

Fuentes de Energía

Capítulo 5: Carbón. Políticas. Secuestro de CO₂

Autores:

- Mathieu Legrand. Profesor Titular. Ahora en la UPM.
- Antonio Lecuona Neumann. Catedrático.

Dpto. De Ingeniería Térmica y de Fluidos, [Grupo ITEA](#), [Universidad Carlos III de Madrid](#), Leganés, España.

2019

La información contenida en este documento sirve de propósito exclusivo como apuntes para alumnos en la enseñanza de la asignatura indicada y ha sido obtenida de las mejores fuentes que se han podido encontrar, generalmente de reconocido prestigio. No obstante el/los autor/es no garantizan la exactitud, exhaustividad, actualización o perfección de su contenido. Por ello no será/n responsable/s de cualquier error, omisión o daño causado por el uso de la información contenida, no tratando con este documento prestar ninguna clase de servicio profesional o técnico; antes bien, se ofrece como simple guía general de apoyo a la docencia. En caso de detectar algún error, rogamos nos lo comunique e intentaremos corregirlo. Puede contener material con copyright © por lo que su reproducción puede no estar permitida.

Introducción al capítulo 5: Carbón. Políticas. Secuestro de CO₂.

Capítulo de carácter informativo y cualitativo. La parte cuantitativa se basa en los Caps. 1 y 2.

El carbón es más abundante que el petróleo, pero es de difícil extracción, transporte y combustión y contiene mucho carbono. Puede contener bastantes impurezas. Ello lo hace un combustible sucio y con **alto factor de emisión de CO₂ FE**. Sin embargo **es de bajo coste** y está menos cargado de impuestos para el usuario final. Su uso está en regresión, pero si avanzan las tecnologías punteras de obtención de H₂ partiendo del carbón junto con el la captura y secuestro de CO₂, pudiera ser una fuente de energía con cierto futuro.

Al ser sólido no se separa de las rocas, por lo que puede contener bastante, dando lugar a **cenizas**. Además puede contener **agua**. Ello, junto con su origen vegetal y en ocasiones menor antigüedad que el petróleo, hace que se le encuentre en grados de calidad muy diferentes, determinando su uso.

Salvo en países poco desarrollados, su uso primordial es para la **producción eléctrica** en centrales convencionales de vapor (ciclo Rankine, similares a las nucleares, pero con el vapor a mayor temperatura y presión) por lo que se aprovecha esta circunstancia para presentarlo, así como la estructura de las centrales de carbón pulverizado. Se citan las técnicas de purificación de los gases de chimenea para mitigar la alta contaminación resultante, así como la elevación de la presión y la temperatura del vapor por encima del punto crítico para aumentar el rendimiento. Son centrales de base, grandes, costosas, lentas de fabricar y muy voluminosas.

Una técnica costosa y aún en desarrollo es la **gasificación integrada** del carbón. Permite quemar el gas en un ciclo combinado vecino, o bien extraer H₂ para su venta y secuestrar el CO₂. Sin embargo, el H₂ es aún incipiente como combustible y el confinamiento de CO₂ no está aún resuelto.

Se presentan otras técnicas futuras de uso limpio del carbón.

La materia se compone del núcleo expositivo, lo complementan temas recordatorios y de ampliación (señalados como *ex cursus*), cuestiones de autoevaluación y un ejercicio propuesto.

Índice

5.1.- Formación de carbón

5.2 .- Composición y clasificación

5.3 .- Reservas, consumo y precios

5.4.- Usos y aplicaciones del carbón

5.5.- Centrales de carbón y mitigación de la contaminación

5.6.- Cuestiones de autoevaluación

5.7.- Ejercicios propuestos

Objetivos: Dar a entender la situación actual del carbón en general como fuente de energía en cantidad similar al petróleo a nivel mundial. Conocer que actualmente su uso mayoritario en sociedades desarrolladas es para generación de electricidad en base y que está en regresión. Dar a entender de las ayudas que las minas reciben en España por cuestiones sociales y estratégicas, si bien tienen un final próximo. Dar a conocer técnicas en desarrollo que tratan de evitar sus altas emisiones a la atmósfera.

5.1.- Formación de carbón (*ex cursus*)

A diferencia del petróleo, el carbón es de origen vegetal. Por ende, no se suelen hallar juntos

~10⁸ años: Bosques oceánicos y pantanos abundantes. La materia vegetal queda hundida en el agua, incluso repetidamente. La privación de oxígeno, origina putrefacción, la presión del agua y de rocas por plegamientos, e incluso la temperatura a las grandes profundidades, induce pérdida de agua y de oxígeno y enriquecimiento en carbono. En resumen:

Descomposición anaeróbica de las plantas ricas en carbono que origina un fósil.

Más información:

[Formación del carbón](#)

[Wikipedia](#)

5.1.- Formación de carbón (*ex cursus*)

Accidentes geológicos (fallas, plegamientos, etc...) pueden hacer aflorar yacimientos de carbón **a cielo abierto** (A), o simplemente reducir la profundidad del yacimiento.

En general, a mayor profundidad, aumenta la concentración en carbono y disminuye la de volátiles y humedad.

Las minas a cielo abierto no necesariamente están así al encontrarlas. Puede ser rentable retirar roca y sedimentos que sepultan el yacimiento para acceder a él a cielo abierto por la mayor facilidad de extracción.

Mina de carbón a cielo abierto en Wyoming, USA.

Coal mine Wyoming. Bureau of Land Management,
Dominio Público,
<https://www.usgs.gov/media/images/wyoming-coal-mine>



5.2.- Composición y clasificación

Contenido en carbono y PCI ↑

- **Antracita:** ~87,1 % en carbono (b.s. base seca en masa). Carbón duro que tiene el mayor contenido de carbono fijo y el menor en materia volátil ~3,6. ~ 9,3 % de cenizas. Tiene un color negro brillante de estructura cristalina. Desprende poco humo y hollín.



Fuente: Wikipedia. CC BY-SA 3.0

- **Hulla (~bituminosos):** ~70-85% b.s. en carbono. Contenido en volátiles ~15 y 30 %. Es negra (hard coal), mate y arde con dificultad.



Fuente: Wikipedia. Dominio público

- **Lignito:** ~70% b.s. en carbono. Alto contenido en volátiles ~20%. Alto contenido en agua (~40%). Suele tener color pardo (brown coal) y estructura fibrosa o leñosa.



Fuente: Wikipedia. CC BY-SA 3.0

- **Turba:** ~ 60% b.s. en carbono. Material orgánico compacto, de color pardo a negro. Se ha de procesar para aprovecharlo como combustible.



Fuente: Wikipedia. CC BY-SA 3.0

↓ Contenido agua

5.2.- Composición y clasificación

El poder calorífico inferior (*PCI*) es tanto menor cuanto mayor es el contenido de humedad.

Se distinguen propiedades en base húmeda b.h. (estado natural) o en base seca b.s., una vez retirada la humedad.

Existen dos análisis del carbón, obviamente en b.h. al incluir humedad y sumar 100%:

1.- **Análisis elemental**, da la composición (en masa) de los elementos químicos materia mineral y agua aparte, p. e.

89,2 % de C; 2,7 % H₂; 1,2% N₂; 1,2 % S; 1,7 % O₂; 3% de cenizas y 1% de humedad inherente,

2.- **Análisis inmediato**: el carbón seco se calienta hasta 925 °C en ausencia de aire, liberando la materia volátil y el agua, quedando solo el carbón fijo que se mide (coque). Contiene las cenizas.

Otra propiedad es la facilidad de aglomeración del carbón para formar coque a alta temperatura.

Las cenizas pueden tener más o menos facilidad para aglomerarse, lo que dificulta su eliminación (caking).

Los carbones se clasifican en rangos, según [ASTM](#).

5.2.- Composición y clasificación. Rangos ASTM (*ex cursus*)

<u>ERA</u>	<u>PERIODO</u>	<u>EDAD</u> <u>x 10⁶</u> <u>años</u>	<u>RANGO</u> <u>**** ASTM</u>	<u>GRUPO</u>	<u>%C</u> <u>Masa *b.s.</u> <u>sin cenizas</u>	<u>%Volátiles</u> <u>Masa *b.s.</u> <u>sin cenizas</u>	<u>PCI [MJ/kg]</u> <u>**b.h. sin</u> <u>cenizas</u>
CENOZOICO	Neógeno	1-2	*** TURBA				
	Paleógeno	2-65	LIGNITO	Lignito B			<14.65
MESOZOICO	Cretácico	65-135		Lignito A			14.65< -<19.30
	Jurásico	181-135	SUB-BITUMINOSOS	Subbituminoso C			19.30< -<22.09
	Triásico	181-		Subbituminoso B			22.09< -<24.41
		230		Subbituminoso A			24.41< -<26.74
PALAEZOICO	Pérmico	230-	BITUMINOSOS	Muy volátiles A, B y C			24.41< -<32.55 Y (A)>32.55
		280		Medio volátiles	69< -<78	22< -<31	
		280		Poco volátiles	78< -<86	14< -<22	
	Carbonífero	280-345	ANTRACITA	Semi antracita	86< -<92	8< -<14	
				Antracita	92< -<98	2< -<8	
				Meta-antracita	>98	<2	
	Devónico Silúrico Ordovícico Cámbrico	345-570	Elaboración propia				
Precámbrico		>570					

*b.s.: base seca

**b.h.: base húmeda

*** La turba no es un rango ASTM

**** American Society for Testing Material ASTM

5.2.- Composición y clasificación. Volátiles y cenizas

Cenizas: Compuestas por sustancias inorgánicas no combustibles, como sales minerales SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO y MgO . Parte queda como residuo en forma de polvo depositado en el hogar y parte puede ser expulsada al aire como parte del humo (cenizas volantes). El carbón tiene un contenido en cenizas muy variable según su tipo y rango.

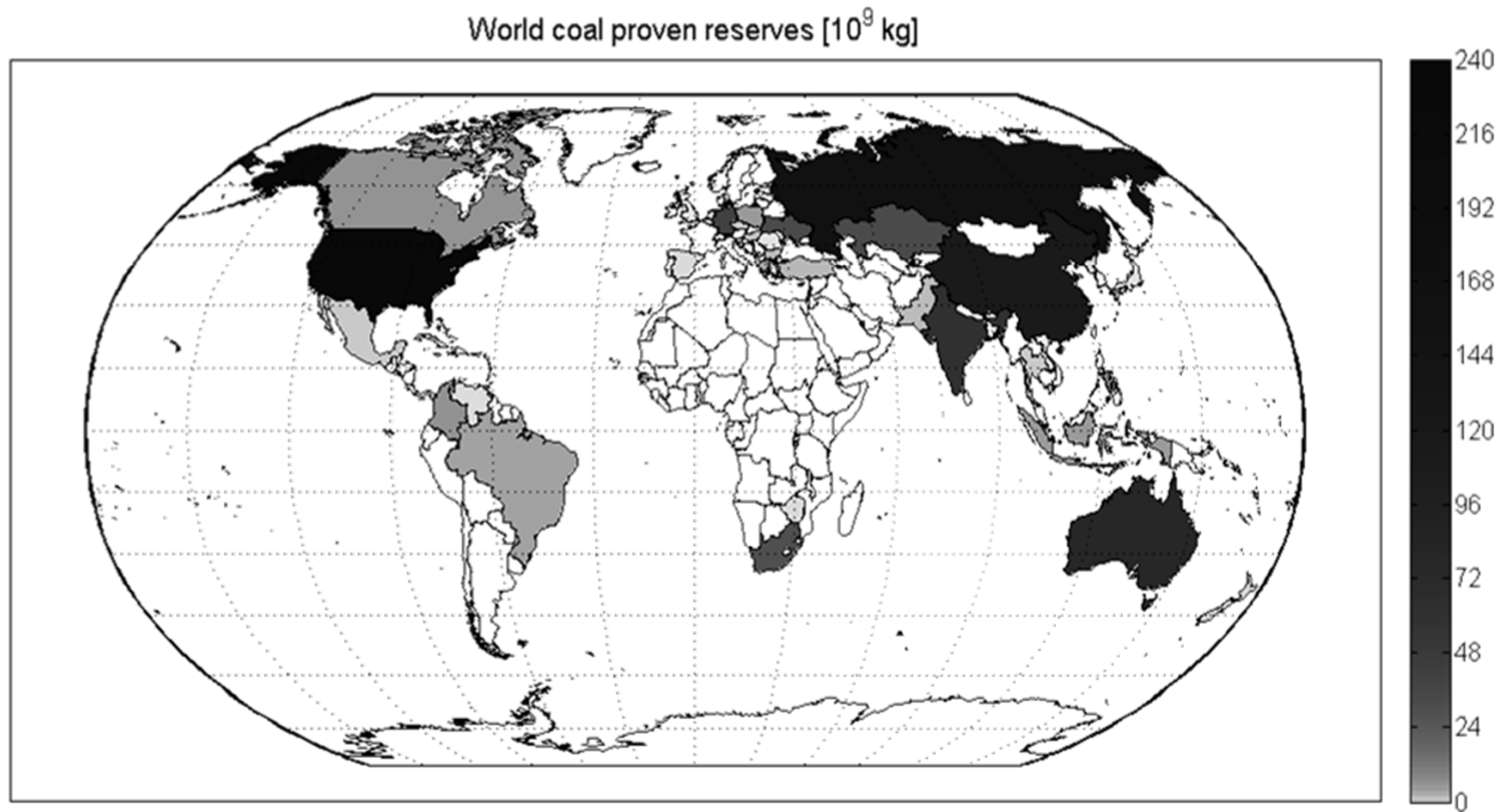
Es muy relevante el punto de fusión de las cenizas (se aglomeran más fácilmente si tienen un punto de fusión bajo). Se suele añadir caliza para subir el punto de fusión. Típicamente, la biomasa tiene un punto de fusión de cenizas bajo.

En una caldera en la que se queme carbón pulverizado, las cenizas pueden fundir y adherirse a los tubos de agua creando puentes de escoria que impiden el paso normal de los gases.

Volátiles: Son hidrocarburos atrapados en el carbón que pasan en fase gaseosa mientras se quema o se calienta el carbón y pueden formar una llama por encima del carbón sólido.

Coque: Resultante de la destilación anaeróbica del carbón bituminoso. C al 90-95%.

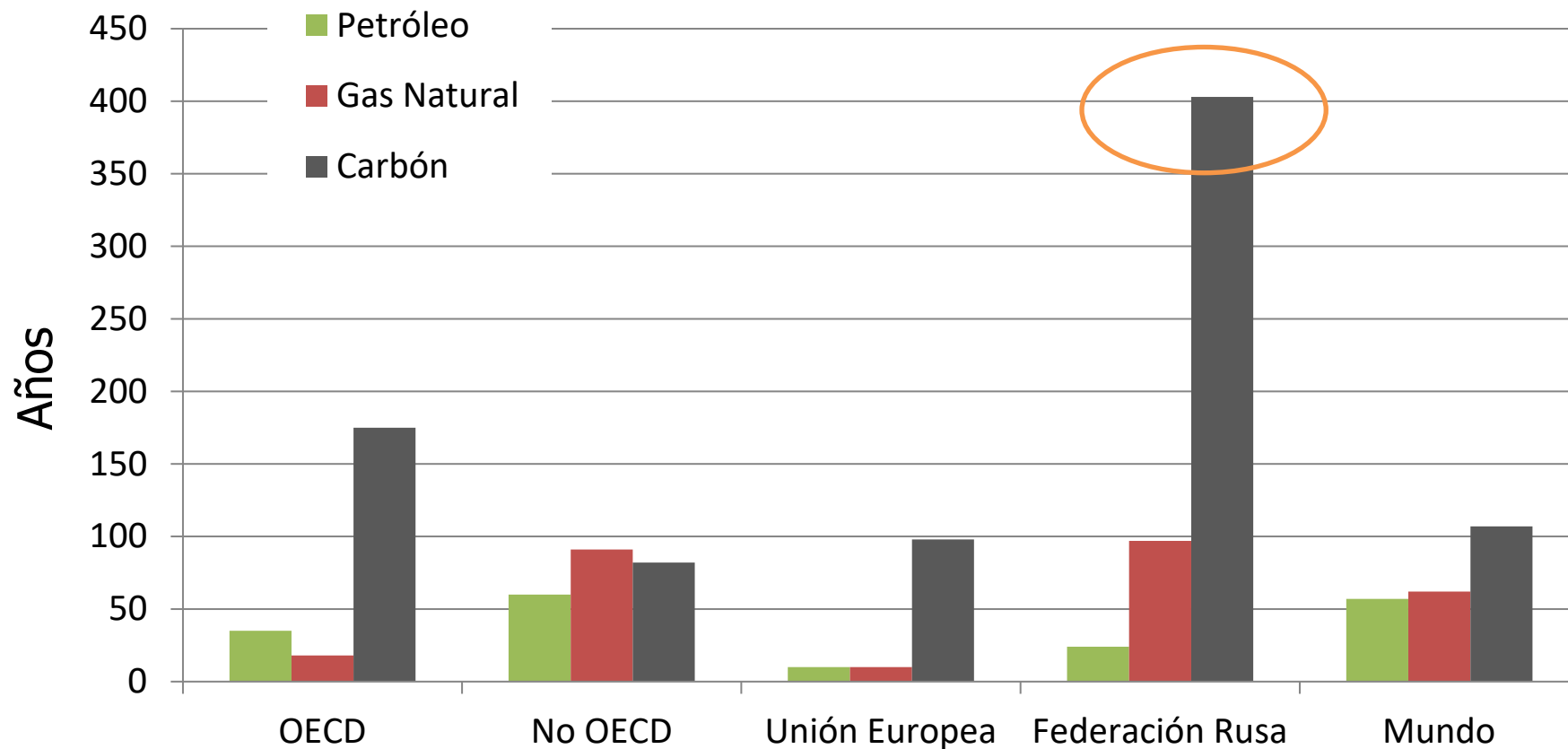
5.3.- Reservas y consumo (ex cursus) ver Caps. 1 y 2.



Elaboración propia con datos de [CIA Factbook](https://www.cia.gov/library/publications/resources/the-world-factbook/index.html), 2012 *The World Factbook 2012*. Washington, DC: Central Intelligence Agency, 2012. Dominio público.

<https://www.cia.gov/library/publications/resources/the-world-factbook/index.html>

5.3.- Reservas y consumo. Ratio Reservas / Producción (*ex cursus*) ver Cap. 2



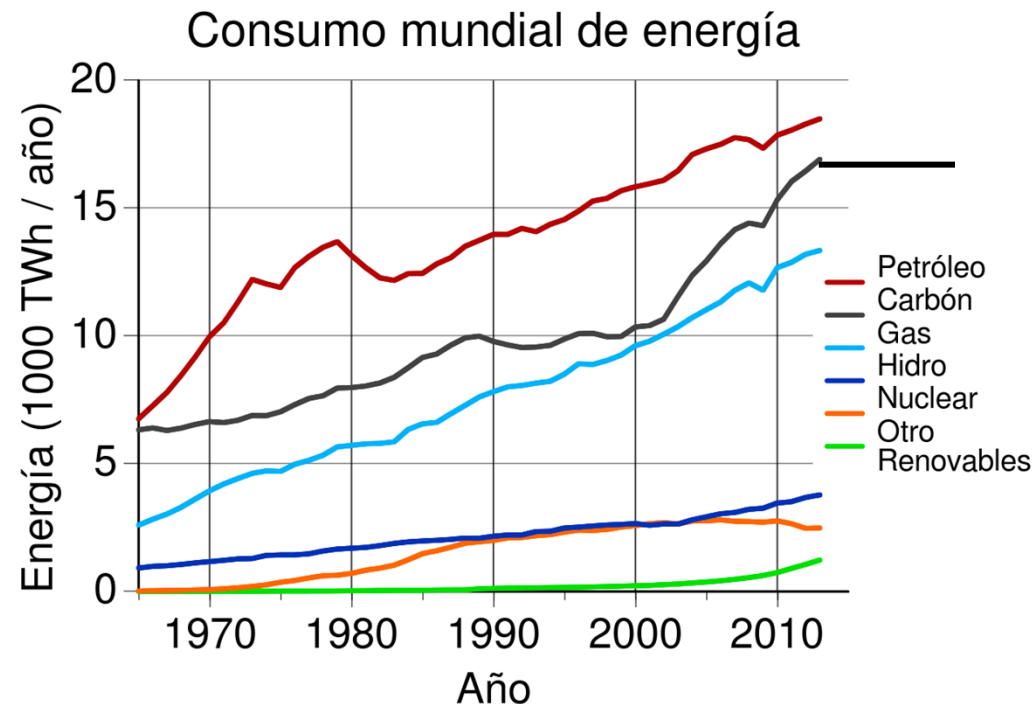
Elaboración propia con datos de: BP Statistical Review of World Energy June 2012 bp.com/statisticalreview [Uso permitido citando fuente original]

A diferencia del petróleo y el gas natural, se encuentran pocos yacimientos nuevos de carbón.

En el mundo, y en especial para los países de la OCDE, el carbón es una fuente de energía prometedora en cuanto a reservas.

5.3.- Reservas y consumo. Consumo mundial (detalles gráfica *ex cursus*)

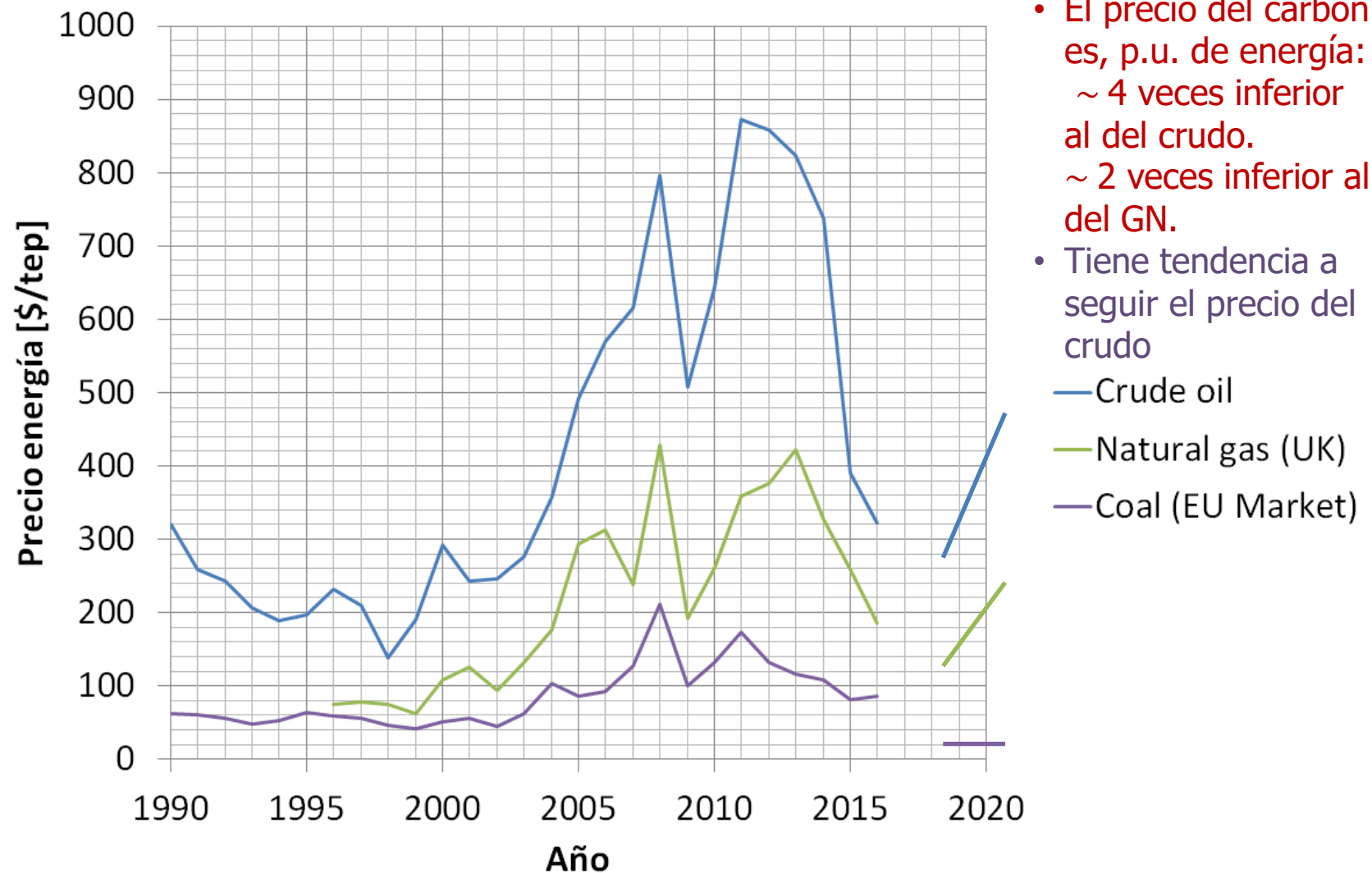
- El carbón representa del orden del **30% de las energías primarias mundiales** y genera el 42% de la electricidad en el mundo, especialmente en Asia y EEUU.



Fuente: [Wikipedia](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=33482873), accedido el 13/03/2020. De Delphi234 - File:World energy consumption.svg, CC0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=33482873>

- El consumo absoluto de carbón mundial ha conocido una fuerte subida en la década 2000-2010.
- Reciente estancamiento, 2014-2019. Pendientes de China, que consume $\approx 50\%$ mundial.

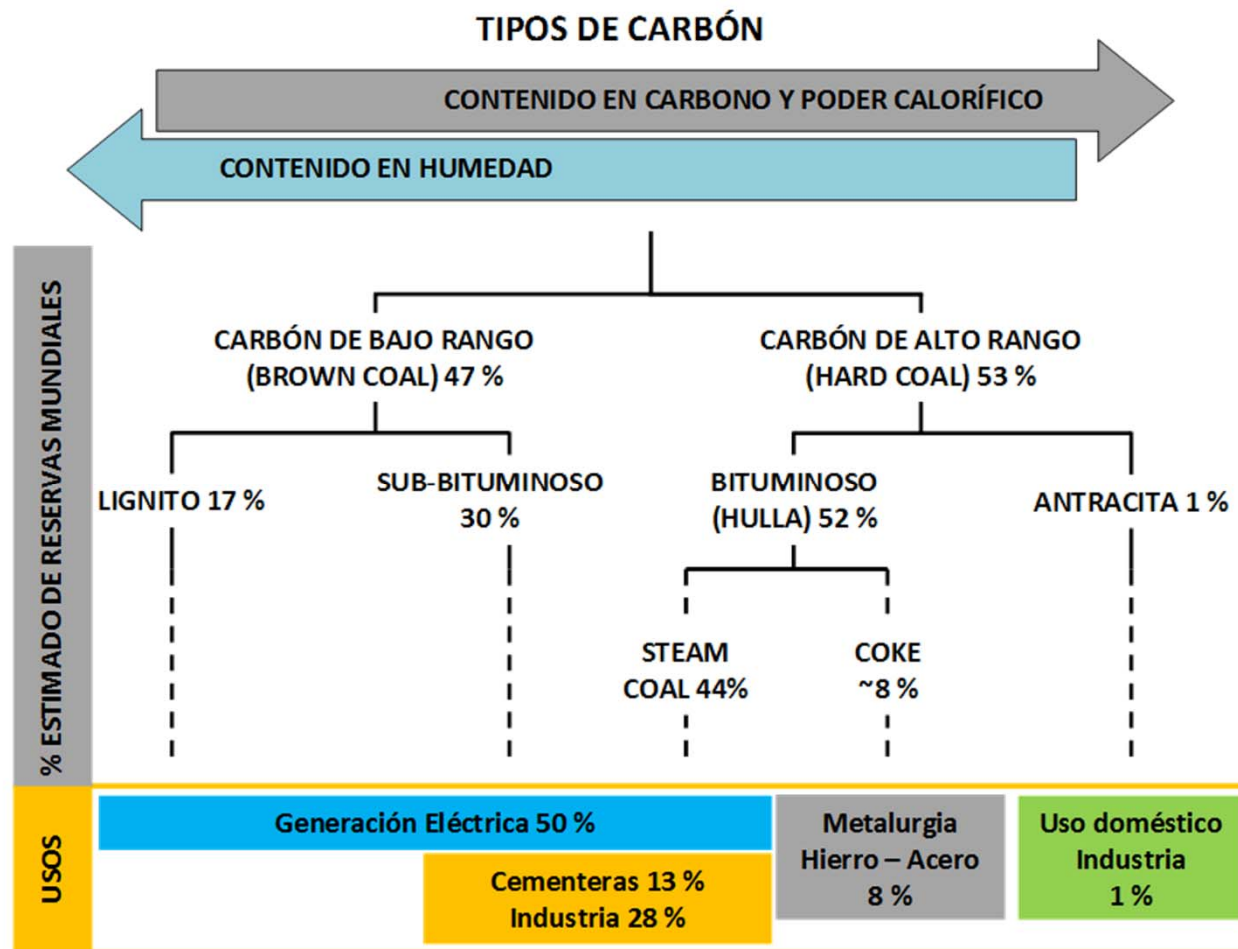
5.3.- Precios del carbón (*ex cursus, la gráfica*)



- El precio del carbón es, p.u. de energía:
~ 4 veces inferior al del crudo.
~ 2 veces inferior al del GN.
- Tiene tendencia a seguir el precio del crudo

Elaboración propia a partir de datos de: [BP Global](#) [Uso permitido citando fuente original]

5.4.- Usos y aplicaciones del carbón (*ex cursus*)



Elaboración propia

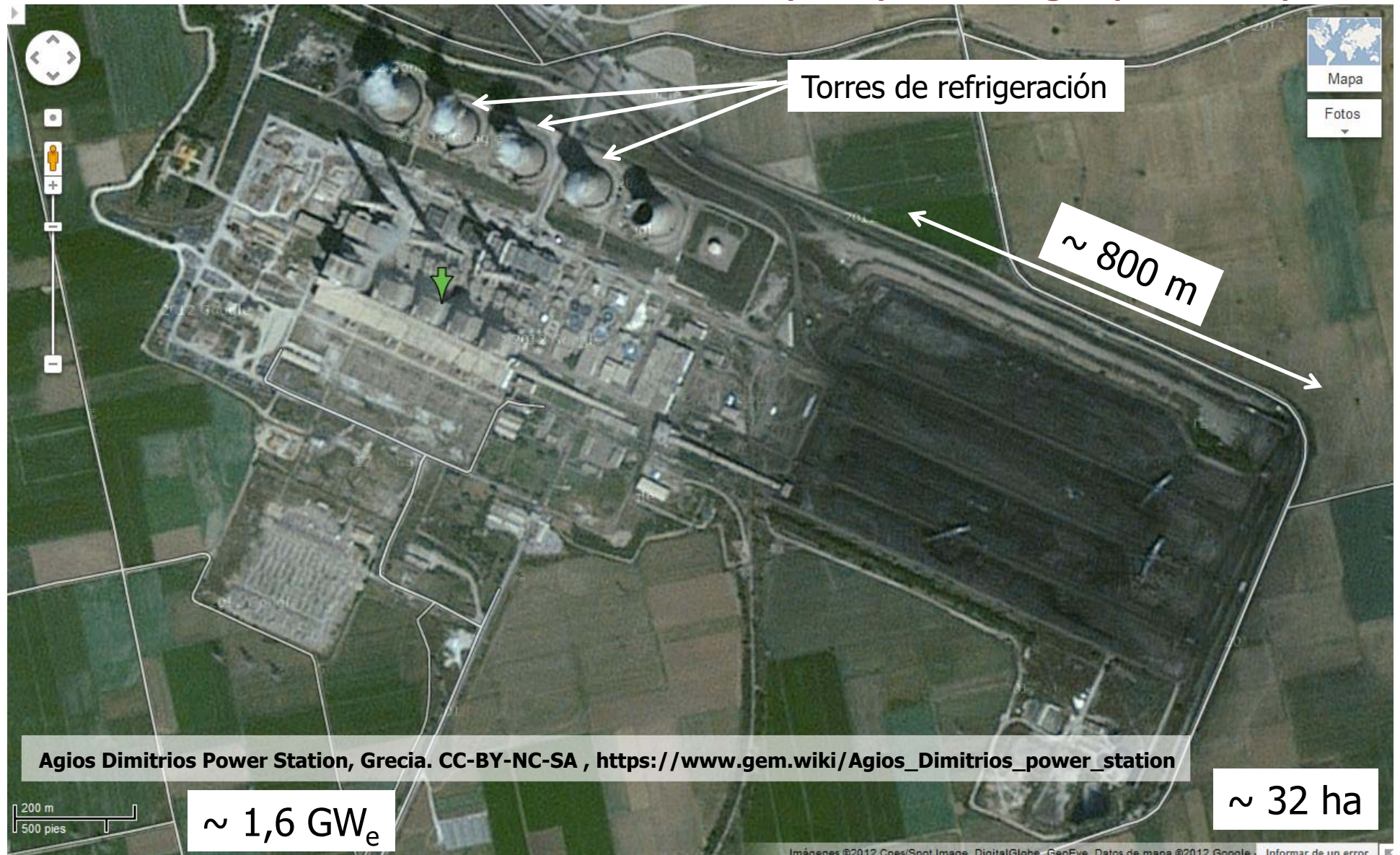
El mejor carbón se reserva para la industria, siderurgia y el declinante uso doméstico (calefacción). El de peor rango se uso para generar electricidad.

5.5.- Centrales de carbón convencionales

Son las más contaminantes que usando otros combustible fósiles, por (recordatorio del **Cap. 1**):

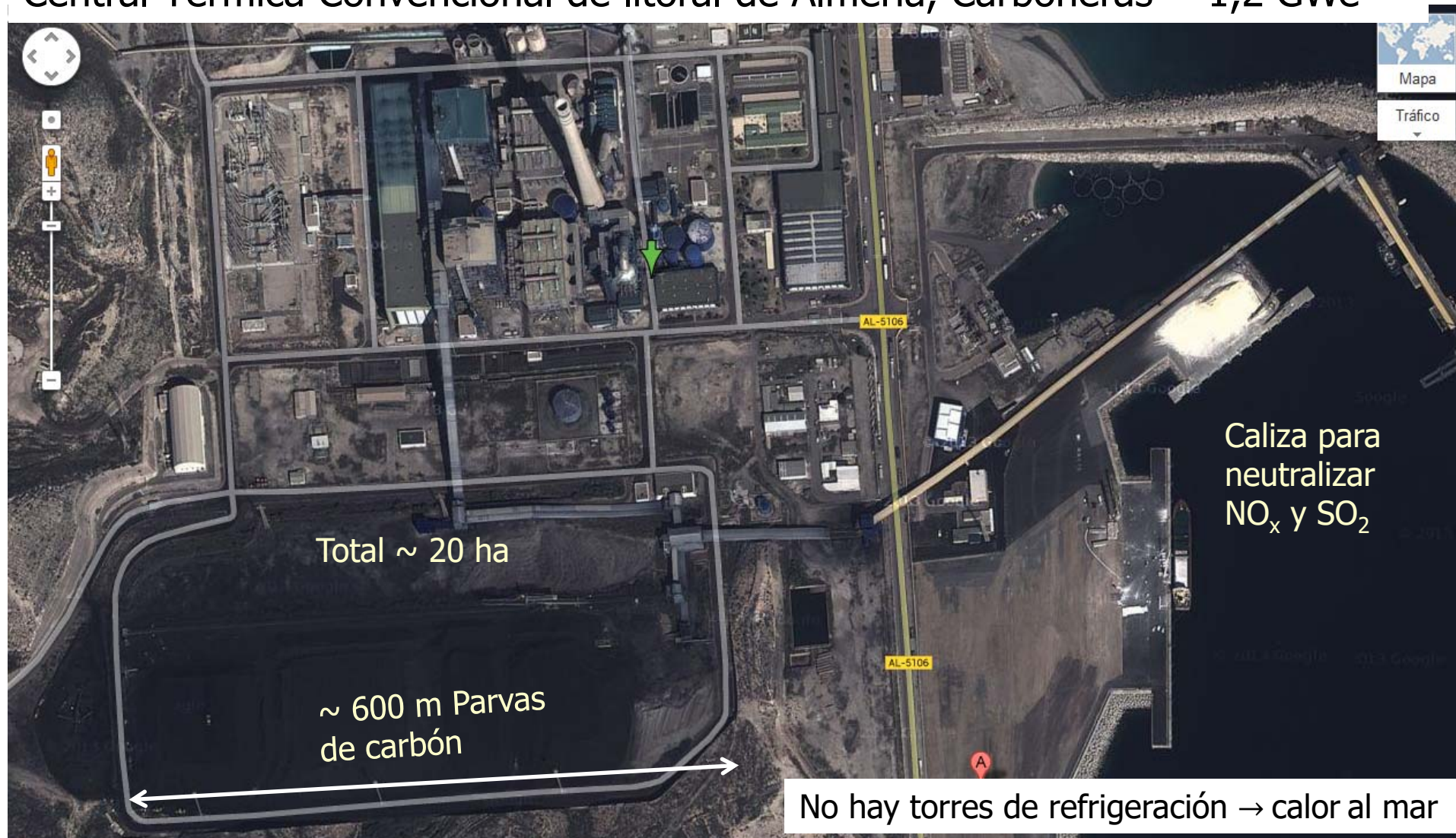
1. La mayores emisiones de CO_2 .
2. PM (Particulate Matter) procedente de cenizas volantes.
3. Azufre procedente del carbón $\rightarrow \text{SO}_4\text{H}_2$ en el aire
4. NO_x de la combustión en el N_2 del aire.
5. Radioactividad del carbón mineral
6. Mercurio contenido en el carbón
7. Impacto ambiental en el territorio por minas a cielo abierto + almacenamientos cercanos a centrales y presencia de metales pesados en el carbón

5.5.- Centrales de carbón convencionales (cont.). Tecnología (*ex cursus*)



5.5.- Centrales de carbón convencionales (cont.). Tecnología (*ex cursus*)

Central Térmica Convencional de litoral de Almería, Carboneras ~ 1,2 GWe

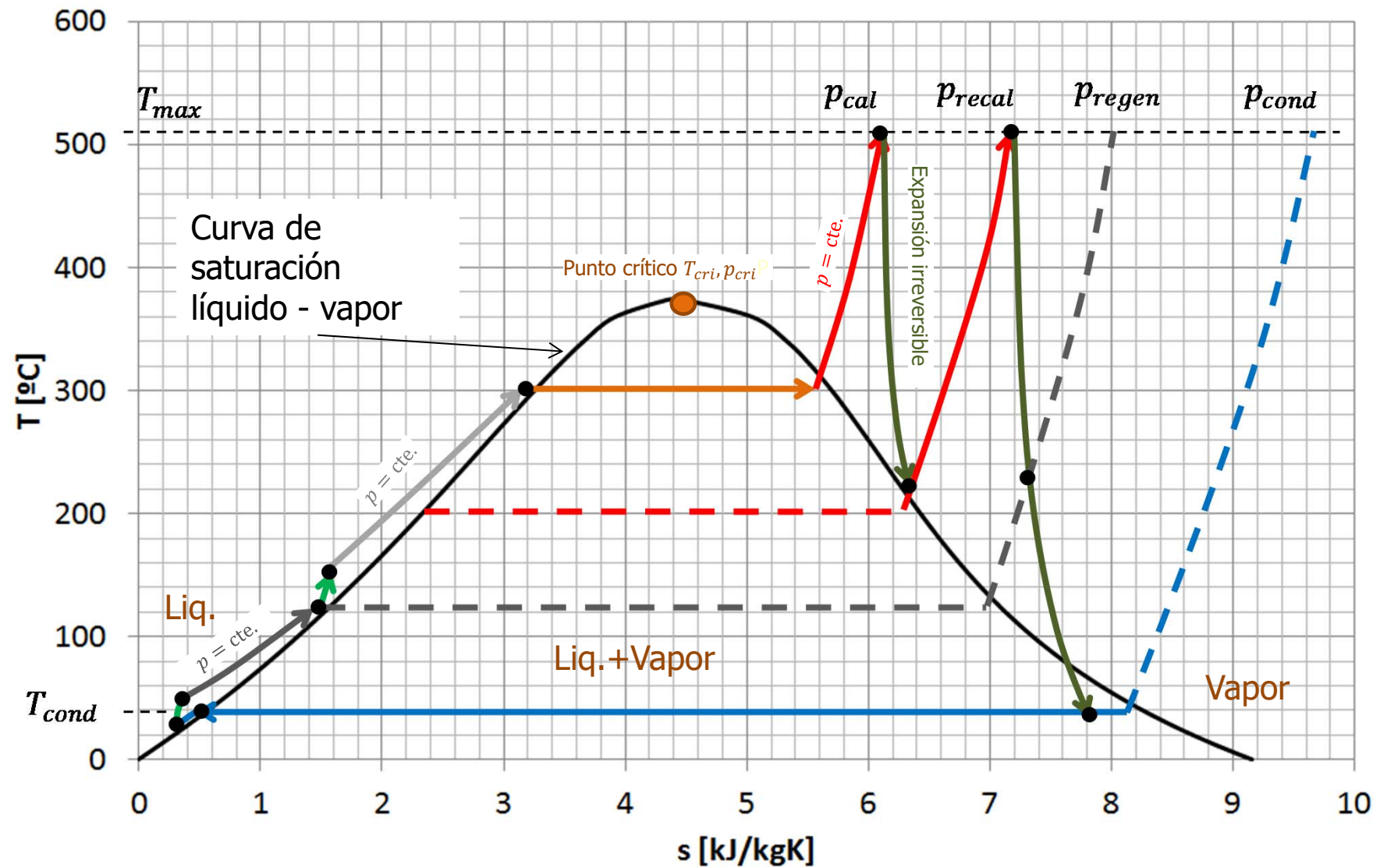


5.5.- Centrales de carbón convencionales (cont.). Ciclo termodinámico

- Tecnología de base, ciclo Rankine:

1. El carbón (pulverizado) arde en un hogar de gran tamaño, rodeado de tubos por cuyo interior circula agua de la caldera para recibir el calor.
2. Los humos de la combustión son enfriados aún más en un recuperador de calor que precaliente el aire de la combustión.
3. Corriente abajo, los humos son tratados para limpiarlos antes de ser vertidos a la atmósfera.
4. Se produce vapor de agua a $T_{max} = 450\text{ °C}-600\text{ °C}$ y presiones de 80 a 200 bar, según la tecnología usada. Fases:
 - I. Se **forma vapor** (**flujo bifásico**) en haces de tubos vaporizadores cerca de la llama a la presión de saturación $p_{cal} = p_{sat} (\approx 300\text{ °C})$, línea horizontal superior.
 - II. Se **sobrecalienta vapor** a $p = \text{cte.}$ en otros tubos sin contacto con el líquido para aumentar h y evitar condensaciones. Se **expande en una turbina de alta presión**.
 - III. Se **recalienta vapor** a p_{recal} tras una primera expansión en turbina de alta presión, para aumentar h y evitar condensaciones. Se **expande en turbina de media presión**. Se puede repetir otra vez y **se expande en turbina de baja presión**.
 - IV. Se **condensa vapor** a muy baja presión ($p_{cond} = p_{sat}(T_{cond}) \sim 80\text{ mbar}$ y $T_{cond} = T_{amb} + 5\text{ a }10\text{ °C} \approx 45\text{ °C}$) evacuando calor residual al ambiente, por medio de una torre de refrigeración húmeda o evacuándolo a un río, mar o lago cercano.
5. El agua condensada se retira del condensador, se desgasifica y se **precalienta** con vapor sangrado de las turbinas (regeneración), con calor de los humos (economizador) y es **bombeado a la caldera**.

5.5.- Centrales de carbón convencionales (cont.). Ciclo sub-crítico



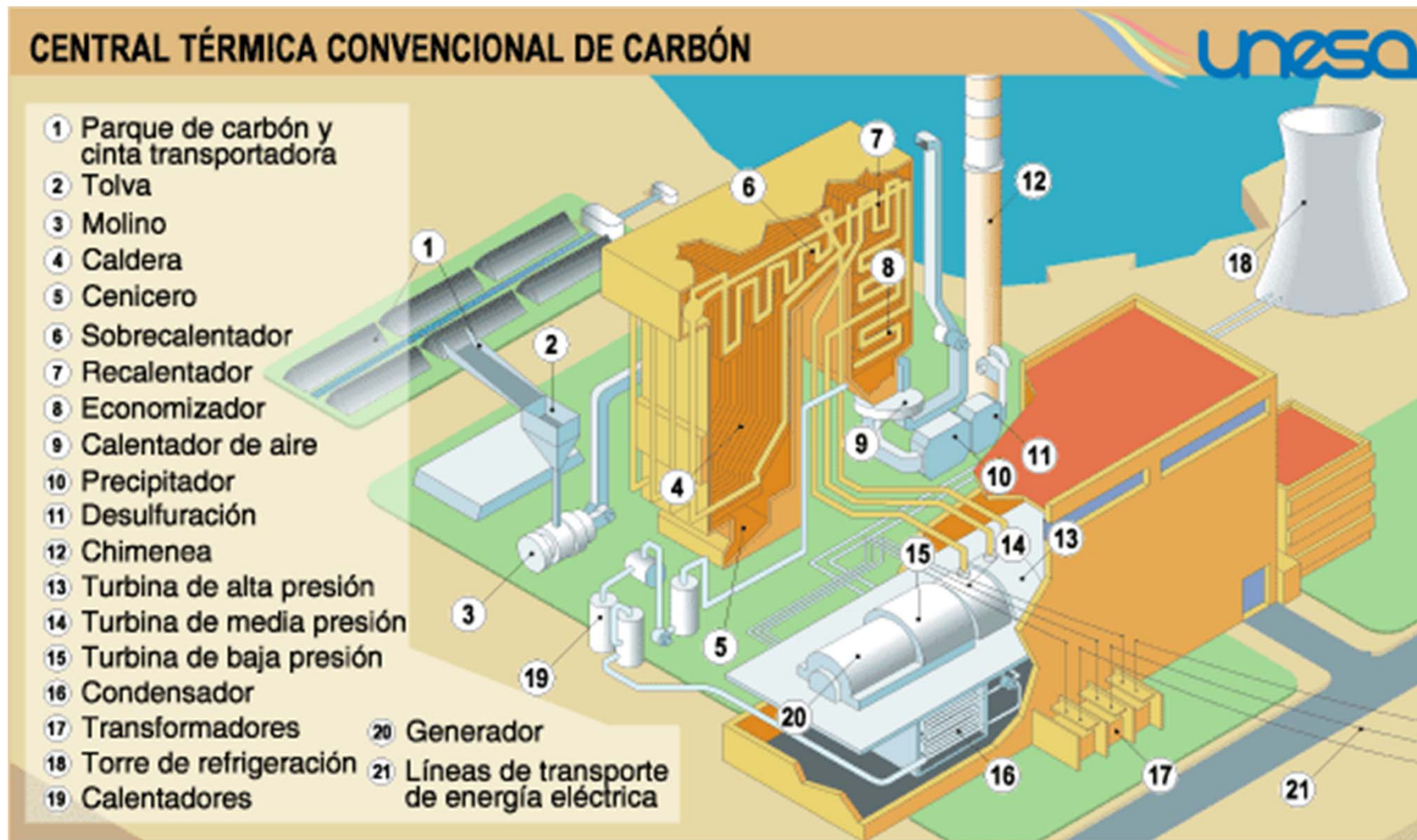
5.4.- Centrales de carbón convencionales (cont.). Técnica de combustión

Las centrales de carbón son diseñadas para carbones específicos, no valiendo para otros ni para biomasa, que no se puede pulverizar.

- Tecnologías:

1. Combustión del carbón en trozos sobre **parrilla**, anticuado por su baja densidad energética. Se usa para biomasa y para potencias < 10 MW.
2. Combustión del carbón **pulverizado** in situ ($\sim 100 \mu\text{m}$).
Permite controlar la combustión para bajar NO_x . Mayoritaria actualmente. Puede usar carbones de bajo rango. Apta para grandes tamaños (GW térmicos). **Este tipo de central tiene una vida útil de 50-60 años.**
3. Combustión en lecho fluidizado. Permite quemar carbones de bajo rango y sin pulverizar. Permite añadir cal para neutralizar S y NO_x .
Complejas y aún minoritarias.
4. Co-combustión: se añade hasta un 30% de biomasa sin tener que variar el diseño. En estudio

5.4.- Centrales de carbón convencionales (cont.) pulverizado (*ex cursus*)



[Fuente](#), Cienciasfera. CC BY-SA 3.0. Accedido 01/12/2019

5.5.- Centrales de carbón (cont.). Mitigación de la contaminación

- Mitigación de la contaminación:

1. Mejorar el rendimiento de los ciclos (p. e. supercrítico o Gasificación Integrada en Ciclo Combinado - GICC)

2. CO_2 : captura y confinamiento

3. PM: Filtros en chimenea

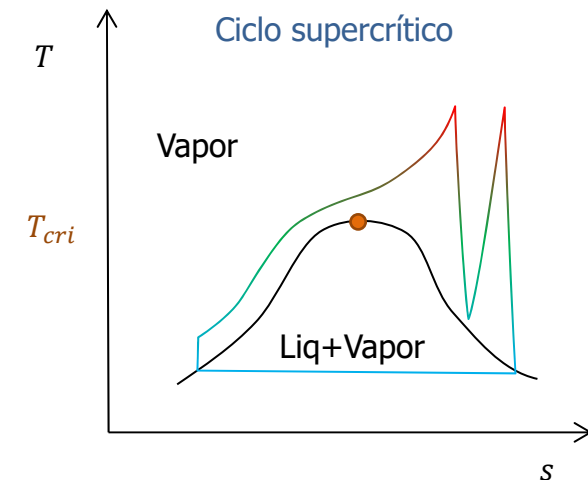
4. Azufre
5. NO_x

Des-acidificación de humos con caliza en seco o húmeda

6. Radioactividad: filtros de PM

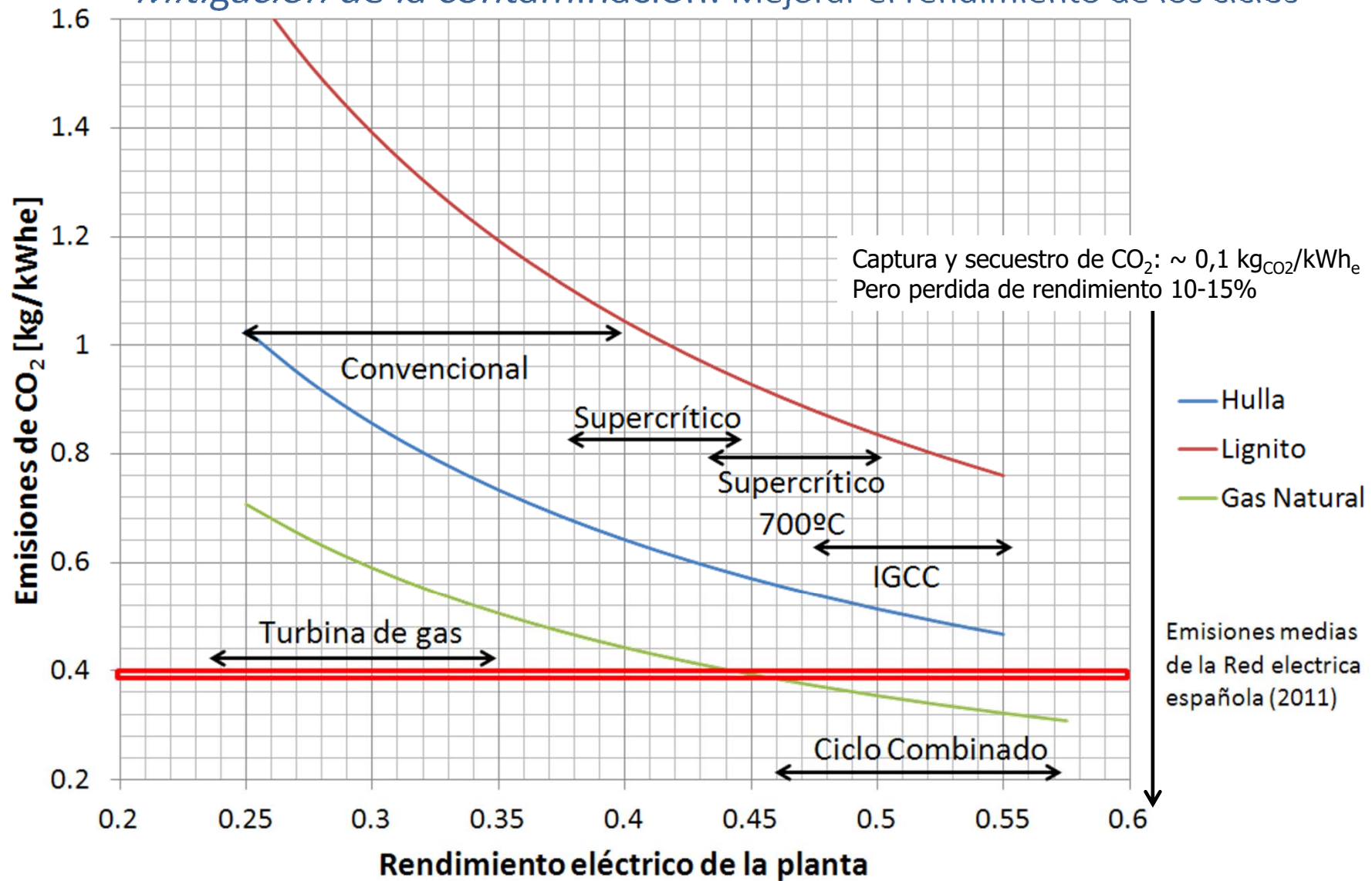
7. Mercurio: en estudio

8. Impacto ambiental minas a cielo abierto: restitución del terreno y vegetación



5.5.- Centrales de carbón (cont.). Mitigación de la contaminación (*ex cursus*)

Mitigación de la contaminación: Mejorar el rendimiento de los ciclos



5.5.- Centrales de carbón (cont.). Mitigación de la contaminación

Centrales avanzadas:

- **Ciclo Rankine supercrítico:**
 1. Se opera a una presión tal que el agua pasa a vapor suavemente, sin ebullición. Se puede llegar a un 50% de rendimiento.
 2. Más de 250 bares en caldera y hasta 650°C (700°C para ultra supercrítico) de vapor vivo. En estado de desarrollo.
- **Gasificación integrada (GI):**
 1. Se gasifica el carbón con O_2 obtenido en una planta de destilación fraccionada de aire.
 2. Se depura el gasificado, se trata con agua a alta presión y temperatura en presencia de catalizadores para eliminando el CO, producir H_2 , y eventualmente se captura y confina el CO_2 licuado.
 3. Se quema en una TG (Brayton) con posibilidad de ciclo combinado (CC) resultando GICC.
 - Es una tecnología incipiente y que se desarrolla continuamente.
 - Ofrece emisiones reducidas y casi nulas a costa de un precio más elevado y eficiencias moderadas.
 - Tecnología compleja y cara.
- **Oxicombustión**
 1. Se quema el carbón pulverizado con O_2 puro en proporción $\approx$ estequiométrica, formando gases con contenido muy alto de CO_2 , lo que permite su fácil separación y confinamiento.
 2. Se evitan altas temperaturas, recirculando el CO_2 que sustituye en N_2 de la atmósfera.
 3. Disponible solo en prototipos o plantas piloto de primera generación.
 4. Pudiera servir para aplicarse a centrales similares a las actuales.
- **Secuestro de CO_2 de fin de chimenea**
 1. Se usan aminas para absorberlo. Costoso, pero posible añadirlo a las centrales actuales (retrofitting).

5.5.- Centrales de carbón (cont.). Mitigación de la contaminación

Gasificación integrada (GI):

- Gasificación: combustión incompleta con déficit de aire o de oxígeno para dar un gas denominado **gas pobre** (con aire) o **gas de carbón (gas de síntesis)** (con oxígeno), compuesto mayoritariamente por CO y H₂ (y N₂ si se gasifica con aire).
- Si se inyecta agua se puede obtener gas de síntesis, más rico en H₂ (y más *PCI*) pues se usa la reacción del **gas de agua**:



- Se dejan impurezas atrás. Este gas purificado puede quemarse en una turbina de gas (que no admite cenizas) y el escape de ésta sirve para producir vapor en una caldera de recuperación de gases de escape (HRSG) para turbinarlo (GICC – Gasificación Integrada en Ciclo Combinado).

5.6.- Cuestiones de autoevaluación

El consumo de carbón en el mundo es mucho menor que el de gas natural	NO
Al ritmo de consumo actual, queda reservas de carbón para menos de 40 años	NO
La relación de Reservas a Producción (R/P en años) para el carbón es la mayor de todos los combustible fósiles	SI
En promedio, el poder calorífico del carbón (PCI) es bastante menor que los combustible líquidos o gaseosos convencionales	SI
Todos los carbones tienen más o menos el mismo contenido en humedad	NO
Las reservas de carbón se concentran principalmente en la antigua Unión Soviética, Norte América y Australia	SI
Al tener depósitos de carbón, España es autoabastecida cara a este recurso	NO
La calidad del carbón español es relativamente baja y de difícil extracción	SI
El carbón se usa principalmente para aplicaciones de calefacción urbana	NO
En España, el carbón se emplea principalmente para la industria metalúrgica (producción de acero principalmente)	NO
Al contrario de otros combustibles fósiles, las reservas de carbón han ido disminuyendo en los últimos 20 años	SI
Por unidad de energía, en la actualidad el carbón es del orden de 4 veces mas barato que el crudo	SI
El precio del carbón tiende a seguir la evolución del precio del crudo	SI

5.6.- Cuestiones de autoevaluación (cont.)

Se puede considerar al carbón y su uso en centrales térmicas convencionales como el combustible más contaminante de los fósiles	SI
En su extracción, en general el contenido en azufre del carbón es muy bajo y no necesita de pre-procesamiento; esto es limpieza del mineral.	NO
El contenido del carbón en metales pesados (principalmente mercurio) es problemática para la contaminación atmosférica medio-ambiental	SI
En centrales térmicas convencionales de carbón, es necesario limpiar los gases de combustión antes de la emisión a la atmósfera	SI
En las calderas de carbón, el hogar de combustión de carbón es relativamente pequeño	NO
La caldera de una central de carbón convencional es más voluminosa que los cuerpos de turbinas de vapor	SI
La tecnología de combustión del carbón más extendida es la llamada “en parrilla”	NO
Convencionalmente, el carbón se suele moler en polvo antes de su introducción al hogar de centrales eléctricas, y por ello la tecnología correspondiente se llama de carbón pulverizado	SI
Existen diseños de combustión del carbón en lecho fluido, e incluso de co-combustión con biomasa	SI
En los hogares de co-combustión, el porcentaje de biomasa respecto al carbón es alto.	NO
El tiempo de construcción de una central de carbón es generalmente más pequeña que el de un ciclo combinado convencional (quemando gas natural)	NO
Para minimizar el impacto ambiental de la centrales de carbón, conviene subir el rendimiento de dichas centrales	SI
Con el mismo enfoque, existen a escala comercial centrales de captura y secuestro de CO ₂ en España	NO

5.6.- Cuestiones de autoevaluación (cont.)

Uno de los intereses principales de quemar carbón en centrales de gasificación integrada en ciclos combinados (GICC) es que su rendimiento es mayor que el de una central convencional	SI
Las emisiones de CO ₂ de una central de carbón convencional son del orden del doble por kWh eléctrico que las de una central de ciclo combinado quemando gas natural	SI
Almacenar carbón cerca de la central para su uso, no supone un impacto ambiental importante	NO
Es más fácil capturar el CO ₂ si se realiza la combustión con oxígeno puro que con aire	SI
La tecnología de oxidación no necesita de elementos adicionales en una central de GICC	NO
La producción de electricidad basada en el carbón es exclusivamente en régimen operativo en base	SI
En plantas GICC con captura de CO ₂ , el combustible de la cámara de combustión de la TG es mayoritariamente una mezcla de CO y H ₂ en fase gaseosa	SI
En calderas de centrales de carbón convencionales, el hogar está rodeado de tubos llevando agua a presión	SI
La oxidación es la única tecnología de secuestro de CO ₂	NO
En tecnologías de oxidación, es necesario recircular CO ₂ en la cámara de combustión	SI
La temperatura adiabática de llama en aire es más elevada que en oxígeno puro	NO
Conviene aumentar la temperatura de llama para minimizar la formación de NO _x en la combustión	NO
Asia es un consumidor muy importante de carbón	SI

5.7.- Ejercicios propuestos.

Ejercicio 5.1. Calcular las emisiones de CO₂ en kg/kWh: A) si se utiliza carbón sub-bituminoso clase A, en una central térmica de vapor de rendimiento $\eta_e = 42\%$ y b) si se utiliza gas natural en ciclo combinado $\eta_e = 56\%$:

A) Carbón $\left[\frac{\text{kg}}{\text{kWh}} \right]$:

B) Gas natural $\left[\frac{\text{kg}}{\text{kWh}} \right]$:

Comparar los valores obtenidos con los datos de la [Tabla 2.3. Fuente.](#)

Estimar el precio de la generación eléctrica en US\$ de ambos sistemas debido exclusivamente al coste del combustible (costes en transparencias anteriores)

A) Carbón $\left[\frac{\text{US\$}}{\text{kWh}} \right]$:

B) Gas natural $\left[\frac{\text{US\$}}{\text{kWh}} \right]$:

¿Son acordes con datos de los apuntes?:

Con un consumo medio de electricidad por habitante de $\dot{e} = 0,5 \text{ kW}_e$ y en una ciudad media tipo dormitorio, como Leganés, con 120.000 habitantes, se pide determinar la cantidad de carbón, bituminoso B, a quemar diariamente, si se emplease una central de carbón convencional con $\eta_e = 40\%$

$$\dot{m} \left[\frac{\text{Tm}}{\text{día}} \right] = .$$