

# Fuentes de Energía

## Capítulo 4: Petróleo. Combustibles líquidos y gaseosos

Autores:

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

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 4: Petróleo. Combustibles líquidos y gaseosos.

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

La singular importancia del petróleo y del gas natural proviene de su abundancia y de la enorme conveniencia de brindar combustibles líquidos y gaseosos portátiles, potentes, de gran calidad, fáciles de quemar y de transportar.

La acumulación del petróleo en zonas privilegiadas permite extraerlo fluyendo en los llamados pozos, aunque el petróleo embebido en rocas y arenas es más abundante. La gran variedad de hidrocarburos que lo forman permite obtener combustibles, desde gaseosos hasta casi sólidos, separándose y transformándose en el refino. Su consumo se concentra en el mundo desarrollado.

El gran interés en el petróleo hace que aún se siga explorando y avanzando en la tecnología de extracción. El precio determina la actividad. La evolución futura de su precio y producción es una incógnita y depende de su mayor aplicación, el transporte, primordialmente como gasolina, querosenos y en menor medida GPL.

El gas natural GN tiene un origen similar y acompaña al petróleo en su yacimiento, o se encuentra solo, incluso embebido en las rocas, gas de esquisto; que actualmente se extrae. Su uso es primordialmente estático, domiciliario e industrial, distribuyéndose canalizado. Mayor *PCS* y menor *FE* que los combustibles líquidos, junto con un precio final inferior. Éste está dominado por el coste del transporte a larga distancia desde el productor al consumidor.

De singular importancia es el uso del GN en centrales eléctricas de ciclo combinado, de rápida respuesta (muy convenientes para estabilizar la red eléctrica), alto rendimiento  $\approx 60\%$ , y baja contaminación (*FE* muy bajo). Garantizarán por ahora el suministro hasta que venga el uso masivo del almacenamiento de la cada vez más presente electricidad renovable, que siendo variable en el tiempo no se ajusta a la demanda.

Ambas fuentes de energía se encontrarán cada vez más limitadas por las emisiones de  $\text{CO}_2$ . Se comenta que España ha de importar ambas fuentes de energía.

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

# Índice

4.1.- Petróleo – Formación y composición

4.2 .- Petróleo – Reservas, producción y consumo – precios

4.3 .- Petróleo – Usos y aplicaciones

4.4.- Petróleo – Situación española

4.5.- Petróleo - Perspectivas

4.6.- Gas natural – Formación y composición

4.7.- Gas natural – Reservas, intercambios y precios

4.8.- Gas natural – Situación española

4.9.- Gas natural – Perspectivas, “shale gas”

4.10.- Cuestiones de autoevaluación.

4.11.- Ejercicio propuesto

**Objetivos:** Dar a entender el binomio petróleo-gas natural y su papel en la sociedad actual y sus perspectivas de futuro. Diferencias en coste y usos entre el petróleo y el gas natural.

## 4.1.- Petróleo – Formación (*ex cursus*)

Petróleo ~ del griego “Piedra aceitosa”

### Teoría orgánica (más aceptada)

- La mayoría de la reservas de crudo y gas natural se formaron hace **millones de años atrás**. En océanos, mares o lagos, había una gran abundancia de organismos microscópicos, bacterias y proto-algas, llamados plancton (conteniendo hidratos de carbono, proteínas, grasas ...). A la muerte del plancton, se sedimenta en el lecho marino. Si el fondo marino está quieto (ausencia de corrientes), y pobre en oxígeno, el plancton muerto acumulado se transforma en un lodo rico en materia orgánica.
- A continuación, sedimentos, como arena, piedras y lodo, puede que se depositen encima del barro rico en materia orgánica. A medida que la materia orgánica es enterrada bajo más capas de sedimentos cada vez más pesando, aumentan la presión y la temperatura, por acercarse a la profundidad caliente de la Tierra.
- A medida que pasa el tiempo, a escala geológica, el sedimento se transforma poco a poco en roca sedimentaria. Mientras tanto, la presión y la temperatura (~100-160 °C) descompone la materia orgánica en cadenas de hidrocarburos más cortas, perdiendo oxígeno y formando petróleo y gas natural. Bajo el efecto de la presión, el lodo del originario del fondo marino se transforma en lo que se llama la "roca madre".
- Después de la formación de la roca madre, los hidrocarburos migran hacia la superficie a través de los poros, separándose del agua, más densa que los hidrocarburos. Toma millones de años para que los hidrocarburos asciendan a través de unos pocos kilómetros de roca por efecto del gradiente de presión.
- Cuando el petróleo y el gas natural se encuentran con una capa superior de roca impermeable, termina su ascensión, acumulándose gradualmente debajo de esa capa impermeable, formando yacimientos de gas natural y de petróleo libres y separados en parte de la roca.
- **Por la necesidad de coincidir estos fenómenos, es infrecuente la formación de petróleo.**

## 4.1.- Petróleo – Formación (*ex cursus*)

Teorías alternativas o complementarias:

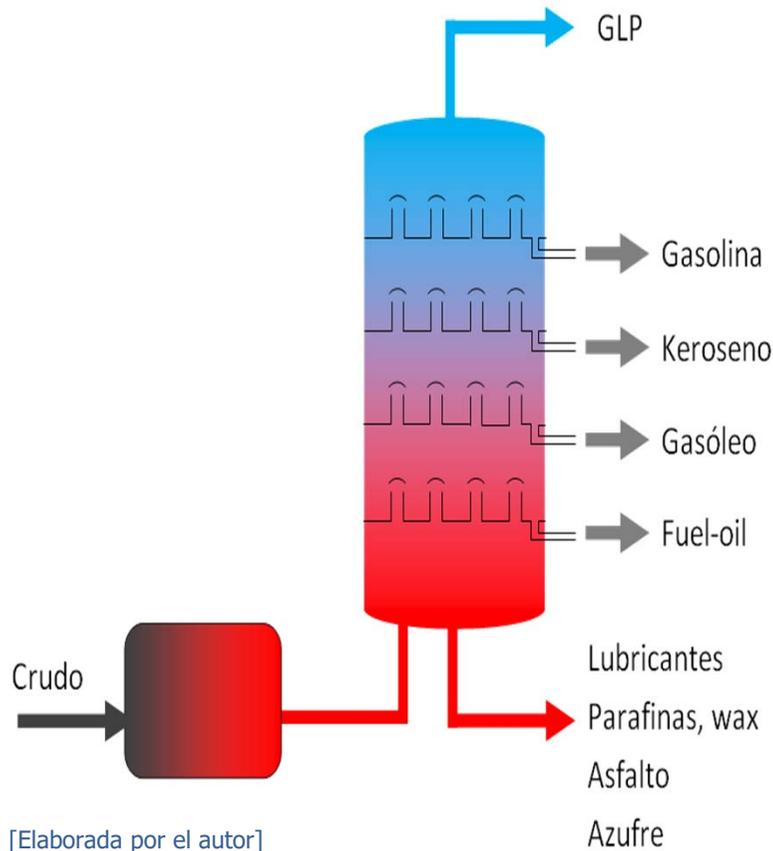
El petróleo primigenio:

En el manto terrestre, el carbono puede existir en forma de hidrocarburos, principalmente metano, y como carbono elemental, dióxido de carbono, y carbonatos. La hipótesis abiótica es que el conjunto completo de hidrocarburos que se encuentran en el petróleo pueden ser generados en el manto por procesos inorgánicos, y estos hidrocarburos pueden migrar fuera del manto en la corteza hasta escapar a la superficie o quedar atrapados por estratos impermeables, formando depósitos de petróleo. Esta teoría suscita muchas controversias.

Petróleo microbiano: "deep biotic petroleum hypothesis" Thomas Gold, (1999). *The deep, hot biosphere*. Copernicus Books. [ISBN 0-387-98546-8](https://doi.org/10.1007/978-0-387-98546-8).

La hipótesis de petróleo microbiano, similar a la anterior, sostiene que no todos los yacimientos de petróleo en las rocas de la Tierra pueden explicarse únicamente de acuerdo con la visión ortodoxa de la geología del petróleo. El petróleo biótico profundo se considera que se forma como subproducto del ciclo de vida de ciertos microbios profundos.

## 4.1.- Petróleo - Composición



### Composición del petróleo:

- Hidrocarburos (alcanos lineales y cíclicos) desde el metano; hasta especies complejas con 40 carbonos, que no pueden destilarse sin descomponerse. Algunos pueden contener oxígeno, p. e. ésteres.
- En peso: 84 - 87% de carbono  
11 - 16% de hidrógeno  
0 - 7% de oxígeno + nitrógeno  
0 - 4% de azufre
- Identificación de especies muy difícil a partir de 8 a 10 carbonos, por la existencia de muchos isómeros.

### Refino básico del petróleo:

- Destilación para separar fracciones por su temperatura de cambio de fase
- Craqueo térmico o catalítico para obtener especies de cadena más corta
- Condensación de gases
- Eliminación de impurezas (azufre)

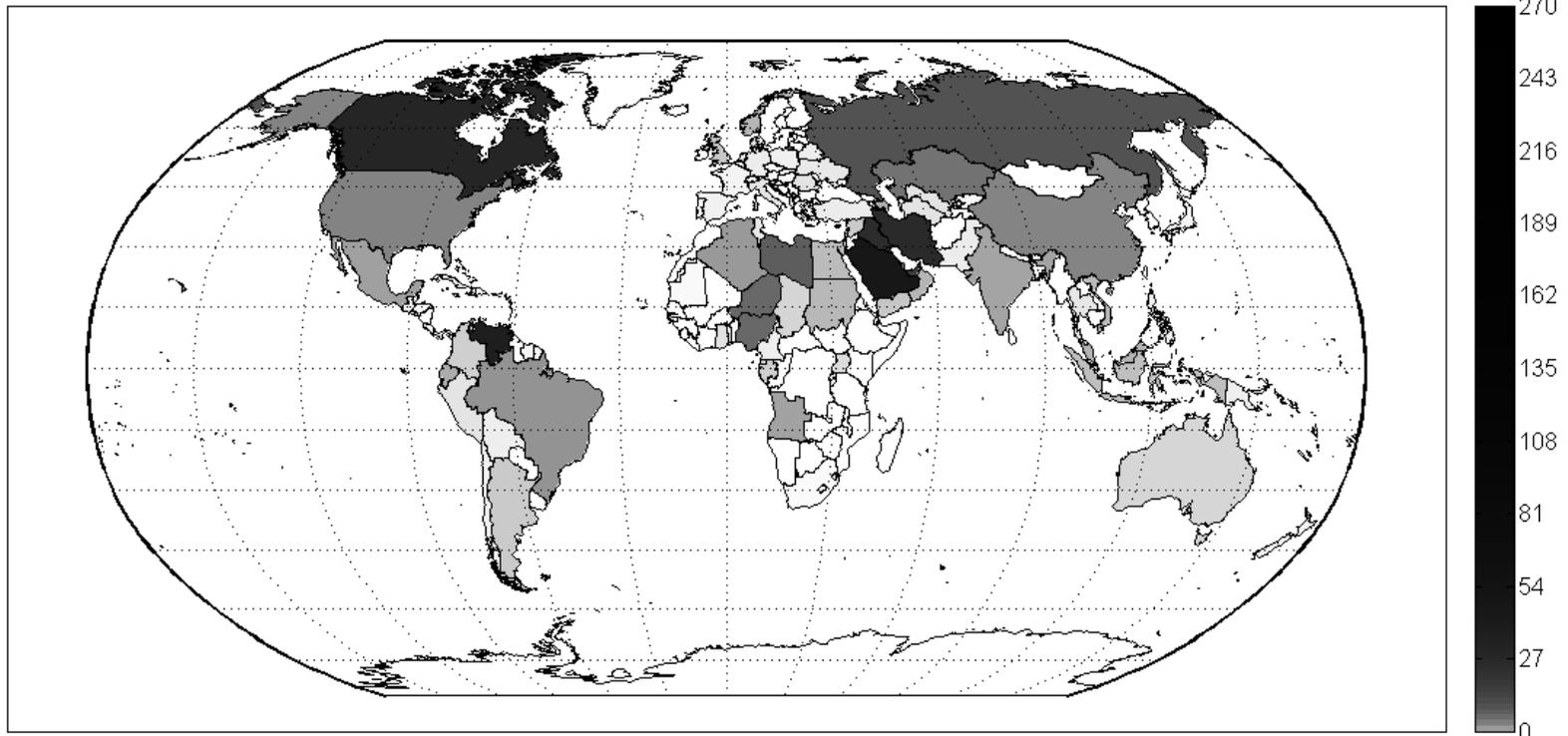
**Poder calorífico inferior (PCI):** tanto mayor cuanto mayor es el contenido en hidrógeno.

Mezclas	{	• Metano	55,7 MJ/kg
		• Propano (puro):	46,4 MJ/kg
		• Butano (puro):	45,8 MJ/kg
		• Gasolina:	44,0 MJ/kg
		• Queroseno	43,4 MJ/kg
		• Gasóleo (A y C):	42,3 MJ/kg
		• Fuel-oil (nº1-nº2):	40,6 – 39,8 MJ/kg

## 4.2.- Petróleo - Reservas

en

World crude oil proven reserves [ $10^9$  bbl]

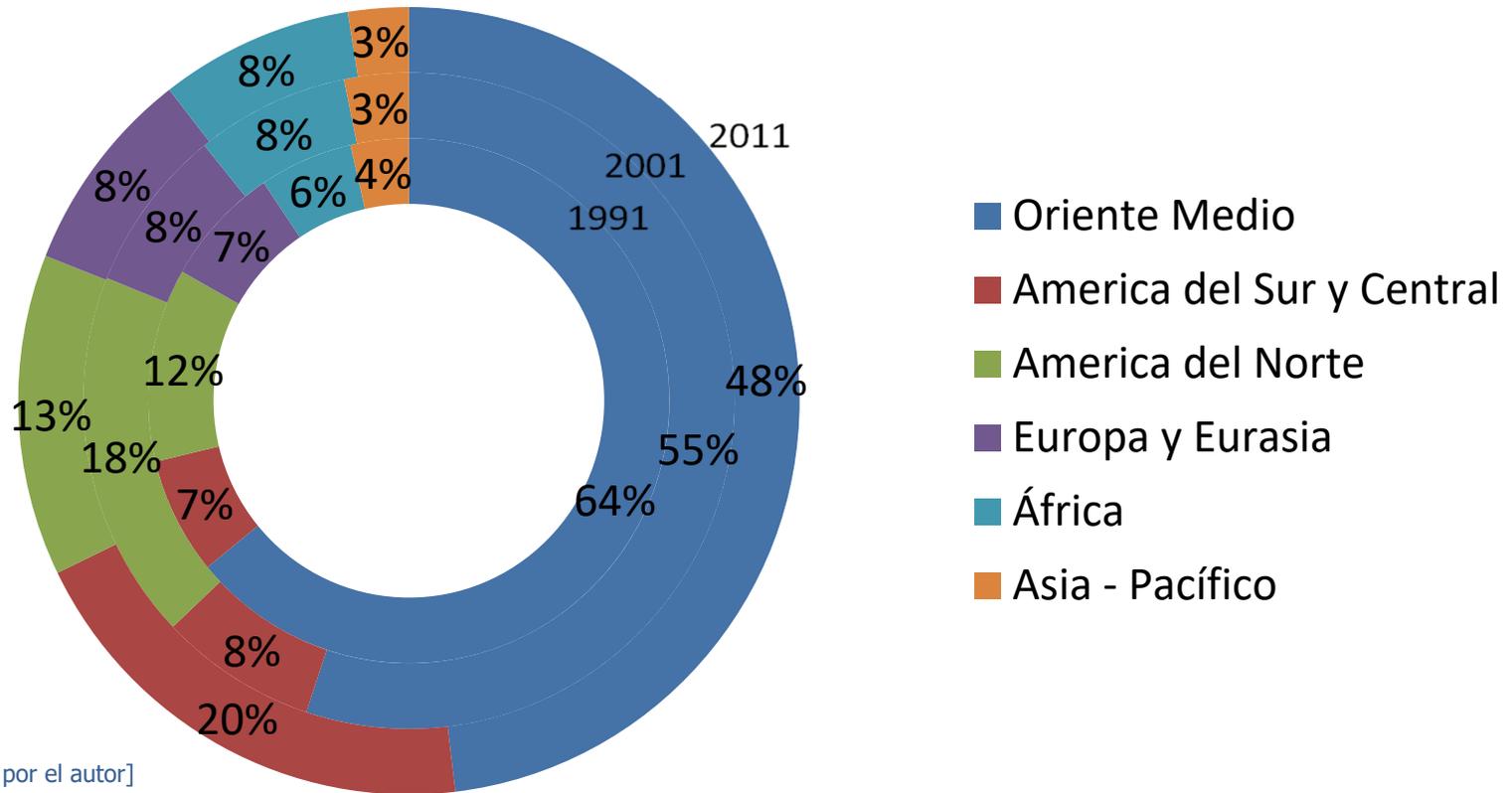


Elaborado a partir de CIA Factbook, 2012. Dominio público, <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/index.html>  
(miles de millones de barriles  $10^9$  bbl =  $10^{12}$  bl).

1 barril (bbl) = 159 litros = 42 U. S. Gallons = 35 imperial gallons ~ 136 kg ~ 5,7 GJ  
(PCI de referencia 41,85 MJ/kg)

- Mundial  $\approx 1,5 \cdot 10^{12}$  barriles de reservas, pero mala repartición geográfica.
- Se ha consumido ya aproximadamente igual cantidad que las reservas actuales.

## 4.2.- Petróleo - Reservas



1991:  $1,03 \cdot 10^{12}$  barriles

2001:  $1,27 \cdot 10^{12}$  barriles

2011:  $1,65 \cdot 10^{12}$  barriles

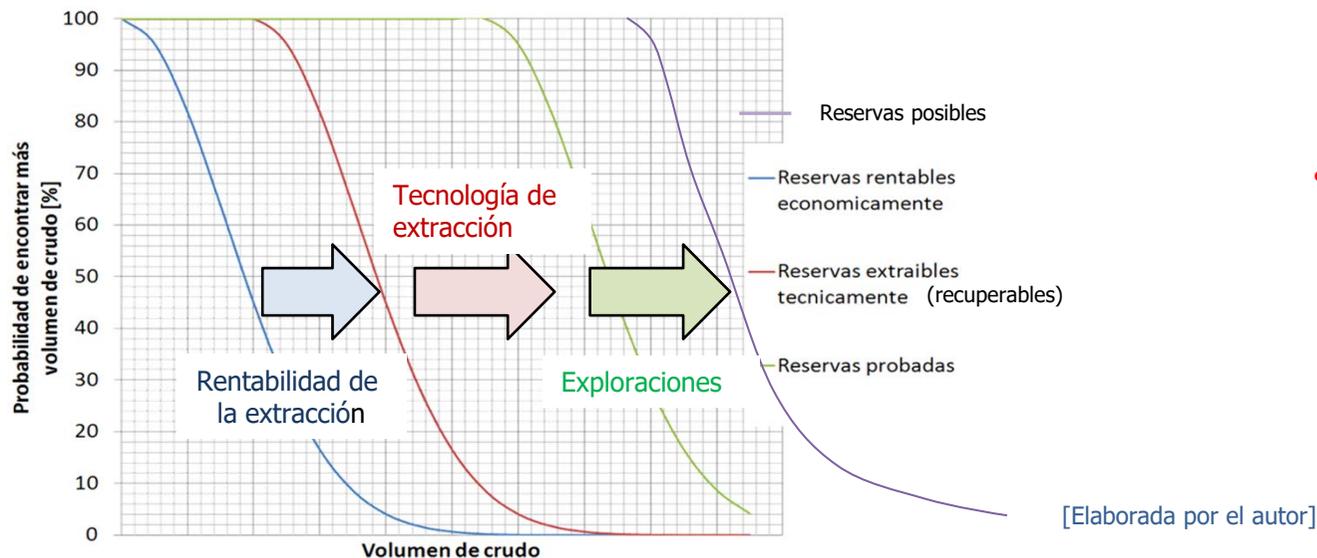
Elaborado a partir de: BP Statistical Review of World Energy June 2012 <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>

- Aumento de las reservas con el tiempo, a pesar del consumo por aumento de los hallazgos y aumento de las tecnologías.
- La mayoría están en Oriente Medio.

## 4.2.- Petróleo - Reservas

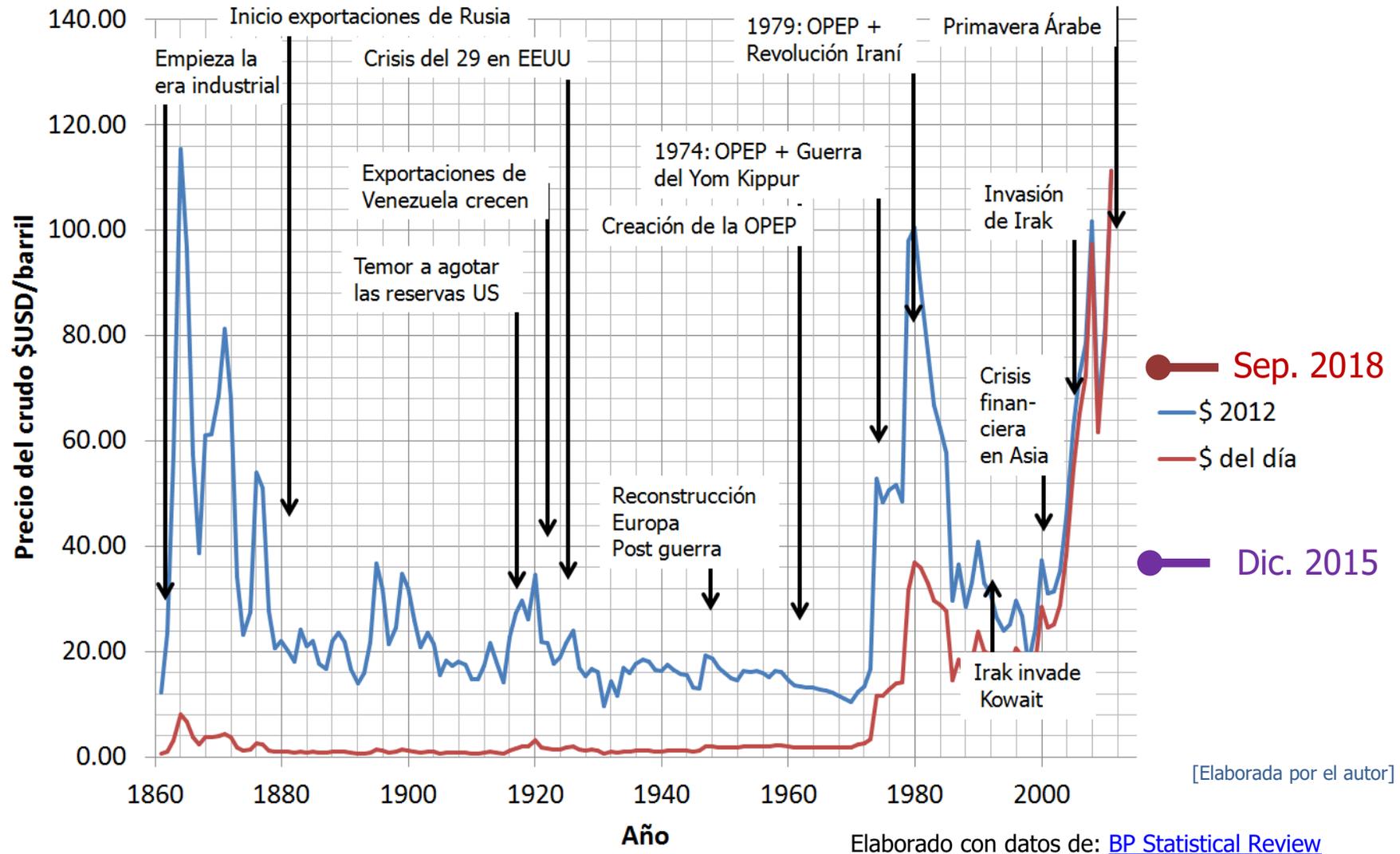
### Reservas – conceptos.

- **Posibles** se obtienen por estudios geológicos.
- **Probadas** son aquellas cuyo yacimiento ha sido descubierto. Aumentarán según se encuentren nuevos yacimientos. La prospección aumentará cuando se venzan barreras tecnológicas y/o suba el precio del crudo, haciendo más rentable un posible yacimiento.
- Todas las reservas probadas no son **recuperables**: existen limitaciones técnicas, así como limitaciones económicas.
- **Rentables**; aquella económicamente viables. Suben al subir el precio del petróleo.



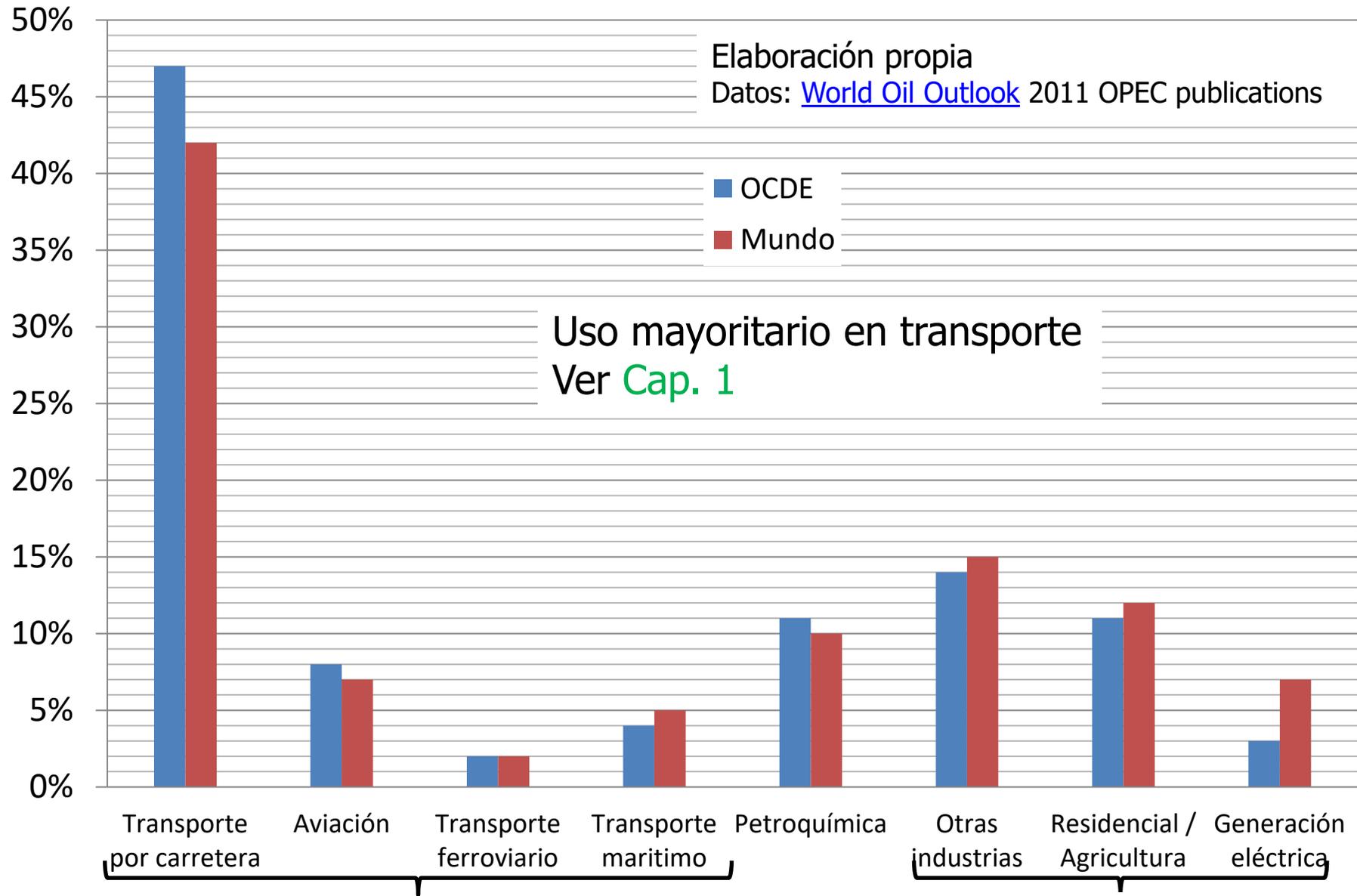
- **A menor probabilidad de hallazgo mayor es la reserva.**

## 4.2.- Petróleo - Precios



- La fuerte subida del precio del crudo en los últimos 10 años ha hecho que las reservas rentables aumentasen un 30% en 10 años. [Más información.](#)

### 4.3.- Petróleo – Usos y aplicaciones (*ex cursus*)

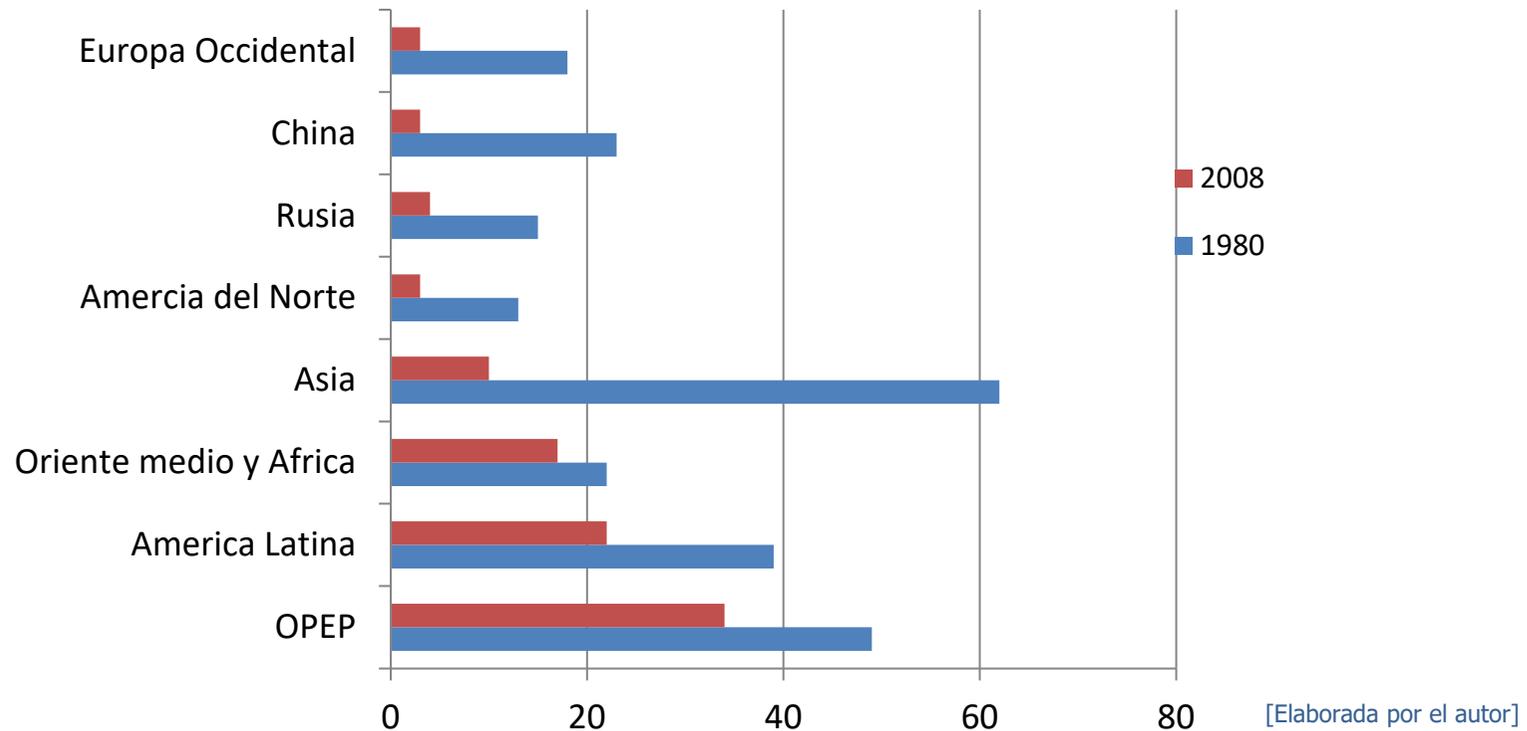


Transporte 55%:  
 Gasolina, gasóleo A y queroseno

Calefacción y electricidad 35%:  
 Fuel-oil y Gasóleo C

### 4.3.- Petróleo – Usos en generación eléctrica (*ex cursus*)

#### Reparto del consumo de petróleo en la generación eléctrica por zonas

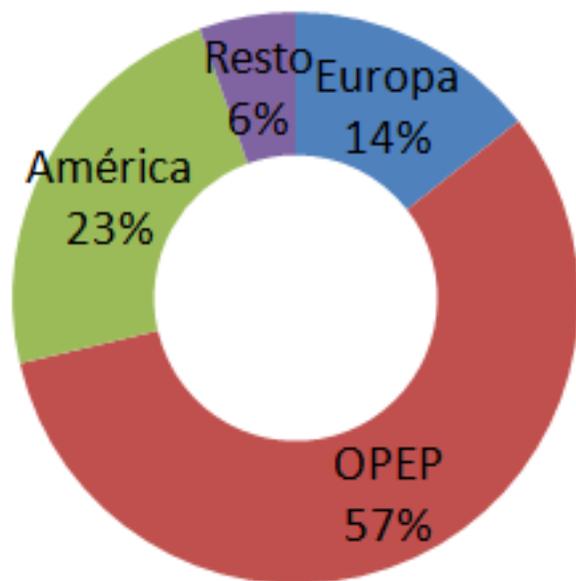


Elaborado con datos de: World Oil Outlook 2011, Fuente, [OPEC Statistics](#)

→ Reducción global de la dependencia energética exterior (salvo grandes productores) y cambio a combustibles más baratos, simultáneamente excluyéndose progresivamente al carbón.

## 4.4.- Petróleo – Situación española (*ex cursus*)

### Importaciones España 2012



Importaciones totales ~ 400 millones de barriles anuales ~ 55 Mtep

[Elaborada por el autor]

Rusia	12,40%
U. Europea	0,60%
Noruega	0,20%
Otros Europa	1,20%
Nigeria	15,50%
Arabia Saudí	14,00%
Irak	8,60%
Irán	7,40%
Libia	5,50%
Venezuela	3,00%
Resto OPEP	3,00%
México	13,10%
Otros América	10,10%
Resto	5,50%

España se abastece en petróleo mayoritariamente de la OPEP (Nigeria y Arabia Saudí), así como de Rusia y Méjico

Representa un 12% de la demanda mundial

Elaborado con datos del Boletín estadístico de hidrocarburos (Julio 2012 – nº 176). CORES: Corporación de Reservas Estratégicas de Productos Petrolíferos

## 4.4.- Petróleo – Situación española – Importaciones (*ex cursus*)

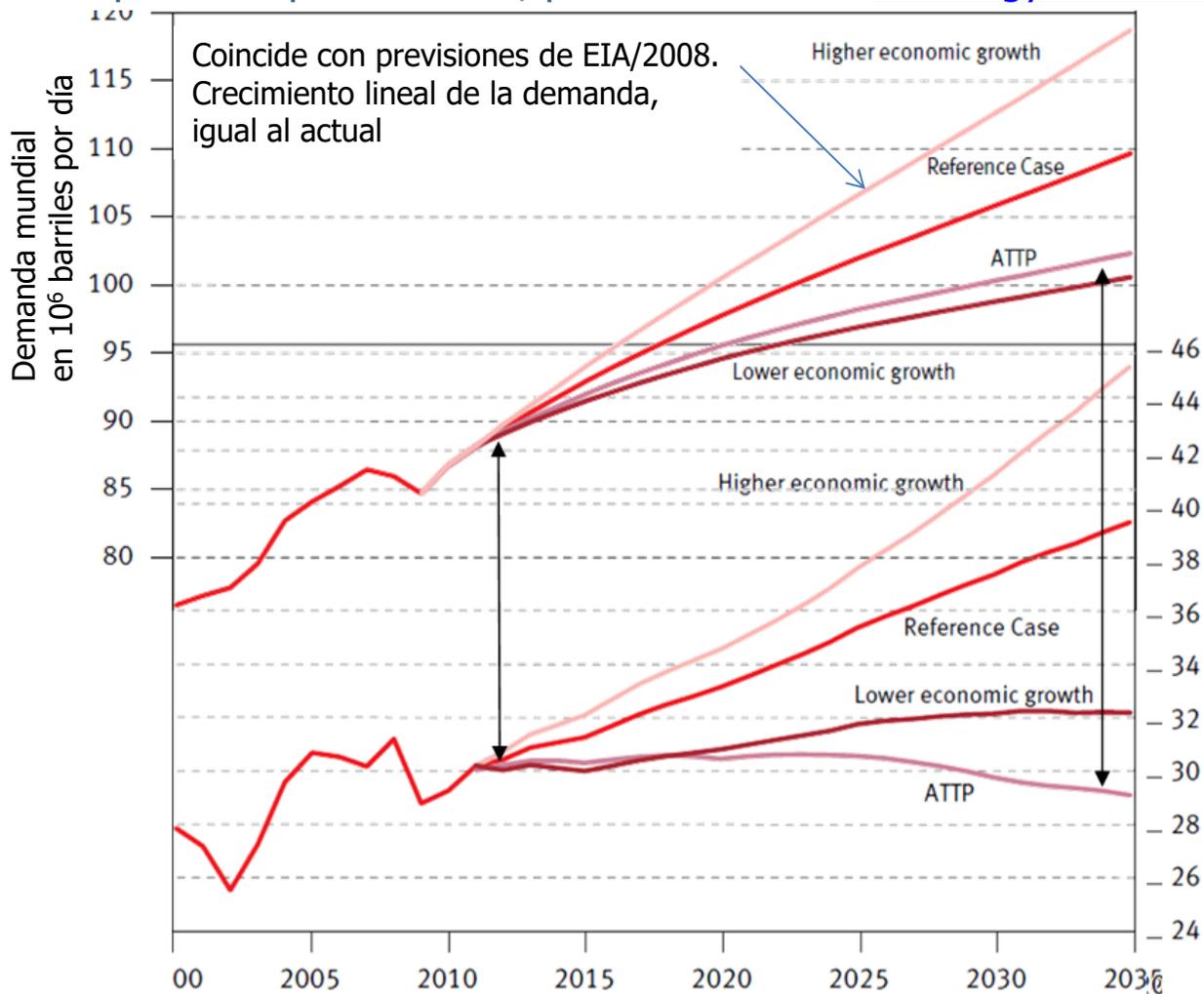
Consumo de gasolinas		
	2012	
	1.000 Tm	%Total
95 I.O	4.709	92,0
98 I.O	404	7,9
<b>Total gasolinas auto</b>	<b>5.114</b>	<b>99,9</b>
Otras	6	-
Consumo de gasóleos		
	2012	
	1.000 Tm	%Total
Gasóleo (A)	21.709	75,3
Biodiesel	27	0,1
Biodiesel mezcla	141	0,5
<b>Total gasóleos auto</b>	<b>21.877</b>	<b>72,8</b>
Agrícola y pesca (B)	4.389	14,6
Calefacción ©	2.407	8,0
Otros	1.375	4,6
Consumo de querosenos		
	2012	
	1.000 Tm	%Total
<b>Aviación</b>	<b>5.412</b>	<b>99,99</b>

- En España, el sector del transporte terrestre (gasolina y gasóleo A) y aéreo (querosenos) representa unos 66 % de las importaciones.
- Buena parte del resto consiste en: sistemas de calefacción en calderas de gasóleos, agricultura, e industria petroquímica (principalmente elaboración de plásticos)
- La proporción usada en generación de electricidad a gran escala es minúscula.

Fuente: Boletín estadístico de hidrocarburos (Julio 2012 – nº 176). [CORES](#): Corporación de Reservas Estratégicas de Productos Petrolíferos

## 4.5.- Petróleo – Perspectivas- Escenarios según EIA y OPEP

Hipótesis: OPEP Crecimiento demanda de petróleo lineal idéntico al actual. Escenario muy "optimista" para la OPEP, pero similar al de la Energy Information Administration



Varios escenarios:

Escenario ATTP "Accelerated Transportation Technology and Policy": endurecimiento de las leyes sobre emisiones de CO<sub>2</sub> del parque automóvil en Europa y en menor medida EE.UU., aumento del parque de vehículos eléctricos.

→ Encarecimiento del crudo?

Fuente: World Oil Outlook 2011, Reutilizable para fines educativos y/o no lucrativos  
[http://www.opec.org/opec\\_web/static\\_files\\_project/media/downloads/publications/WOO\\_2011.pdf](http://www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/downloads/publications/WOO_2011.pdf)

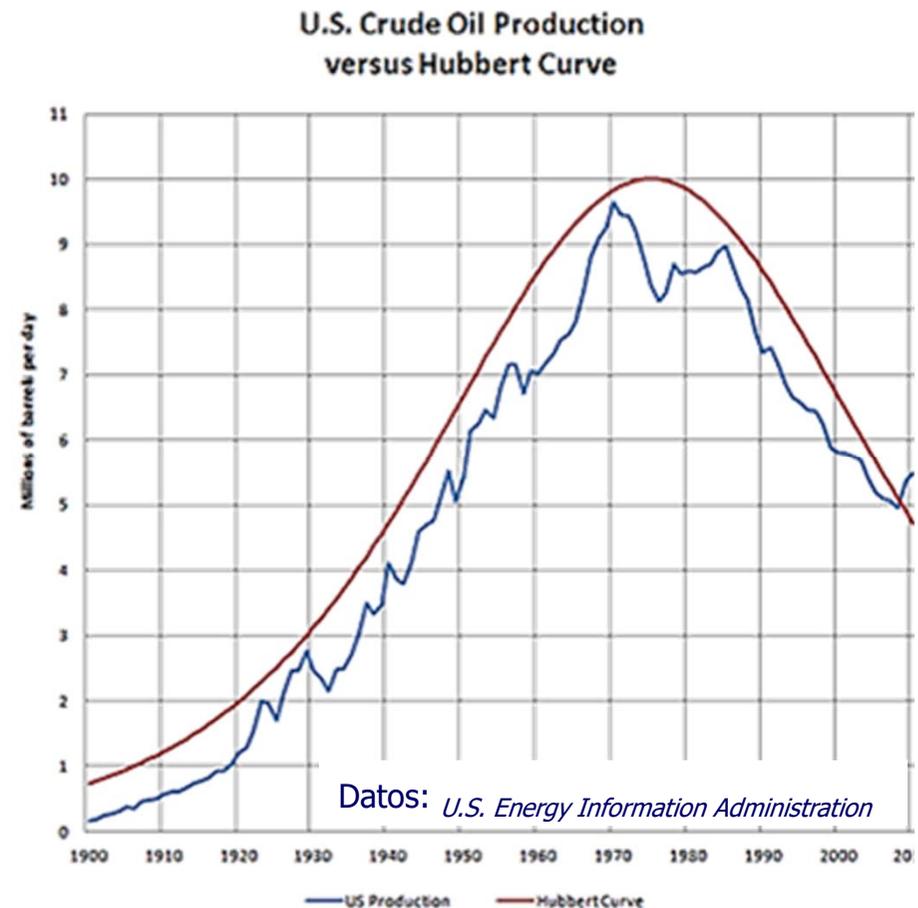
## 4.5.- Petróleo – Otras Perspectivas- Escenario Pico de producción (*ex cursus*)

Dos teorías simples:

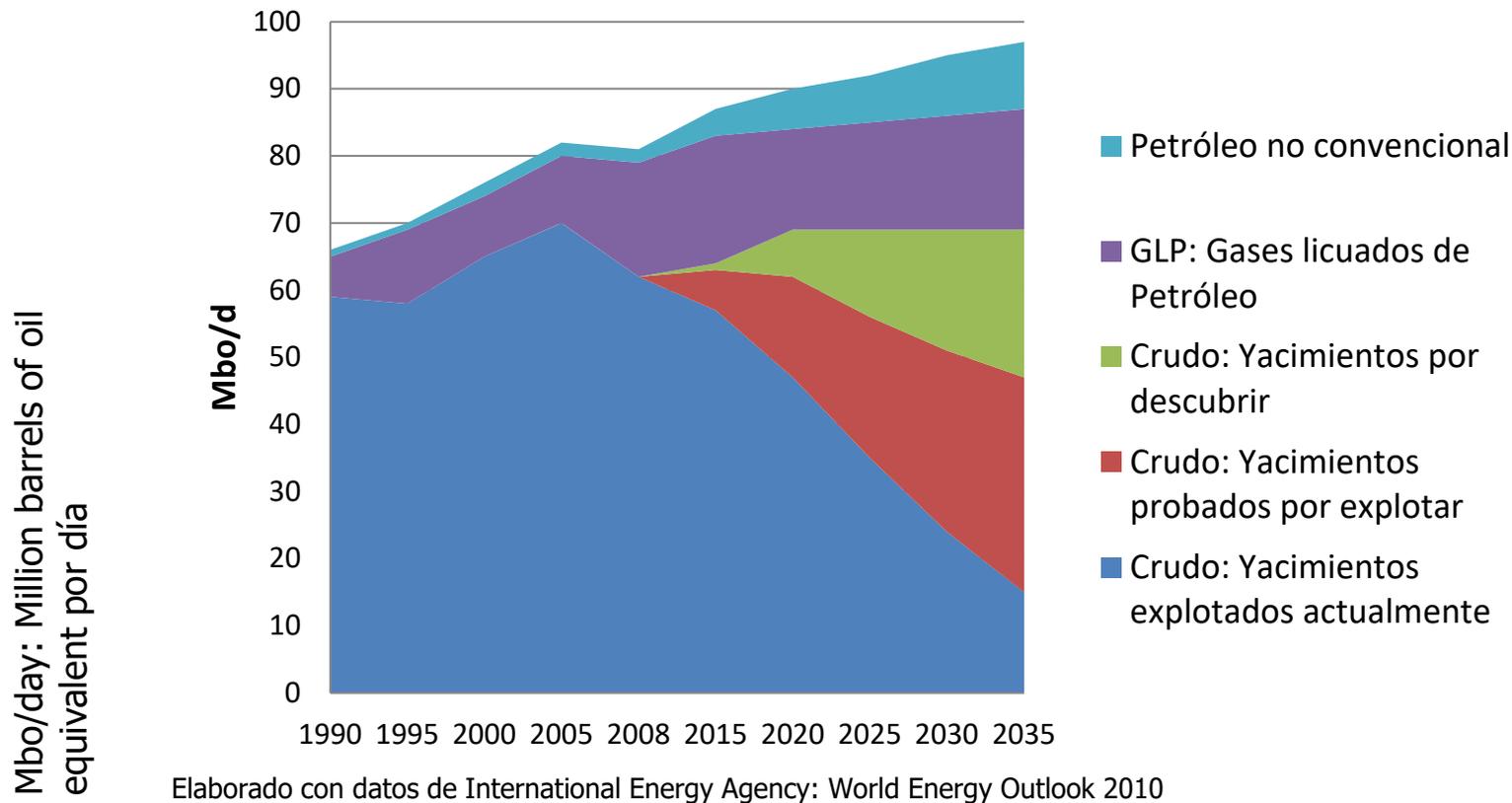
1. [Teoría](#) de la abundancia "Cornucopia". Seguirá aumentando la producción hasta que bruscamente caiga por agotamiento y/o sustitución por otra forma de energía. Figura anterior. Plazo de agotamiento entre 40 y 70 años.
2. [Teoría](#) de M. King Hubbert. El pico de producción anual se alcanza cuando se ha consumido la mitad de las reservas. La curva de producción es gaussiana. "Hubbertitas"

Producción:

- La teoría de Hubbert predijo el pico en EE.UU. Con 15 años de antelación, adquiriendo gran renombre.
- Aplicación al mundo es cuestionable, aunque se cifró el pico de producción mundial entre 2007 y 2010 por algunos, ... mientras que otros sostienen que aumentará hasta 2100.
- Las contradice el cambio climático, como el Protocolo de Kioto, [COPXX](#) y programas [h2020](#) y [h2035](#) de la UE pueden suponer un límite al petróleo.



## 4.5.- Petróleo – Perspectivas



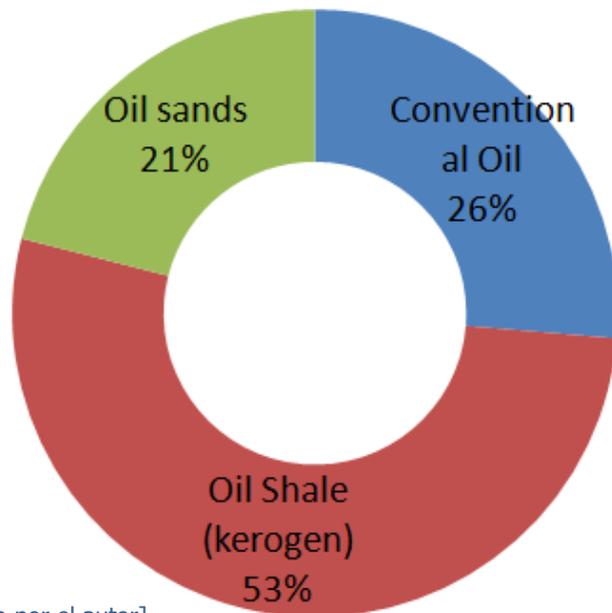
Las previsiones de aumento de crudo:

- Convencional: yacimientos probados y por descubrir.
- No convencional (asfaltos, pizarras, etc.) aumentos relativamente bajos, a pesar de sus grandes reservas, debido a sus costes de explotación y transporte, uso de consumo importante de agua y baja calidad por ser pesado, con azufre y cenizas.

## 4.5.- Petróleo – Otras perspectivas- Petróleo no convencional (*ex cursus*)

- No es líquido y actualmente apenas se ha explotado. Es más costoso y de peor calidad que el convencional. Grandes reservas.

### Reservas de crudo no convencional



[Elaborada por el autor]

Porcentajes aproximativos, basados en estimaciones

**Oil sands, bituminous oil, extra heavy oil** ~  $1,2 \cdot 10^{12}$  barriles, similar a las convencionales.

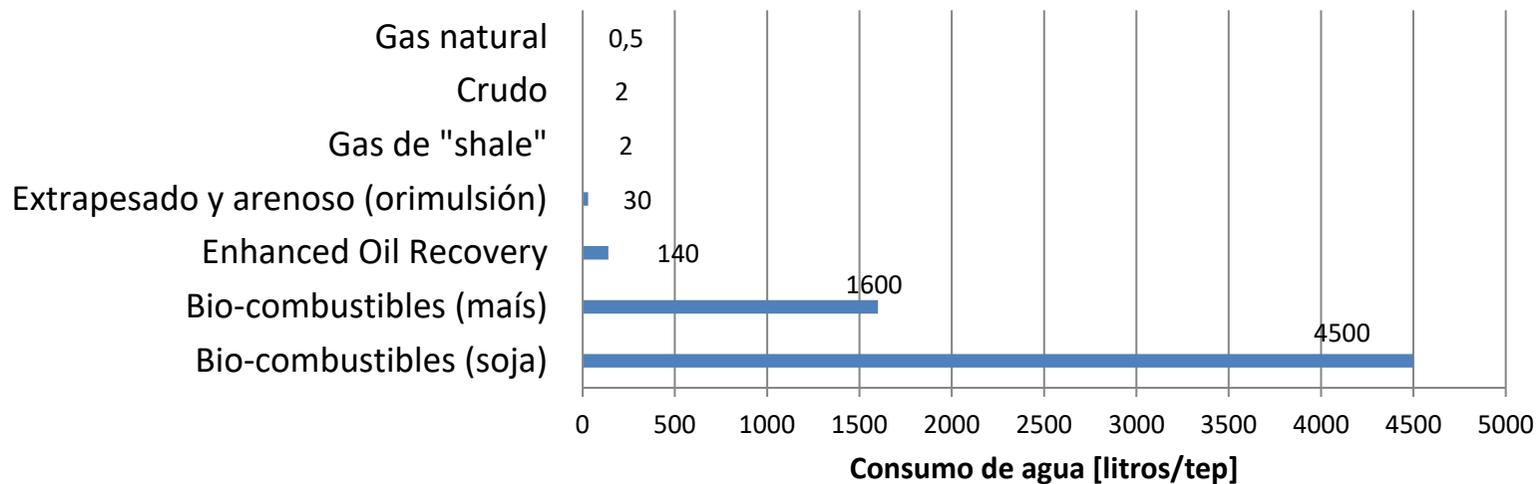
- **Crudo arenoso y/o bituminoso:** sólido a temperatura ambiente. 70% de las reservas en Alberta, Canadá. Difícil de extraer (se ha de calentar para extraerlo + suelo congelado en Canadá) .
- **Crudo extra pesado:** muy viscoso; con densidades altas, incluso superando la del agua. Contiene mucho azufre y metales pesados (níquel y vanadio), muy difícil de bombear y transportar. (Orimulsión, río Orinoco, Venezuela).

**Oil shale (esquisto bituminoso, pizarra)** ~  $2,8-3,3 \cdot 10^{12}$  barriles, superiores al convencional. Crudo atrapado en la roca madre (la parte recuperable constituye el llamado querógeno). Muy costoso de extraer y procesar: se necesita calentar la roca madre hasta al menos  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  (hasta  $520\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). 60% de las reservas en EEUU, 25% en Rusia y Brasil.

El consumo energético (y económico) y en agua para la extracción, proceso y transporte del crudo no convencional es varias veces mayor que para el crudo convencional ...

## 4.5.- Petróleo – Otras perspectivas- Consumo de agua (*ex cursus*)

### Consumo de agua para combustibles destinados a transporte



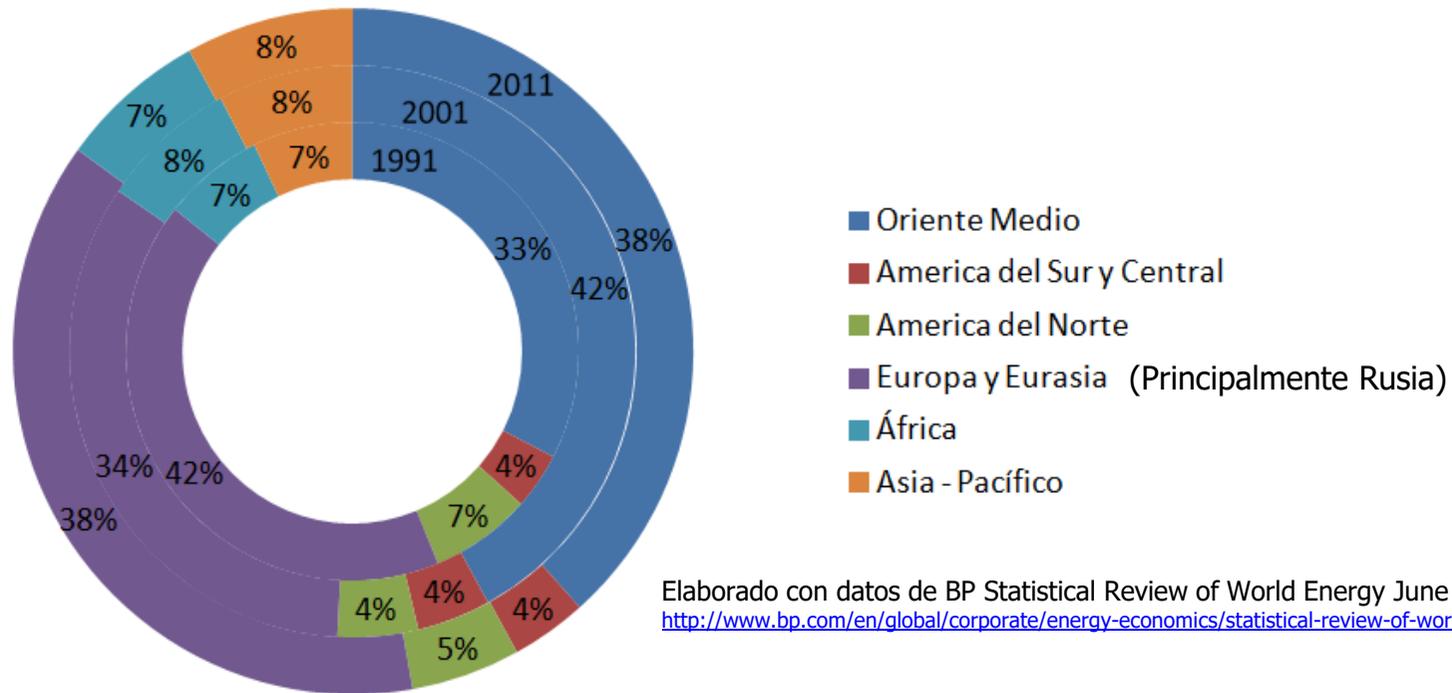
Elaborado con datos de : World Oil Outlook 2011 [http://www.opec.org/opec\\_web/static\\_files\\_project/media/downloads/publications/WOO\\_2011.pdf](http://www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/downloads/publications/WOO_2011.pdf)

- La recuperación mejorada de crudo (Enhanced oil recovery) inyectando agua alrededor del pozo consume mucha agua. Se puede usar CO<sub>2</sub> licuado.
- Los biocombustibles líquidos consumen mucha agua para su elaboración (2.000 veces más que el crudo convencional, más de un litro de agua por litro de combustible). Además consumen aprox. 1/2 de la energía de su *PCI*.

## 4.6.- Gas natural – Formación y composición

- Constituido fundamentalmente por **metano**, aunque contiene otros HCs, N<sub>2</sub>, humedad, etc.
- Acompaña al petróleo y al carbón (influencia de bacterias?) o bien está en yacimientos de gas natural exclusivamente.
- Los [hidratos de metano](#) en las profundidades marinas y en el [permafrost](#) son un yacimiento inexplorado e inexplorado al estar muy repartido en grandes extensiones. Grandes reservas.
- El GN se transporta por gasoductos a gran presión o en barcos metaneros en estado líquido. (España es singular al llegar la mayoría por barco)
- Se transporta y distribuye por red de gasoductos.
- En la red de tuberías es gaseoso y a presión (clase A, B y C según nivel de presión) para minimizar la potencia necesaria, que al ramificarse se baja la presión con válvulas hasta entregarlo a presión ligeramente superior a la atmosférica a los usuarios de bajo consumo, para minimizar fugas y evitar entrada de aire.
- El coste en yacimiento es un ~ 10% del coste de entrega al usuario, siendo los costes de transporte internacional la mitad del resto y la otra mitad el coste de distribución.
- Poder calorífico mayor que el crudo, *PCI* ~ 50 MJ/kg y baja proporción de carbono.
- **Empleo en: generación de calor industrial y doméstica por su limpia y fácil combustión. Generación de electricidad a gran escala (ciclos combinados).**
- La industria lo usa también como materia prima para sintetizar sustancias químicas, p. e. NH<sub>3</sub>.
- Su precio sigue al del petróleo pues **está indexado a él.**

## 4.7.- Gas natural– Reservas (*ex cursus*) ver Cap. 1. Reservas probadas de GN por zonas



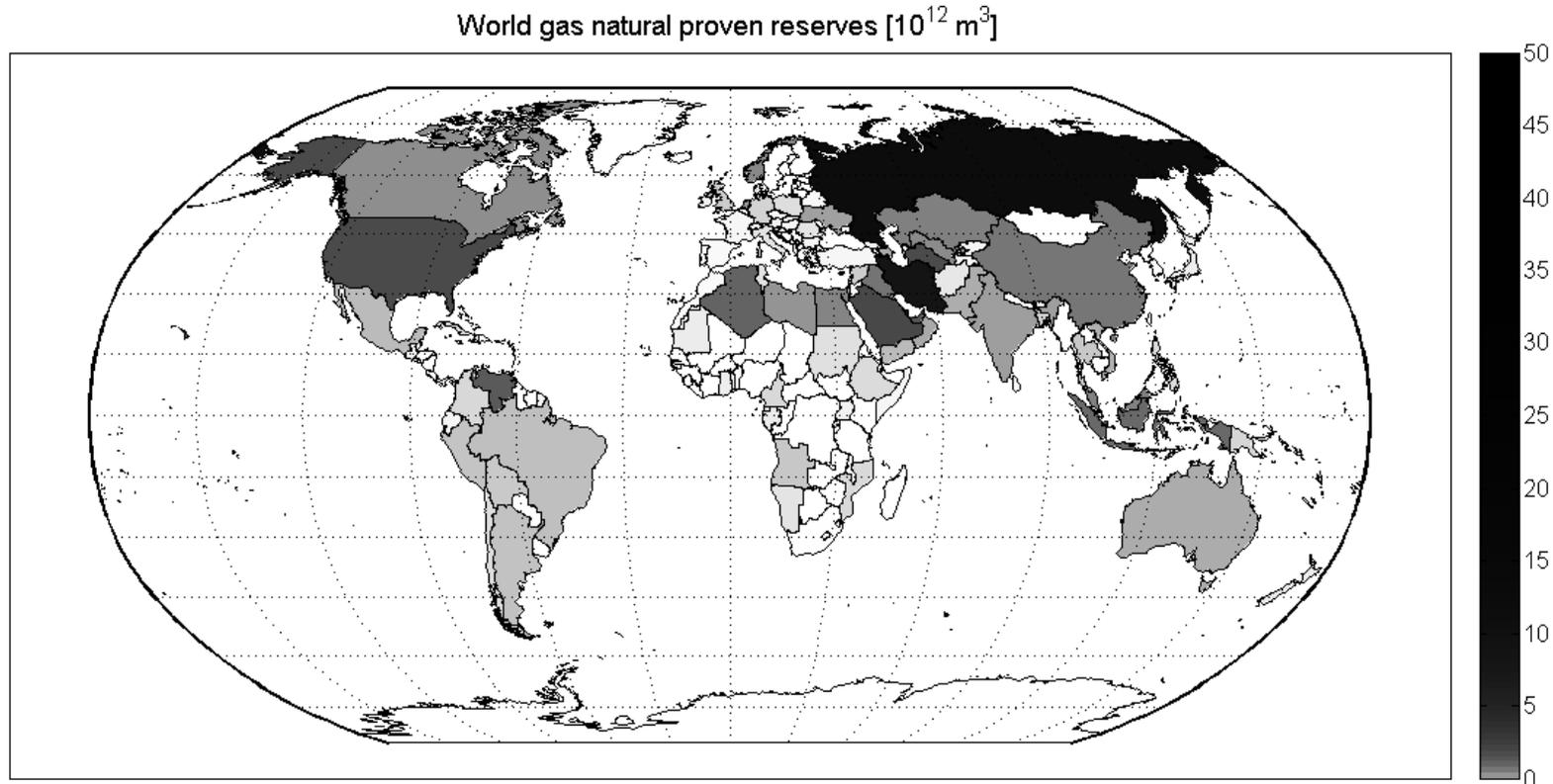
Elaborado con datos de BP Statistical Review of World Energy June 2012  
<http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>

1991:  $131 \cdot 10^{12} \text{ Nm}^3$       2001:  $169 \cdot 10^{12} \text{ Nm}^3$       2011:  $208 \cdot 10^{12} \text{ Nm}^3$

- N indica condiciones normales de  $P$  y  $T$ .  $1 \text{ Nm}^3$  tiene un  $PCI$  similar a  $1 \text{ kg}$  de petróleo

Las reservas han crecido con el tiempo a pesar del consumo, por iguales razones que el crudo.

## 4.7.- Gas natural– Reservas (*ex cursus*)

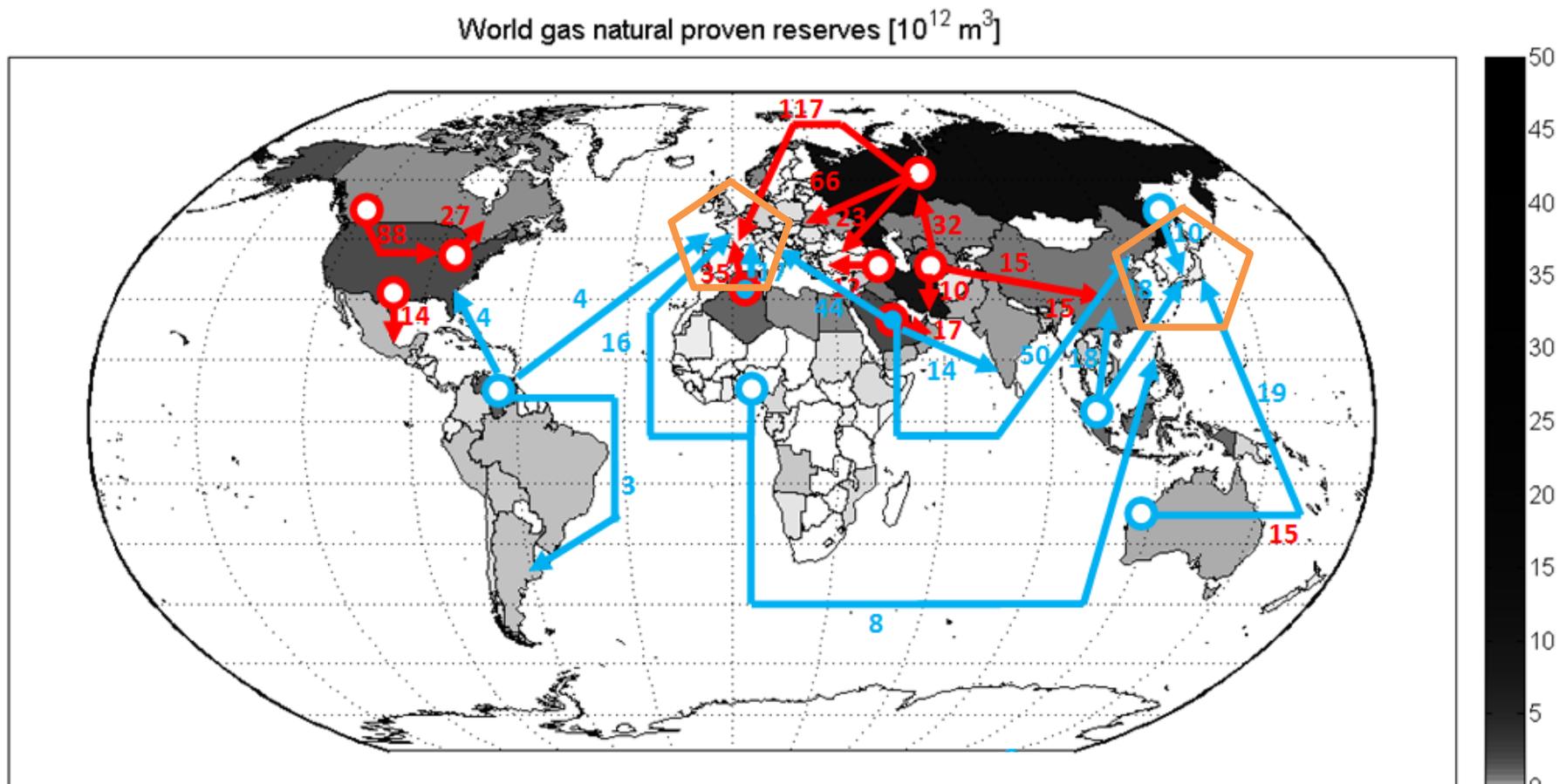


Elaboración propia a partir de datos de la CIA: The World Factbook 2009. Washington, DC: Central Intelligence Agency, 2009. Dominio público. <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/index.html> (millones de millones de  $\text{Nm}^3$ ).

$1 \text{ Nm}^3 = 0,77 \text{ kg}$  (*PCI* variable según composición  $\text{CH}_4$ , etano, propano, butano,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ...  $\sim 39\text{-}44 \text{ MJ/m}^3$ . En consecuencia, 1 tep  $\sim 1.000 \text{ m}^3$  de gas natural)

$\sim 210 \times 10^{12} \text{ Nm}^3$ , ( $\approx$  las reservas de crudo probadas, ver [Tabla 2.1](#)) pero mala repartición geográfica: la Federación Rusa y Oriente Medio representan por sí solos un 70% de las reservas mundiales. Norte América (EE.UU. primordialmente) produce apreciablemente.

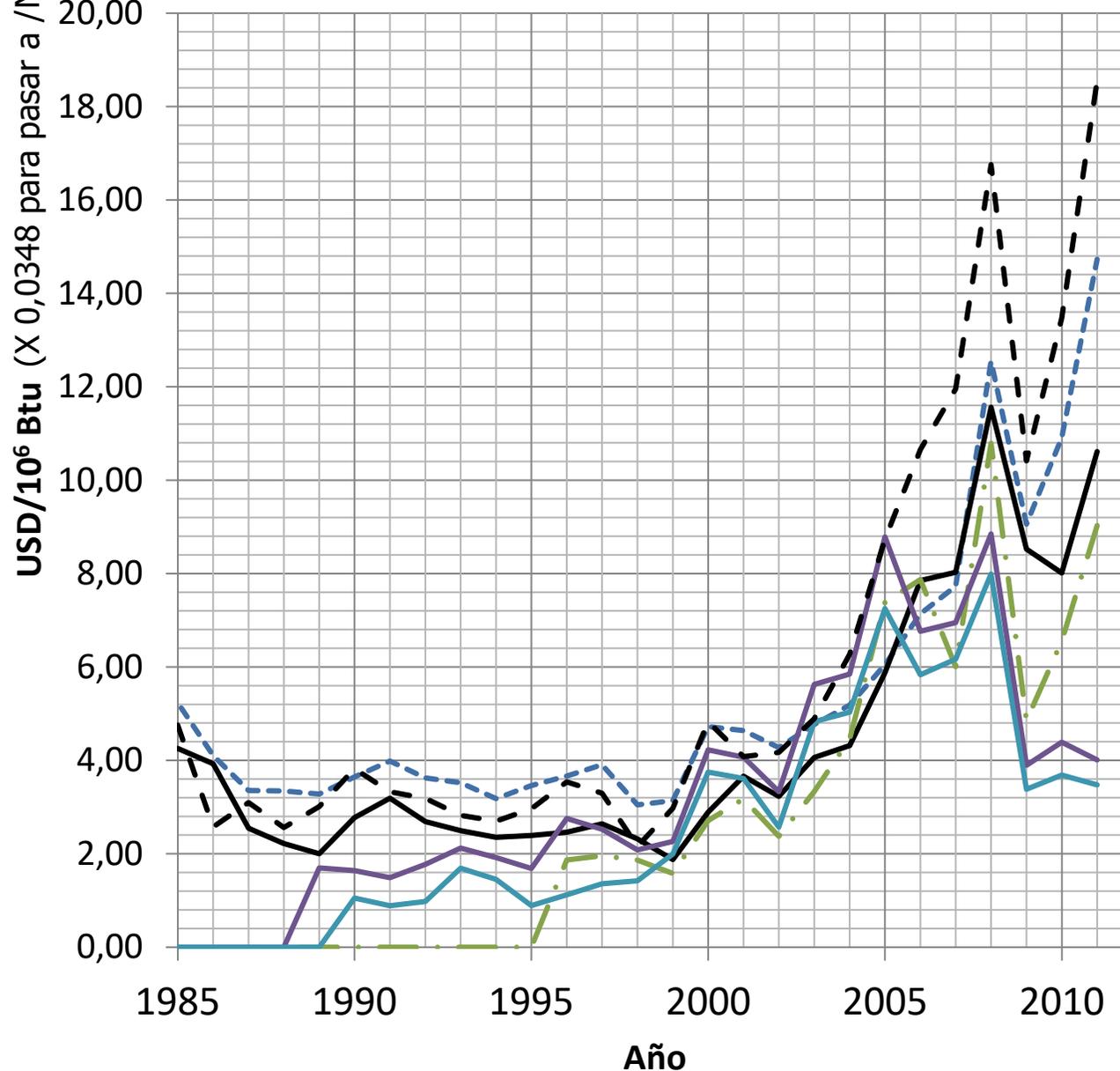
## 4.7.- Gas natural– Intercambios internacionales ( $10^9 \text{ Nm}^3$ ) (*ex cursus*)



Fuente: CIA: The World Factbook 2009. Washington, DC: Central Intelligence Agency, 2009. Dominio público.  
<https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/index.html>

Principales importadores: Europa, China y Japón  
 Datos: BP Statistical Review of World Energy June 2012 [www.bp.com/statisticalreview](http://www.bp.com/statisticalreview)

## 4.7.- Gas natural- Precios



- LNG
- Gas Natural UE
- ... Gas Natural UK
- Gas Natural US
- Gas Natural Alberta (Canada)
- - - Petróleo (crudo)

Datos:

UK Source: 1984-1990 German Federal Statistical Office 1991-2011 German Federal Office of Economics and Export Control (BAFA).

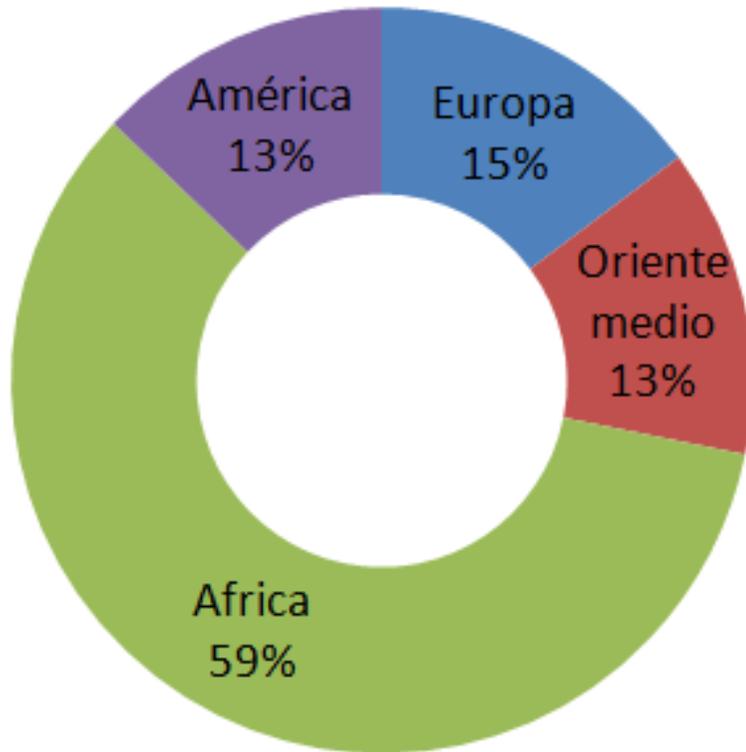
US & UE Source: Heren Energy Ltd. Alberta Source: Energy Intelligence Group, *Natural Gas Week*.

**Note:** cif = cost+insurance+freight (average prices).

- Los precios del gas natural siguen el del crudo, pero es más barato por unidad de energía, a pesar del precio alto de transporte .
- Su precio es **bien diferente según la región**, a causa de su transporte desde la extracción al consumidor.

## 4.8.- Gas natural– Situación española (*ex cursus*)

### Importaciones España 2012



Noruega	11,00%
Otros Europa	3,80%
Qatar	12,90%
Omán	0,50%
Argelia	40,00%
Nigeria	15,40%
Egipto	3,60%
Perú	6,90%
Trinidad y Tobago	6,00%

El gas natural importado procede mayormente de Argelia por gasoducto.

El resto, un 60%, llega licuado por barco

Importaciones totales  $\sim 34 \cdot 10^9 \text{ m}^3 \sim 34 \text{ Mtep}$  vs 55 de petróleo

Elaborado a partir de datos de: Boletín estadístico de hidrocarburos (Julio 2012 – nº 176). CORES ([www.cores.es](http://www.cores.es)); Corporación de Reservas Estratégicas de Productos Petrolíferos

## 4.8.- Gas natural– Situación española – Usos y Aplicaciones

España posee infraestructura de distribución y acumulación de GN: plantas de regasificación y gasoductos, pero no llega a todas partes, por lo que su uso en agricultura, ganadería y lugares apartados es muy bajo.

74% uso residencial, industrial y comercial para:

- Calentamiento de procesos
- Calefacción
- Agua caliente sanitaria
- CHP (Cogeneración: Combined Heat and Power)

25% Generación eléctrica (ciclo combinado)

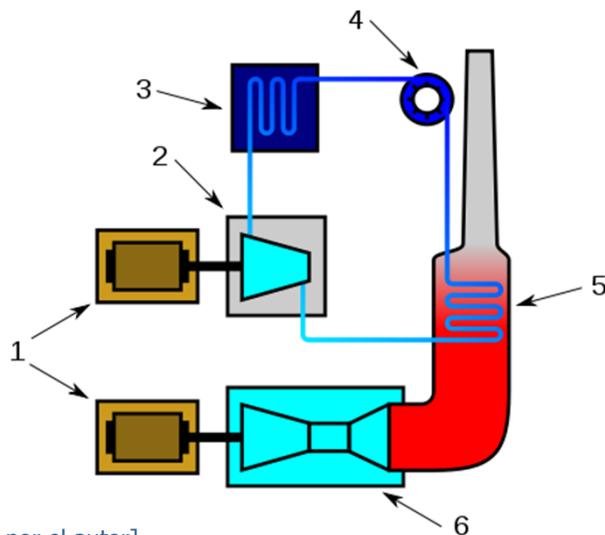
- 26 GW<sub>e</sub> instalados en 69 plantas de ~ 300-400 MW<sub>e</sub>
- Producción en pico (buen rendimiento a carga parcial + rapidez de la respuesta de la TG) y compensación de la variabilidad eólica.

<1% para el transporte, sustituyendo la gasolina con un 50% del precio, en barcos para reducir la contaminación en puertos.

## 4.8.- Gas natural– Situación española – Ciclo combinado

Las plantas de uso más extendido se componen de un ciclo Brayton (o Joule) abierto y un ciclo de Rankine cerrado de cola, con acoplamiento externo por el escape de la turbina de gas  $\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

- Sin postcombustión en el Recuperador de Calor de Gases de Escape (**HRSG** : Heat Recovery Steam Generator).
- Con postcombustión suplementaria (hasta  $760\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) en el Recuperador de Calor de Gases de Escape (**HRSG**). Para aumentar la potencia con menor rendimiento.



1. Generadores eléctricos.
2. Turbina de vapor.
3. Condensador.
4. 4. Bomba de alimentación.
5. 5. HRSG/Caldera de recuperación de
6. gases de escape
7. 6. Turbina de gas

[Elaborada por el autor]

## 4.8.- Gas natural– Situación española – Estructura de generación (*ex cursus*)

Estructura de la generación eléctrica.

Consumo:

Pico de demanda hasta  $\sim 40$  GWe

Valle de demanda  $\sim 23$  GWe

Potencia de generación instalada  $\sim 110$  GWe.

Producción de base:

Nuclear  $\sim 7$  GWe = constante

Carbón  $\sim 10$  GWe = constante pero menos.

Producción de punta

Ciclo combinado  $\sim 26$  GWe. Gestionable pero tarda algo. Gas natural.

Fuel + gas  $\sim 2$  GWe. Pequeñas centrales.

Producción no gestionable

Cogeneración:  $\sim 7$  GWe (no renovable, gas natural)

*Renovables no gestionables*

*Eólica:  $\sim 24$  GWe*

*Fotovoltaica:  $\sim 5$  GWe*

*Renovables gestionables: Ajustan a la producción eólica y solar*

*Hidroeléctrica:  $\sim 20$  GWe las más flexible. Bombeo hidráulico nocturno*

*Solar Térmica:  $\sim 2$  GWe*

*Otros y rdondeo: 7 GWe*

*> 50%  
renovable*

## 4.8.- Gas natural vs petróleo

- Más barato por unidad de energía.
- Disponible en una tubería. No hace falta almacenamiento local.
- Se puede usar para el transporte, comprimido, en MACIs MEP por su alto N.O.
- Se puede usar para cogeneración con MACIs y TGs.
- Cada vez se usa más para viviendas e industria quemando en calderas.
- Menos emisiones CO<sub>2</sub>:
  - Por kWh<sub>t</sub>
  - Por kWh<sub>e</sub>. La mitad si no hay pérdidas directas de gas en transporte y regasificación. Por mejor rendimiento en ciclo combinado (generación eléctrica)  $\eta = 0,5 - 0,6$ .
- Menos emisiones de NO<sub>x</sub> por posibilitar menor temperatura de llama. Menos emisiones de HCs y partículas por su más fácil combustión.
- El ciclo combinado tiene buen rendimiento a carga parcial, y permite asumir variaciones importantes de demanda y de producción (para complementar la eólica). Por eso hay tanta potencia instalada en España (26 Gw<sub>e</sub> por una producción media de 9 GW<sub>e</sub>). Cubre los huecos de las renovables y caídas técnicas de grandes centrales, a mayores precios por poder responder rápidamente a la demanda. Estas centrales cobran sin generar, por estar listas para entrar a producir rápidamente.

## 4.8.- Gas natural vs petróleo (*ex cursus*)

- Precios en España a 2019 consumo usuario final pequeño consumidor.

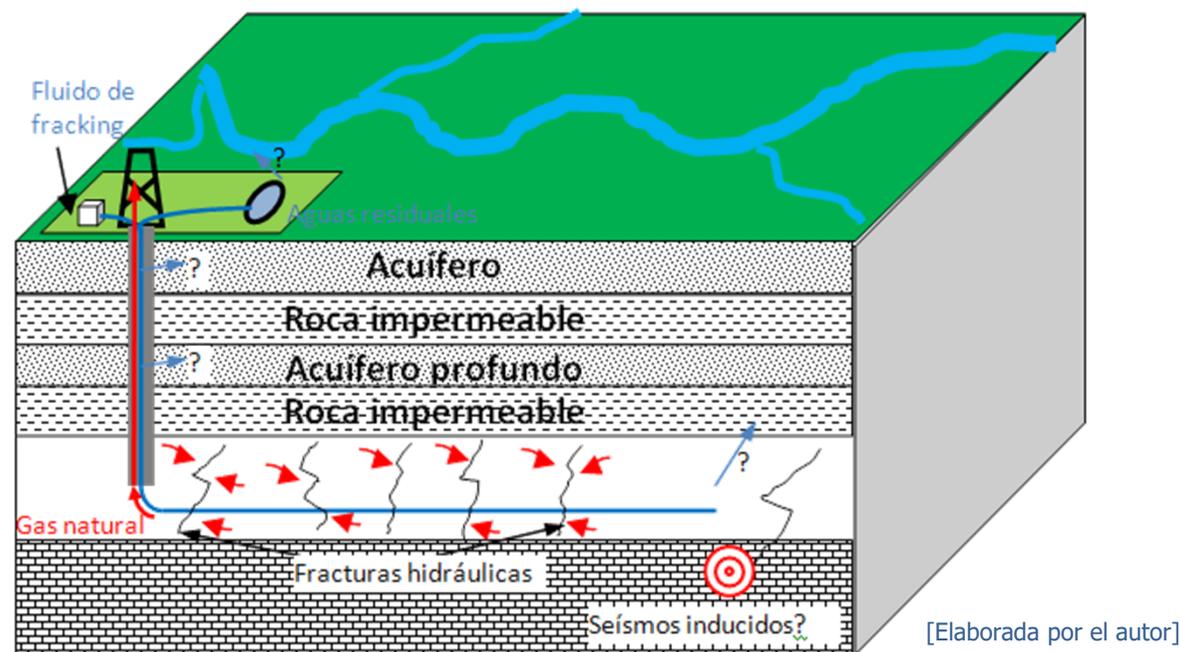
- Elec: Tarifa sin discriminación horaria, tarifa 2.0A, PVPC,  $\approx 0,11$  a  $0,13$  €/kWh<sub>e</sub>+peaje +término de potencia+alquiler de contador+impuesto a la electricidad ( $\sim 5\%$ )+21% IVA.
- Co discriminación horaria sube un poco de 10 h a 22 h y baja a la mitad de 22 h a 10 h

- GN: Tarifa de Último Recurso (TUR), término de consumo, de  $\approx 0,053$  a  $0,061$  €/kWh<sub>t</sub> + peaje + alquiler de contador+impuesto a los hidrocarburos  $0,002$  €/kWh<sub>t</sub> +21% IVA.

El precio del GN industrial es mucho menor  $\sim 0,03$  €/kWh<sub>t</sub> y tanto menor cuanto mayor sea el consumo y la presión de suministro, así como la posibilidad de aceptar interrupción.

## 4.9.- Gas natural – Perspectivas – Gas de esquisto “shale gas”

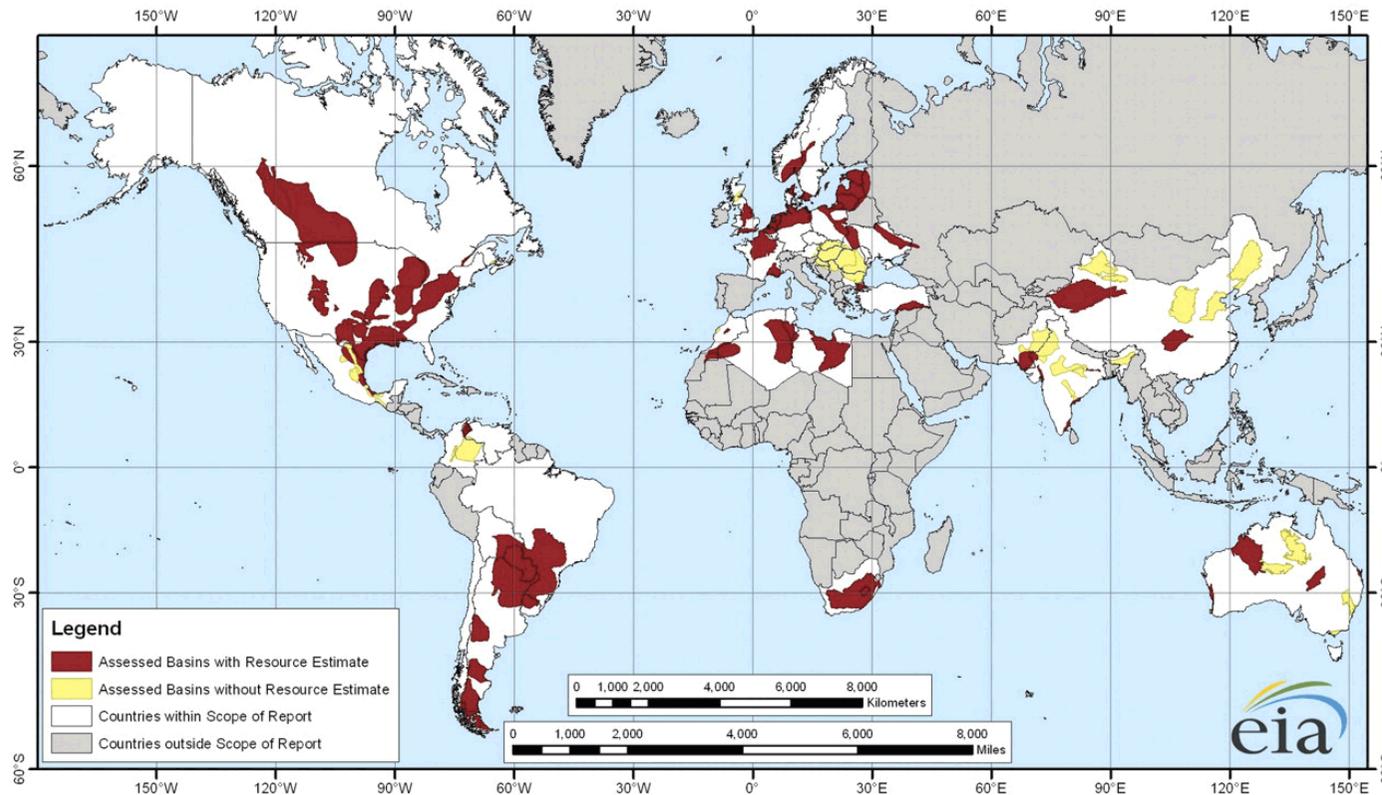
El **gas de esquisto** (*shale gas*) es un hidrocarburo gaseoso (mayormente metano) que se encuentra en las formaciones rocosas sedimentarias de grano muy fino. Se extrae de zonas profundas donde abunda el esquisto. El interior rocoso del esquisto presenta baja permeabilidad, lo que dificulta su difusión. Para la extracción comercial de dicho gas, es necesario fracturar la roca hidráulicamente (*fracking*): Inyección a presión de un fluido (generalmente agua con arena y productos químicos) en el terreno, para ampliar las fracturas existentes en el sustrato rocoso que encierra el gas o el petróleo, y favoreciendo así su salida hacia la tubería de extracción. Su rentabilidad depende del precio del GN.



Existe un peligro medioambiental derivado del consumo de agua y de la introducción de compuestos químicos, que podrían contaminar tanto el terreno como los acuíferos subterráneos. Se sospecha que es origen de algunos micro-terremotos.

## 4.9.- Gas natural – Perspectivas – Gas de esquisto “shale gas”

- Se ha llegado a convertir en una fuente muy importante de gas natural en EEUU desde principios de este siglo, y el interés se ha extendido al resto del mundo (especialmente China, que posee las mayores reservas probadas). Casi inexplorado hace 20 años, en 2010 representó 20% de la producción de gas natural en EE.UU., con perspectivas (IEA) de superar el 45% en 2035 si sube el precio del petróleo. Se han realizado prospecciones en el país Vasco.



48 importantes yacimientos de gas de esquisto. 38 países, según la *U.S. Energy Information Administration* ([EIA](#))

## 4.10.- Cuestiones de autoevaluación

En España, los ciclos combinados queman fuel-oil y combustibles residuales mayoritariamente	NO
El uso de ciclos de fuel y gas-oil para producción de potencia es considerable en el mundo por su precio moderado	NO
En España, el 25% del consumo de gas natural se destina a generación de electricidad	SI
La mayoría del consumo de petróleo en Europa se destina al sector del transporte	SI
En España, el parque automovilístico está formado por un 80% de motores de encendido provocado (gasolina)	NO
Por unidad de energía, el gas natural es más barato que el petróleo o sus derivados	SI
La mayoría del gas natural llega a España desde Argelia por gasoducto	SI
En España, la potencia instalada de ciclo combinado es mayor que la potencia instalada en nuclear	SI
La generación de los ciclos combinados es muy poco adaptable, y por eso forman parte de la base de generación eléctrica	NO
El número de automóviles por 1.000 personas es aproximadamente proporcional al PIB/habitantes	SI
Se prevé un aumento exponencial del consumo de petróleo en los próximos 25 años	NO
El precio del petróleo es muy estable, sobre todo en los últimos 20 años	NO
Se prevé un descenso del precio del crudo	NO

## 4.- Petróleo. Combustibles líquidos y gaseosos. Usos y precios. Conversión

La infraestructura de almacenamiento y distribución de gas natural es muy escasa en España	NO
El precio del gas natural es mucho más estable que el del crudo	NO
En los últimos 20 años, las reservas probadas de crudo convencional han bajado	NO
En los últimos 20 años, las reservas probadas de gas natural han aumentado	SI
La extracción y procesamiento del crudo convencional requieren mucho más consumo de agua que los bio-combustibles líquidos destinados a transporte	NO
La eficiencia térmica de los ciclos combinados es mejor que el de una central de carbón convencional	SI
El hecho de quemar gas natural en ciclos combinados en vez de carbón en una central térmica convencional supone un ahorro de emisiones de CO <sub>2</sub> del orden del 50%	SI
La mayoría de las reservas de petróleo se hallan en EEUU	NO
En general, la producción y el consumo de combustibles fósiles ocurre en los mismos países, lo que supone pocos intercambios comerciales	NO
Las reservas de crudo no convencional son mayores que las de crudo convencional	SI
El coste del crudo no convencional es más elevado que el del crudo convencional	SI
El gas natural tiene una tarifa por discriminación horaria, como la electricidad	NO

## 4.- Petróleo. Combustibles líquidos y gaseosos. Usos y precios. Conversión

Las reservas probadas se basan exclusivamente en la tecnología disponible para extraer la materia prima	NO
América del Norte es el mayor consumidor de crudo per cápita	SI
Las emisiones de CO <sub>2</sub> anuales de América del Norte son ligeramente más bajas que las de Europa	NO
En los últimos 50 años, el precio del crudo en dólares corrientes se ha multiplicado por 5	SI
El consumo mundial de gas natural (en tep) es actualmente mayor que el de petróleo	NO
Todas las agencias internacionales de energía mayormente coinciden en cuanto a las predicciones de producción de crudo para las próximas décadas	NO
Al tener reservas de gas natural, España es poco dependiente energéticamente	NO
Las dos crisis del petróleo del siglo pasado (1974 y 1979) empujaron a los países no exportadores de petróleo a cambiar drásticamente de política energética	SI
La invasión de Irak en 2003 por parte de EEUU ha tenido como consecuencia un descenso significativo del precio del crudo	NO
En general, el crudo se puede consumir tal cual o con mínimo procesamiento, sea cual sea su uso final	NO
El gas natural en origen no es más que metano	NO
El gas natural se emplea en España mayoritariamente para generación de electricidad	NO
España hace mucho uso de centrales de fueloil para cubrir picos de demanda eléctrica	NO

## 4.- Petróleo. Combustibles líquidos y gaseosos. Usos y precios. Conversión

**Ejercicio propuesto 4.1:** Estimar el factor de emisión, como los kg de CO<sub>2</sub> emitidos por kilo de combustible y además por unidad de energía (exergía) contenida, de a) C<sub>n</sub>H<sub>2n</sub> b) Gas natural (metano para simplificar pues su calidad es variable). Tomar PCI de C<sub>c</sub>H<sub>2c</sub>: 42 MJ/kg y del metano, el PCS de 55 MJ/kg, pues el agua de su combustión se puede condensar sin problema. Tomar el PCI del petróleo de referencia para la tep del [Cap. 1](#). Comparar los resultados obtenidos con los valores de la tabla del IDAE en el [Cap. 2](#).

Reacción química de combustión completa y perfecta 1 mol de co.:  $C_cH_h + \left(c + \frac{h}{4}\right) O_2 \rightarrow cCO_2 + \frac{h}{2} H_2O$

$$a) C_cH_{2c}: FE_m = \frac{cM_{CO_2}}{M_{C_cH_{2c}}} = \frac{c(12+32)}{c12+2c} = \frac{44}{14} = 3,14 \frac{kg_{CO_2}}{kg_{C_cH_{2c}}}$$

$$C_cH_{2c}: FE_e = \frac{FE_m}{PCI} = 3,14 \frac{kg_{CO_2}}{kg_{C_cH_{2c}}} \left(42 \frac{MJ_t}{kg_{CO_2}}\right)^{-1} = 0,0748 \frac{kg_{CO_2}}{MJ_t} 41,87 \frac{MJ_t}{kg_{ep}} \frac{1.000 kg_{ep}}{tep} = 3,13 \frac{t_{CO_2}}{tep}, \text{ Tabla 2.3: 2,9 a 3,04}$$

Comentario, los combustibles ligeros tienen un PCI ligeramente mayor.

$$b) \text{ Gas natural (GN} \rightarrow CH_4): FE_m = \frac{44}{12+4} = 2,75 \frac{kg_{CO_2}}{kg_{CH_4}}$$

$$CH_4: FE_e = \frac{FE_m}{PCI} = 2,75 \frac{kg_{CO_2}}{kg_{C_cH_{2c}}} \left(55 \frac{MJ_t}{kg_{CO_2}}\right)^{-1} = 0,05 \frac{kg_{CO_2}}{MJ_t} 41,87 \frac{MJ_t}{kg_{ep}} \frac{1.000 kg_{ep}}{tep} = 2,09 \frac{t_{CO_2}}{tep}, \text{ Tabla 2.3, GN: 2,34}$$

Comentario: el GN no es metano puro, contiene etano, entre otros HCs y algún gas inerte que rebajan su PCI.

Emisiones de CO<sub>2</sub> (en en t<sub>CO<sub>2</sub></sub>) si se utiliza a) C<sub>c</sub>H<sub>2c</sub> en una central térmica (eficiencia 42%) y b) GN en ciclo combinado (eficiencia 56%). Tomar equivalencia directa energética para la electricidad, [Cap. 1](#).

$$a) C_cH_{2c}: FE_{el} = \frac{FE_e}{\eta_{el}} = \frac{3,13 t_{CO_2}}{0,42 tep} = 7,45 \frac{t_{CO_2}}{tep} \frac{0,086 tep}{MWh_{el}} = 0,64 \frac{t_{CO_2}}{MWh_{el}}, \text{ Tabla 2.3, central de fuelóleo neta: 0,73}$$

$$b) CH_4: FE_{el} = \frac{FE_e}{\eta_{el}} = \frac{2,09}{0,56} = 3,73 \frac{t_{CO_2}}{tep} \frac{0,086 tep}{MWh_{el}} = 0,32 \frac{t_{CO_2}}{MWh_{el}}, \text{ Tabla 2.3, central de ciclo combinado neta: 0,35}$$

Comentario: Las centrales de fuelóleo, en media, aparentemente han sido consideradas con un rendimiento menor en la tabla.