

# CARBÓN

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

# Carbogénesis

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

# Fase bioquímica

En general el proceso de descomposición de estas sustancias vegetales depende del medio en que se desarrolla, principalmente, en relación a tres factores: contenido de nutrientes para bacterias y hongos, oxígeno y pH. Estas condiciones determinan, por un lado el modo de descomposición, y , por otro la clase de sustancias vegetales sobre las que se produce dando lugar a la formación de los macerales de los que surgen los diferentes tipos de carbón existentes.

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

Tabla. 1 Formación de los macerales de los carbones duros en función del medio y las sustancias vegetales de procedencia.

# Fase geoquímica

El estado geoquímico determina el rango o evolución metamórfica del carbón. Hoy en día se considera que la temperatura ha desempeñado el papel principal en la evolución geoquímica del carbón, ya que se ha observado que la temperatura aumenta conforme la profundidad de la capa. Es posible que altas temperaturas hayan sido suficientes para que reacciones químicas extremadamente lentas hayan transformado la materia fósil en carbón.

# Caracterización

## Composición y estructura

El carbón es una roca sedimentaria compuesta principalmente por una fracción orgánica (macerales) y, en menor proporción, por sustancias minerales, que contiene asimismo agua y gases en poros submicroscópicos. Estos compuestos orgánicos mayoritarios resultan de la formación y condensación de anillos polinucleares carbocíclicos Fig.1 donde el carbono, hidrógeno y oxígeno son los elementos fundamentales, y el azufre y nitrógeno son complementarios.

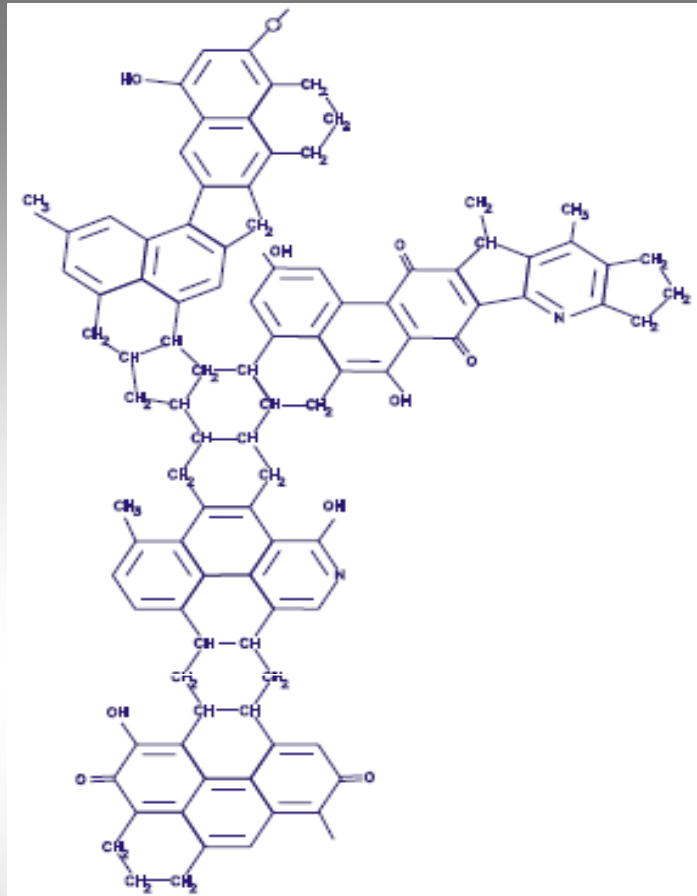


Fig.1 Representación esquemática de las macromoléculas de carbón.

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

Tabla 2. Comparación Carbón-Petróleo

Para la caracterización de un carbón se hace referencia a su composición petrográfica, es decir, a la proporción y distribución de sus respectivos macerales y minerales constituyentes.

De esta manera se distinguen, por ejemplo, los carbones húmicos, compuestos fundamentalmente de vitrinita y que dan lugar a la denominada serie ligno-hullera y los sapropélicos, con una alta proporción de exinitas, como las ampelitas y bogues.



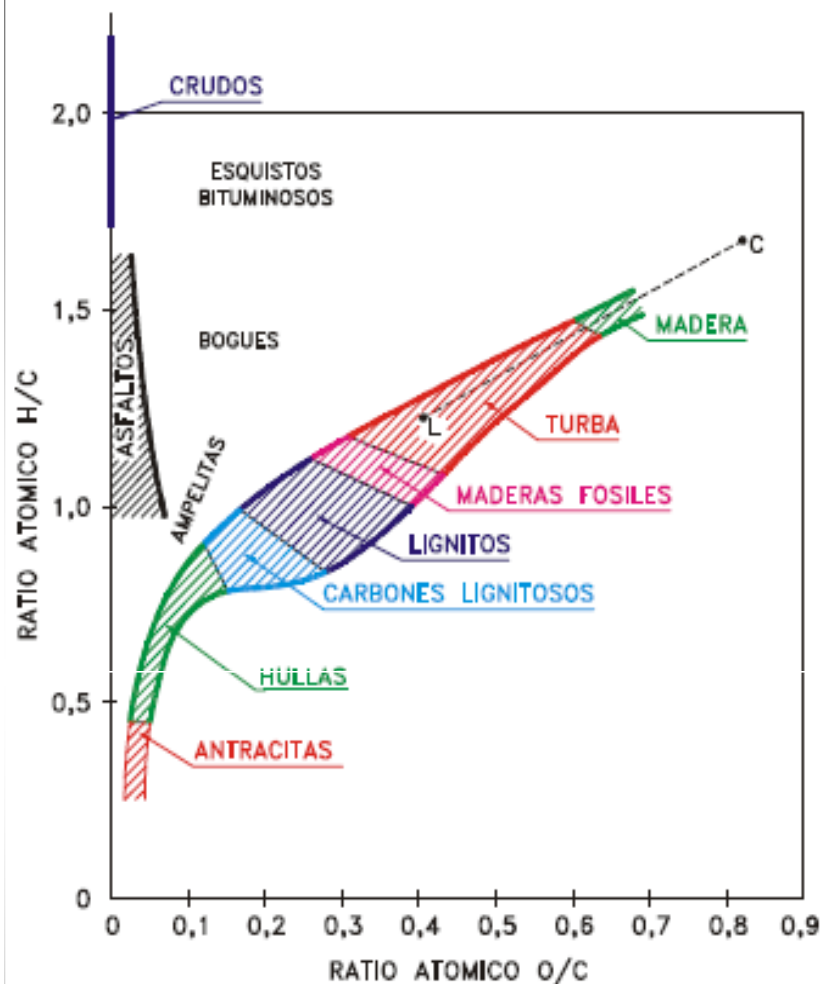


Fig.2 Representación de combustibles según Van Krevelen

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

(1) Características relativas al combustible puro.

(2) Poderes caloríficos relativos al combustible puro "ficticio" (sólo C, H, O) en kcal/kg.

(3) Asimilable a carbones ortobituminosos (Seyler) y bituminosos medios en volátiles (A.S.T.M.).

(4) Asimilable a carbones semibituminosos (Seyler) y bituminosos bajo en volátiles (A.S.T.M.).

(5) Asimilable a semiantracitas (Seyler y A.S.T.M.).

Tabla 3 Características medias de los combustibles de la serie Ligno-Hullera (1)

# Clasificaciones Físico-Químicas

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

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

Tabla 4. Clasificación Seyler

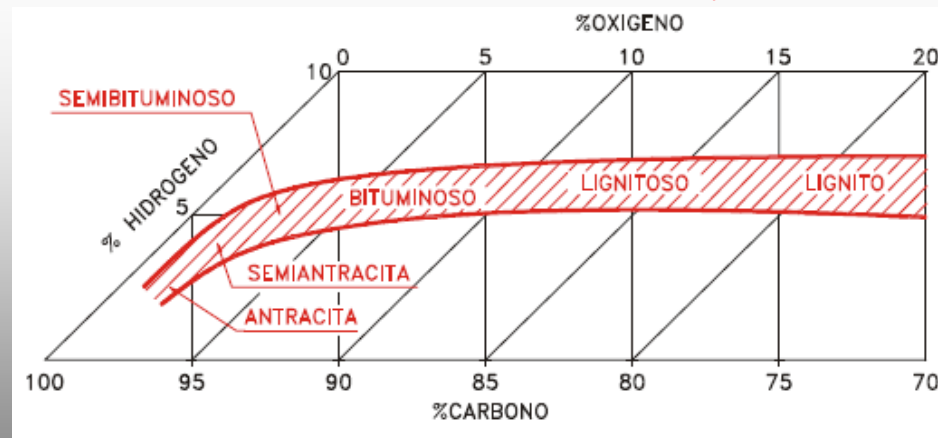


Fig. 3 Diagrama Seyler

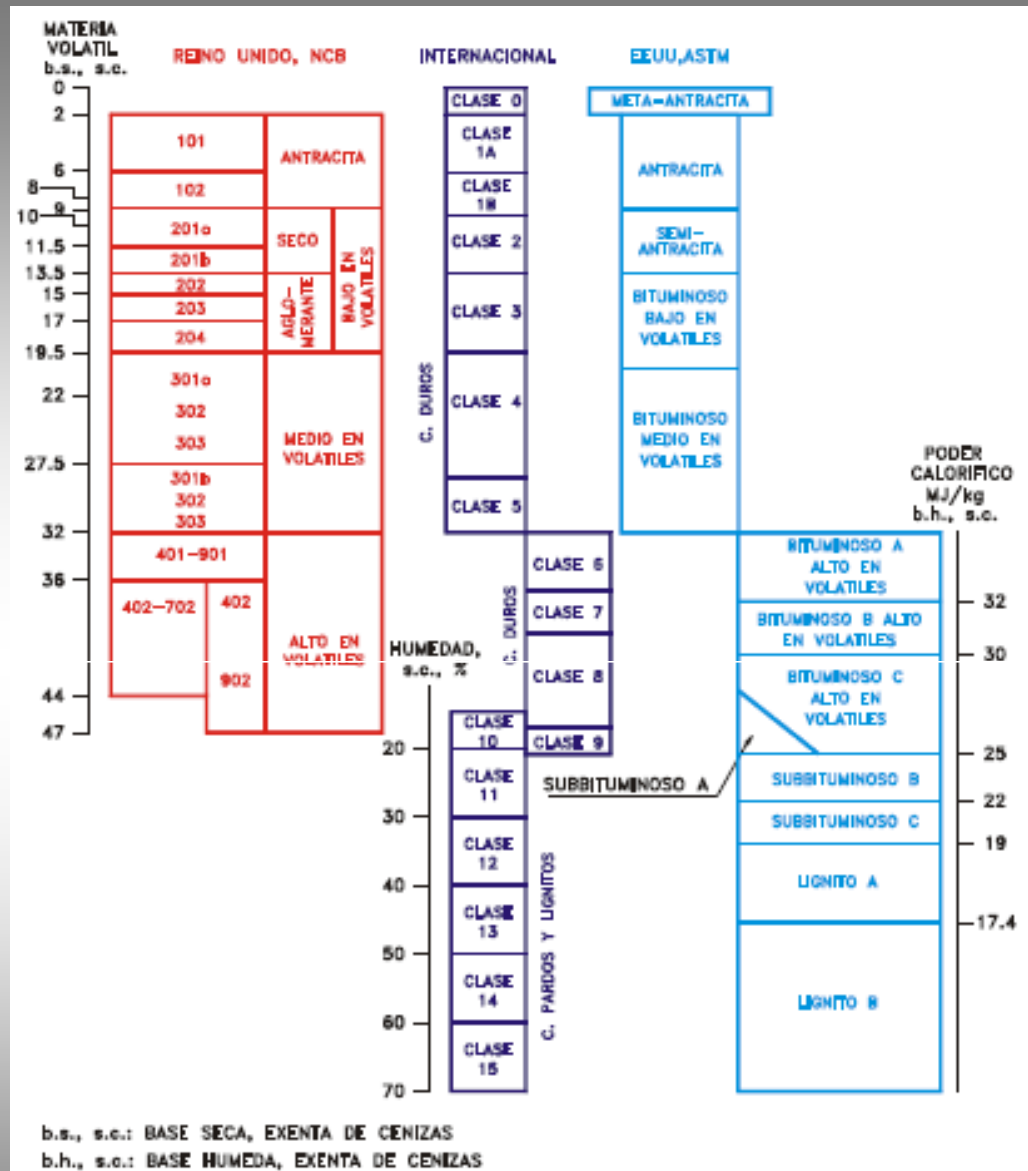


Fig. 4 Comparación entre distintos sistemas de clasificación de carbón

# Clasificación Microscópico - Visual

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

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

Tabla 5. Relación entre rango del carbón y reflectancia de la vitrinita

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

Tabla 6. Clasificación Stopes-Heerlen

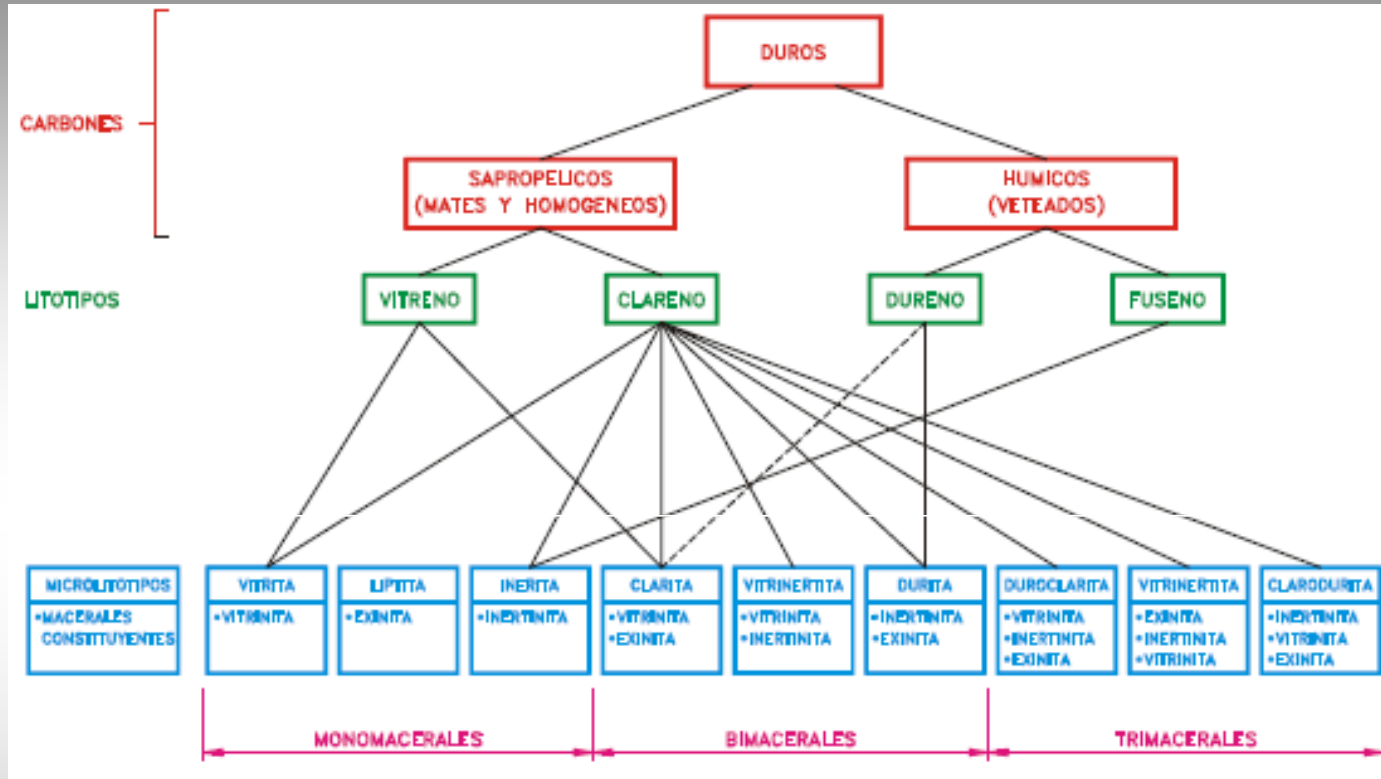


Fig.5 Clasificación Óptica de los carbones duros

# Análisis Inmediato

## 1. Humedad

Se determina generalmente por el porcentaje de pérdida de peso molecular al calentar una muestra de carbón a 105 °C. Por encima de esta temperatura aparecen las pérdidas de agua.

## 2. Contenido en volátiles

Indicador de la reactividad y la facilidad de ignición en función de las características de la muestra y del proceso de combustión.

## 3. Cenizas

Define la calidad del carbón en la combustión al determinar el contenido de materia incombustible presente (Poder calorífico).

# Análisis Elemental

Los elementos analizados son carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno. Este análisis es necesario para los balances de materia y energía de la combustión.

Los contenidos en carbono e hidrógeno permiten estimar el  $CO_2$  y  $H_2O$  que se producirá en la combustión y que darán lugar a nuevos hidrocarburos.

La presencia de nitrógeno en los carbones formará óxidos de nitrógeno  $NO_x$ .

El azufre se oxida a  $SO_2$  que normalmente se convierte en  $SO_3$ , el cual combinado con el vapor de agua de los gases de combustión genera ácido sulfúrico  $H_2SO_4$ .



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

(1) Expresión de resultados: c.r.: como se recibe; b.s.: base seca; b.s., s.c.: base seca, exenta de cenizas  
(2) Valores usuales. Entre paréntesis otros valores aceptados.  
Nota: f | función de

**Tabla 7. Ensayos normalizados y requerimientos para carbones de Centrales Térmicas**

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

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

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

**Tabla 7. Continuación**

# Carboeléctricas

Este tipo de centrales utilizan como energético primario el carbón de bajo contenido de azufre y requieren de alta tecnología para el manejo de los residuos de combustión, además de instalaciones especiales para abatir la contaminación.

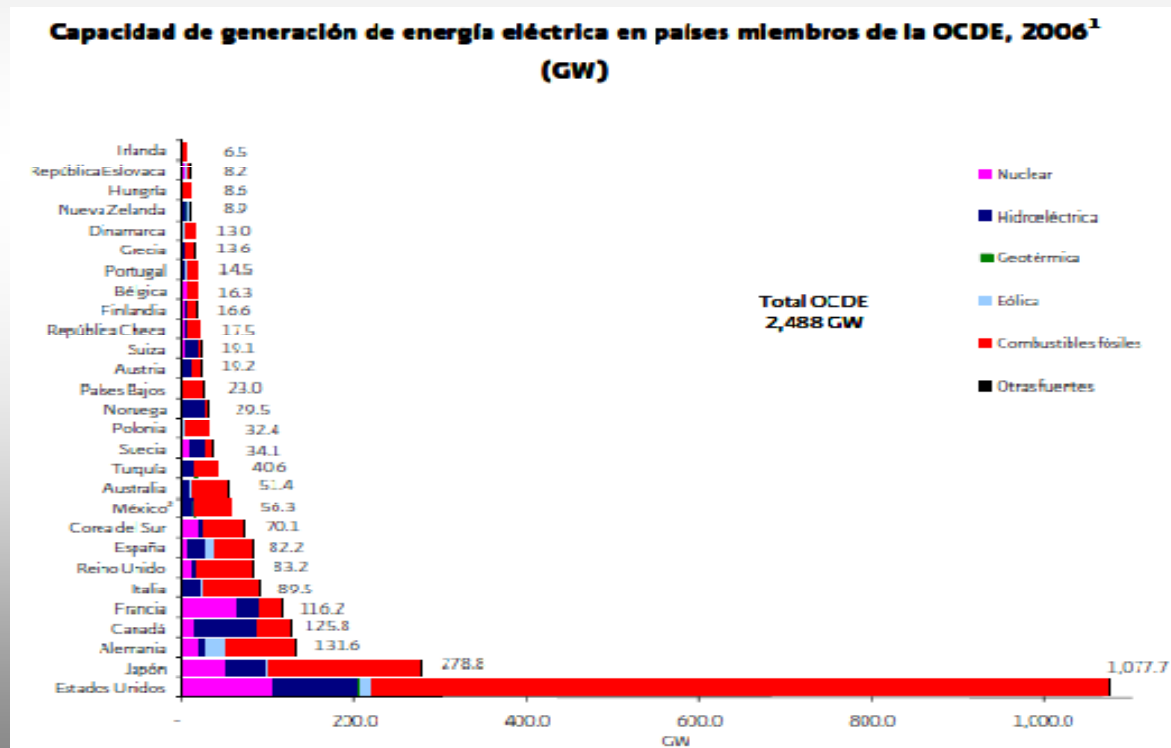


Fig. 6

Las centrales carboeléctricas utilizan el mismo esquema de generación que las centrales del tipo vapor, con la diferencia de que requieren de equipos adicionales:

- Sistema de manejo de carbón
- Transportadores de carbón
- Manejo de cenizas
- Desulfurizadores
- Precipitadores electrostáticos
- Limpieza de polvos

### **Central térmica Dual**

Esta clase de centrales utilizan como fuente energética primaria dos combustibles: combustóleo o carbón, lo que le da la particularidad de ser "dual".

# Proceso de generación

La tecnología empleada en estas plantas carboeléctricas se fundamenta en el ciclo Rankine. En la figura 7 se muestran esquemáticamente los componentes básicos de una central térmica de vapor simplificada. En donde se tienen cuatro subsistemas identificados por las letras A a D. En el subsistema B se utiliza como combustible para producir en la caldera vapor de alta presión y temperatura. En el subsistema A se da la conversión de calor a trabajo, es decir el vapor hace girar el rotor de la turbina el cual está acoplado al rotor del generador eléctrico (subsistema D). El vapor que sale de la turbina pasa al condensador donde cambia a estado líquido mediante el circuito de agua de refrigeración el cual forma el subsistema C, el agua condensada es recirculada hacia la caldera por medio de la bomba de alimentación.

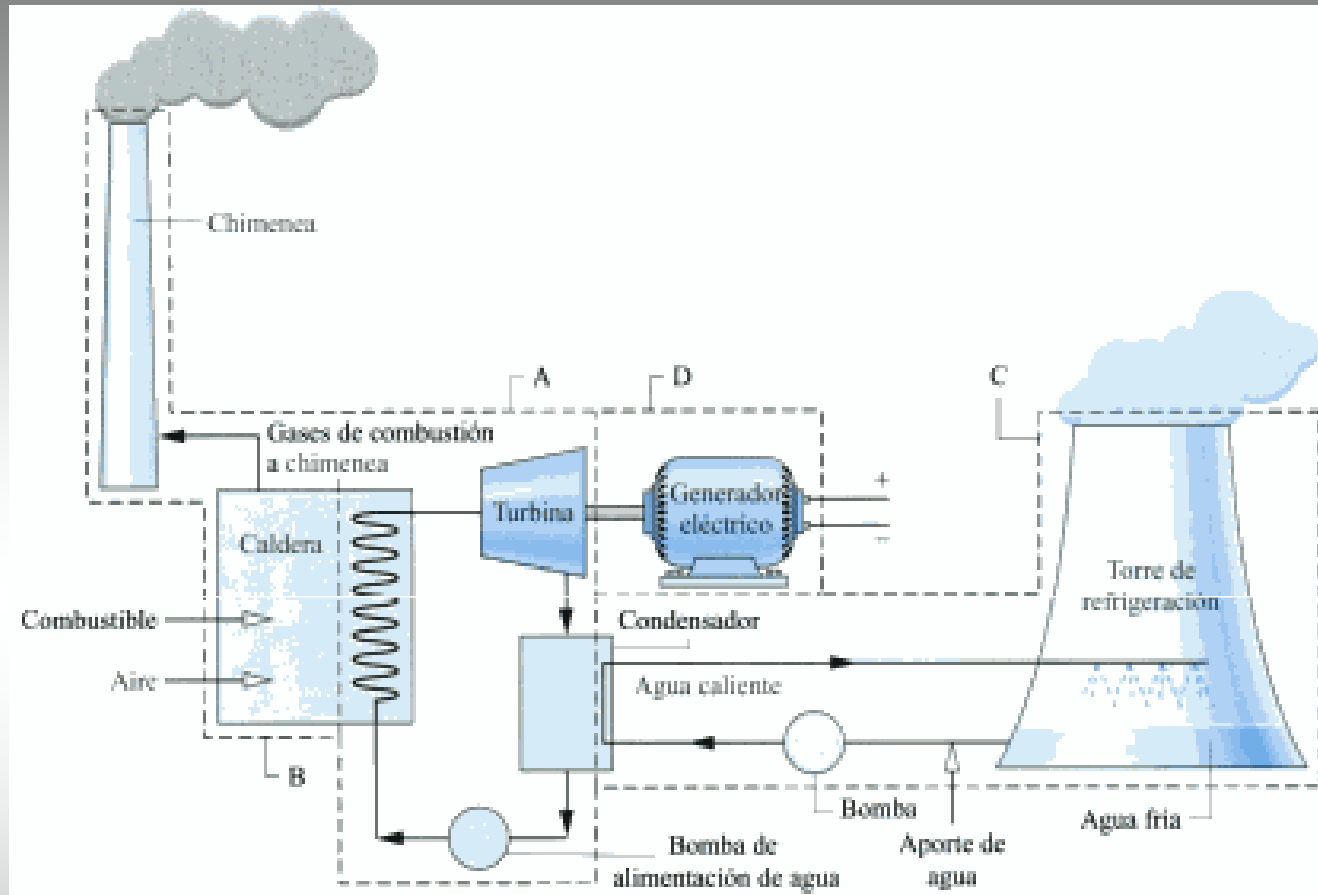
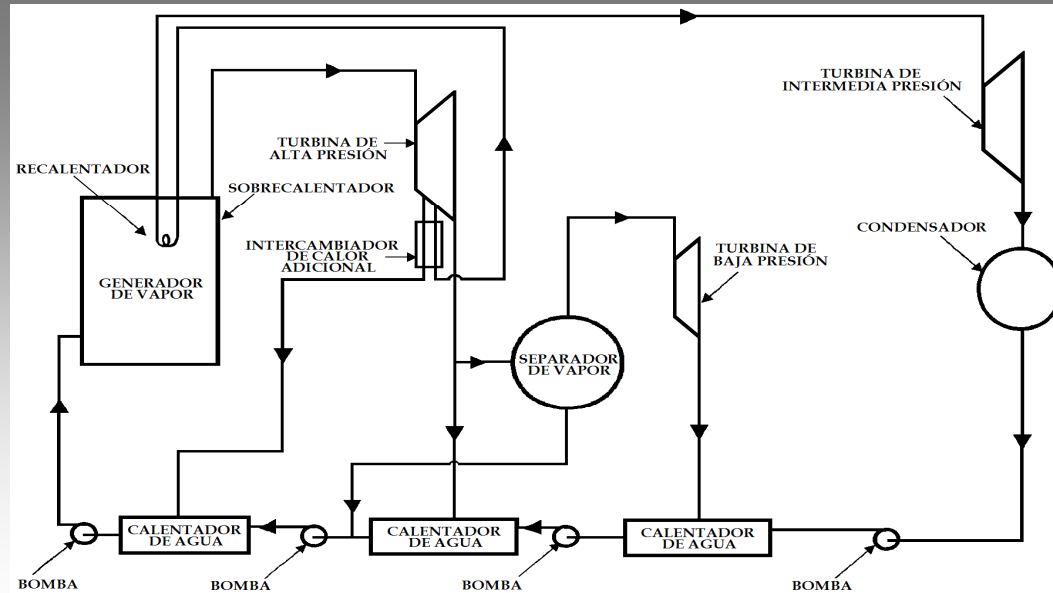


Fig. 7 Componentes básicos de una central térmica de vapor



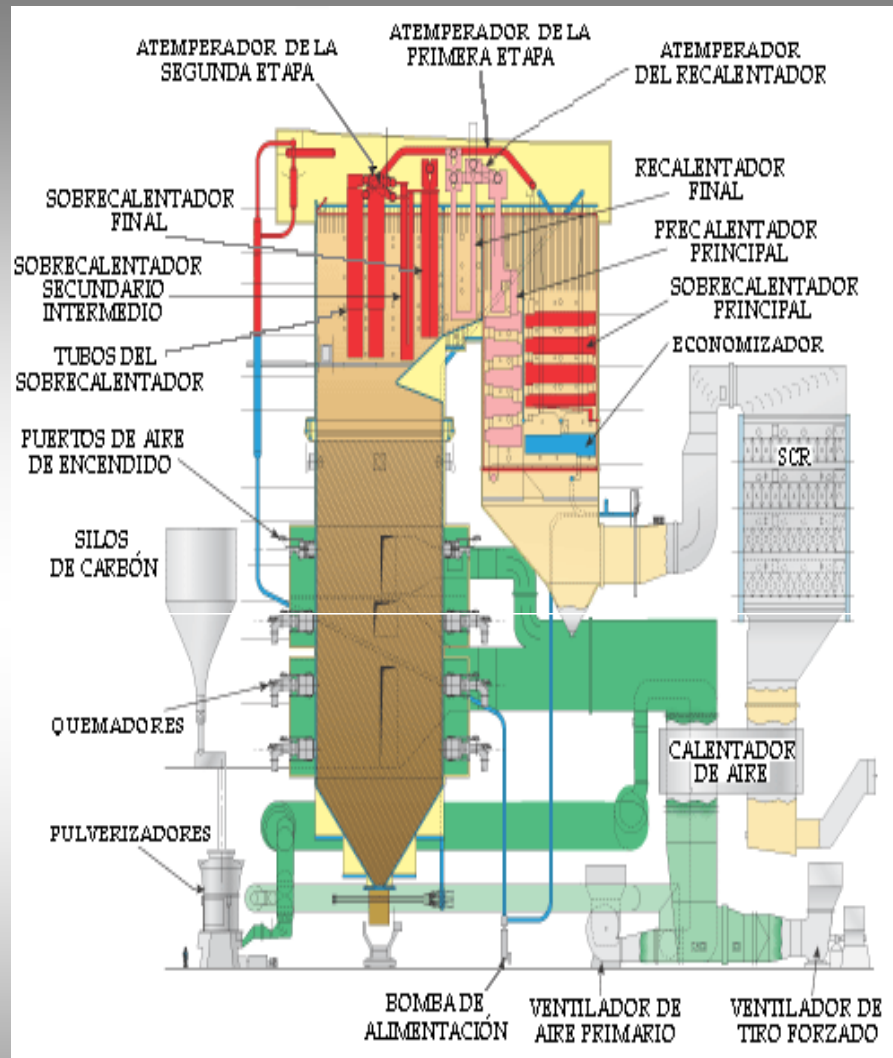
**Fig.8 Ciclo Rankine regenerativo con un recalentamiento**

El ciclo Rankine regenerativo con recalentamiento emplea las siguientes dos adaptaciones. El recalentamiento consiste en retirar vapor de etapas intermedias de la turbina para volver a calentarlo en el generador de vapor, una vez que el vapor ha alcanzado las condiciones adecuadas se conduce al módulo de presión intermedia de la turbina. La característica de regeneración consiste en extraer vapor de una o más etapas de la turbina para calentar el condensado.

## Equipos básicos y auxiliares de la planta generadora

En este tipo de centrales termoeléctricas se disponen de los siguientes procesos y equipos básicos: extracción y bombeo de agua, tratamiento de agua de alimentación, flujo de combustible, generación de vapor en la caldera, expansión en el turbina, condensación, circulación en torres de refrigeración y por último entrega de la generación al sistema de distribución eléctrica por medio de la subestación de alta tensión.





El generador de vapor tiene por objeto calentar el agua de alimentación para vaporizarla, además de recalentar el vapor extraído de la turbina. El calor necesario para convertir el agua en vapor se obtiene en el hogar de la caldera, en donde se quema el combustible.

Fig.7 Generador de vapor

## Sistema de Manejo y Tratamiento de ceniza

En el uso de combustibles sólidos, como lo es el carbón es necesaria la extracción de cenizas o escoria. Por lo que se dispone de dispositivos para sacar las cenizas del hogar y las partículas capturadas por el precipitador electrostático, mediante el uso de sopladores de hollín, dispositivos mecánicos de golpeo, tolvas para recolección, banda transportadora de cenizas y depósitos para ceniza

## Turbina de vapor

En la turbina se pueden distinguir dos partes principales, el rotor y el estator o carcasa. El rotor está formado por ruedas de álabes unidas al eje y constituyen la parte móvil de la turbina. La carcasa está diseñada para proteger la turbina y sostener el rotor. En la carcasa se tienen: conexiones de vapor de entrada, líneas de purgas y extracciones, soportes de las chumaceras y alojamiento de los sellos.

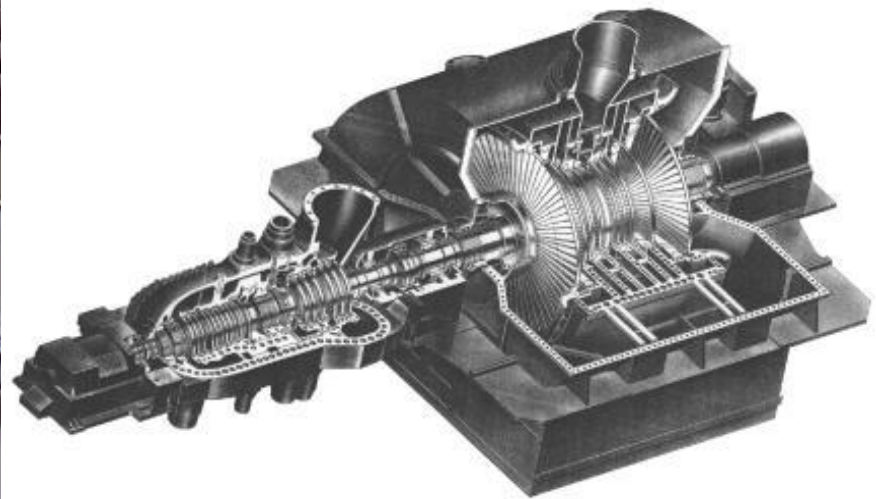
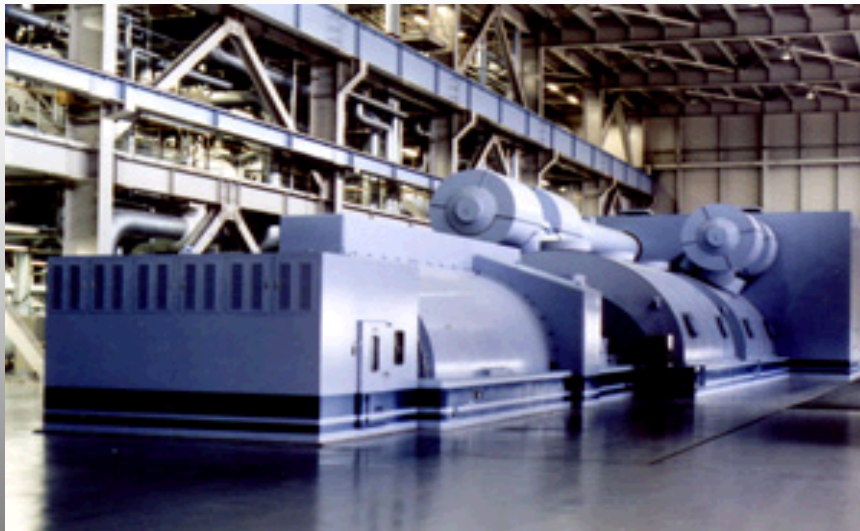


Fig. 8 y 9 Turbogenerador MHI

## Sistema de condensación por agua

El proceso de condensación requiere de un medio refrigerante y una obra de toma, la cual consta de un conjunto de rejas, mallas y bombas que suministran el agua de enfriamiento al condensador. En la mayoría de los casos se dispone de un circuito abierto, de manera que el agua captada de un río circula a través del condensador y se devuelve al cauce del que se ha tomado, a una temperatura ambiente.

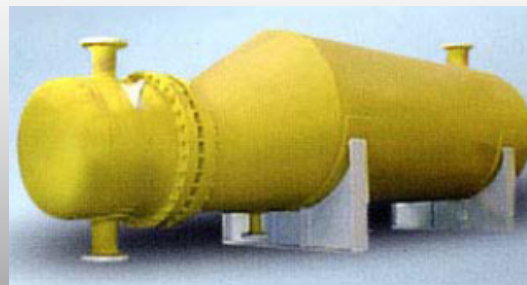


Fig.10 Condensador

## Generador eléctrico

El generador eléctrico es una máquina sincrónica capaz de transformar en potencia eléctrica la máxima potencia de salida de la turbina. El generador está construido por dos partes principales estator y rotor.

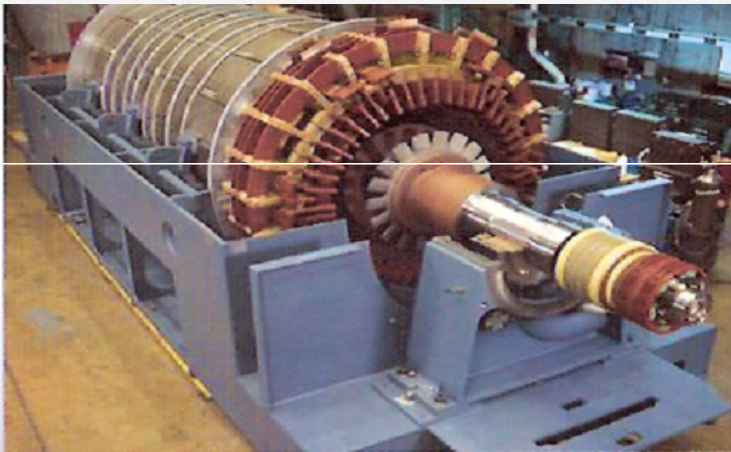


Fig. 11 Armadura base

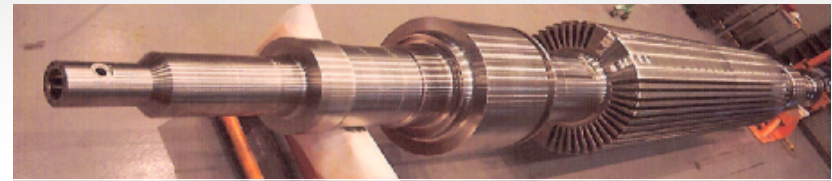


Fig. 12 Rotor de polos lisos

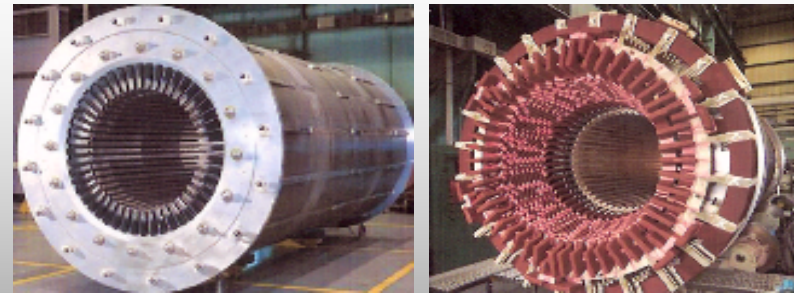


Fig. 13 Núcleo y devandos del estator

## Sistema de excitación y regulación de tensión

Para la regulación de tensión del generador eléctrico se utiliza un sistema de excitación estático cuyas funciones son: suministrar la corriente de campo, controlar el voltaje de generación (kV) en forma rápida y automática, contribuir a una buena estabilidad del sistema de potencia bajo distintas condiciones de carga. El sistema de excitación estático está formado por un grupo de tiristores y un regulador de voltaje automático AVR que suministra y controla la excitatriz.

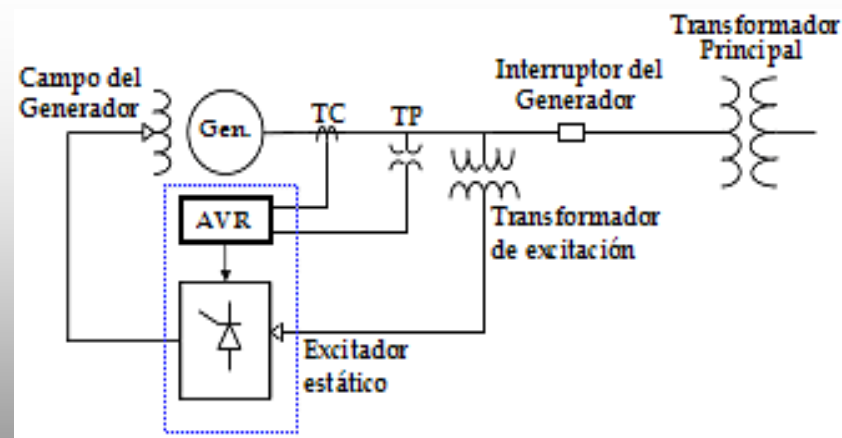


Fig. 14 Sistema de excitación y control AVR

## Ventajas

- Diversificación de combustibles
- Bajo costo de combustible

## Desventajas

- Alto costo de inversión
- Alto impacto ambiental
- Alto costo de mantenimiento

# REMEDIACIÓN

Captura y Secuestro de Carbón (CCS), que propone enterrar bajo tierra todas las emisiones de CO<sub>2</sub> que libere una planta durante su funcionamiento antes que sean emanados por la chimenea.

Proceso.

1. El carbón es combustionado con oxígeno puro, concentrando el CO<sub>2</sub> en gas.
2. El gas resultante es limpiado de residuos como la ceniza y el sulfuro.
3. El gas es enfriado para condensarlo y mezclarlo con agua.
4. El CO<sub>2</sub> es inyectado por debajo de las capas de roca impermeables.
5. El CO<sub>2</sub> se diluye con agua salina pudiendo convertirse en minerales sólidos



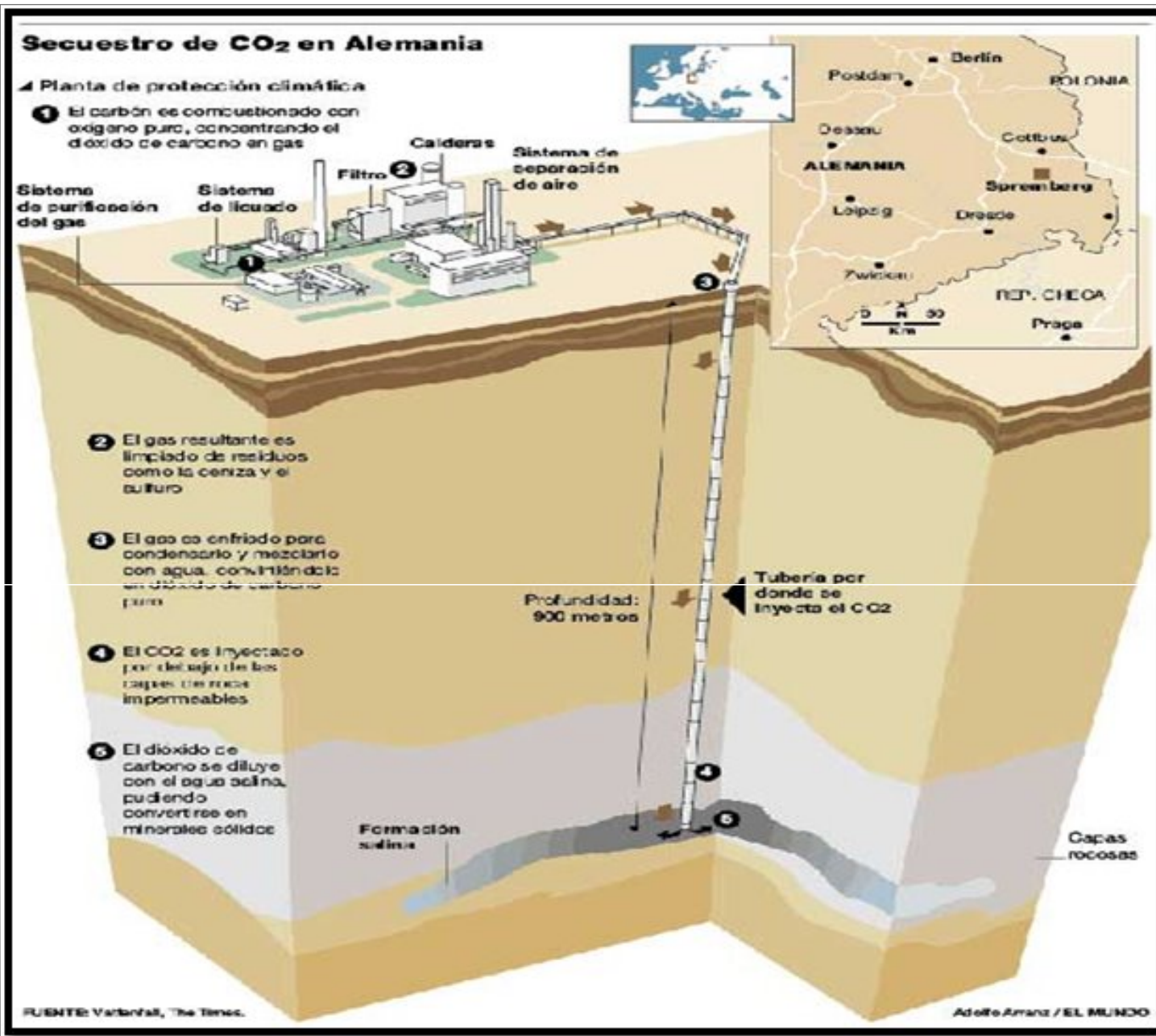


Fig. 15 Planta de protección climática

# Gasificación Integrada con Ciclo Combinado (IGCC)

La gasificación consiste en una oxidación parcial de combustibles sólidos o líquidos para formar lo que se conoce como un gas de síntesis. El cual contiene monóxido de carbono (entre 40 y 56%) e hidrógeno (entre 25 y 37%) y por sus características se puede utilizar como combustible.

## Proceso de gasificación

1. Requiere oxígeno como agente gasificante
2. Requiere de agua como enfriamiento

La forma para obtener calor durante la gasificación es un punto importante, pues la gasificación requiere de procesos altamente endotérmicos para formar el gas de síntesis.

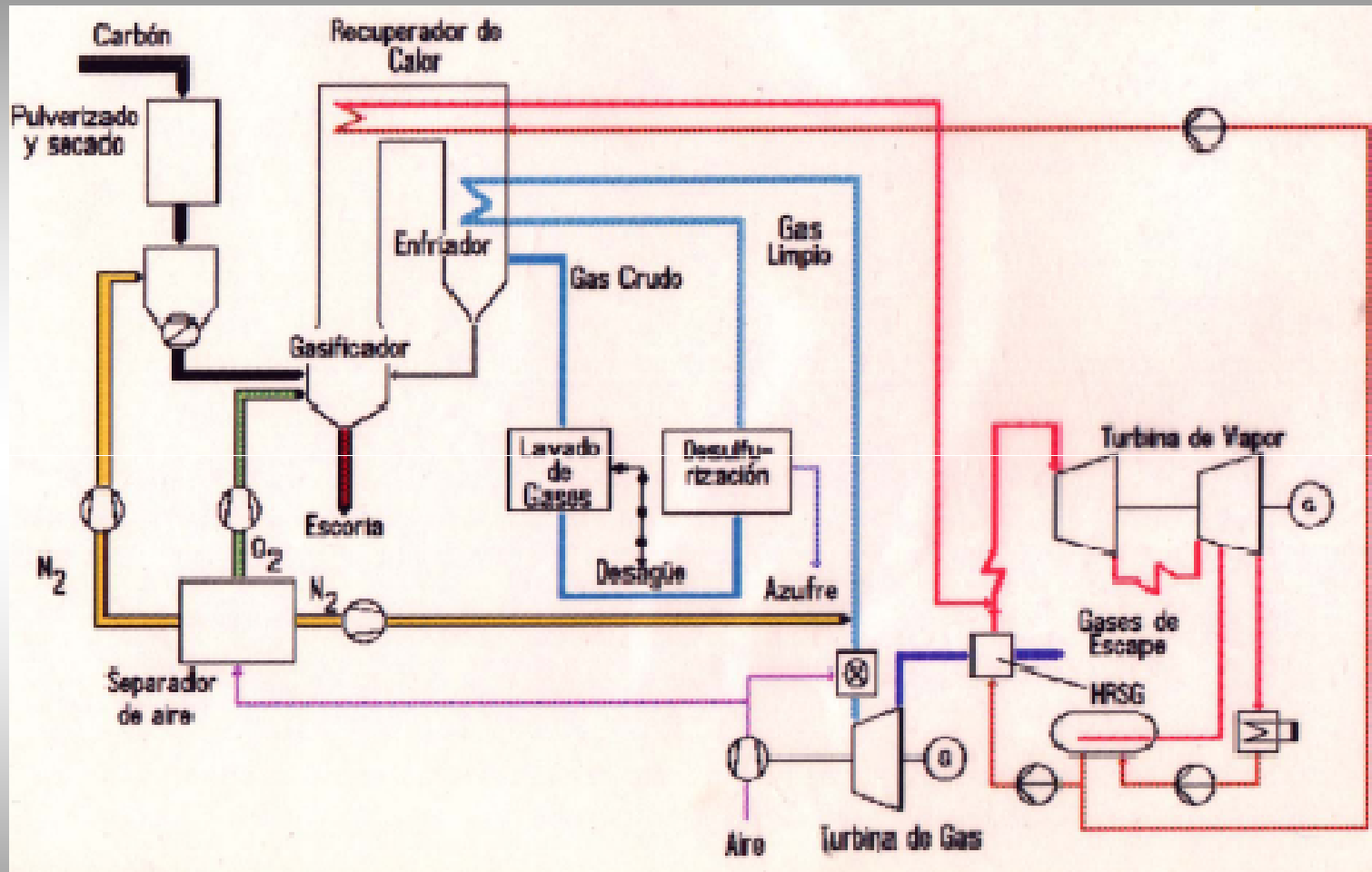
El calor necesario es obtenido a partir de la oxidación parcial de combustible empleado mediante el suministro de oxígeno y vapor de agua, o bien, aire y vapor de agua. Esto produce una reacción exotérmica.

## Procesos tecnológicos de gasificación

Las características de los diferentes tipos de gasificadores están determinadas por la manera que tienen para llevar a cabo las reacciones químicas, así como el método empleado para introducir las sustancias.

Se pueden identificar tres tipos de gasificadores:

- Lecho fijo
- Flujo por arrastre
- Lecho fluidizado



**Fig. 16 Esquema de una planta de gasificación**

## Ventajas de la gasificación en ciclos de potencia

Los procesos de gasificación integrados a ciclos combinados para generación de energía eléctrica tienen grandes ventajas como las que se indican a continuación:

- La flexibilidad en el uso de combustibles sólidos y en general de cualquier desecho orgánico.
- Diferentes procesos para la gasificación han demostrado poderse aplicar con cualquier tipo de combustible sólido (carbón o coque de petróleo) sin necesidad de modificaciones importantes en el reactor.
- Tiene una mayor eficiencia termodinámica del ciclo, comparando este parámetro con el de unidades termoeléctricas convencionales.

- Las eficiencias que se pueden alcanzar en los procesos IGCC pueden llegar hasta 46%, dependiendo del proceso
- .Reducen las emisiones contaminantes al ambiente, las cuales comparativamente con las carboeléctricas convencionales son muy inferiores.
- Se espera por lo menos que la reducción de emisiones de plantas IGCC vs. plantas carboeléctricas convencionales sean de:

hasta 27 % menos de CO<sub>2</sub>

70 % menos de sólidos

95 % menos de SO<sub>2</sub>

50 % menos de NO<sub>x</sub>

- Se produce vapor de alta presión en el proceso de gasificación que puede aprovecharse en la turbina de vapor del ciclo combinado o como vapor de proceso de alta o mediana presión.
- Los costos de instalación (o costos de inversión) son competitivos con respecto al de centrales carboeléctricas convencionales que incluyen la limpieza de gases de combustión.
- Se puede obtener como subproducto azufre puro, lo cual tiene un valor comercial superior a los desperdicios o subproductos que normalmente se obtienen en carboeléctricas convencionales.



# Bibliografía

1. Fundamentos de termodinámica técnica, Michael J. Moran, Shapiro.
2. Química la ciencia Central, Theodore L. Brown.
3. Tecnología mecánica e instalaciones, Odón de Buen Lozano.
4. Plantas de vapor. Arranque, prueba y operación. Charles Donald Swift.