

# Fuentes de Energía

## Capítulo 3: Fuentes no renovables. Clasificación. Energía nuclear.

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 3: Fuentes no renovables. Clasificación. Energía nuclear.

Tras una perspectiva de las fuentes de energía no renovables, se introduce a la energía nuclear:

- La generación de energía térmica con energía nuclear, tanto de fusión (solo en teoría) como de fisión.
- La tecnología de la obtención del combustible para reactores de fisión. Concepto de la baja concentración de uranio y en él de  $^{235}\text{U}$ . La necesidad de enriquecimiento y la cuestión de los residuos y su almacenamiento prolongado, vida media. Concepto de material fisible y material fértil para generar nuevo combustible.
- Las reservas probadas de uranio y la duración prevista. Insensibilidad al precio del uranio.
- Los tipos de centrales. La necesidad de un moderador y las barras de control. Concepto de los diferentes edificios de la central. Rendimiento típico. Desaprovechamiento de la energía térmica residual por ser ciclo Rankine.
- La necesidad de producción continua a plena potencia de las centrales nucleares.
- La situación española de las centrales nucleares. Fin de vida y desmantelamiento.
- La característica del bajo coste interno (del capital inicial y del combustible), el alto coste externo y la moratoria nuclear.

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

# Índice

3.1.- Clasificación de fuentes de energía

3.2.- Fuentes no renovables

3.3 .- Conceptos de Energía Nuclear. Fusión - Fisión

3.4.- Reservas y precios del Uranio

3.5.- Usos y aplicaciones de la energía nuclear

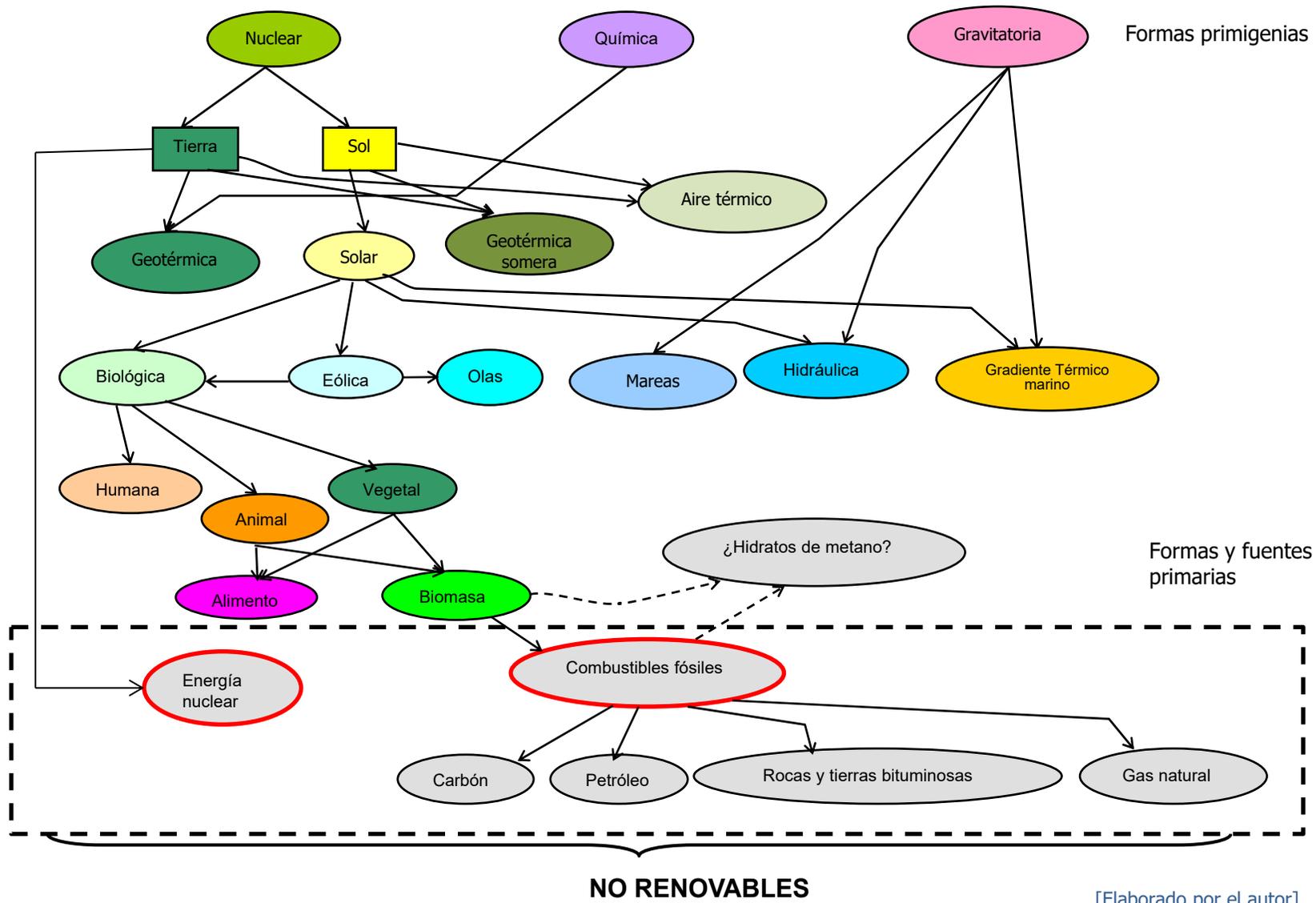
3.6.- Tecnología

3.7.- La situación Española

3.8.- El ciclo del combustible, perspectivas

**Objetivos:** Dar a entender los principios y características generales de la energía nuclear, su uso, su situación actual y su papel en la cesta de la energía. Dar a conocer los dos tipos principales de centrales nucleares para la producción de electricidad.

### 3.1.- Clasificación de fuentes de energía



## 3.2.- Fuentes no renovables

Fuentes cuyo recurso es limitado a escala de tiempo humana

### Combustibles fósiles

Petróleo

Carbón

Gas natural



Formación:  $10^7$ - $10^8$  años

Agotamiento:  $10^2$ - $10^3$  años

### Energía nuclear y fusión

confinamiento magnético D-D, D-T

confinamiento inercial

### Energía nuclear y "combustibles fósiles"

$^{235}\text{U}$ ,

$^{239}\text{Pu}$ ,

$^{233}\text{U}$



Agotamiento último:  $10^2$ - $10^3$ , años; Ver [Tabla 2.1](#)

artificiales

### 3.3.- Energía nuclear – Conceptos (*ex cursus*)

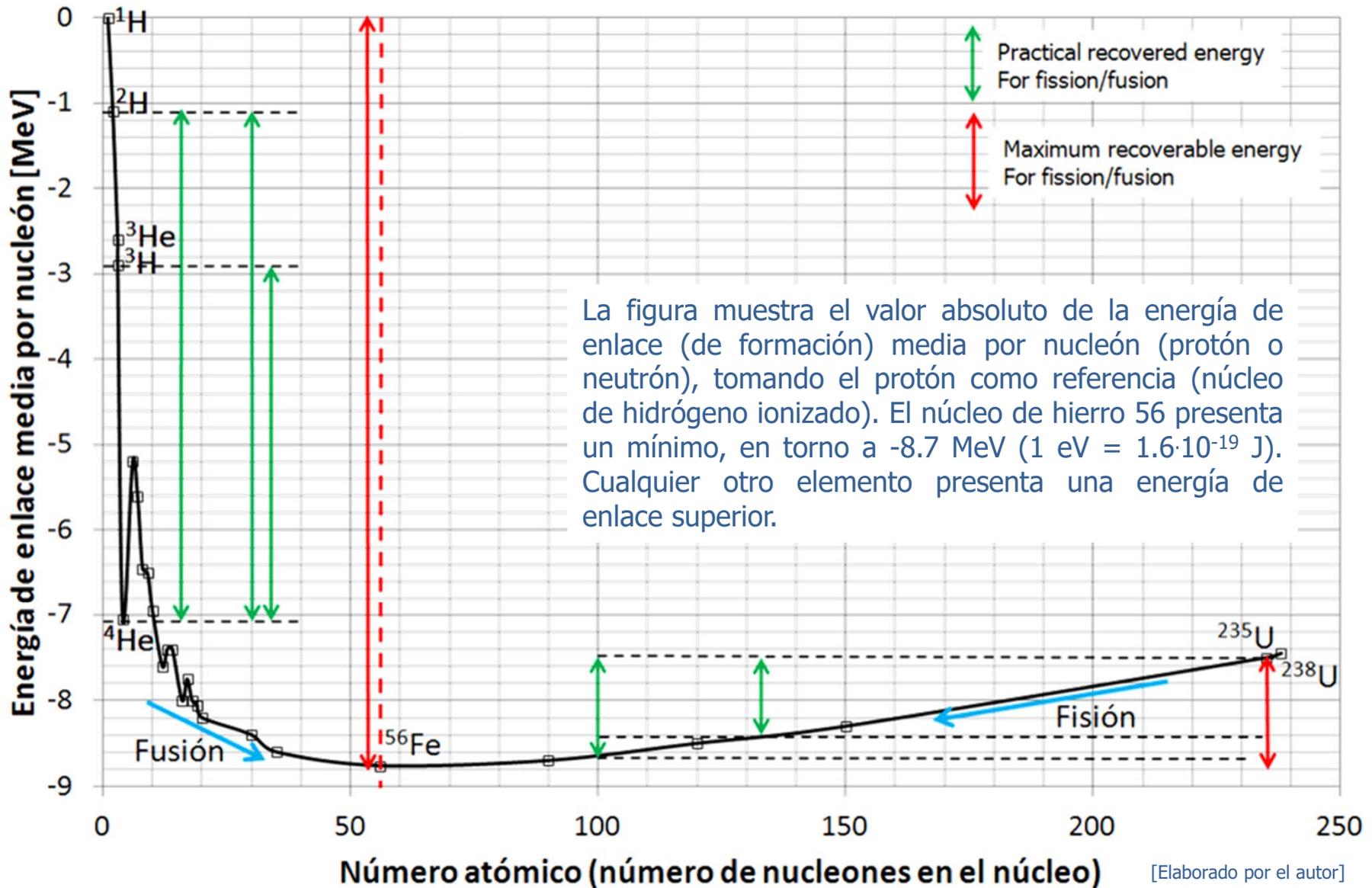
Existen 4 grandes fuerzas en la naturaleza:

- **fuerza nuclear fuerte** (responsable de la cohesión de los protones y neutrones, así como de los núcleos de los átomos)
- **fuerza nuclear débil** (involucrada en la desintegración beta)
- **fuerza electromagnética** (interacción electrón-núcleo + moléculas),
- **fuerza gravitatoria.**

Las energías por unidad de masa involucradas en dichas fuerzas varían de varios ordenes de magnitud, decreciendo en el orden dado.

- La cohesión de los núcleos de los átomos, resultante de la fuerza nuclear fuerte, vence sobradamente la repulsión electrostática de los protones del núcleo (Cargas eléctricas positivas).
- Al igual que los enlaces electromagnéticos entre átomos (enlaces químicos), los enlaces entre protones y neutrones en el núcleo, conllevan energía. Esta energía es varios ordenes de magnitud más importantes que los enlaces químicos.
- Al destruir y recombinar estos enlaces, se puede recuperar energía útil, de modo similar a una reacción de combustión.

### 3.3.- Energía nuclear – Conceptos (*ex cursus*)



### 3.3.- Energía nuclear – Conceptos

Con el fin de obtener energía, surgen dos tipos de reacción posibles para saltar hacia menores energías y así liberar la diferencia:

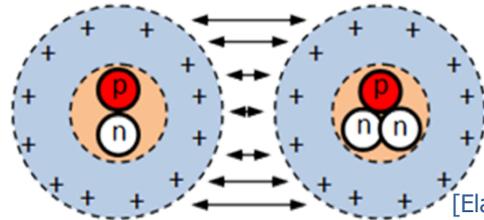
- La FUSIÓN: combinación de núcleos más ligeros que el hierro
- La FISIÓN: rotura de núcleos más pesados que el hierro

La fusión presenta más potencial que la fisión, por unidad de masa (por nucleón).

La máxima energía extraíble de la materia sería por un mecanismo de desintegración completa, siendo ésa  $E=mc^2$ ,  $\sim 938$  MeV por nucleón. Con lo cual la máxima energía recuperable por reacciones de fusión (8.7 MeV/nucleón), representa menos de un 1 % de la energía contenida en la materia.

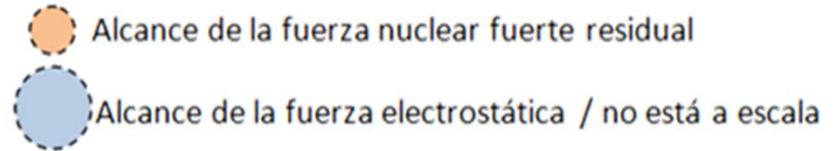
### 3.3.- Energía nuclear – Fusión

Para lograr la fusión formando He (fácil), es necesario acercar dos núcleos, venciendo para ello la fuerza electromagnética repulsiva de los núcleos (implica energía enormes para lograr la fusión  $U_{coul}$ ). Siendo  $Z$  el número atómico:



[Elaborado por el autor]

$$U_{coul} = \frac{k Z_1 Z_2 e^2}{r} \quad \sim 0.1 \text{ MeV para D-T}$$



Energía liberada por fusión  $\Delta E > U_{coul}$

Posibles reacciones:  $D + D \rightarrow {}^4\text{He} + 12.5 \text{ MeV}$

$D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n + 17.6 \text{ MeV}$

.....

Criterio de Lawson: mínimo tiempo  $\tau$  y densidad numérica de materia confinada  $n$

$$n\tau > \{10^{14} \text{ para } D - T \text{ y } 10^{16} \text{ para } D - D \text{ [s cm}^{-3}\text{]}$$

Confinamientos: - **gravitatorio** (estrellas)  $\tau$  grande,  $n$  grande.

- **inercial** (implosión inducida por láseres)  
 $\tau$  pequeño,  $n$  grande.

- **magnético (tokamak)**  $\tau$  grande,  $n$  muy pequeño

Solo prototipos:  
Tecnología inmadura  
y carísima

Temperatura y densidad ↑

### 3.3.- Energía nuclear – Fusión

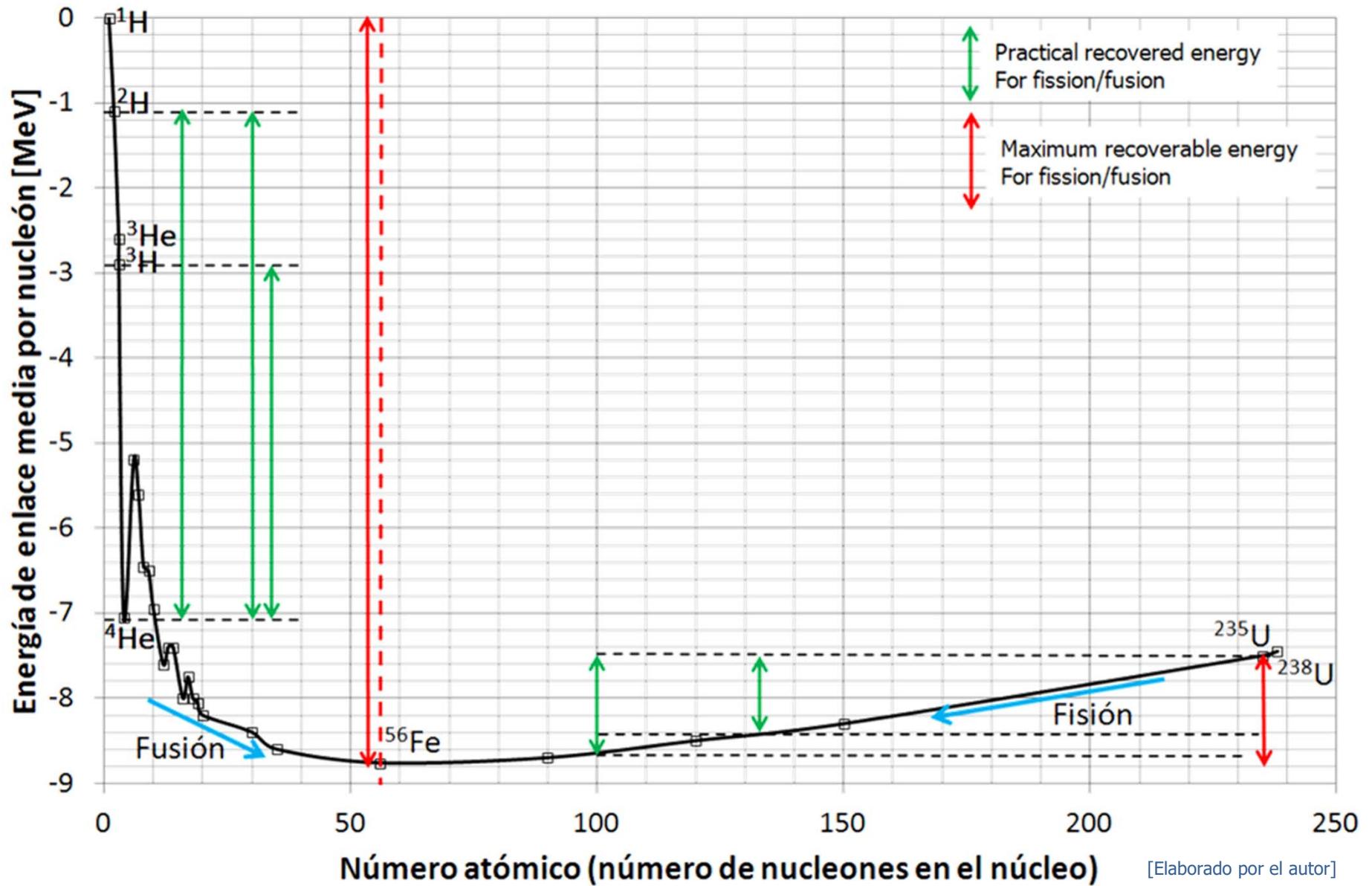
#### Ventajas:

- combustible virtualmente inagotable (agua pesada) o fabricable (se dispone de la tecnología desde el final de la segunda guerra mundial).
- Residuos mayoritariamente no radioactivos e inertes, además de no contaminantes ( $^4\text{He}$ ).
- $\sim$  teóricamente 0 emisiones directas de  $\text{CO}_2$  en operación. Pero en la realidad pudiera usarse energía fósil inicialmente.

#### Desventajas:

- Tecnología inmadura (faltan al menos 50 años)
- Costes de creación muy altos.

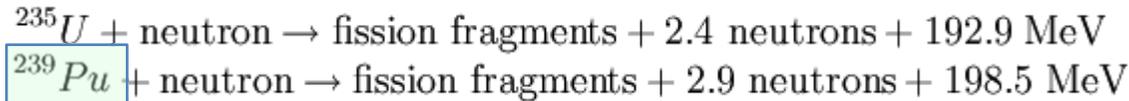
### 3.3.- Energía nuclear – Fisión (*ex cursus*)



[Elaborado por el autor]

### 3.3.- Energía nuclear – Fisión

No hay que vencer la fuerza electrostática repulsiva de los núcleos si se bombardea con neutrones (sin carga eléctrica) un átomo inestable



!3-4 veces menos que la fusión  
Por unidad de masa!  
-> A demostrar como  
ejercicio propuesto

→ Artificial: no existe en la Tierra de forma natural

**Material**, o "combustible", **fisible**\*: que permite lograr la fisión, recuperando energía útil de ella: p. e.  ${}^{235}\text{U}$ ,  ${}^{239}\text{Pu}$ ,  ${}^{233}\text{U}$

\*Fisible: para lograr la fisión es necesario que la probabilidad (sección eficaz) de absorción del proyectil (generalmente un neutrón) en el núcleo sea grande, que el núcleo resultante sea altamente inestable, y que se desintegre rápidamente emitiendo más proyectiles (neutrones) que los recibidos. Un requisito adicional para que un material sea fisible es que la reacción sea exotérmica.

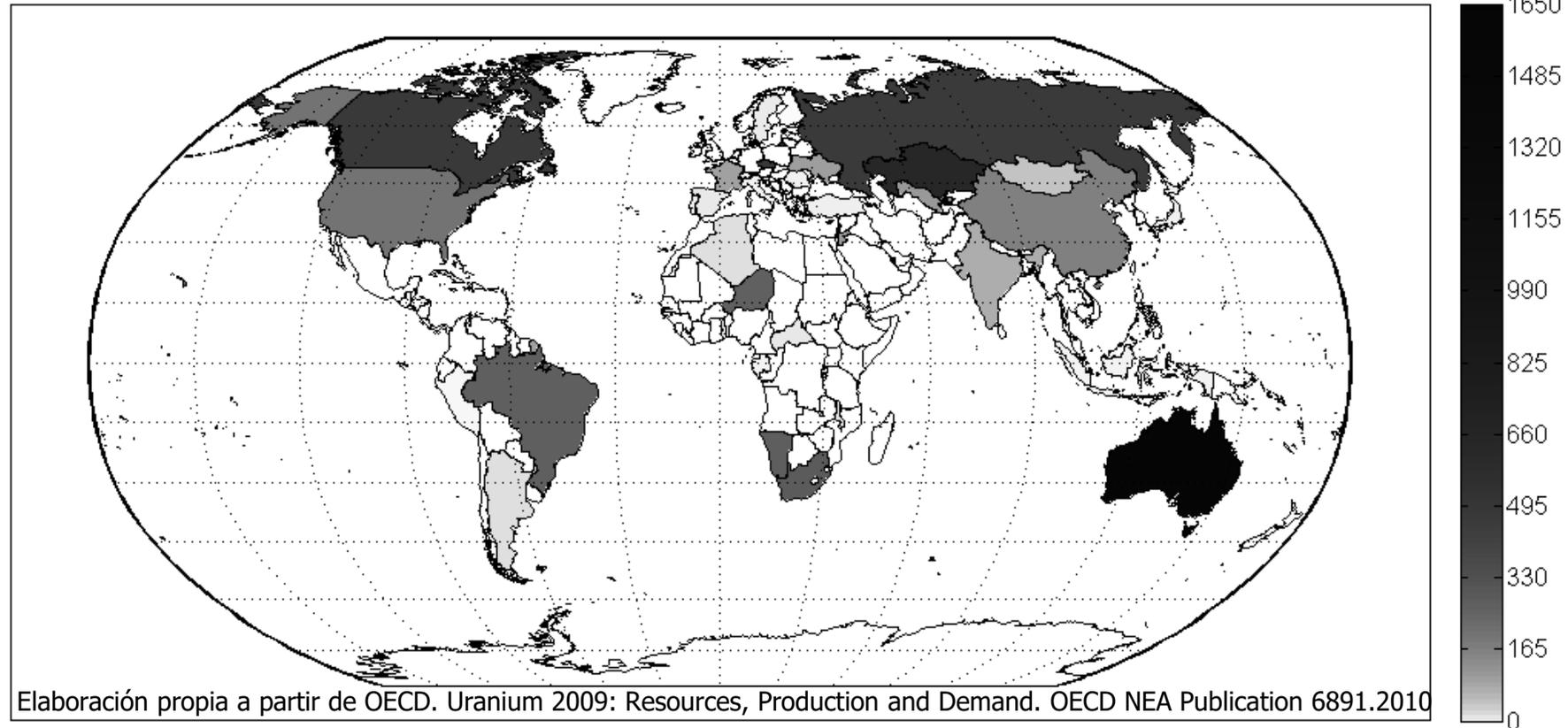
**Material fértil**: que por transmutación, se obtiene un material fisible artificial  
 ${}^{238}\text{U} \rightarrow {}^{239}\text{Pu}$ ,  ${}^{232}\text{Th} \rightarrow {}^{233}\text{U}$

Como cualquier elemento químico (a excepción del H y el He), el uranio procede de las reacciones de fusión termonuclear en el núcleo de las estrellas. Los elementos más pesados que el hierro (que presenta a menor energía de enlace por nucleón), se producen en cantidades apreciables en explosiones de estrellas

${}^{235}\text{U}$  y  ${}^{238}\text{U}$  proceden de la núcleo-síntesis en supernovas hace  $2 \cdot 10^8 - 6 \cdot 10^9$  años

### 3.4.- Energía nuclear – Reservas de Uranio

World reserves of recoverable Uranium, regardless of isotope [ $10^6$  kg]



- Mal reparto mundial: 7 países poseen el 75% de las reservas mundiales probadas. Australia (23%), Kazajistán (15%), Rusia (10%), Sudáfrica (8%), Canadá (8%, mineral muy concentrado), EEUU (6%), Brasil (5%)
- Reservas mundiales probadas (2017):  $\sim 6 \cdot 10^6$  Tm ([reference](#))

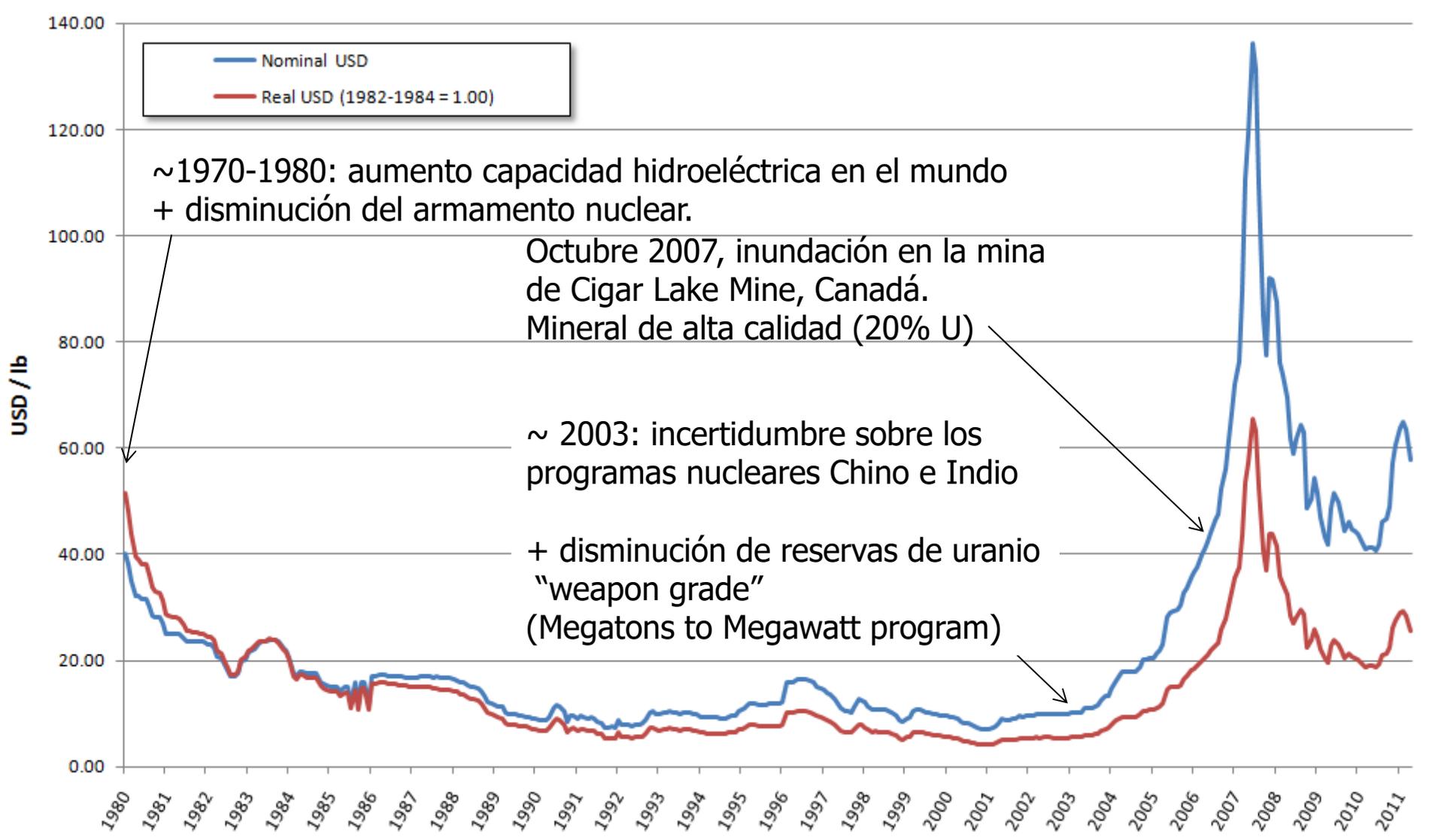
### 3.4.- Energía nuclear – Reservas de Uranio (Tabla 2.1)

Fuente	Reservas probadas <i>R</i> (EJ)	Producción actual <i>P</i> (EJ)	Reservas/producción <i>R/P</i> (años)
Carbón	20.000	139	144
Crudo convencional	8.100±20%	173	47±20%
Gas natural	8.100-10.000	108	75-93
Uranio (fisión 1 paso)	2.000 – 7.000 *	29	69 -241
Deuterio+Tritio (fusión)	$6 \times 10^6$	0	$\infty$
Deuterio+Deuterio (fusión)	$6 \times 10^9$	0	$\infty$
Total	---	449	

**Actividad propuesta 3.1:** realizar una rápida estimación de la energía extraíble de las reservas probadas.

- Las reservas de uranio son inciertas y dependen del precio del producto, el cual influye poco en el precio final de la electricidad nuclear, por lo que puede encarecerse mucho, permitiendo extraer de minerales menos concentrados.

### 3.4.- Energía nuclear – Precio del Uranio (U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>)



Fuente: MonthlyUraniumSpot.png, CC BY-SA 3.0, <http://en.wikipedia.org/wiki/File:MonthlyUraniumSpot.png> accedido el 03/12/2019

### 3.4.- Energía nuclear – Enriquecimiento ¡Es el $^{235}\text{U}$ el útil!

Proceso	Para un reactor típico de 1.000 MW <sub>e</sub> 1 año
<b>Minería</b>	20.000 Tm con 1% de mineral de uranio ( $\text{UO}_2$ y $\text{U}_3\text{O}_5$ )
<b>Molienda</b>	230 Tm de óxidos de uranio concentrado (195 Tm U) (U = <b>0,7% <math>^{235}\text{U}</math></b> + 99,3% $^{238}\text{U}$ ) → “Yellow Cake”
<b>Conversión</b>	288 Tm $\text{UF}_6$ que es líquido (195 Tm U)
<b>Enriquecimiento</b> (el resto de $^{238}\text{U}$ no sirve)	35 Tm $\text{UF}_6$ (24 Tm U enriquecido) - (LEU ~ <b>2-5% <math>^{235}\text{U}</math></b> + 98-95% $^{238}\text{U}$ ) LEU: “Low Enriched Uranium” = Uranio enriquecido
<b>Fabricación del combustible</b>	27 Tm en pastillas de $\text{UO}_2$ (24 Tm U enriquecido)
<b>Operación en Reactor</b>	<b>7 TWh de electricidad/año</b>
<b>Combustible usado</b>	27 Tm conteniendo: 240 kg Pu (239-241); 720 kg productos de fisión (con transuránicos como Pu y Np); y 23 Tm U (0,8% $^{235}\text{U}$ )

Muchos países dependen mayoritariamente de las explotaciones comerciales de enriquecimiento en EEUU, Reino Unido, Francia, Alemania, Países Bajos, y Rusia, por tener una capacidad de enriquecimiento propia muy limitada.

### 3.5.- Energía nuclear – Usos y aplicaciones (*ex cursus*)

#### Tecnología de centrales de generación eléctrica

- General Electric en EE.UU.
- Westinghouse en EE.UU.
- Areva en Francia
- Siemens y KWU en Alemania
- Nuclear Electric en Reino Unido
- ABB en Suecia
- Toshiba, Kansai Electric e Hitachi en Japón



#### Propulsión de naves militares

- Submarinos
- Portaviones

#### Armamento nuclear

- Bombas (“weapon grade” Uranium & Plutonium)
- Munición anti-blindaje (DU – Depleted Uranium)

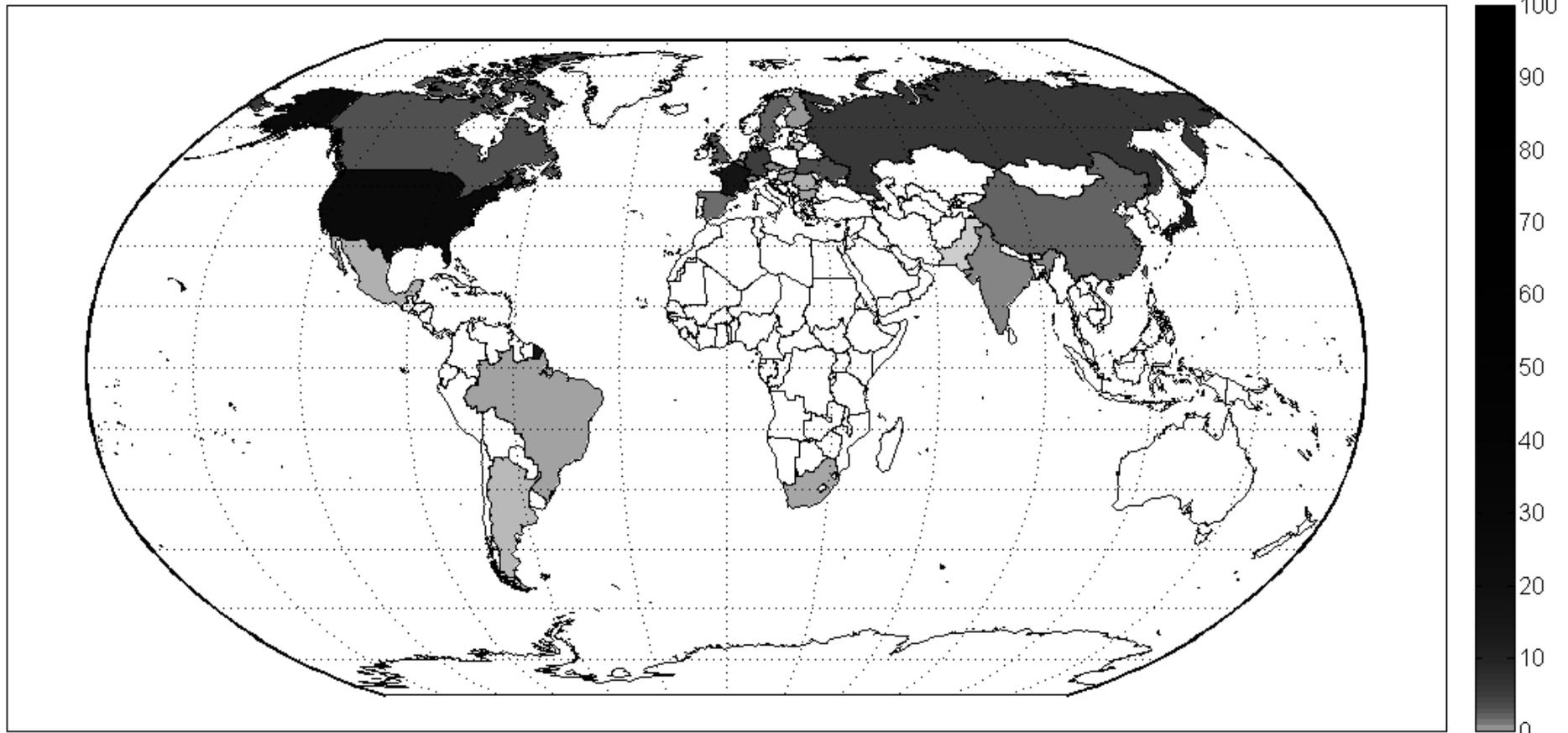
#### Aplicaciones medicas

- Más que energía, se suele usar las propiedades radioactivas de ciertos isótopos como marcador

Central Nuclear de Cofrentes, Valencia. Foro Nuclear, CC BY-NC-SA 2.0. <https://flic.kr/p/2iv52sA>

### 3.5.- Energía nuclear – Potencia instalada en el mundo (*ex cursus*)

World installed nuclear capacity (electricity) [GW]



Elaboración propia a partir de datos de la CIA: The World Factbook 2011. Washington, DC: Central Intelligence Agency, 2011. Dominio público. <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/index.html>

### 3.5.- Energía nuclear – Potencia instalada en el mundo (*ex cursus salvo España*)

1 Reactor para producción eléctrica ~ 1 GWe = 1.000 MWe

Según diversas fuentes:

- En el mundo hay unas 400 centrales nucleares operativas.
- Unas 60 se encuentran en fase de construcción.
- Francia es el país con mayor dependencia nuclear en la generación eléctrica.
- EEUU es el país que más centrales dispone:

Estados Unidos (104)

Francia (58)

Japón (50)

Rusia (32)

Corea del Sur (21)

India (20)

Reino Unido (19)

Canadá (18)

Alemania (17)

Ucrania (15)

**España: (7 reac.+1)**

**Almaraz I.** Situada en Almaraz (Cáceres).

**Almaraz II.** Situada al lado de Almaraz I (Cáceres).

**Ascó I.** Situada en Ascó (Tarragona).

**Ascó II.** Situada al lado de Ascó I (Tarragona).

**Cofrentes.** Situada en Valencia.

**Santa María de Garoña.** Situada en Burgos. Ya cerrada

**Trillo.** Situada en Guadalajara.

**Vandellós II.** Situada en Tarragona.

### 3.7.- Energía nuclear – Situación española: (*ex cursus la localización*)



Dato relevante: 7,7 GW<sub>e</sub> instalados. 5 centrales con 7 reactores Elaboración propia.

### 3.6.- Energía nuclear – Tecnología, importante.

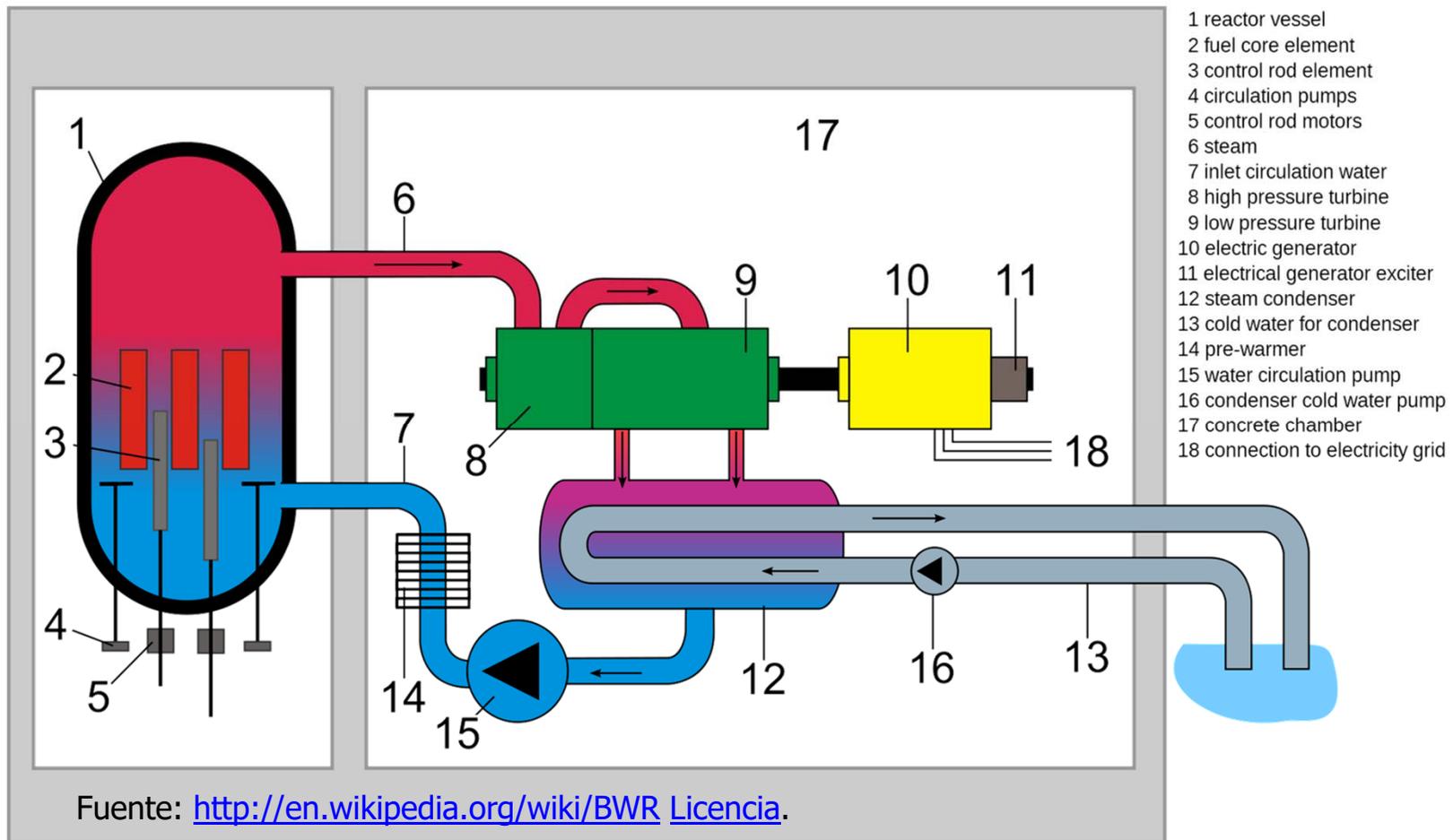
#### Elementos principales de un reactor nuclear:

- **Combustible:** Usualmente pastillas de  $UO_2$  apiladas en el interior de tubos que constituyen el núcleo del reactor (barras de combustible).
- **Moderador:** Material que decelera los neutrones liberados en la fisión, convirtiéndolos en neutrones térmicos (lentos, o de baja energía) aumentando así la probabilidad de ocasionar una nueva reacción de fisión (sección eficaz). A pesar de su nombre, el moderador incrementa la actividad del reactor. Se usa: agua, agua pesada o grafito.
- **Barras de control:** Construidas con un material que absorbe neutrones (cadmio, circonio o boro), con el fin de disminuir su actividad. Regulador principal de la carga del reactor.
- **Refrigerante:** Fluido que circula por el reactor y traslada la potencia térmica producida en la reacción nuclear al ciclo de potencia. (Agua, agua pesada, gases, o metales líquidos)
- **Recinto presurizado:** Vasija que contienen el núcleo del reactor y el moderador. Si está constituido por tubos, en ellos se contiene el combustible, pasando el refrigerante a través del moderador, que se sitúa fuera de los mismos.
- **Generador de vapor:** Elemento del sistema de refrigeración encargado de producir vapor para el ciclo de potencia.
- **Contención:** Estructura de hormigón y acero que aísla el núcleo del Reactor de el exterior. Permite contener escapes del reactor (principalmente vapor de agua).
- **Edificio de combustible:** Aloja la piscina para almacenamiento temporal de combustible nuevo y usado.
- **Edificio de turbinas. Edificio de control.** Otros.

### 3.6.- Energía nuclear – Tecnología

Light Water Reactors (LWR, que incluyen BWR y PWR) reactores que usan agua común.

- **BWR** - Boiling Water Reactor (**U** enriquecido (**LEU**) – moderador agua): el agua que hierve en el reactor ( $\sim 70$  bar;  $\sim 280$  °C) saturada, se turbin. **Rendimiento  $\sim 30-33\%$**

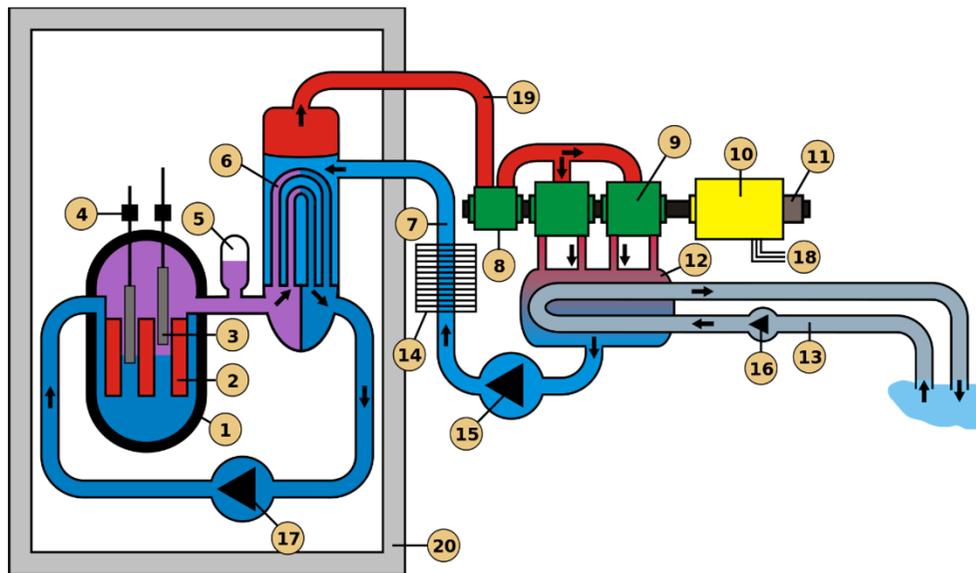


**1/3 a nivel mundial**

### 3.6.- Energía nuclear – Tecnología

PWR – Pressurized Water Reactor (**U enriquecido (LEU)** – moderador agua)

Reactores de agua presurizada (~ 140 bar) en estado líquido. El agua presurizada del reactor (para evitar su ebullición) calienta el agua de la turbinas(saturada) en un generador de vapor. Presenta la ventaja de que el agua del reactor no sale del edificio de contención, limitando las posibilidades de contaminación. **Rendimiento ~ 30-33%.**



**2/3 a nivel mundial**

Fuente: KKW mit DWR.png, CC BY-SA 3.0, [Wikipedia](https://es.wikipedia.org/wiki/Reactor_de_agua_presurizada)

Otro: [http://en.wikipedia.org/wiki/Pressurized\\_water\\_reactor](http://en.wikipedia.org/wiki/Pressurized_water_reactor). [Dominio público](https://es.wikipedia.org/wiki/Dominio_p%C3%BAblico)

### 3.6.- Energía nuclear – Tecnología (*ex cursus*)

Reactores Rápidos Reproductores (FBR – Fast Breeder Reactor) o “súper generadores o reproductores rápidos”

- Refrigerados por metales líquidos (plomo o sodio) o gases (helio o CO<sub>2</sub> a alta presión - supercríticos)
- No tienen moderador → neutrones rápidos
- Transmutación de <sup>238</sup>U en <sup>239</sup>Pu al absorber neutrones rápidos (ireproducción de material fisible a partir de un material fértil!)
- +Posibilidad de usar <sup>232</sup>Th→<sup>233</sup>U fisible
- Generan menos elementos transuránicos (actínidos)
- Tras tratamiento de los residuos, obtención de nuevo material fisible (de ahí la denominación de “súper generadores”)
- <sup>235</sup>U y <sup>239</sup>Pu son los materiales fisibles de estos reactores
- Ofrecen altos **rendimientos hasta ~ 44 %**
- Orientados también a la producción de <sup>239</sup>Pu para aplicaciones militares (en desuso tras moratoria nuclear internacional por el riesgo de su uso)

### 3.7.- Energía nuclear – Situación española

7 en explotación de 8 centrales, 6 desde la década de los 80. Potencia instalada ~ 1.000 MW<sub>e</sub>, la mayoría de tipo PWR (reactores de agua presurizada). La primera, Garoña, de tipo BWR se encuentra actualmente en desmantelamiento. **En España, la energía nuclear representa un 20% de la generación eléctrica.**

La vida útil de una central es de 40 años (ampliable en unos casos a 50-60 años)

Tabla (*ex cursus*)

Central (provincia)	Potencia instalada (MWe)	Tipo de reactor (suministrador )	Estado actual	Titular
Santa María de Garoña (Burgos)	466	BWR (General Electric)	En explotación comercial desde 1971	Nuclenor
Almaraz I (Cáceres)	1.035	PWR (Westinghouse)	En explotación comercial desde 1981	Iberdrola 53% Endesa 36% Gas Natural/Fenosa 11%
Almaraz II (Cáceres)	1.044	PWR (Westinghouse)	En explotación comercial desde 1983	Iberdrola 53% Endesa 36% Gas Natural/Fenosa 11%
Ascó I (Tarragona)	1.032	PWR (Westinghouse)	En explotación comercial desde 1984	Endesa 100%
Ascó II (Tarragona)	1.027	PWR (Westinghouse)	En explotación comercial desde 1986	Endesa 85% Iberdrola 15%
Cofrentes (Valencia)	1.092	BWR (General Electric)	En explotación comercial desde 1985	Iberdrola 100%
Trillo I (Guadalajara)	1.066	PWR (Siemens-KWU)	En explotación comercial desde 1988	Gas Natural/Fenosa 34.5% Iberdrola 48% HCEnergía 15.5% Nuclenor 2%
Vandellós II (Tarragona)	1.087	PWR (Westinghouse)	En explotación comercial desde 1988	Endesa 72% Iberdrola 28%

### 3.7.- Energía nuclear – Situación española

COMPARACIÓN DE COSTES INTERNOS DE GENERACIÓN POR TECNOLOGÍAS					
	Capital de inversión	Operación y mantenimiento	Combustible	Total (\$/MWh)	Emisiones directas CO <sub>2</sub>
<b>Nuclear</b>	~ 60 %	~ 30 %	~ 12 %	<b>23,7</b>	NO
<b>Gas</b> (Ciclo Combinado)	~ 17 %	~ 11 %	~ 72 %	<b>31,2</b>	SÍ
<b>Carbón</b>	~ 23 %	~ 22 %	~ 54 %	<b>32,9</b>	SÍ
<b>Biomasa</b>	~ 28 %	~ 18 %	~ 55 %	<b>46,8</b>	SÍ
<b>Eólica</b>	~ 80 %	~ 20 %	0 %	<b>50,1</b>	NO

Considerando 8.000 horas anuales de operación (~2.200 para la eólica). Tasa de descuento de un 5 % y precios del gas del año 2003, aunque los datos siguen válidos, dentro de grandes oscilaciones. Solo se consideran costes internos.  
 Fuente: R. Tarjanne & K. Luostarinen (2004). Lappeeranta University of Tecnology. Finlandia.

- Los **costes internos** de la electricidad nuclear son relativamente bajos comparado a otras tecnologías. En la tabla, no se tienen en cuenta las **externalidades** (costes no repercutidos en el balance económico, como subvenciones, subsidios e impuestos), y gestión de residuos, que pueden llegar a duplicar o triplicar el precio nuclear indicado.
- Adicionalmente, la energía nuclear requiere de una infraestructura muy compleja y costosa (tratamiento de residuos y manipulación del combustible nuevo y usado), así como de un desarrollo tecnológico importante. De no tener acceso a ellos, se contratan a otros países.

### 3.7.- Energía nuclear – Situación española (*ex cursus*)

- A los costes de la producción de la energía para la electricidad es necesario añadir **otros costes** (incentivos a las renovables, sistemas extra-peninsulares, déficit de tarifa, transporte y distribución, etc.) e impuestos, que hacen que el precio del suministro hasta se duplique aproximadamente.
- Hay distintos precios, según tarifas. En general es menor para empresas que para domicilios.
- En general, los precios en España son más altos que la media en Europa.

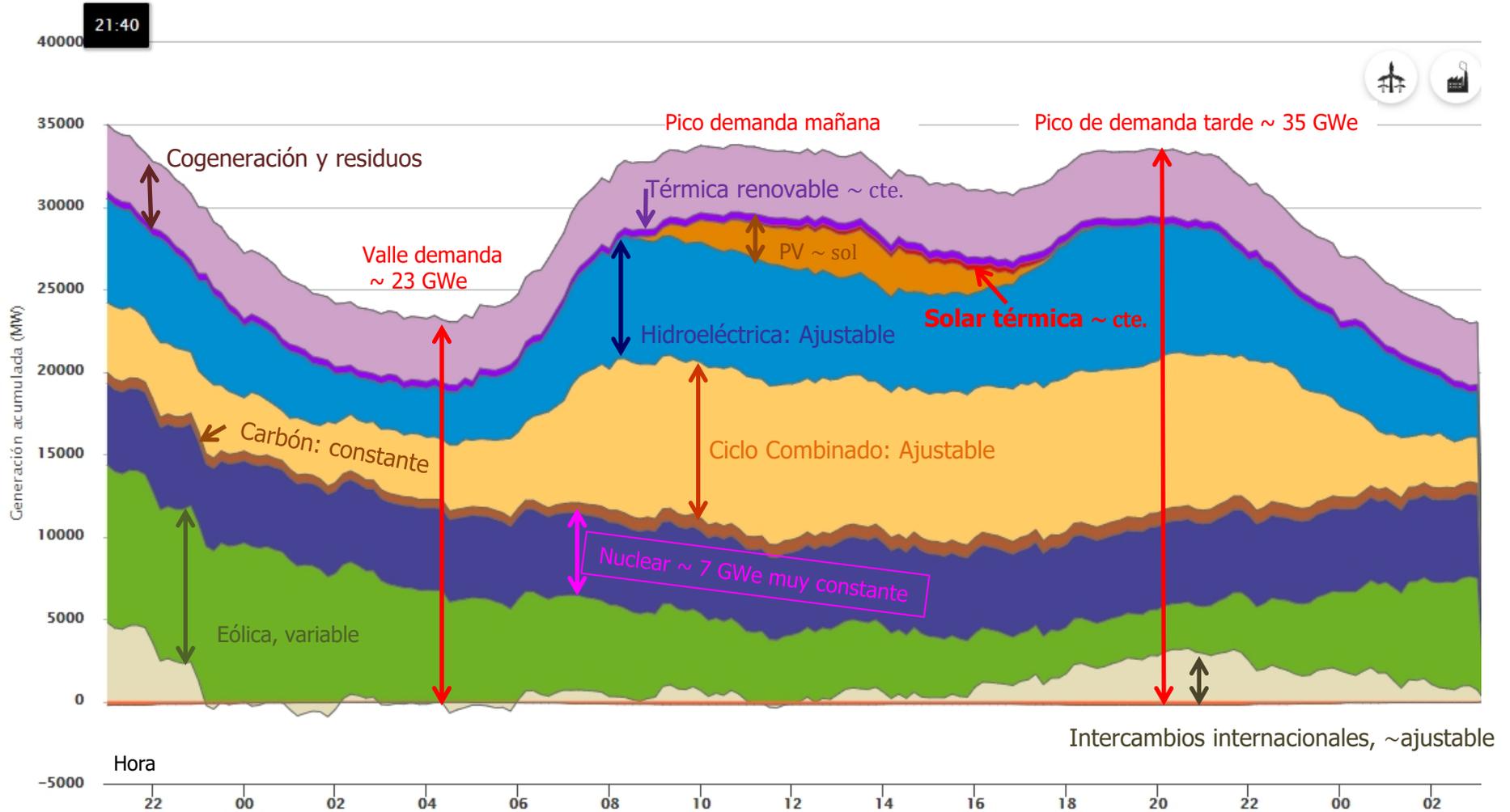


Fuente: [Eurostat](http://Eurostat). Accedido el 03/12/2019

### 3.7.- Energía nuclear – Situación española (*ex cursus*)

- En Francia, en parte por su estructura de generación (80% nuclear) y consumo, el acceso a la electricidad es un 40 % más barato que en España.
- Buena parte de esta diferencia se debe también al denominado déficit tarifario: la política española fue puntualmente contener la subida de la tarifa de la electricidad a los contribuyentes, pagando el estado la diferencia de coste entre generación y facturación a las grandes eléctricas del país, endeudándose. Actualmente, en torno al 10% de la factura consiste en pago de dicha deuda y sus intereses, perteneciendo a grandes grupos bancarios.
- Otra parte significativa de dicha diferencia se debe a las subvenciones a las renovables y régimen especial (+ayudas al carbón).
- España, como los demás países, tiene una demanda eléctrica variable en el tiempo (variación diaria y estacional), y la generación ha de ajustarse a la demanda.
- **La energía nuclear solo genera en base**, es decir de manera continua, sin variar su carga a lo largo del tiempo (salvo operaciones de recarga y mantenimiento programadas). A 2019 el gobierno plantea dejar 3 centrales nucleares en 2031, [referencia](#).

### 3.7.- Energía nuclear – Situación española



Estructura de la generación eléctrica a lo largo de un día de otoño. En la Fuente, puede visualizarse cualquier día.

Fuente: © RED ELÉCTRICA DE ESPAÑA - www.ree.es · Todos los derechos reservados [Uso autorizado para este curso]. Accedido 03/12/2019

## 3.7.- Energía nuclear – Conclusiones

### Ventajas frente al uso de los combustibles fósiles

- ☺ 0 emisiones de CO<sub>2</sub> en operación, directas. Bajas emisiones indirectas.
- ☺ Aparentemente (quitando externalidades) el precio de producción por MWh es el menor ( $\cong$  3 cents€/kWh).
- ☺ Se reduce la dependencia de los países productores de petróleo.
- ☺ El coste de la electricidad depende muy poco del precio del combustible (representa en torno a un 10% del coste de producción).

### Inconvenientes

- ☹ Posibilidades de accidente (probabilidad muy baja).
- ☹ Residuos radiactivos de alta, media y baja actividad: En torno a la mitad de los residuos radiactivos decaen con una vida media de menos de 30 años (en las piscinas de combustible de las centrales). Duración hasta 100.000 años para los de baja actividad. No existen actualmente almacenamientos permanentes.
- ☹ Posibilidad de usos terroristas (sobre todo <sup>239</sup>Pu).
- ☹ Alto tiempo y coste de construcción de las centrales (20 años).
- ☹ Tiempo de vida de las centrales: 40 años → 60 ???
- ☹ Rendimiento de las centrales bajo  $\sim$  30% por limitarse la temperatura máxima → presión máxima.
- ☹ Necesidad de instalar al menos 10 GW<sub>e</sub> nucleares para sustentar los costes de la infraestructura nacional necesaria.
- ☹ **Generación en base** exclusivamente.

### 3.7.- Energía nuclear – Perspectivas. El ciclo del combustible (*ex cursus*)

El ciclo de combustible se refiere a todas las actividades que intervienen en la producción de energía nuclear: minería, enriquecimiento, fabricación del combustible, producción de energía, tratamiento y almacenamiento de residuos y desmantelamiento de la instalación.

- ❖ **Ciclo de combustible abierto:** El combustible gastado en una central se trata y finalmente almacena definitivamente en asentamientos geológicos profundos.
- ❖ **Ciclo de combustible cerrado:** Una vez el combustible es “quemado” en un reactor, se separa el material fisionable no gastado para volverlo a introducir en reactores, obteniéndose un aprovechamiento mayor del uranio.
  - ❖ La viabilidad económica de los ciclos cerrados depende del precio del combustible. Presenta como inconvenientes: gran complejidad tecnológica e inversión económica muy alta. Existe riesgo elevado de proliferación de armamento nuclear.
  - ❖ Una opción de ciclo cerrado consiste en que el combustible gastado procedente de un reactor sea reprocesado, obteniendo uranio y plutonio aptos para la fabricación de combustible MOX, que pueda ser introducido nuevamente en un reactor.
  - ❖ Otra opción pasaría por los reactores reproductores (breeder). Estos reactores permitirían a partir de combustible gastado, generar por absorción de neutrones más material fisible del que se consume. En estos ciclos de combustible se obtendrían menos actínidos, reduciendo los residuos de larga duración. Actualmente en desarrollo.

## 3.7.- Energía nuclear – Perspectivas. El ciclo del combustible (*ex cursus*)

### Ciclo abierto avanzado

#### ❖ Condicionantes:

- Bajo precio del combustible.
- Resistencia al riesgo de proliferación nuclear.

#### ❖ Características:

- Desarrollo de reactores HTGR (*High Temperature Gas cooled Reactors*).
- Temperatura de operación  $\approx 900^{\circ}\text{C}$  permitiendo rendimientos del orden del 45% frente al 33% de los LWR actualmente existentes.
- Utilizan el helio como refrigerante y como impulsor de la turbina [Brayton](#).
- Se están desarrollando 2 modelos de reactor HTGR.

## 3.7.- Energía nuclear – Perspectivas. El ciclo del combustible (*ex cursus*)

### Ciclo cerrado simple. Opción MOX

#### ❖ Condicionantes:

- Precio del combustible medio/alto
- Sin resistencia socio-política al riesgo de proliferación de armamento nuclear

#### ❖ Características:

- Uso de reactores reproductores.
- Reciclado del combustible mediante la separación de elementos reutilizables (U, Pu) del combustible gastado para crear MOX (combustible de Óxidos Mixtos).
- El tratamiento del combustible gastado se realiza en instalaciones PUREX: *Plutonium and Uranium Recovery by Extraction*.
- Supone reducción moderada del consumo de uranio.
- Alto riesgo de proliferación nuclear.

## Cuestiones de autoevaluación (nuclear)

España dispone de almacenamientos permanentes de residuos radio-activos	NO
Tanto la fisión como la fusión nuclear aprovechan las diferencias de energía de enlace nuclear.	SI
En una central nuclear, el moderador tiene la función de aminorar la reacción de fisión	NO
Una vez detenido la reacción de fisión en un reactor nuclear, éste deja de generar calor por completo	NO
La mayoría de reservas de uranio se encuentran en Canadá, Australia y Sur África	SI
Por unidad de energía, el precio del Uranio es mucho menor que el del petróleo	SI
1 g de Uranio 235 equivale a casi dos toneladas de petróleo en términos de energía	SI
El isotopo fisible del uranio es el 238, al ser menos estable que el 235	NO
La mayoría de los países “nucleares” tienen capacidad suficiente de enriquecimiento para abastecer todas sus centrales	NO
En España, se podría duplicar la potencia nuclear instalada prescindiendo de los ciclos combinados	NO
Todas las centrales necesitan uranio enriquecido para su funcionamiento	NO
El precio del Uranio es muy estable, sobre todo en los últimos 20 años	NO
El uranio es la única opción para la fisión nuclear	NO

## Cuestiones de autoevaluación (nuclear)

Todos los reactores de centrales nucleares están refrigerados por agua	NO
El ratio reservas/producción anual de uranio es más elevado que el del petróleo	SI
La energía nuclear basada en el ciclo abierto del uranio se puede considerar una fuente de energía renovable	NO
La energía nuclear basada en la fusión del deuterio se puede considerar como una fuente de energía renovable por la inmensidad de las reservas	SI
El precio de la electricidad para el usuario final en España es de los más baratos de Europa	NO
El coste interno de generación de electricidad nuclear es de los más bajos, explicando parcialmente el bajo precio de la electricidad en Francia, por ejemplo	SI
En España, la energía nuclear, con igual tecnología, podría cubrir el 80% de la demanda	NO
En España, la producción de electricidad nuclear representa cerca del 20% del total	SI
La generación de electricidad de origen nuclear es muy adaptable a variaciones bruscas de demanda y/o producción, y por esa razón se emplea para suplir a picos de demanda	NO
La fusión nuclear es una fuente de energía muy prometedora y muy atractiva cara a emisiones de CO <sub>2</sub> y/o residuos nucleares	SI
La energía nuclear es de las más “limpias” en cuanto a emisiones de gases de efecto invernadero	SI
Los costes de operación y mantenimiento son muy elevados en comparación a otras fuentes de energía	SI
Los costes de inversión no son tan elevados en comparaciones a otras fuentes de energía	NO

## Cuestiones de autoevaluación (nuclear)

Una de las desventajas de la energía nuclear es el tiempo de construcción de una central	SI
Es muy improbable que ocurra un accidente nuclear (menos que en una central térmica convencional)	SI
Los residuos nucleares más longevos tienen una semi-vida del orden de 1.000 años	NO
El rendimiento de las centrales nucleares actuales es bajo en comparación con otras tecnologías basadas en recursos no renovables convencionales.	SI
La línea de actuación futura para la energía nuclear consiste en mejorar la eficiencia energética de los ciclos, dado que la seguridad está lograda suficientemente.	NO
El aumento del precio del combustible nuclear en los últimos años ha tenido una repercusión importante en los costes de generación, y por ello muchos países han tomado la decisión de cerrar centrales nucleares	NO
La vida útil de una central nuclear se sitúa en unos 80-100 años	NO
La potencia nominal unitaria de las centrales nucleares españolas se sitúa en unos 1.000 MW <sub>e</sub>	SI
Las centrales nucleares españolas están orientadas a la producción de plutonio para producción de combustible MOx	NO
El coste de procesado, almacenamiento temporal y almacenamiento definitivo son difíciles de evaluar, pero en cualquier caso son poco significativos en el coste final real del combustible nuclear	NO
La inmensa mayoría de la potencia nuclear instalada en el mundo es para generación de electricidad, y no para usos militares (propulsión de embarcaciones tipo submarino o porta-aviones)	SI
La producción de electricidad nuclear mundial es del mismo orden que el de los combustibles fósiles	NO
El uranio 238, al igual que el torio 232, es un isótopo fértil	SI

## Fuentes de Energía, Energía Nuclear

**Actividad 3.2** : Calcular el equivalente Tep de 1 kg de  $^{235}\text{U}$ , de 1 kg de LEU al 3.6%.

$$1 \text{ kg } ^{235}\text{U} = 1890 \text{ tep} \qquad 1 \text{ kg LEU}(3.6\%) = 68 \text{ tep}$$

Coste en USD de la tep de LEU 3,5 €/tep (40€/kg  $\text{U}_3\text{O}_8$ ) frente a la de petróleo 503 €/tep (65\$/barrel en 2019 y 812 kg/m<sup>3</sup>). A la luz de los resultados, el coste del Uranio es significativo en el coste de la electricidad nuclear? NO

Cuanta energía nuclear podría instalarse en total en España (en  $\text{GW}_e$ )? En torno a 15 GW (correspondiendo al valle de demanda = base = potencial instalada de carbón + nuclear actual)

Se puede considerar la energía nuclear con ciclo cerrado del combustible una energía renovable? No, por la finitud de las reservas,

Estimar el coste de inversión para la construcción de una central de 1.000  $\text{MW}_e$ , suponiendo que representa el 60 % del coste de la electricidad ( $\sim 25$  €/MWh) y que la central está generando durante 40 años con un promedio de 80% de carga. 4200 M€

# Fuentes de Energía, Energía Nuclear

## Actividad 3.3:

Realizar una rápida comparativa entre la energía nuclear y fuentes de energía renovables a partir de los costes de inversión (construcción) proporcionados a continuación:

	Costes construcción (en millones de € por GW <sub>e</sub> instalado)	Horas útiles de funcionamiento (horas/año)	Costes de construcción (millones de € por GW <sub>e</sub> <u>producido</u> )
Nuclear	~4.000	7.400	
Eólica	800 a 1.500	~ 2.000	
Fotovoltaica	500	~ 1.600	

Cálculos: