicos y consume menos energía; el gas ácido concentrado que se ha configurado durante la regeneración, se envía al sistema recuperador de S, que transforma la mayoría de los compuestos de S en elementos comerciables.

Proceso Claus.- Es el que más se emplea para recuperar el S de los gases sulfurosos separados en las refinerías de gas natural y de petróleo, y de flujos de plantas químicas. Este método se ha utilizado en los flujos de gas ácido procedentes de la gasificación del carbón, recuperarando el 95÷97% del S presente en el flujo de gas ácido. Cuando el gas de cola de una planta Claus contiene de 3 ÷5% del S base, se convierte en una fuente emisora que requiere nuevas modificaciones del proceso o un nuevo proceso de tratamiento. Si la planta Claus se combina con una unidad SCOT *(Shell Claus Off-gas Treatment)* de tratamiento de gas fétido, se llega a una reducción del sulfuro de hidrógeno H_2S inferior a 10 ppm en volumen, es decir más del 99%.

$\begin{cases} El\ contenido\ de\ S\ en\ el\ combustible \\ La\ concentración\ de\ H_2S\ en\ el\ gas\ bruto \end{cases}$, afecta a la selección del proceso; la selección final se basa en $\begin{cases} - \ un\ análisis\ comparativo\ de\ emisiones\ admitidas \\ - \ el\ coste\ de\ capital\ y\ de\ operación \end{cases}$

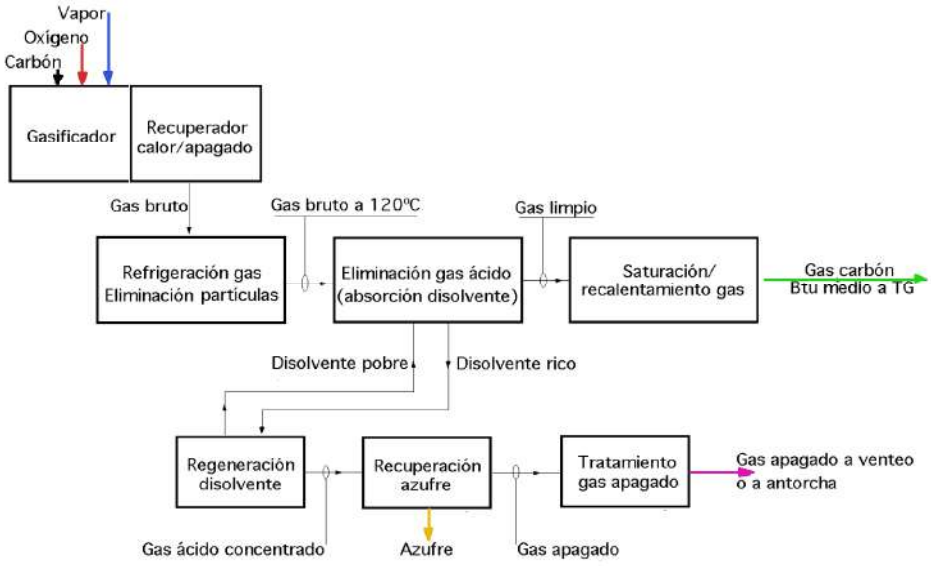


Fig XVIII.22.- Esquema de un sistema de limpieza de gas para un gasificador de flujo arrastrado y soplado con O_2

La aplicación de estos procesos produce un gas de carbón que cuando se quema da lugar a emisiones de S y de partículas mucho menores que las estandarizadas para nuevas fuentes.

Emisiones de NO_x.- No hay emisiones procedentes del sistema de gasificación, salvo una pequeña cantidad que emana de la planta de recuperación de S.

Para la generación energética, el combustible que se prefiere para el combustor de una turbina de gas de ciclo combinado, es el gas con poder calorífico medio procedente de un gasificador soplado con O_2; las emisiones de NO_x pueden ser bajas, dependiendo del sistema de turbina de gas que se utilice. La mayor parte del N_2 procedente del combustible se elimina del gas bruto en las etapas iniciales de la limpieza del gas, por lo que los NO_x que salen del combustor hacia la turbina, son de origen térmico.

Mediante la dilución del gas en agua, vapor saturado o inyección de N_2 antes de la combustión, las emisiones de NO_x pueden llegar a ser inferiores a $\begin{cases} 0{,}1\ lb/10^6\ Btu \\ 43\ g/GJ \end{cases}$.

XVIII.7.- PROCESOS EN DESARROLLO

Los gasificadores soplados con $aire_{presurizado}$ se están considerando para su posible aplicación en plantas energéticas de ciclo combinado. La eliminación de la planta de O_2 puede reducir costes y mejorar la eficiencia global de la instalación; una exigencia en el diseño de los sistemas soplados con aire es el desarrollo de equipos de limpieza del gas en caliente, fiables y con costes admisibles.

Mediante la limpieza del gas en caliente, la turbina se puede alimentar directamente con el gas que sale del gasificador; la limitación impuesta por los materiales, permite un campo operativo del orden de $\begin{cases} 1200°F \div 1400°F \\ 649°C \div 760°C \end{cases}$, por lo que los materiales disponibles resultan más adecuados para los gasificadores de lecho fluidificado y de flujo arrastrado; los absorbentes a considerar operan y se regeneran en seco, con lo que se minimiza el agua a sumidero.

Los ***filtros de material cerámico***, rígidos y porosos, son adecuados para la eliminación de partículas en caliente.

El material cerámico debe:
- *ser bastante poroso para permitir la penetracion del gas*
- *capturar las particulas finas*
- *permitir la eliminacion de sólidos y recuperar la caída de presión*
- *resistir el ataque químico producido por un ambiente reductor a alta temperatura*

Existen ***filtros de lecho granular*** en los que el gas polvoriento pasa a través de un lecho móvil de sólidos que atrapa las partículas; el material que constituye el lecho, junto con las partículas atrapadas, se extrae, se limpia y se devuelve al proceso.

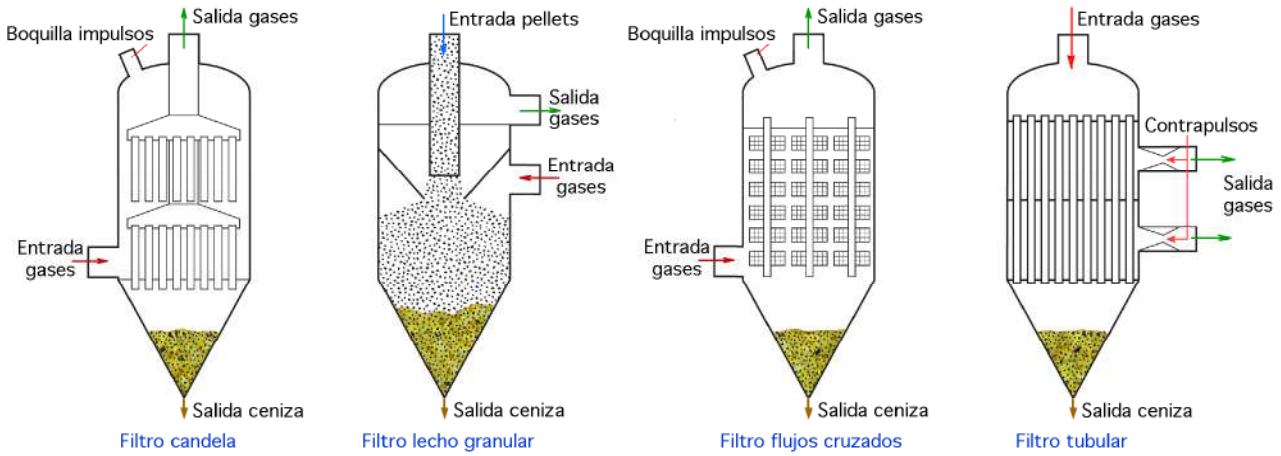


Fig XVIII.23.- Sistemas de filtros cerámicos

Desulfuración en caliente.- En los sistemas regenerativos se utiliza un absorbente como la ferrita de cinc $ZnFe_2O_4$ que es capaz de eliminar compuestos de S en fase gaseosa, hasta niveles de 10 ppm en volumen y que se puede regenerar, Fig XVIII.24.

En el proceso, las pellas de ferrita de cinc están contenidas en unos recipientes reactores, a través de los cuales pasa el gas ácido cargado de S.

- Algunos sistemas configuran lechos fijos en paralelo, con válvulas calientes que distribuyen el gas entre los diversos lechos, según se encuentren en períodos de absorción o de regeneración

- Otros sistemas emplean el concepto de lecho agitado, que tienen la ventaja de un control más preciso de la temperatura y la posibilidad de extraer calor durante la regeneración

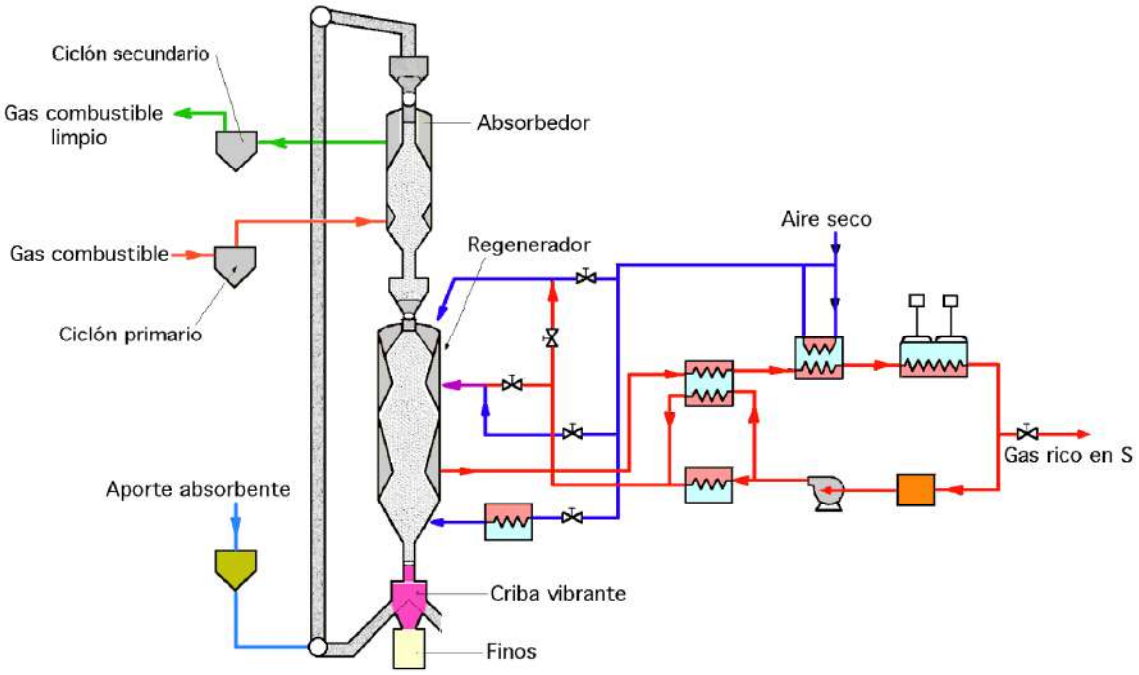


Fig XVIII.24.- Esquema de proceso de lecho agitado con ferrita de cinc

El absorbente se regenera mediante el paso de un flujo de aire controlado a través del lecho de pellas, que reacciona exotérmicamente para producir un gas con SO_2 concentrado, que hay que tratar posteriormente. Si la temperatura se mantiene por debajo de 1200ºF (650ºC), la producción de la vaporización y sinterización del cinc se hace crítica.

El absorbente titanato de cinc Z_nTiO_3, se ha desarrollado para incrementar la temperatura de la operación hasta 1400ºF (760ºC), reduciendo la vaporización del cinc e incrementando la potencia y vida del absorbente, que es un parámetro crítico por su alto coste.

La ferrita de cinc se ha ensayado en las modalidades de eliminación $\begin{cases} \text{- } \textit{única} \\ \text{- } \textit{de acabado} \end{cases}$

*- En la **eliminación única** el absorbente se usa para eliminar la totalidad del S*

*- En la **eliminación de acabado**, el absorbente es un medio secundario que elimina el S, ya que la eliminación principal se efectúa dentro del gasificador*

Los *gasificadores de lecho fluidificado* utilizan un absorbente basto, como la caliza o dolomía, para capturar parte del S.

Las *unidades de flujo arrastrado* se alimentan con óxido de hierro o con dolomía para capturar el S de la escoria.

- Además de las líneas de eliminación de partículas y de S, hay que considerar el efecto de la presencia en el gas de cloruros, compuestos alcalinos y otros elementos volátiles, sobre las características operativas del equipo que se encuentra aguas abajo

- El NH_3 presente en el gas no condensa en la hipótesis de limpieza en caliente, y puede dar lugar a altas emisiones de NO_x a partir del combustor de la turbina de gas

Efluentes acuosos.- Los sistemas de gasificación anteriores utilizan agua para:

- La refrigeración del gas bruto
- El apagado (enfriamiento rápido) de la escoria fundida
- La ejecución de la lechada de carbón
- La saturación del gas limpio
- La gasificación como reactivo en forma de vapor

El agua que sale en forma de humedad con el gas bruto, condensa durante el proceso de refrigeración; la cantidad de agua a sumidero y el tratamiento requerido varían según los diferentes procesos de gasificación. La mayor parte del agua se recicla hacia el propio sistema, aunque se requiere una purga continua para limitar la acumulación de $\begin{cases} \text{- } \textit{sales corrosivas} \\ \text{- } \textit{impurezas retiradas del flujo de gases} \end{cases}$

En todos los efluentes acuosos de gasificadores están presentes diversos contaminantes, como amoniaco, sulfuros, cianuros y formiatos; sus valores están relacionados con los contenidos de S y N_2

en el combustible, y con la temperatura de operación del gasificador.

En los gasificadores de lecho agitado, la concentración de $\begin{cases} \text{- } \textit{contaminantes orgánicos} \\ \text{- } \textit{compuestos fenólicos} \end{cases}$ es bastante alta en el agua que va a sumidero, contaminantes que no existen en las actuales unidades de flujo arrastrado.

En el agua que va a sumidero procedente de depuradores húmedos hay presencia de partículas finas en suspensión.

El proceso de tratamiento de los efluentes químicos de gasificadores de carbón varía según los $\begin{cases} \textit{contaminantes presentes} \\ \textit{requisitos exigidos en la descarga} \end{cases}$, e incluye la: $\begin{cases} \text{- } \textit{Limpieza de vapor} \\ \text{- } \textit{Floculación y clarificación de partículas} \\ \text{- } \textit{Oxidación biológica por organismos orgánicos e inorgánicos} \end{cases}$

Descarga de sólidos.- La principal fuente de descarga de sólidos procedentes de un gasificador es la ceniza del carbón evacuada por el fondo de la unidad. Los sólidos arrastrados por el gas, si no se reciclan tras su captura, se pueden constituir en desechos; a veces, los sólidos arrastrados se descargan como lodos de clarificación procedentes del sistema de tratamiento del agua residual; la ordenación de estos sólidos depende del proceso de gasificación y de las propiedades del carbón utilizado en el mismo.

Una ventaja medioambiental de los gasificadores de flujo arrastrado, en comparación con las calderas convencionales de carbón, es la naturaleza inerte y volumen reducido de los residuos sólidos.

- La alta temperatura de gasificación convierte la mayor parte de la ceniza del combustible en escoria fundida, sangrada desde el fondo del gasificador

- Tras el enfriamiento rápido con agua, la escoria se convierte en un sólido vitrificado que es muy resistente a la lixiviación

- Se ha investigado el reciclado de la ceniza, fundamentalmente como $\begin{cases} \textit{material de asiento para carreteras} \\ \textit{aglomerado de peso ligero} \end{cases}$

- La planta recuperadora de S produce azufre elemental, que se puede vender como fertilizante

- La ceniza del fondo de los gasificadores de lecho agitado no es peligrosa

- La ceniza no aglomerada procedente de un gasificador de lecho fluidificado no está fundida y puede contener sólidos reactivos.

Para la captura de S se suele añadir al lecho fluidificado un absorbente con Ca, por lo que puede haber presencia de sulfuro de calcio, que requiere una oxidación externa para estabilizar el Ca en forma de sulfato.

XVIII.9.- GASIFICACIÓN DEL CARBÓN PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA

Mediante un proceso posterior del gas de síntesis que tiene CO y H_2 se puede obtener amoniaco, metanol, anhídrido acético, gasolina y otros subproductos, mediante diversas etapas de conversión química; estas técnicas son costosas cuando se las compara con la producción química de los citados elementos a partir del petróleo y gas natural

El gas sintético se puede utilizar para la generación de energía eléctrica, siendo la aplicación más inmediata su combustión en una turbina de gas; la recuperación del calor residual del gasificador y del escape de la turbina de gas para producir vapor de agua, permiten combinar eficientemente el ciclo de la turbina de gas y el de la turbina de vapor configurando un ciclo combinado con gasificación integrada

Este método de generación de energía a partir del carbón, que es técnicamente viable, no se aplica de forma comercial, debido a que los sistemas convencionales de combustión son más baratos y más sencillos; no obstante, se ha renovado el interés por las plantas de ciclo combinado, tras los últimos desarrollos y reglamentaciones medioambientales, cada vez más exigentes.

PLANTA ENERGÉTICA DE CICLO COMBINADO.- La producción de energía eléctrica a partir de la gasificación del carbón y de la combustión del gas combustible en una planta de ciclo combinado, requiere un alto grado de integración de componentes, tal como se indica en la Fig XVIII.25; parte del aire comprimido se utiliza para gasificar el carbón; el gas combustible quemado y caliente se expande en una turbina que acciona el compresor de aire y el generador eléctrico. El gas de escape de la turbina de gas, que en unidades modernas sobrepasa los 1000ºF (538ºC), pasa a través de un generador de vapor recuperador de calor, en el que se produce vapor sobrecalentado que acciona un grupo turboalternador.

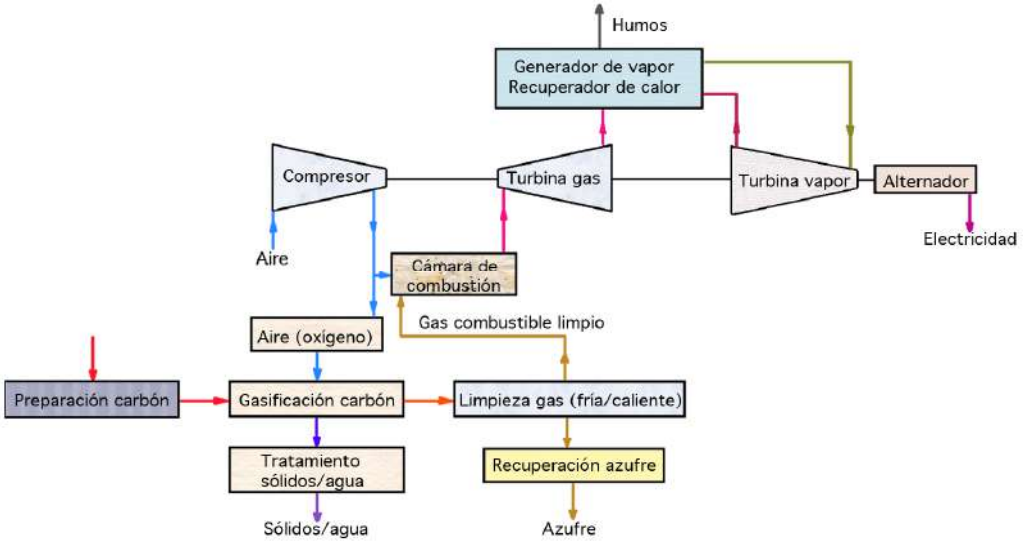


Fig XVIII.25.- Esquema de ciclo combinado con gasificación integrada de carbón

El proceso de gasificación libera una importante energía térmica, que se recupera en el ciclo de vapor, y así se logra una alta eficiencia del conjunto de la planta. La refrigeración del gas bruto mediante enfriamiento rápido elimina el coste y complejidad de la recuperación de calor, pero reduce la eficiencia hasta en un 10% respecto de la correspondiente a la plena recuperación de calor.

Las características del combustible, influyen mucho en el diseño del proceso:

- Un combustible con una alta humedad estructural, como el lignito, no permite un gasificador alimentado con lechada de carbón en agua, por su baja eficiencia

- Cuando se quema un volumen relativamente alto de un gas de carbón, con bajo poder calorífico, las turbinas de gas tienen diversas posibilidades para manipular los grandes desequilibrios entre flujo de aire y flujo de gas, en lo que respecta a $\begin{cases} \text{- el mínimo poder calorífico del gas combustible} \\ \text{- las características operativas de las emisiones} \\ \text{- la capacidad del compresor} \end{cases}$

El tamaño de la planta se centra en la turbina de gas; una instalación simple de *turbina de gas-turbina de vapor* produce más de 250 MW, de los que un 60% los genera la turbina de gas.

Plantas mayores requieren múltiples turbinas de gas, una sola turbina de vapor y mayores equipos tanto en el resto de la planta, como en $\begin{cases} \text{- la manipulación del combustible.} \\ \text{- instalaciones eléctricas y de control} \\ \text{- el tratamiento de agua} \end{cases}$

Una planta de ciclo combinado con gasificación integrada en fases progresivas, queda configurada instalando: $\begin{cases} \text{- las turbinas de gas de ciclo simple para gas natural} \\ \text{- la turbina de vapor} \\ \text{- el generador de vapor recuperador de calor} \end{cases}$

El sistema de gasificación de la planta de ciclo combinado tiene flexibilidad para atender demandas energéticas variables entre punta y valle, y el acomodo a una variación en el precio del gas natural frente al carbón; las modificaciones en las turbinas de gas y en el balance de calor en la parte del vapor, pueden ser muy significativas cuando se cambia de gas natural a gas de carbón.

Ventajas de la planta de ciclo combinado.- La demanda de un medio ambiente más limpio es el mayor impulso para el desarrollo y puesta en servicio de plantas de ciclo combinado, que tienen muy bajas emisiones. Los gasificadores soplados con O_2 dotados de un sistema de limpieza de gas en frío, son adecuados para tener bajas emisiones de SO_2, NO_x, residuos sólidos y toxinas atmosféricas.

En una instalación de ciclo combinado equipada con una planta Claus y un sistema de limpieza del gas en cola, se puede alcanzar una eficiencia en la eliminación de S superior al 99%.

Con los compuestos de N_2 del combustible eliminados en el sistema de limpieza de gas en frío,

las emisiones de NO_x procedentes de una planta de ciclo combinado vienen determinadas exclusivamente por las características de funcionamiento del combustor que alimenta la turbina de gas.

Con algunos combustores se pueden alcanzar valores inferiores a $\begin{cases} 0{,}05\ lb/10^6\ Btu \\ 21{,}5\ g/GJ \end{cases}$, dependiendiendo del poder calorífico del combustible (se pueden añadir humedad y N_2) y de la temperatura de entrada en la turbina. Ambos parámetros afectan a la temperatura punta de la llama y a la generación del NO_x térmico. Las plantas convencionales de carbón podrían alcanzar estos valores de emisiones por medio de técnicas de combustión combinadas con un control de postcombustión para bajos NO_x.

Los subproductos sólidos de una planta de ciclo combinado con un gasificador de flujo arrastrado, consisten en: $\begin{cases} \text{- } una\ escoria\ enfriada\ súbitamente\ y\ no\ reactiva,\ procedente\ del\ gasificador \\ \text{- } un\ S\ elemental \end{cases}$

Si el S se comercializa y vende, el flujo de desechos se reduce al de la ceniza del combustible.

Según sea el contenido de S en el combustible, la planta convencional de carbón puede producir hasta el doble de residuos sólidos, debido a los subproductos de SO_2; ésto se puede evitar, parcialmente, mediante la producción de yeso en sistemas convencionales de depuración.

También hay que tener en cuenta el impacto medioambiental por metales pesados contenidos en la ceniza del combustible, y por la emisión a la atmósfera de toxinas y partículas muy finas.

Por lo que respecta al coste del combustible, la eficiencia se ha convertido en un objetivo medioambiental y económico habida cuenta de las altas emisiones de CO_2 a nivel mundial.

Eficiencia.- La eficiencia teórica de un ciclo combinado se sitúa en el $38 \div 43\%$, dependiendo de $\begin{cases} \text{- } la\ magnitud\ de\ la\ inversión \\ \text{- } el\ grado\ de\ integración\ de\ la\ planta \\ \text{- } el\ tipo\ de\ combustible \\ \text{- } otras\ características\ específicas \end{cases}$

Eficiencias mayores se pueden alcanzar con turbinas de gas que operen a mayor temperatura; una planta grande operando con un ciclo Rankine en condiciones de vapor supercrítico, tiene una eficiencia del orden del 38%, y en un ciclo de vapor subcrítico de 35%. El objetivo es obtener sistemas de menor coste y más eficientes que los que están soplados con O_2 , por lo que se están desarrollando sistemas de plantas de ciclo combinado con soplado de aire y limpieza de gas en caliente para eliminar el proceso de $\begin{cases} \text{- } fraccionamiento\ del\ aire\ (separación\ del\ O_2\ ) \\ \text{- } limpieza\ química\ en\ frío\ (clásico\ en\ las\ refinerías) \end{cases}$ lo que reduce el diseño de la planta a componentes y procesos típicos de la industria energética.

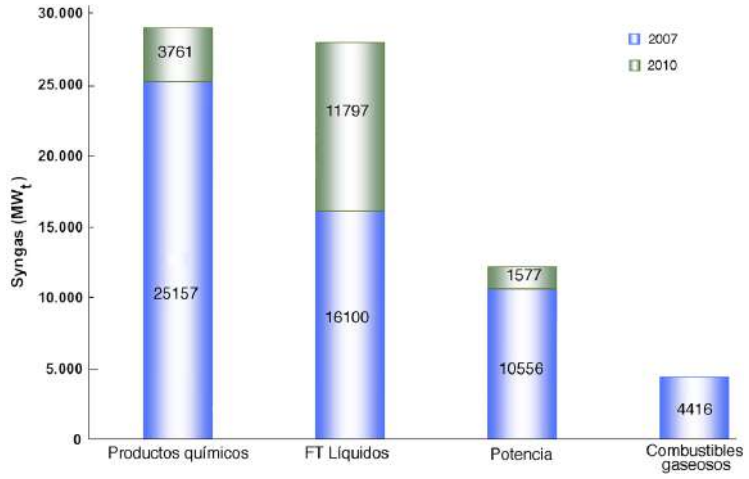


Fig XVIII.26.- Capacidad mundial de gasificación, por productos, operando en 2007 y crecimiento previsto hasta 2010

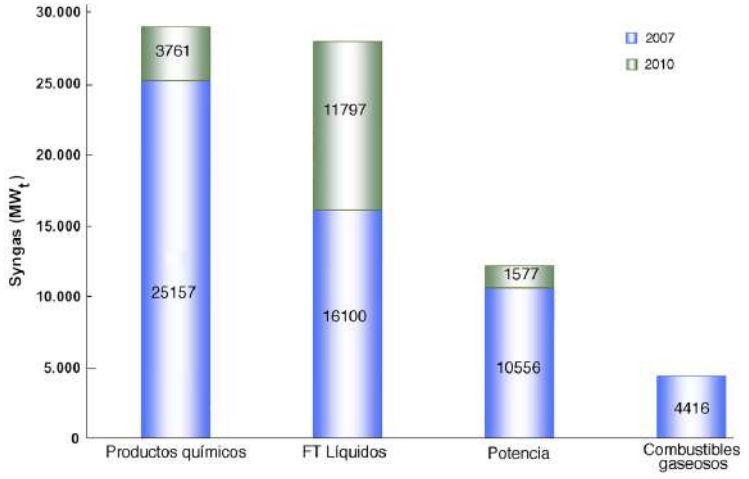


Fig XVIII.27.- Capacidad mundial de gasificación, por materia prima, operando en 2007 y crecimiento previsto hasta 2010

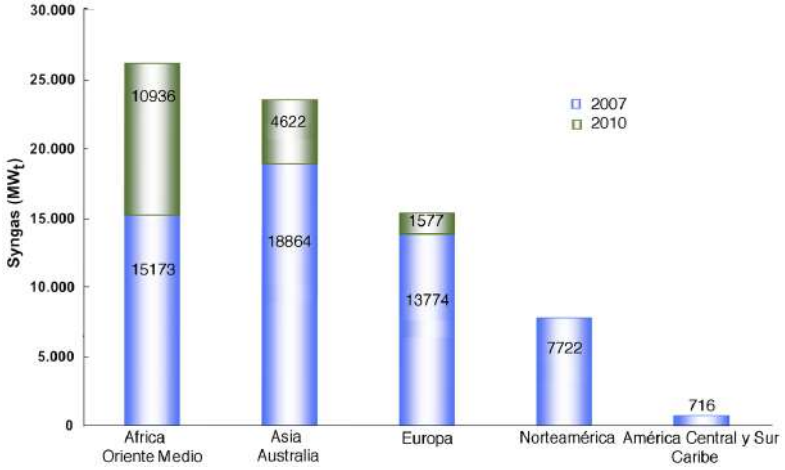


Fig XVIII.28.- Capacidad mundial de gasificación, por regiones, operando en 2007 y crecimiento previsto hasta 2010

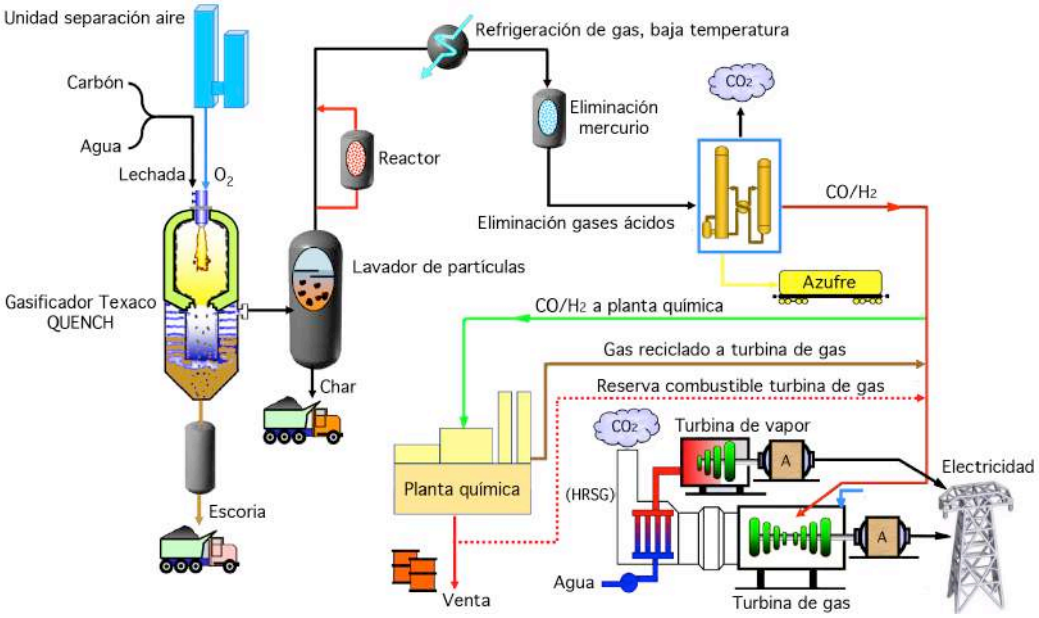


Fig XVIII.29.- Proceso gasificación Texaco Quench GE

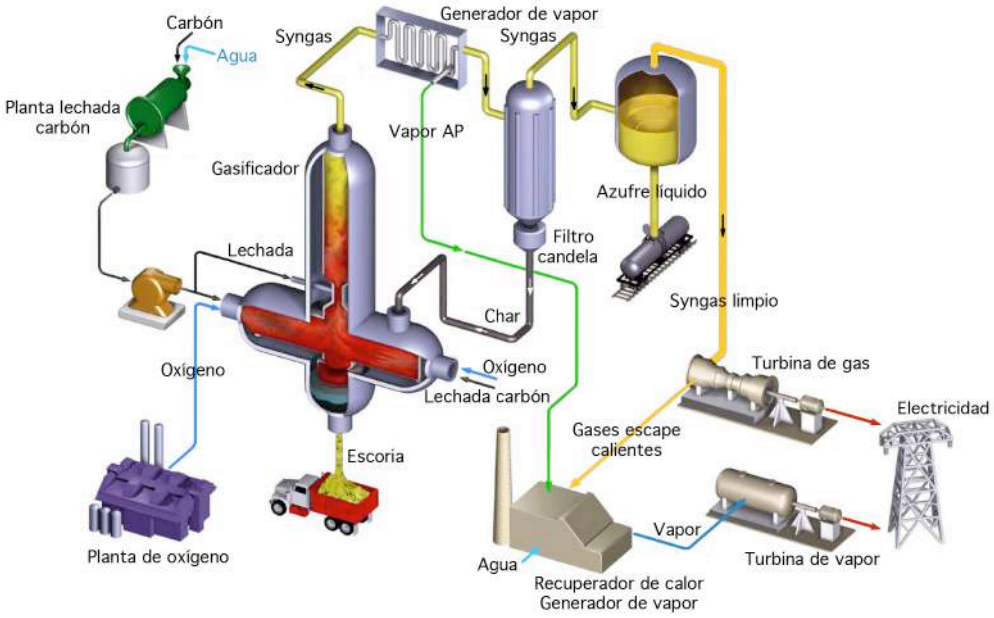


Fig XVIII.30.- Proceso gasificación Conoco Phillips E-Gas

Las características medioambientales de la limpieza de los gases calientes resultan críticas:

- Porque requieren más desarrollos para rebajar los NO_x emitidos por el combustor de la turbina de gas cuando hay compuestos de N_2 en el combustible

- Para eliminar partículas a temperaturas superiores a 1000°F (538°C)

- Para demostrar unas características de servicio y de vida razonables

El coste de la producción de energía en plantas de ciclos avanzados de vapor Rankine, Hirn o como los sistemas de lecho fluidificado presurizado, con un sistema de ciclo combinado, determina el campo de utilización de cada técnica, Fig XVIII.29.30

REFERENCIAS CAP XVIII.- GASIFICACIÓN DEL CARBÓN

Grosman P.R., Curtis R.W.- PULVERIZED-COAL-FIRED GASIFIER FOR PRODUCTION OF CARBON MONOXIDE AND HYDROGEN.- Transactions of the ASME, Paper n°.53-A-49-1953

Probert P.B.- INDUSTRIAL FUEL GAS FROM COAL.- American Ceramic Society, Washington D.C., 1975

Dravo Corporation.- HANDBOOK OF GASIFIERS AND GAS TREATMENT SYSTEMS, USERDA.- Report FE-1772-11-1976

May M.P.- SUSPENSION GASIFIER OFFERS ECONOMICS OF SCALE.- Iron and Steel Engineer, pp. 45-62-1977

Elliot M.A.- CHEMISTRY OF COAL UTILIZATION.- 2nd Suppl. Volume, Chapters 23-24-25-Wiley, New York-1981

EPRI Report AP-3109.- COAL GASIFICATION SYSTEMS: A GUIDE TO STATUS, APPLICATIONS AND ECONOMICS.- Synthetic Fuel Association-1983

Meyers R.A.- HANDBOOK OF SYNFUELS TECHNOLOGY.- Part 3-Mc.Graw Hill, N.Y.-1984

SFA Pacific, Inc.- DRY FEED ENTRAINED-FLOW COAL GASIFICATION PROCESS TECHNOLOGY STATUS.- The SFA Quarterly Report-1988

Bakker W.T.- MATERIALS FOR SYNGAS COOLERS IN INTEGRATED GASIFICATION-COMBINED CYCLE POWER PLANTS.- Technical Brief PR-2048-1988

B&W.- STEAM: ITS GENERATION AND USE, 40th Edition, Chapter 16, The Babcock Wilcox Company, Barberton, Ohio, USA, (1992)

Notestein J.E.- UPDATE ON DEPARTMENT OF ENERGY HOT GAS CLEANUP PROGRAMS.- Eighth Annual EPRI Conference on Coal Gasification, 1988

Ebbins J.R., Ruhl E.- THE BGL GASIFIER: RECENT ENVIRONMENTAL RESULTS.- Eighth Annual EPRI Conference on Coal Gasification, 1988

Krewinghaus A.B., Richards P.C.- COAL FLEXIBILITY ON THE SHELL COAL GASIFICATION PROCESS.- Pittsburgh Coal Conference, 1989

Baker D.C.- ENVIRONMENTAL CHARACTERIZATION OF THE SHELL COAL GASIFICATION PROCESS, III, SOLID BY-PRODUCTS.- Seventh Annual Pittsburgh Coal Conference, 1990

Peterson D.L.- TREATMENT OF GASIFICATION WASTE WATER: TREATABILITY TEST RESULTS AND DEVELOPMENT OF A PROCESS DESIGN MANUAL.- Ninth Annual EPRI Conference on Coal Gasification Power Plants, 1990