QUÍMICA INDUSTRIAL II

COMBUSTIBLES
COMBUSTIÓN

ÁCIDO SULFÚRICO

AMONIACO
ÁCIDO NÍTRICO

CAL

CEMENTO

CLOROSODA

SOLVAY

PROF. RONALD MÁRQUEZ
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
DPTO. DE QUÍMICA INDUSTRIAL Y APLICADA
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

Combustión 6

1.1. Combustión.....6

1.1.1. Definición 6

1.1.2. Combustión Convencional 6

1.1.3. Reacciones de combustión 7

1.1.4. Productos de combustión 8

1.1.5. Clasificación de los combustibles 9

1.1.6. Clasificación del carbón.....9

1.1.7. Estructura del carbón 10

1.1.8. Composición del carbón..... 12

1.1.9. Poder calorífico del carbón 13

1.1.10. Producción de carbón 14

1.1.11. Procesos de conversión de carbón 15

1.2. Gasificación 17

1.2.1. Definición 17

1.2.2. Proceso de Gas de agua 18

1.2.3. Reacciones de gasificación..... 18

1.2.4. Clasificación de los gases combustibles 20

1.2.4.1. Gas de productor 20

1.2.4.2. Gas de agua 20

1.2.5. Tipos de reactores de gasificación..... 21

1.2.5.1. Comparación entre los tipos de platos más comunes..... 24

1.2.5.2. Proceso Lurgi de ceniza seca (1926)..... 24

1.2.5.3. Gasificador Winkler de lecho fluidizado (1931) 26

1.2.5.4. Gasificador Koppers-Totzek de flujo arrastrado 27

1.2.5.5. Producción de gas natural sustituto 27

Azufre – Producción de Ácido Sulfúrico 28

1.3. Producción de azufre y ácido sulfúrico 28

1.3.1. Proceso Frash. Definición 28

1.3.2. Historia de la manufactura de Ácido Sulfúrico 29

1.3.3. Proceso de contacto 30

1.3.3.1. Oxidación de azufre 30

1.3.3.2. Oxidación de dióxido de azufre 32

1.3.3.3. Oxidación de dióxido de azufre con absorción de SO3 interetapa 33

1.3.3.4. Absorción de trióxido de azufre 34

1.3.3.5. Termodinámica de la reacción 35

SO2 + ½ O2 SO3 35

1.3.3.6. Cinética de la reacción 37

1.3.4. Producción de ácido sulfúrico y oleum 39

1.3.4.1. Productos secundarios e integración de calor en la planta 40

1.3.4.2. Consideraciones en la producción de H2SO4 40

1.3.4.3. Mercados para H2SO4 41

Nitrógeno – Producción de Gas de Síntesis 42

1.4. Nitrógeno – Producción de Gas de Síntesis 42

1.4.1. Producción de nitrógeno 42

1.4.2. Producción de gas de síntesis 43

1.4.2.1. Composición 43

1.4.2.2. Producción 44

1.4.3. Reformado con vapor de hidrocarburos 44

1. Purificación de la alimentación de HC – Desulfuración y desclorificación 44

2. Reformado con vapor primario 45

3. Reformado con vapor secundario 49

4. Reacción de Shift del gas de agua a alta temperatura 50

5. Reacción de Shift del gas de agua a baja temperatura 53

6. Reacción de Metanación 53

Producción de Amoniaco 54

1.5. Síntesis de amoniaco 54

1.5.1. Historia de la producción de amoniaco 54

1.5.2. Síntesis y termodinámica de la reacción 55

1.5.3. Productos químicos derivados del amoniaco 62

Producción de Ácido Nítrico 64

1.6. Síntesis de ácido nitrico 64

1.6.1. Historia de la producción de ácido nítrico 64

1.6.2. Producción de ácido nítrico 64

1.6.2.1. Producción de óxido nitroso 65

1.6.2.2. Oxidación de óxido nitroso 69

1.6.2.3. Absorción y producción de ácido nítrico 69

1.6.2.4. Obtención de ácido nítrico a concentraciones mayores de 68% 72

1.6.2.5. Mercados y usos del ácido nítrico 73

Producción de Cal 74

1.7. Producción de Cal 74

1.7.1. Calcinación 74

1.7.2. Hornos de calcinación verticales 75

1.7.3. Hornos de calcinación horizontales 77

Producción de Cemento 78

1.8. Producción de Cemento Portland 78

1.8.1. Composición 78

1.8.2. Formación del Clinker de cemento Portland 79

1.8.3. Cinética de formación del Clinker de cemento Portland 80

1.8.4. Estructura del cemento Portland 80

Producción de NaOH y Cl2 83

1.9. Proceso Clorosoda 83

1.9.1. Producción de NaCl 83

1.9.2. Planta Clorosoda 84

1.9.3. Celdas utilizadas en el proceso clorosoda 84

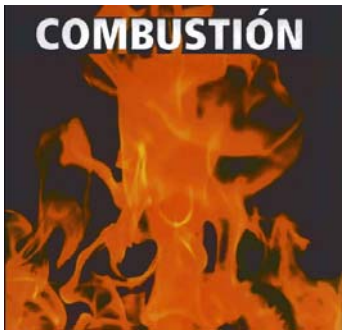
Producción de Carbonato de Sodio 88

1.10. Proceso Solvay 88

1.11. Bibliografía 91

Capítulo 1

Combustión



1.1. Combustión

1.1.1. Definición

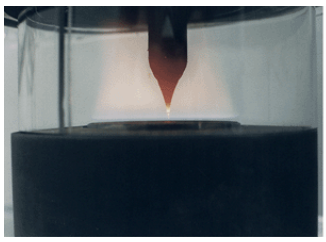
La Combustión es la interacción auto-sostenida y exotérmica de un combustible con un oxidante a través de una serie de eventos físicos y químicos, finalmente resultando en la formación de agua y dióxido de carbono, los cuales son los productos de reacción más estables.

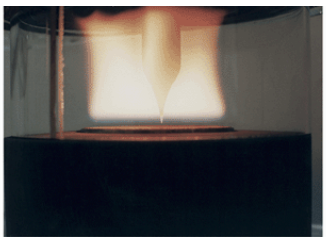
1.1.2. Combustión Convencional

La combustión convencional se define como una reacción en fase gaseosa que envuelve la creación de una llama en la cual el combustible reacciona con oxígeno de acuerdo a la estequiometría dada en la ecuación:

$$C_xH_y + (x + y/4)O_2 \rightarrow xCO_2 + y/2\,H_2O$$

COMBUSTIÓN DE METANO





Un poco rica en combustible (F = 1)

Rica en combustible con hollín (F > 1)

Llama difusiva

Llamas laminares de metano premezcladas

$$\phi = (\text{fuel amount/oxidant amount})_{\text{actual}}/(\text{fuel amount/oxidant amount})_{\text{stiochiometric}}$$

Figura 1 Procesos de combustión: a) horno de reformado (llama premezclada), b) hornos de topping y de vacío en el área de destilación en una refinería, c) Mechurrio (llama difusiva).

1.1.3. Reacciones de combustión

La secuencia general de reacciones que lleva a la producción de CO2 es la siguiente (Sencan, 2003):

$$CH_4 \rightarrow CH_3^{\bullet} \rightarrow CH_2O \rightarrow CO \rightarrow CO_2$$

$$CO + OH^{\bullet} \rightarrow CO_2$$ oxidación de CO

$$H^{\bullet} + O_2 \rightarrow OH^{\bullet} + O^{\bullet}$$
$$O^{\bullet} + H_2 \rightarrow OH^{\bullet} + H^{\bullet}$$

Colectivamente los radicales libres H*, O*, y OH* forman una “piscina” de radicales en la llama a través de una serie de reacciones de propagación
(estas son las bases de la combustión de H_2)

$$CH_4 + H^{\bullet} \rightarrow CH_3^{\bullet} + H_2$$
$$CH_4 + OH^{\bullet} \rightarrow CH_3 + H_2O$$
$$CH_4 + O^{\bullet} \rightarrow CH_3^{\bullet} + OH^{\bullet}$$
$$CH_3^{\bullet} + CH_3^{\bullet} \rightarrow C_2H_6$$
$$C_2H_6 + H^{\bullet} \rightarrow C_2H_5^{\bullet} + H_2$$
$$C_2H_5^{\bullet} \rightarrow C_2H_4 + H^{\bullet}$$
$$C_2H_4 + H^{\bullet} \rightarrow C_2H_3^{\bullet} + H_2$$
$$C_2H_3^{\bullet} \rightarrow C_2H_2 + H^{\bullet}$$
$$C_2H_3^{\bullet} + O_2 \rightarrow CHO^{\bullet} + CH_2O$$
$$CHO^{\bullet} \rightarrow CO + H^{\bullet}$$
$$CO + OH^{\bullet} \rightarrow CO_2 + H^{\bullet}$$

La destrucción del combustible y la formación y destrucción de compuestos intermedios son gobernadas por **reacciones de radicales libres**. Por ejemplo, el metano en la llama es destruido como consecuencia del ataque por radicales H* , OH* , y O*.

1.1.4. Productos de combustión

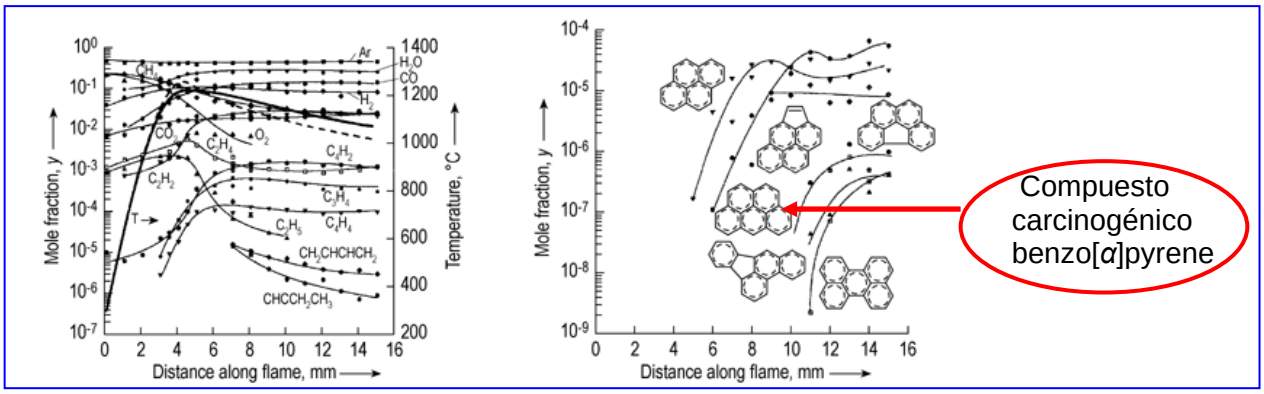


Figura 3 Perfiles de concentración de las especies más importantes y de algunos hidrocarburos aromáticos policíclicos formados en una llama de metano rica en combustible, premezclada.

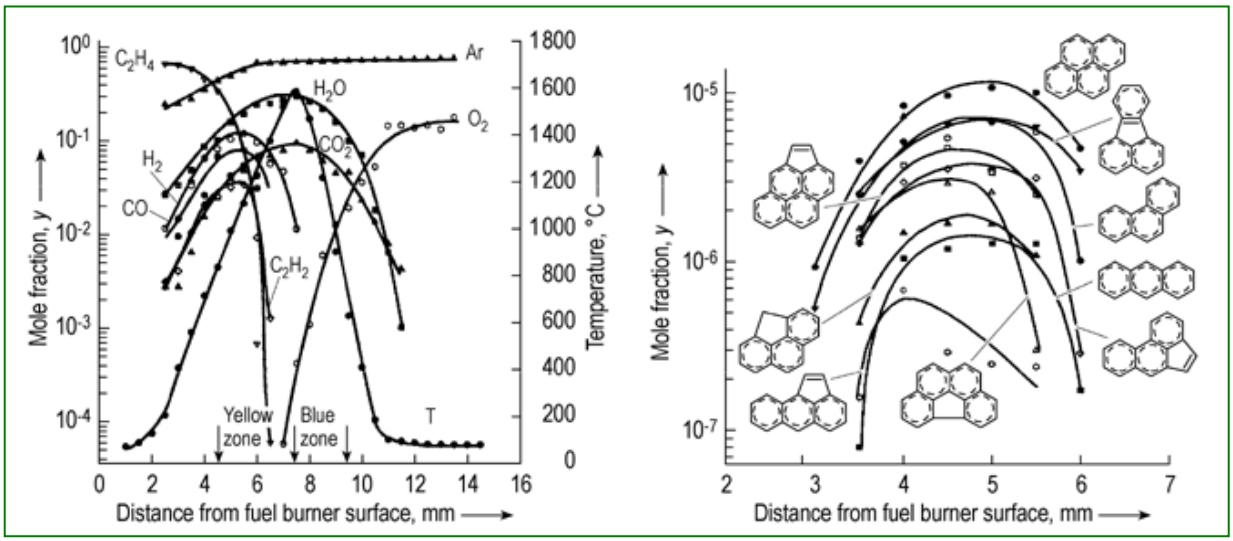


Figura 4 Perfiles de concentración versus la distancia desde la superficie de un quemador en una llama difusiva de etileno.

1.1.5. Clasificación de los combustibles (El-Mahallawy, 2002)

Disponible en la naturaleza	Producido sintéticamente
Sólido	
Carbón	**Coque**
Madera	**Bitumen**
Vegetación	**Desechos sólidos inorgánicos**
Desechos sólidos orgánicos	
Líquido	
Petróleo	**Crudos sintéticos**
Aceites biológicos	**Destilados de petróleo**
	Alcoholes
	Combustibles coloidales
	Benceno
Gas	
Gas natural	**Gas natural**
Gas de pantano	**Hidrógeno**
Biogas	**Metano**
	Propano
	Gasificación de carbón

1.1.6. Clasificación del carbón (ASTM D 338, Miller, 2005)

Clasificación ASTM del carbón por rango

Clase/grupo	Carbón fijo (%)	Materia volátil (%)	Poder calorífico (Btu/lb)
Antracítico			
Meta-antracita	>98	<2	—
Antracita	92–98	2–8	—
Semi-antracita	86–92	8–14	—
Bituminoso			
Volatilidad baja	78–86	14–22	—
Volatilidad media	69–78	22–31	—
Volatilidad alta A	<69	>31	>14,000
Volatilidad alta B	—	—	13,000–14,000
Volatilidad alta C	—	—	10,500–13,000
Subbituminoso			
Subbituminoso A	—	—	10,500–11,500
Subbituminoso B	—	—	9500–10,500
Subbituminoso C	—	—	8300–9500
Lignítico			
Lignito A	—	—	6300–8300
Lignito B	—	—	<6300

1.1.7. Estructura del carbón

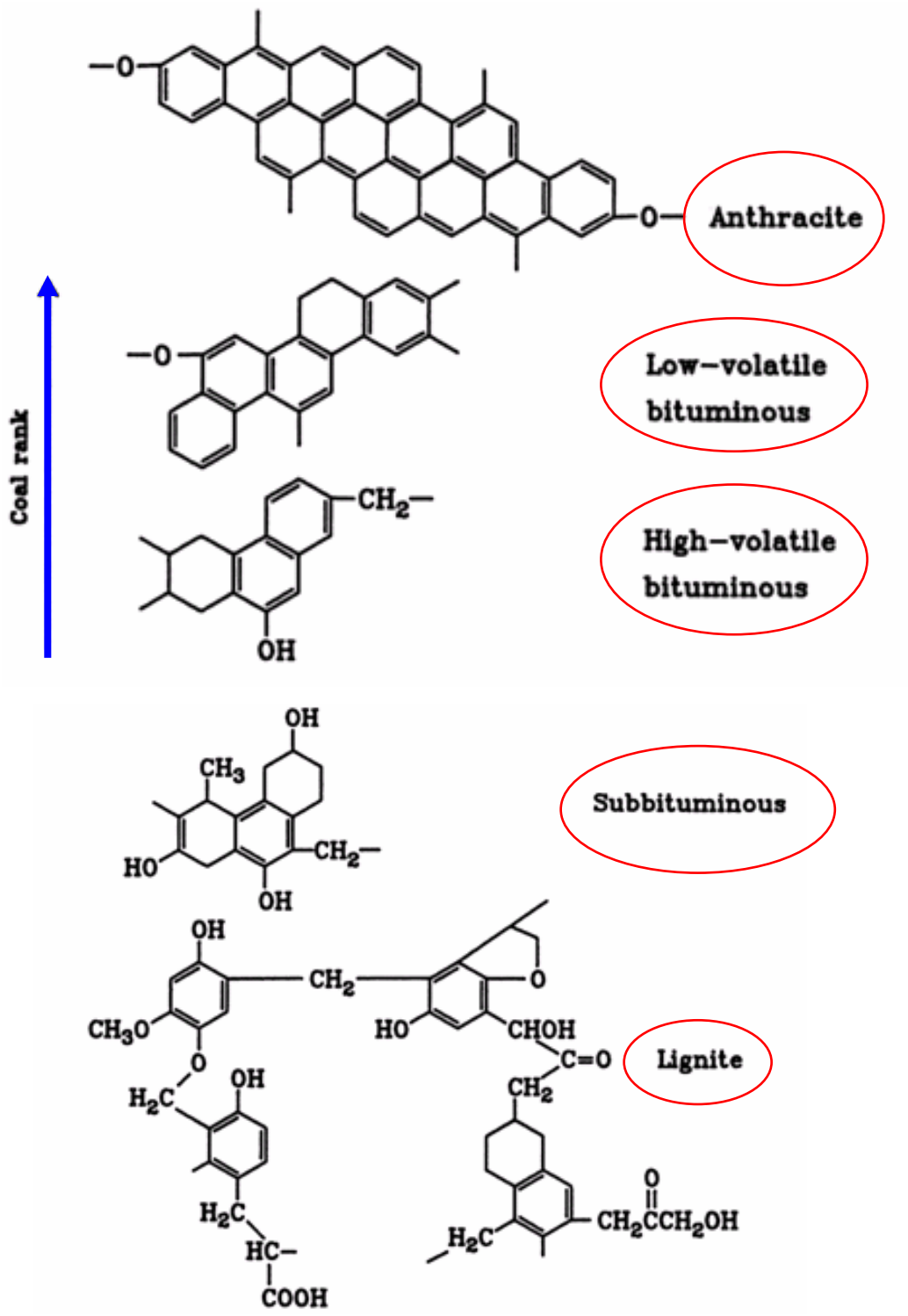


Figura 5 Estructura del carbón de acuerdo a la clasificación ASTM

La **antracita** es un carbón duro, frágil y brillante

VCM = 5 %
PC = 30000 to 33000 kj/kg

El **carbón bituminoso** es muy negro
VCM = 19 % a 45 %
PC = 28000 to 35000 kj/kg

El **carbón sub-bituminoso** es negro:
VCM* = 30 - 35 %
PC* = 19000 to 24000 kj/kg

***Donde VCM = Materia Combustible Volatile y PC = Poder calorífico Inferior**

El **lignito** es un carbón marrón negruzco
VCM cercano a **30 %**
PC = 13000 to 18000 kj/kg

Figura 6 Clasificación del carbón de acuerdo a la clasificación ASTM

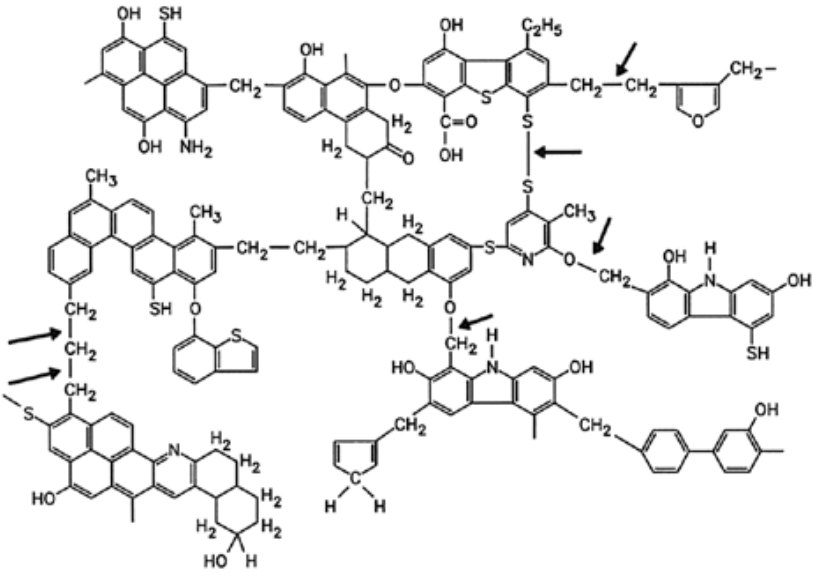


Figura 7 Modelo de WISER de la estructura del carbón

1.1.8. Composición del carbón

	% Peso					
	C	H	S	N	O	Relación molar H/C
Petróleo	84.6	12.8	1.5	0.4	0.5	1.82
Turba	56.8	5.6	0.3	2.7	34.6	1.18
Lignito	68.8	4.9	0.7	1.1	24.5	0.86
Carbón bituminoso	81.8	5.6	1.5	1.4	9.7	0.82
Antracita	91.7	3.5	—	—	2.7	0.46

Figura 8 Análisis elemental de algunos tipos de carbón comparado con petróleo crudo

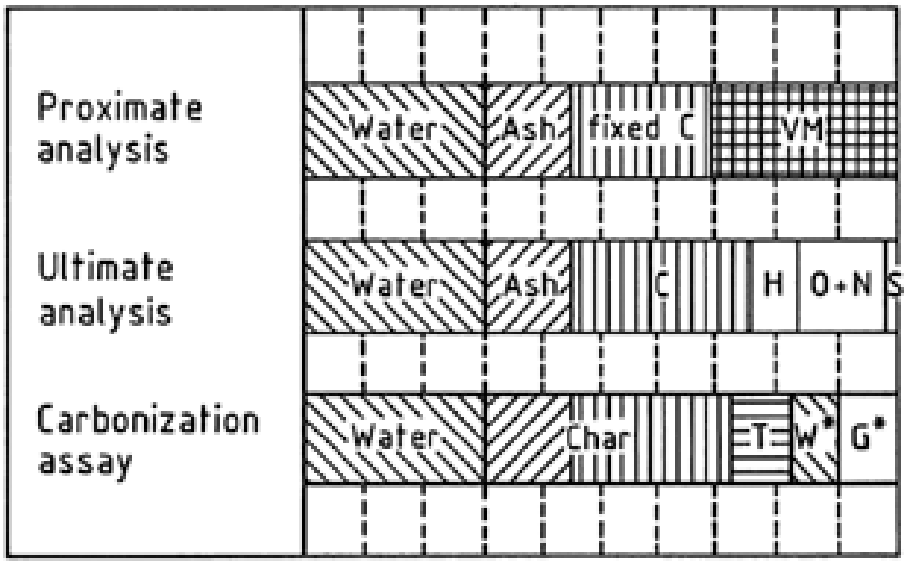


Figura 9 Comparación de un **análisis aproximado y un análisis último** con ensayos de carbonización C, H, O, N, S = elementos; T = alquitrán; W* = agua descompuesta; G* = gas carbonizado; VM = materia combustible volátil

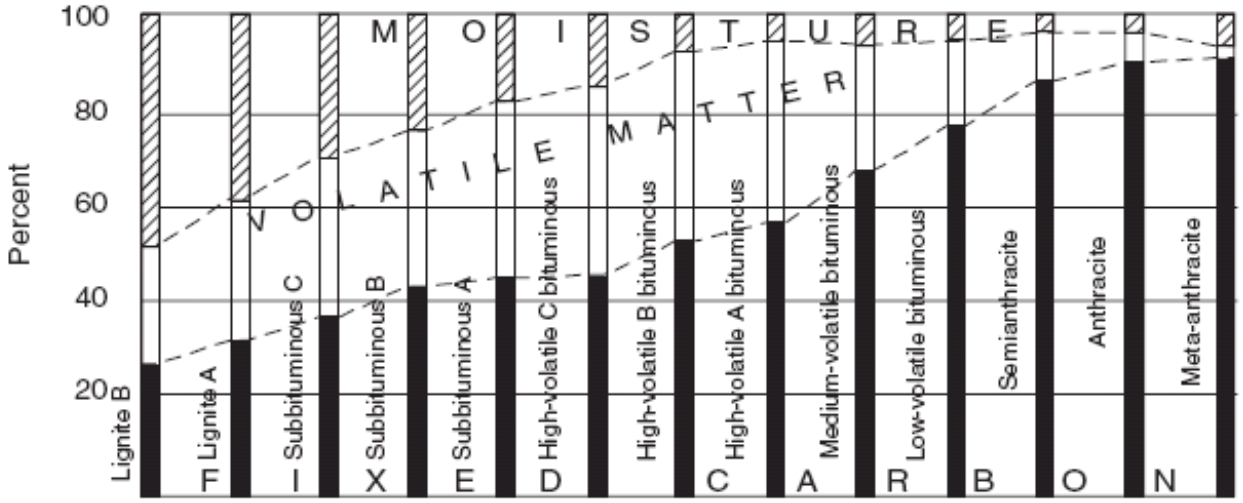


Figura 10 Analisis aproximado de carbones de diferentes rangos (Matar, 2000)

1.1.9. Poder calorífico del carbón

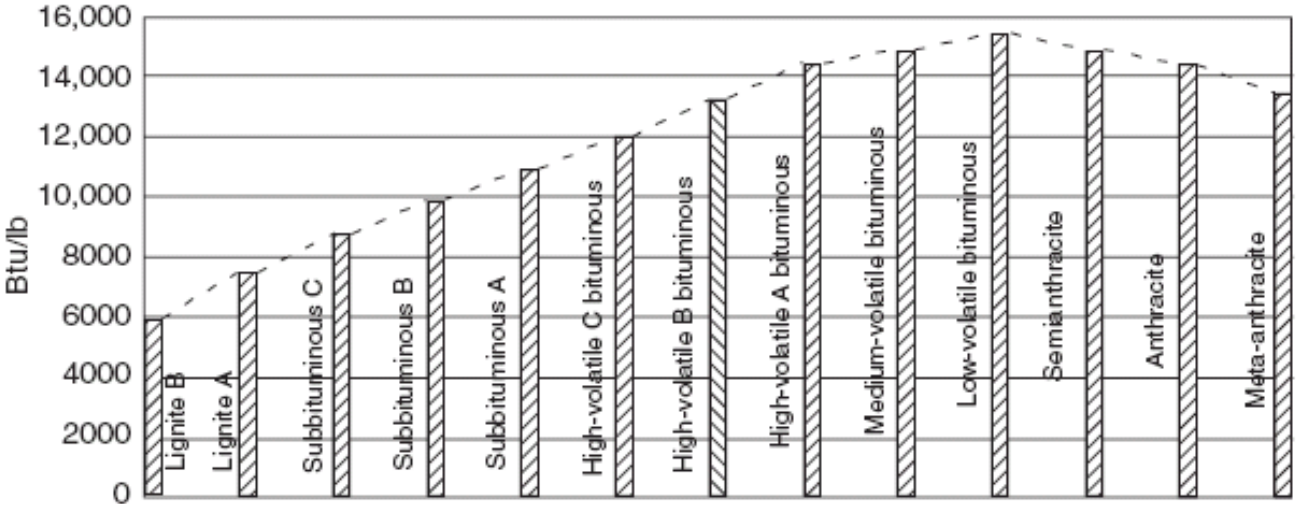
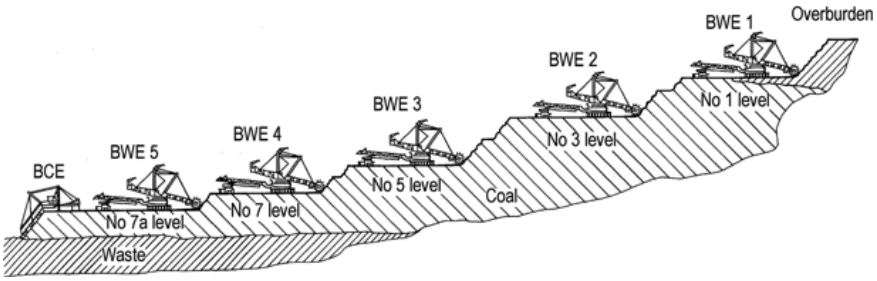


Figura 11 Comparación de poder calorífico (en una base libre de humedad y materia mineral (Matar,2000)

1.1.10. Producción de carbón

Grúa trabajando en una típica mina de producción de carbón

Bucket Wheel Excavator (BWE):
* 95 metros de alto
* Más de 250 m de largo
* Pesa más de 45500 ton
* Costo 100 MM $
* Requiere de 5 operadores
* Puede remover 76455 m^3/día



Sección transversal de una mina de lignito en Australia equipada con excavadoras (BWE) en cada uno de los niveles y (BCE) en el nivel inferior

Figura 12 Métodos de extracción de carbón

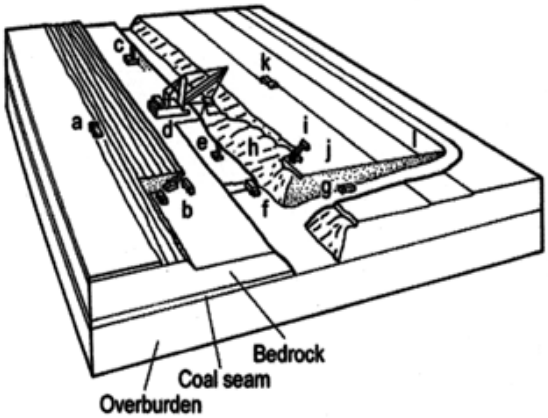


Figura 13 Izq. **Sistema de una mina de extracción de carbón a)** Despojamiento del suelo superior; **b)** Pre-despojamiento con una pala fronta; **c)** Excavación y exploción a profundidad; **d)** Grúa; **e)** Excavación y explosión; **f)** Carga del carbón; **g)** Camiones especializados; **h)** Pila de escombros; **i)** Llenado con grúas de la pila de escombros;**j)** Re-formado de la superficie de escombros; **k)** Reemplazo del suelo superior; **l)** Revegetación. Der. Distribución de cintas transportadoras en una mina de lignito en Alemania

1.1.11. Procesos de conversión de carbón

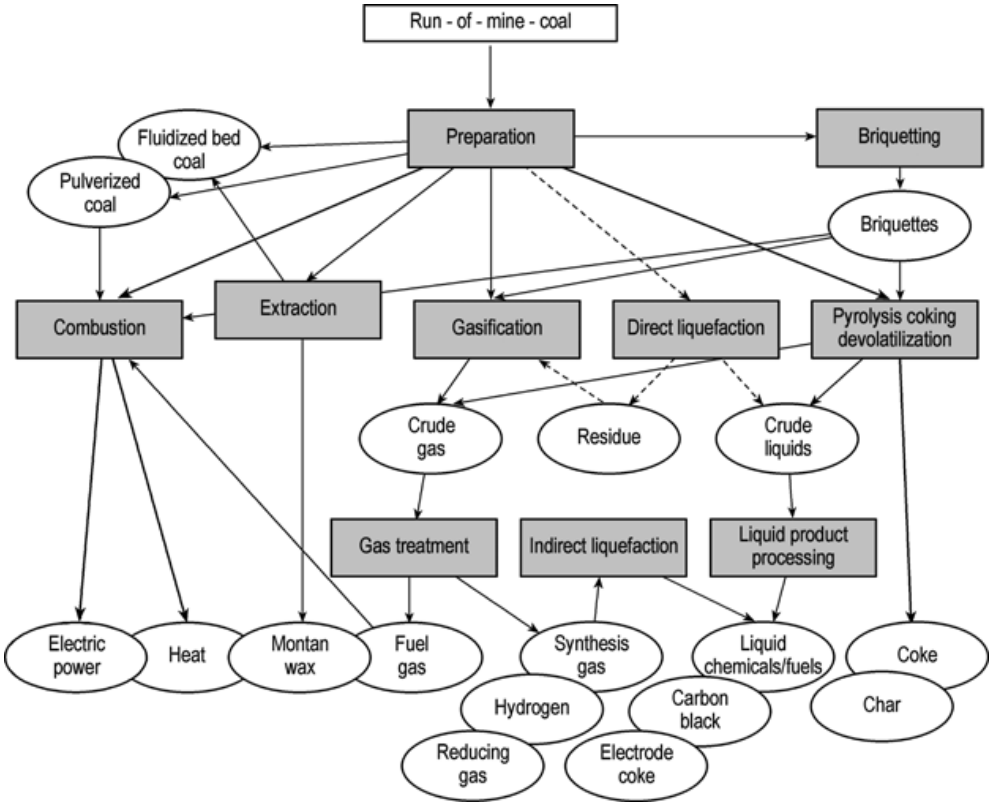


Figura 14 Procesos de conversión de carbón para producir combustibles sólidos, líquidos y gaseosos

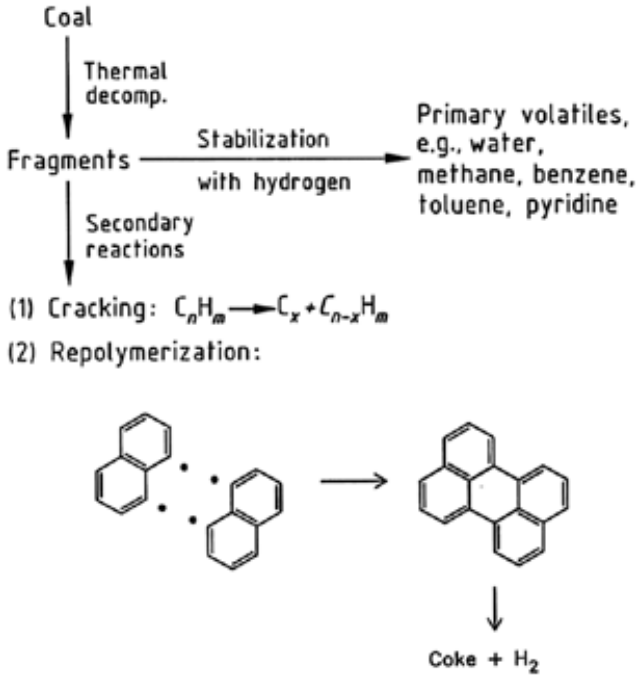


Figura 15 Reacciones primarias y secundarias en la pirólisis del carbón

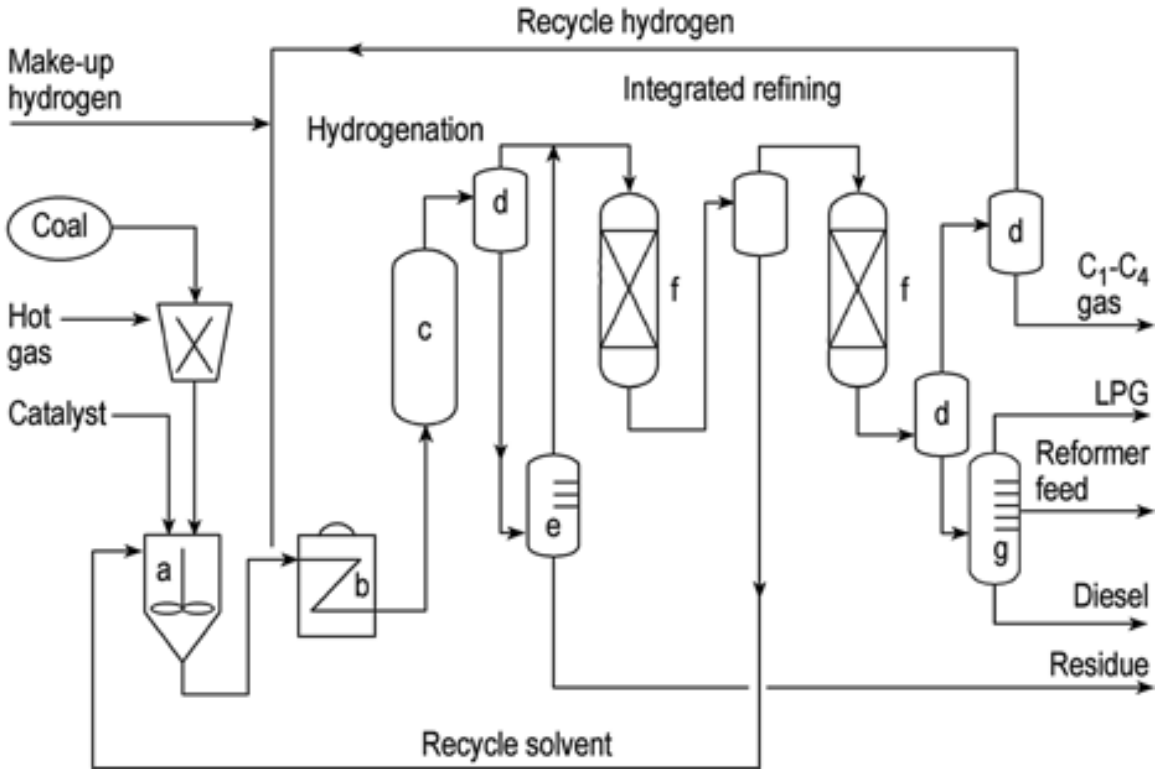


Figura 16 Diagrama del proceso IGOR+ de licuefacción de carbón: a) Preparación de carbón; b) Precalentador de la suspensión; c) Reactor de hidrogenación; d) Separador caliente; e) Columna de destilación al vacío; f) Reactor de lecho fijo; g) Columna de destilación atmosférica

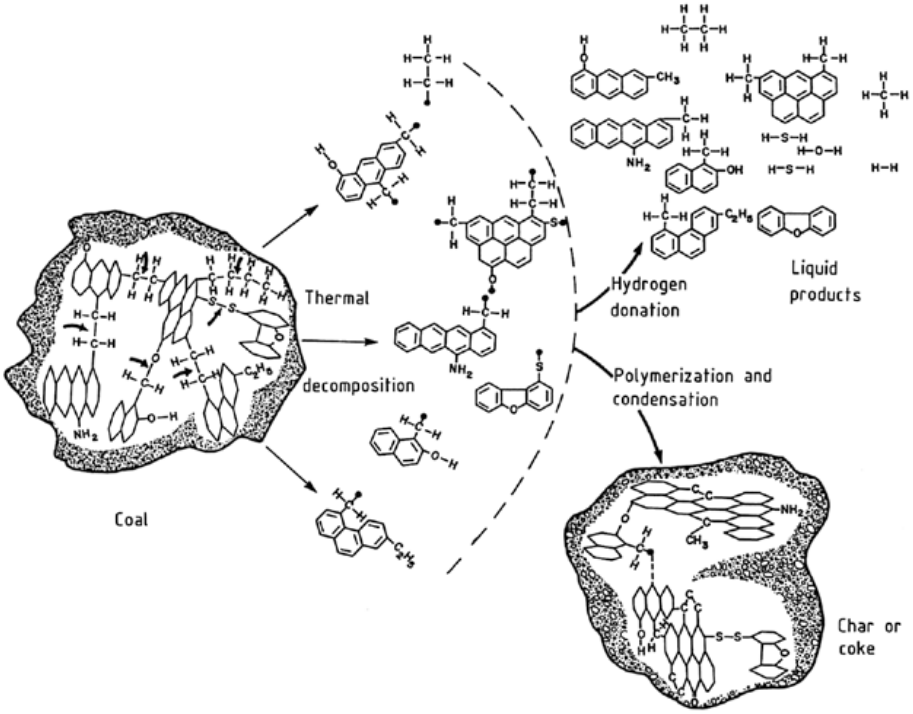


Figura 17 Representación de los procesos que ocurren durante la licuefacción del carbón

Capítulo 2 Gasificación

1.2. Gasificación

1.2.1. Definición

La GASIFICACIÓN comprende la conversión de cualquier combustible carbonado a un producto gaseoso con un poder calorífico aprovechable.

La tecnología dominante es la oxidación parcial, la cual produce a partir de combustible un gas de síntesis que consiste en hidrógeno y monóxido de carbono en varias relaciones, donde el oxidante puede ser oxígeno puro, aire, y/o vapor.

$$C + 1/2O_2 \rightarrow CO$$
$$CO + H_2O \rightarrow H_2 + CO_2$$

El éxito de la producción de gases por oxidación parcial no puede ser solo atribuido a el hecho de que el gas es más sencillo de manejar que un combustible sólido. Hay también una razón química aún más básica que puede ser mejor ilustrada con las siguientes reacciones (Higman, 2003):

$$C + \tfrac{1}{2} O_2 = CO \qquad -111\ \text{MJ/kmol}$$
$$CO + \tfrac{1}{2} O_2 = CO_2 \qquad -283\ \text{MJ/kmol}$$
$$C + O_2 = CO_2 \qquad -394\ \text{MJ/kmol}$$

28% de calor perdido

72% del calor se mantiene en el gas

En la práctica, el combustible puede contener no solo carbono sino también algo de hidrógeno, y el porcentaje del calor en el combustible original, el cual se mantiene en el gas, es, en procesos modernos, generalmente entre 75 y 88%:

1.2.2. Proceso de Gas de agua

En el proceso de gas de agua se obtiene un gas que consiste en aproximadamente cantidades iguales de hidrógeno y monóxido de carbono. La reacción de gas de agua endotérmica puede ser escrita como:

$$C + H_2O \leftrightarrows CO + H_2 \qquad +131\ MJ/kmol$$

Convirtiendo parte o todo el monóxido de carbono en hidrógeno seguido de la reacción de shift,

$$CO + H_2O \leftrightarrows H_2 + CO_2 \qquad -41\ MJ/kmol$$

es posible convertir el gas de agua en hidrógeno o gas de síntesis (una mezcla de H2 y CO) para la síntesis de amoniaco o metanol, respectivamente

1.2.3. Reacciones de gasificación

Reacciones de combustión,

$$C + \tfrac{1}{2}\,O_2 = CO \qquad -111\ MJ/kmol \qquad (1)$$
$$CO + \tfrac{1}{2}\,O_2 = CO_2 \qquad -283\ MJ/kmol \qquad (2)$$
$$H_2 + \tfrac{1}{2}\,O_2 = H_2O \qquad -242\ MJ/kmol \qquad (3)$$

Reacción de Boudouard,

$$C + CO_2 \leftrightarrows 2\ CO \qquad +172\ MJ/kmol \qquad (4)$$

Reacción de gas de agua,

$$C + H_2O \leftrightarrows CO + H_2 \qquad +131\ MJ/kmol \qquad (5)$$

Reacción de metanación,

$$C + 2\ H_2 \leftrightarrows CH_4 \qquad -75\ MJ/kmol \qquad (6)$$

En general, nos conciernen situaciones donde también la conversión de carbón sea esencialmente completa. Bajo estas circunstancias podemos reducir las ecuaciones (4),(5), y (6) a las dos reacciones homogeneas siguientes :

Reacción de shift del CO:

$$CO + H_2O \leftrightarrows CO_2 + H_2 \qquad -41\ \text{MJ/kmol} \qquad (7)$$

y la reacción de reformado con vapor de metano:

$$CH_4 + H_2O \leftrightarrows CO_2 + 3\ H_2 \qquad +206\ \text{MJ/kmol} \qquad (8)$$

Las reacciones (1), (4), (5), y (6) describen las cuatro formas en las cuales un combustible carbonoso o hidrocarburo puede ser gasificado. La reacción 4 juega un papel en la producción de CO puro cuando se gasifica carbono puro con una mezcla oxígeno/CO2. La reacción 5 tiene un rol predominante en el proceso de gas de agua. La reacción 6 es la base de todos los procesos de gasificación por hidrogenación. Pero la mayoría de los procesos de gasificación dependen de un balance entre las reacciones 1 (oxidación parcial) y 5 (reacción de gas de agua).

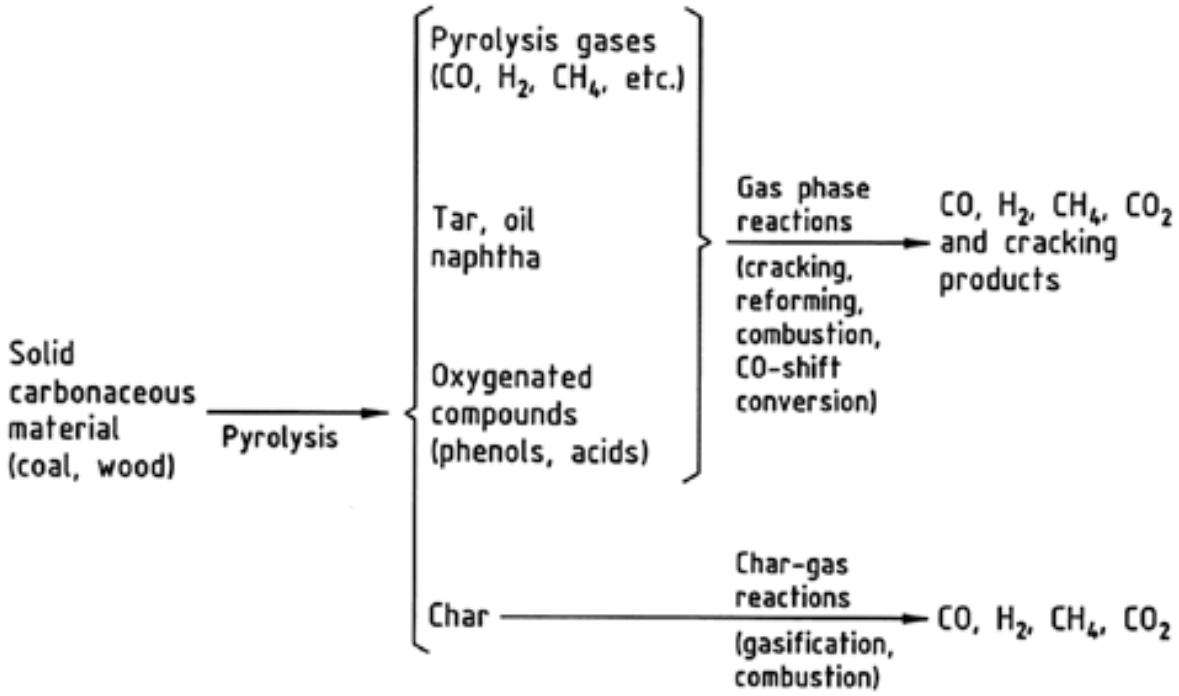


Figura 18 Reacciones químicas principales durante la gasificación de carbón (Reimert, 2003)

1.2.4. Clasificación de los gases combustibles

Los gases para usos industriales o para calefacción pueden ser clasificados en varias formas. La clasificación más apropiada es a través del poder calorífico, en kJ/m3 estándar:

	kJ/m^3 estándar
Gas de agua y de productor	4600 – 12 500
Gas de síntesis y de reducción	ca. 12 500
Town gas y gas de medio-Btu	16 700 – 20 000
Biogas y gas de desperdicios	18 000 – 29 000
Gas de alto-Btu y gas natural substituto (SNG)	25 000 – 37 000

1.2.4.1. Gas de productor

En el proceso de gas de productor, aire humidificado es soplado de forma ascendente a través de un lecho profundo de carbón o coque. El carbón es alimentado desde el tope y se desciende lentamente a medida que es consumido. La ceniza en retirada del fondo del reactor a través de una parrilla rotaria. El aire reacciona con el carbón, produciendo gas con un PCI de 6500 kJ/m3. La presencia de cerca de un 50% de nitrógeno en el gas producido es la principal causa de este bajo valor. La ventaja del proceso es que este era continuo.

1.2.4.2. Gas de agua

El proceso de gas de agua es un proceso discontinuo en el cual el vapor reacciona con coque caliente para formar hidrógeno y monóxido de carbono. Primero, el carbón o coque del lecho es calentado soplando aire de forma ascendente a través del lecho hasta temperaturas cercanas a 1300°C. Luego el flujo de aire es detenido y se pasa vapor a través del lecho de carbón o coque, primero de forma ascendente y luego descendente, produciendo el gas de síntesis. La razón de las dos direcciones del flujo de vapor era para usar de manera óptima el calor del lecho, el cual se requiere para promover la reacción endotérmica de gas de agua. Cuando la temperatura era bajada cerca de 900°C, la "corrida" de vapor se detiene y el ciclo es repetido.

1.2.5. Tipos de reactores de gasificación

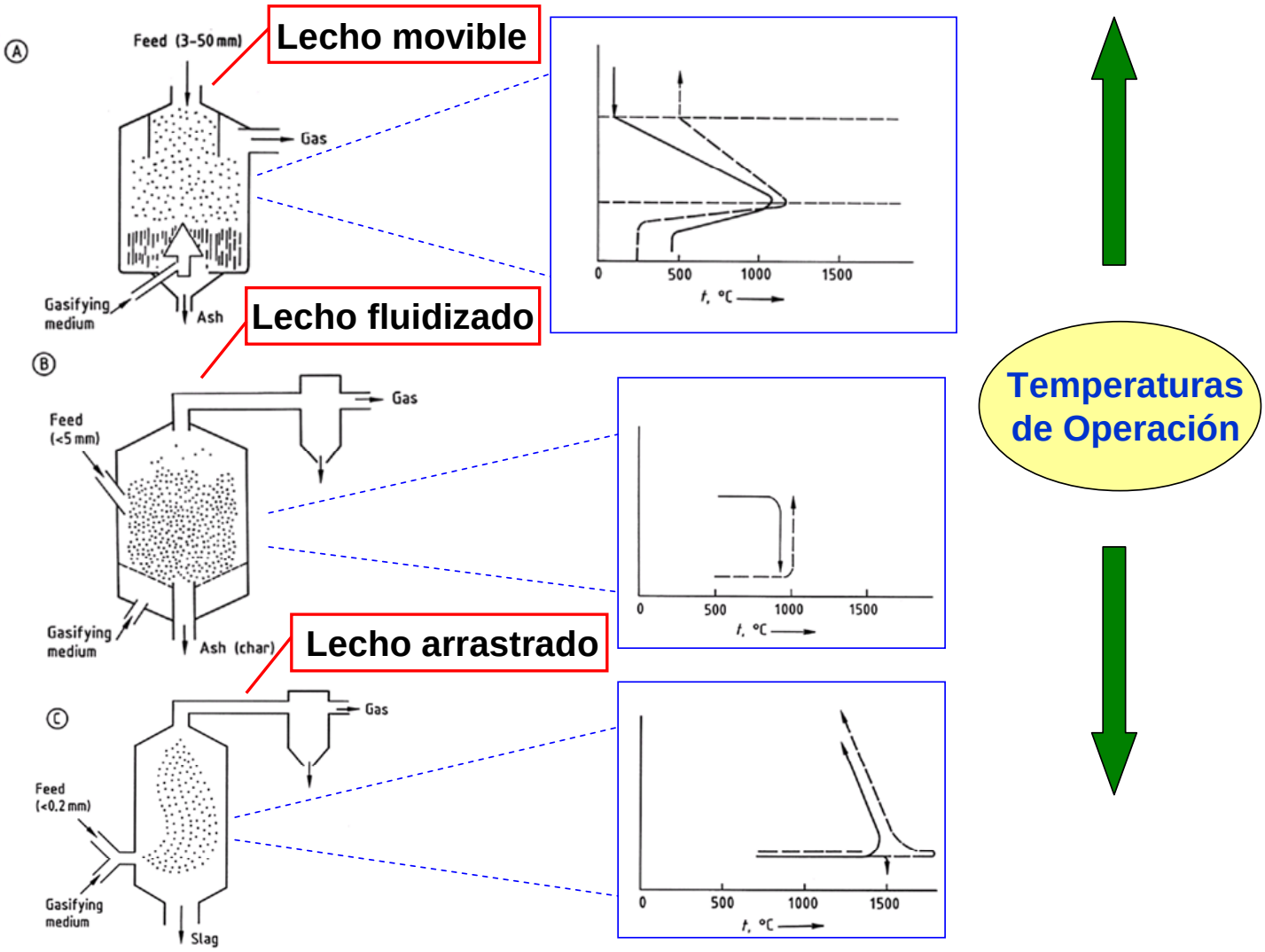


Figura 19 Clasificación de los procesos de gasificación, se muestran la dirección de flujo y los perfiles de temperatura de cada uno de ellos (Higman, 2003)

Category	Moving-Bed		Fluid-Bed		Entrained-Flow
Ash conditions	Dry ash	Slagging	Dry ash	Agglomerating	Slagging
Typical processes	Lurgi	BGL	Winkler, HTW, CFB	KRW, U-Gas	Shell, Texaco, E-Gas, Noell, KT
Feed characteristics					
Size	6–50 mm	6–50 mm	6–10 mm	6–10 mm	<100 µm
Acceptability of fines	limited	better than dry ash	good	better	unlimited
Acceptability of caking coal	yes (with stirrer)	yes	possibly	yes	yes
Preferred coal rank	any	high	low	any	any
Operating characteristics					
Outlet gas temperature	low (425–650°C)	low (425–650°C)	moderate (900–1050°C)	moderate (900–1050°C)	high (1250–1600°C)
Oxidant demand	low	low	moderate	moderate	high
Steam demand	high	low	moderate	moderate	low
Other characteristics	hydrocarbons in gas	hydrocarbons in gas	lower carbon conversion	lower carbon conversion	pure gas, high carbon conversion

Source: Adapted from Simbeck et al. 1993

Figura 20 Características de los diferentes tipos de procesos de gasificación (Higman, 2003)

Alimentación y procesos	Contenido, vol %						
	H_2	CO	CH_4	C_{2+}	N_2+ Ar	CO_2	H_2S + COS
Coal							
Lurgi pressure gasification	43	12	11.5	1	0.3	32	0.2
BGL	28	57	7.1	0.4	4.2	3	0.3
Koppers – Totzek	30	55	0.1		1.4	13.2	0.3
Texaco	37	41.3	0.1		0.6	20.7	0.3

Figura 21 Composición típica del gas de productor obtenido en procesos de gasificación

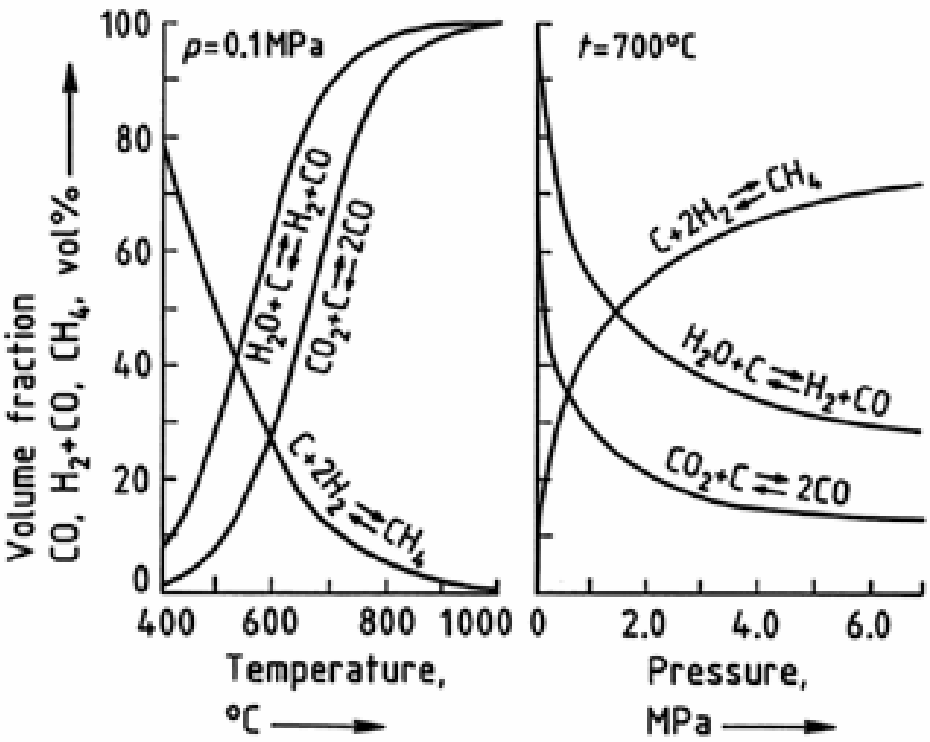


Figura 22 Efecto de la temperatura y presión de equilibrio en la composición del gas en presencia de carbón sólido

Variación de la composición de gas de síntesis y rendimientos a 1500 °C				
	1 Bar	**30 Bar**	**60 Bar**	**100 Bar**
CO_2, mol%	0.00	0.01	0.21	0.34
CO, mol%	63.42	63.33	62.88	62.88
H_2, mol%	34.37	33.89	33.07	33.07
CH_4, mol%	0.01	0.27	0.85	0.85
H_2O, mol%	0.01	0.21	0.67	0.67
Others, mol%	2.19	2.20	2.20	2.19
Total, mol%	100.00	100.00	100.00	100.00
H_2+CO/feed, mol/mol	8.61	8.52	8.45	8.36
LHV dry/feed, MJ/mol	2.31	2.31	2.32	2.32
$O_2/(H_2+CO)$, mol/mol	0.27	0.27	0.27	0.27
O_2/LHV dry, mol/MJ	0.99	0.99	0.98	0.97

Figura 23 Efecto de la presión en la composición del gas de síntesis (Higman, 2003)

1.2.5.1. Comparación entre los tipos de platos más comunes

1.2.5.2. Proceso Lurgi de ceniza seca (1926)

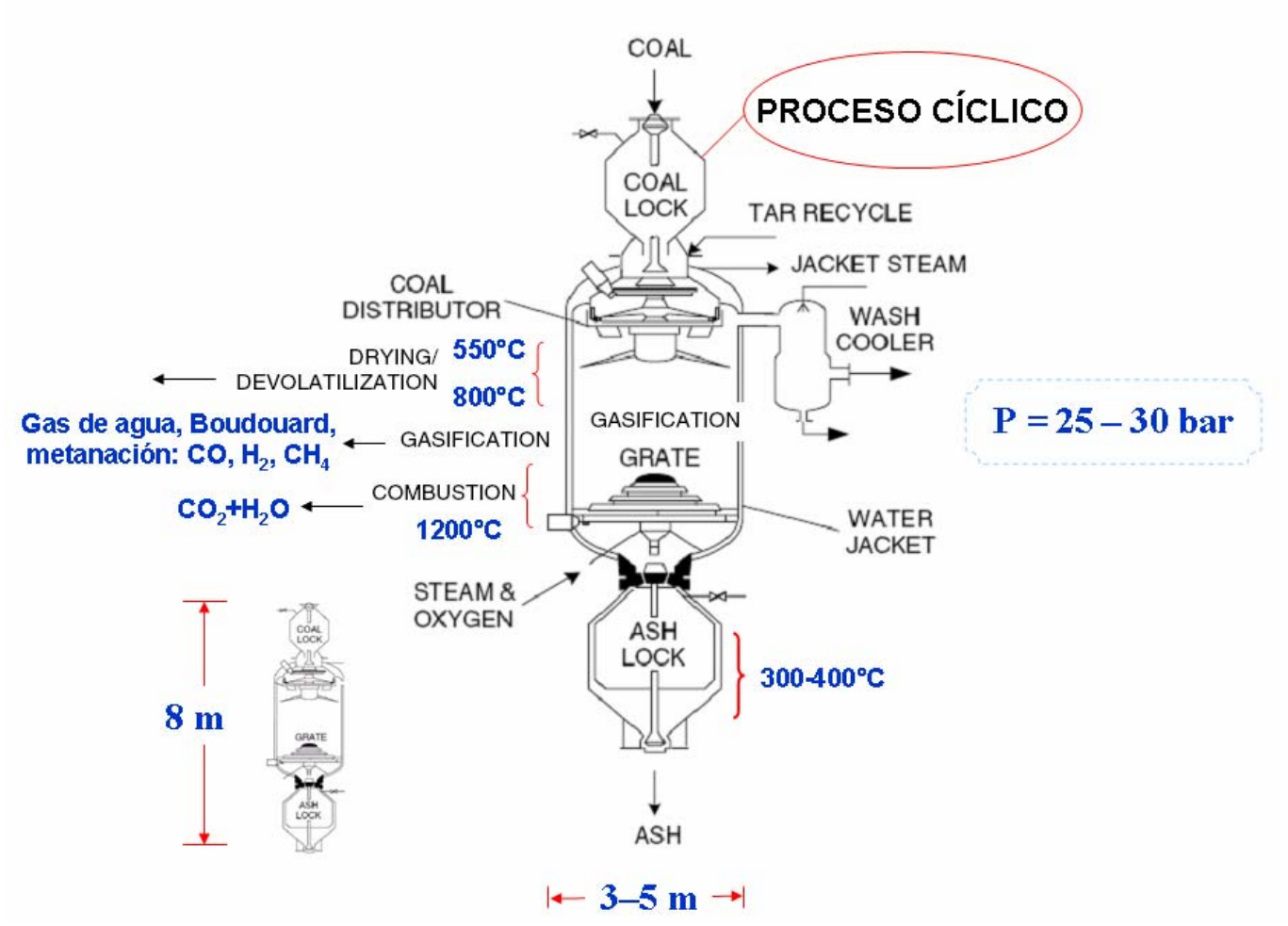


Figura 24 Esquema del reactor Lurgi de ceniza seca (Higman, 2003)

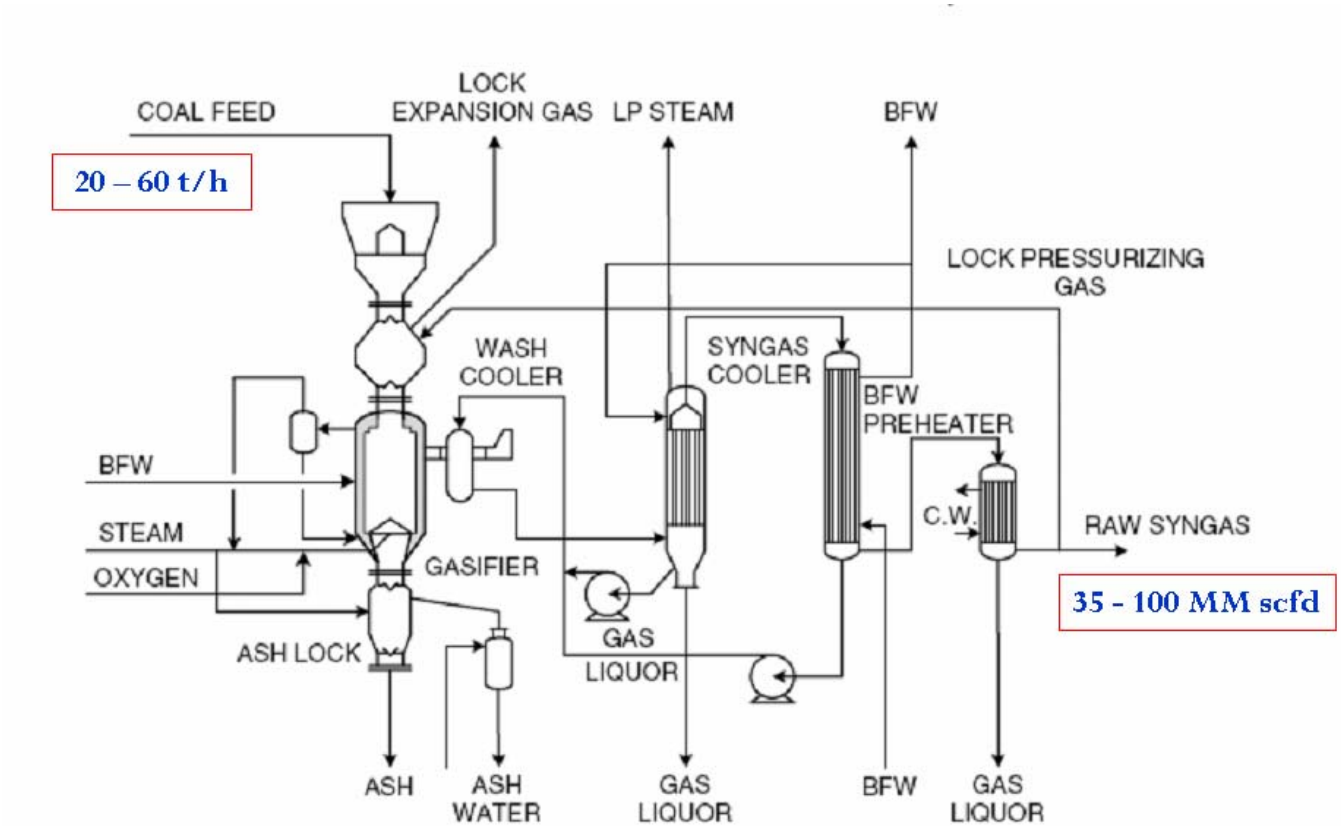


Figura 25 Esquema del proceso Lurgi

Type of Coal	Lignite	Bituminous	Anthracite
Components (maf)			
C, wt%	69.50	77.30	92.10
H, wt%	4.87	5.90	2.60
S, wt%	0.43	4.30	3.90
N, wt%	0.75	1.40	0.30
O, wt%	24.45	11.10	1.10
Raw gas composition (dry)			
CO_2+H_2S, mol%	30.4	32.4	30.8
CO, mol%	19.7	15.2	22.1
H_2, mol%	37.2	42.3	40.7
CH_4, mol%	11.8	8.6	5.6
C_nH_m, mol%	0.4	0.8	0.4
N_2, mol%	0.5	0.7	0.4
Feed components per 1000 Nm^3 $CO+H_2$			
Coal maf, kg	950	750	680
Steam, kg	1180	1930	1340
Oxygen, Nm^3	170	280	300

Source: Supp 1990

Figura 26 Datos de desempeño típico de un gasificador Lurgi de ceniza seca

1.2.5.3. Gasificador Winkler de lecho fluidizado (1931)

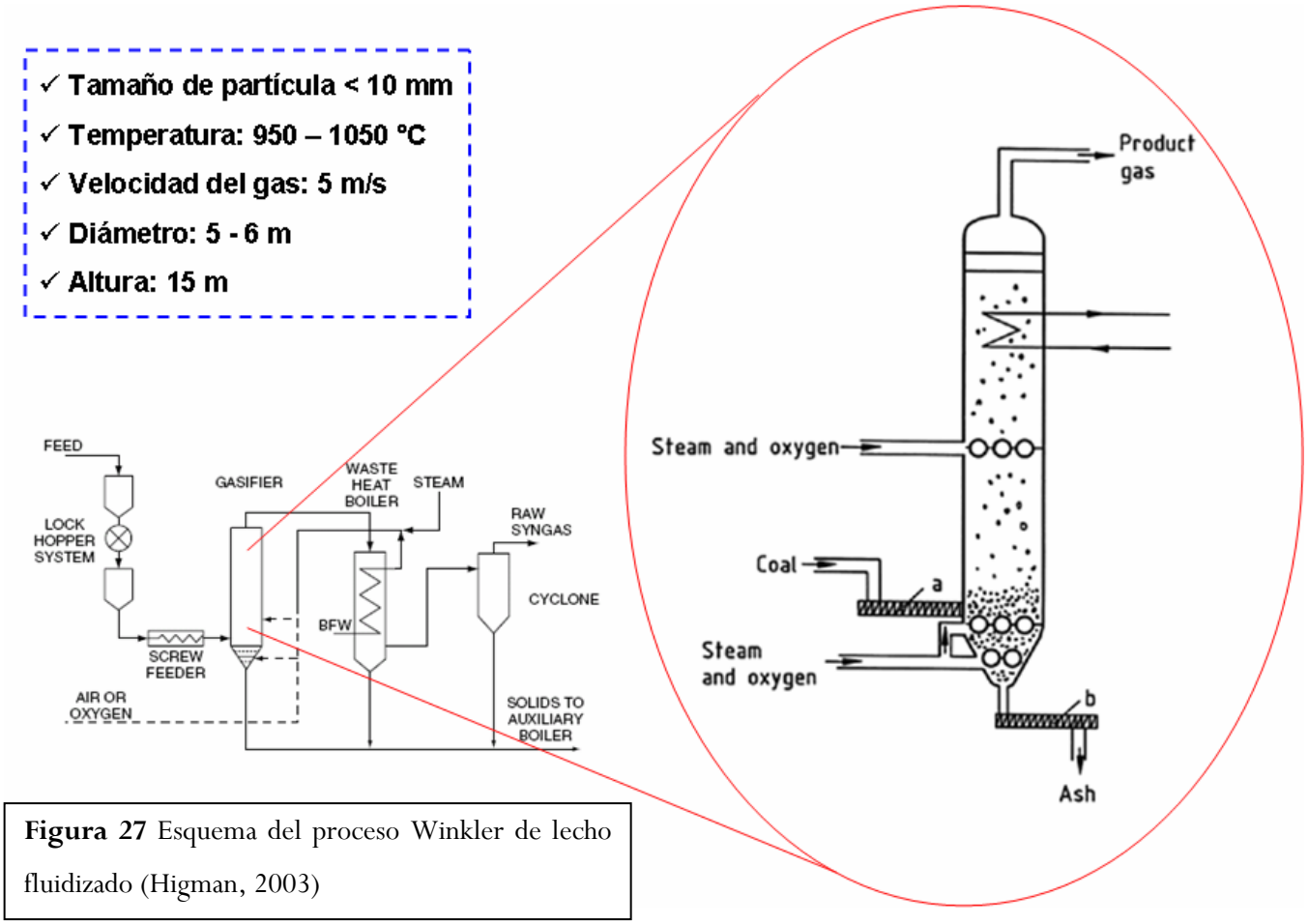


Figura 27 Esquema del proceso Winkler de lecho fluidizado (Higman, 2003)

Type of Coal		Biomass	Lignite	Bituminous	Bituminous
Blast		Air	O_2/steam	O_2/steam	Air
Temperature	°C	900	1000	1000	1000
Pressure	bar	30	30	30	30
Components (maf)					
C, wt%		50.45	66.66	81.65	81.65
H, wt%		5.62	4.87	5.68	5.68
S, wt%		0.10	0.41	1.13	1.13
N, wt%		0.10	1.14	1.71	1.71
O, wt%		43.73	26.92	9.83	9.83
Raw gas composition(dry)					
CO_2, mol%		6.7	6.2	5.3	1.9
CO, mol%		31.0	56.7	52.0	30.7
H_2, mol%		18.9	32.8	37.3	18.7
CH_4, mol%		2.1	2.6	3.5	0.9
A, mol%		0.5	0.6	0.6	0.6
N_2, mol%		40.8	0.9	1.0	47.0
H_2S, mol%		0.03	0.2	0.3	0.2
Feed components per 1000 Nm^3 H_2+CO					
Fuel maf, kg		100	1317	564	100
Steam, kg		0	26	260	24
Air or Oxygen, Nm^3		118	461	260	266

Figura 28 Datos de desempeño típico para gasificadotes de lecho fluidizado para diferentes alimentaciones y tipo de oxidante

1.2.5.4. Gasificador Koppers-Totzek de flujo arrastrado

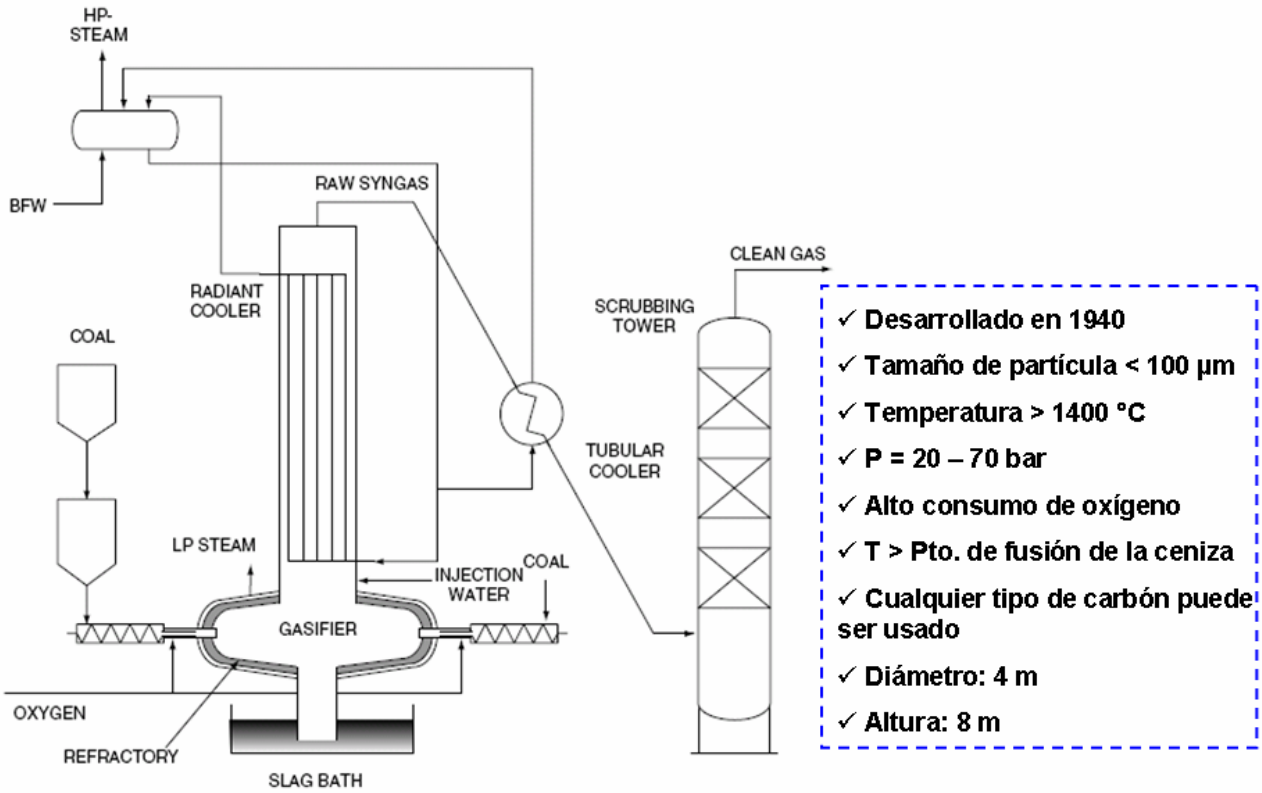


Figura 29 Esquema del proceso Koppers Totzek de flujo arrastrado (Higman, 2003)

1.2.5.5. Producción de gas natural sustituto

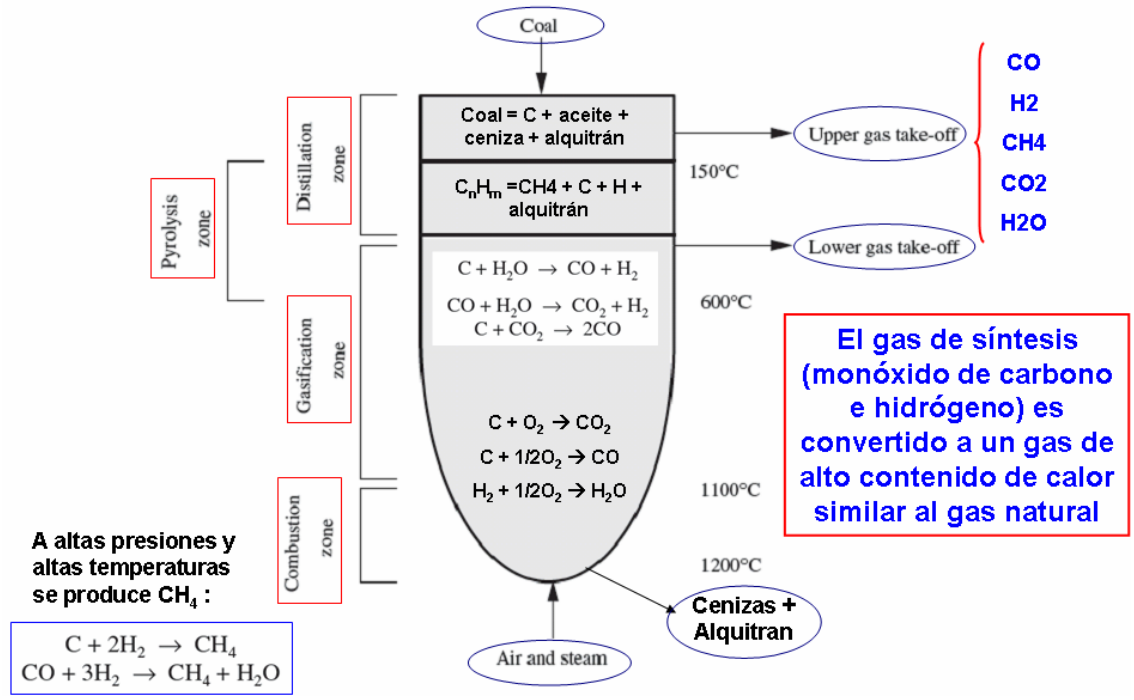
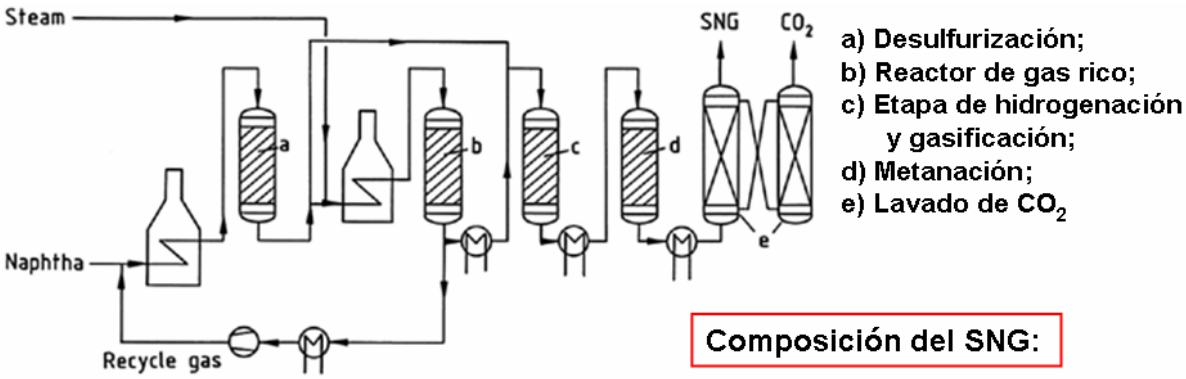


Figura 30 Esquema del reactor de producción de Gas Natural Sustituto GNS (Speight, 2002)



Composición del gas rico:

Dióxido de Carbono	21.6
Monóxido de Carbono	0.3
Hidrógeno	12.5
Metano	65.6

Composición del SNG:

Metano	96.3
Monóxido de Carbono	0.02
Hidrógeno	1.38
Nitrógeno + argón	1.1
Dióxido de Carbono	1.2
Sulfuro de hidrógeno	4 ppm

Figura 30 Esquema del proceso de producción de Gas Natural Sustituto GNS (Reimert, 2003)

Capítulo 3

Azufre – Producción de Ácido Sulfúrico

1.3. Producción de azufre y ácido sulfúrico

1.3.1. Proceso Frash. Definición

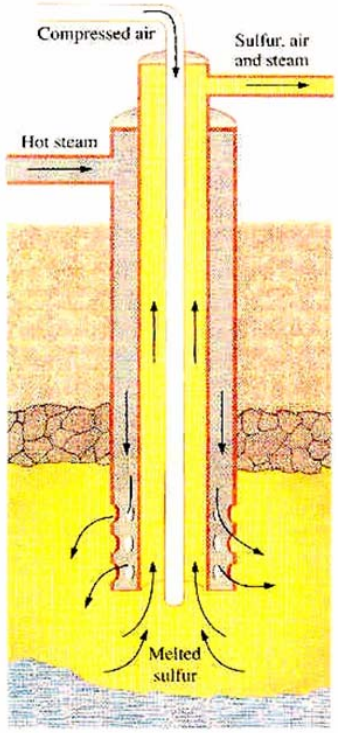


Figura 30 El proceso Frash usa tres tuberías concéntricas colocadas en la formación. Agua sobrecalentada (a una temperatura de 160ºC) es bombeada bajo presión a través de la tubería externa. Esto calienta la roca sobre el punto de fusión del azufre, 119ºC. El azufre fundido es más pesado que el agua y se acumula en una piscina. Aire calentado y comprimido es bombeado a través de la tubería interna para llevar el azufre en la piscina a través del anulo hasta la superficie.