

# ENERGÍAS ALTERNATIVAS Y SU PAPEL EN EL FUTURO ENERGÉTICO DE LA UNIÓN EUROPEA

POR GUILLERMO VELARDE PINACHO\*

## Introducción

Actualmente, la dependencia exterior (consumo menos producción nacional) de las energías fósiles (petróleo, gas y carbón) es del 80% en España y Portugal del 55% en la Unión Europea y de un 25% en Estados Unidos. Esta gran dependencia exterior de los combustibles fósiles en España y Portugal, además de tener una gran inseguridad en su suministro y a la oscilación de sus precios al alza, tienen el inconveniente de emitir grandes cantidades de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), según se indica en el cuadro 1, p. 96.

---

\* General de división del Ejército del Aire; catedrático de Física Nuclear; fundador y presidente del Instituto de Fusión Nuclear de la Universidad Politécnica de Madrid y académico de la *European Academy of Sciences*. Del año 1957 a 1963 estudió Ingeniería y Ciencia Nuclear (Pennsylvania State University y Argonne National Laboratory), trabajando posteriormente en *Atomics International* (Estados Unidos). Fue director de la División de Tecnología de la Junta de Energía Nuclear (JEN), hoy Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT). Es autor de siete libros, entre ellos, *Mecánica Cuántica*, editorial MacGraw Hill, 2002, co-editado seis y publicado 354 trabajos de investigación. En el año 1997 se le concedió el premio *Edward Teller International Award* a la investigación sobre fusión por confinamiento inercial y en el año 1998 el *Archie A. Harms Prize* por el desarrollo de sistemas emergentes de energía nuclear. Desde el año 1998 a 2007 ha sido presidente del Comité de Coordinación de la Unión Europea para la energía de fusión inercial.

**Cuadro 1.**– Emisiones de CO<sub>2</sub> durante la operación y en el resto del ciclo.

Fuente energética	Generado en operación	Generado en resto ciclo	Total gramo kilovatios hora
Carbón 600 megavatios	892	111	1.003
Fue-oil	839	149	988
Turbina gas	844	68	912
Diesel	726	169	895
Bombeo hidráulico	17	5	132
Fotovoltaica	0	97	97
Hidroeléctrico	0	5	5
Energía nuclear	0	5	5
Generador eólico	0	3	3

Referencia EDF (cálculo según normas ISO 14040, A. de la Torre, revisión SNE, octubre de 2006.

Dentro del Convenio-Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático se ha firmado el Protocolo de Kioto en el que se establecen unas limitaciones a las emisiones de gases de efecto invernadero.

El Protocolo de Kioto, firmado en el año 2002 por la Unión Europea y ratificado por España el 8 de febrero de 2005 establece que los países pertenecientes al anexo primero, «Países industrializados y economías en transición», reduzcan sus emisiones por debajo del volumen del año 1990 en un 5,1%.

La Unión Europea establece una reducción de un 8% para el periodo 2008-2012, con respecto a las emisiones del año 1990.

Debido a la firma de este Protocolo de Kioto y a la dependencia exterior de las energías fósiles en un 80%, España se encuentra en una difícil situación, agravada por el hecho de haber establecido la moratoria nuclear sin la cual nos habría permitido seguir un camino paralelo al de Francia, con un 80% de producción de energía nuclear y al haber apostado, en esta década, por las energías renovables en detrimento de la energía nuclear.

Estas energías renovables tienen un coste del kilovatio hora, que según datos del Ministerio de Industria, para el eólico es el doble que el nuclear y para el solar fotovoltaico es 10 veces el nuclear. Estos elevados costes se han ido compensando a través de elevadas primas, que para el año 2009 fue de cerca de los 6.000 millones de euros.

Las energías alternativas a las de los combustibles fósiles, carbón, gas y derivados del petróleo, son las llamadas energías renovables y la energía nuclear.

Las energías renovables engloban a la energía geotérmica y a una serie de fuentes energéticas que tienen su origen en la radiación solar, bien directamente como la energía solar o indirectamente como la energía eólica, la de las olas y mareas y la de la biomasa. La energía nuclear está constituida por la de fisión nuclear, empleada en las actuales centrales nucleares y la de futura energía de fusión nuclear.

La clasificación anterior es la empleada habitualmente en los medios de comunicación social pero, como es corriente en estos casos, carece de base científica, ya que una clase de energía de fusión nuclear es la de confinamiento gravitacional, en la que los reactores nucleares son las estrellas y en particular el Sol, por lo que las energías renovables, excepto la geotérmica, son casos particulares de la de fusión nuclear por confinamiento gravitacional, según se indicará en el apartado de energía de fusión nuclear de este capítulo.

Todas estas energías alternativas, no emiten gases de efecto invernadero durante su operación, pero generan CO<sub>2</sub> durante el resto del ciclo de fabricación. En el cuadro 1, se especifica las emisiones de CO<sub>2</sub> de las diferentes fuentes de energía, observándose que las energías hidráulica, nuclear y eólica prácticamente no emiten CO<sub>2</sub> durante el ciclo completo; mientras que la fotovoltaica, aunque no emite CO<sub>2</sub> durante la operación, durante el resto del ciclo emite CO<sub>2</sub> en cantidad análoga a la de gas.

### **Planes de Energía Nacional (PEN) y Plan de Energías Renovables (PER)**

Las energías renovables son energías de «generación distribuidas», de pequeña potencia y cuya generación puede estar próxima al centro de consumo. En algunos casos, el consumidor de energía es a la vez el productor de electricidad. La energía nuclear es de «generación masiva», empleando centrales de centenares de megavatios y óptimamente de unos 1.500 megavatios, que requieren costosas líneas de transporte de energía hasta los centros de consumo, con las consiguientes pérdidas de energía durante el transporte.

La Unión Europea, en su intento de controlar el cambio climático, ha propuesto el llamado plan 20-20-20, que consiste en:

- Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 20%, de ahora al año 2020, y en un 60%-80% de ahora al año 2050.
- Que las energías renovables representen el 20% del consumo energético del año 2020.

Dentro de la libertad limitada que la Unión Europea concede a los Estados miembros, «las renovables deberían ser sustituidas por energías alternativas» incluyendo, por tanto, a la energía nuclear.

Con objeto de que Europa tenga una economía próspera y sostenible que la sitúe a la cabeza de las técnicas energéticas limpias, eficientes, seguras y con baja emisión de CO<sub>2</sub> en el ciclo completo, ha establecido el Plan Estratégico Europeo de Tecnologías Energéticas (SET-PLAN), que pretende para el año 2020 (E. Soria, *Monografía* del CESEDEN, número 26):

- Lograr que los biocombustibles de Generación II representen alternativas competitivas a los combustibles fósiles, manteniendo al mismo tiempo la sostenibilidad de su producción.
- Permitir la utilización comercial de tecnologías de captura, transporte y almacenamiento del CO<sub>2</sub>, mediante la demostración a escala industrial.
- Duplicar la capacidad de generación de electricidad de las mayores centrales eólicas y el desarrollo de la energía eólica marina.
- Demostrar la disponibilidad comercial a gran escala de la energía solar fotovoltaica y de la energía solar concentrada.
- Permitir una red eléctrica europea única capaz de incorporar la integración masiva de fuentes de energía renovables y descentralizadas.
- Introducir masivamente en el mercado dispositivos y sistemas eficientes de conversión de la energía para la utilización en los edificios, en los transportes y en la industria.
- Mantener la competitividad de las tecnologías de la fisión nuclear, así como solucionar la gestión de los residuos radiactivos a largo plazo.

Para cumplir los objetivos en el año 2050 se establecen los siguientes retos tecnológicos:

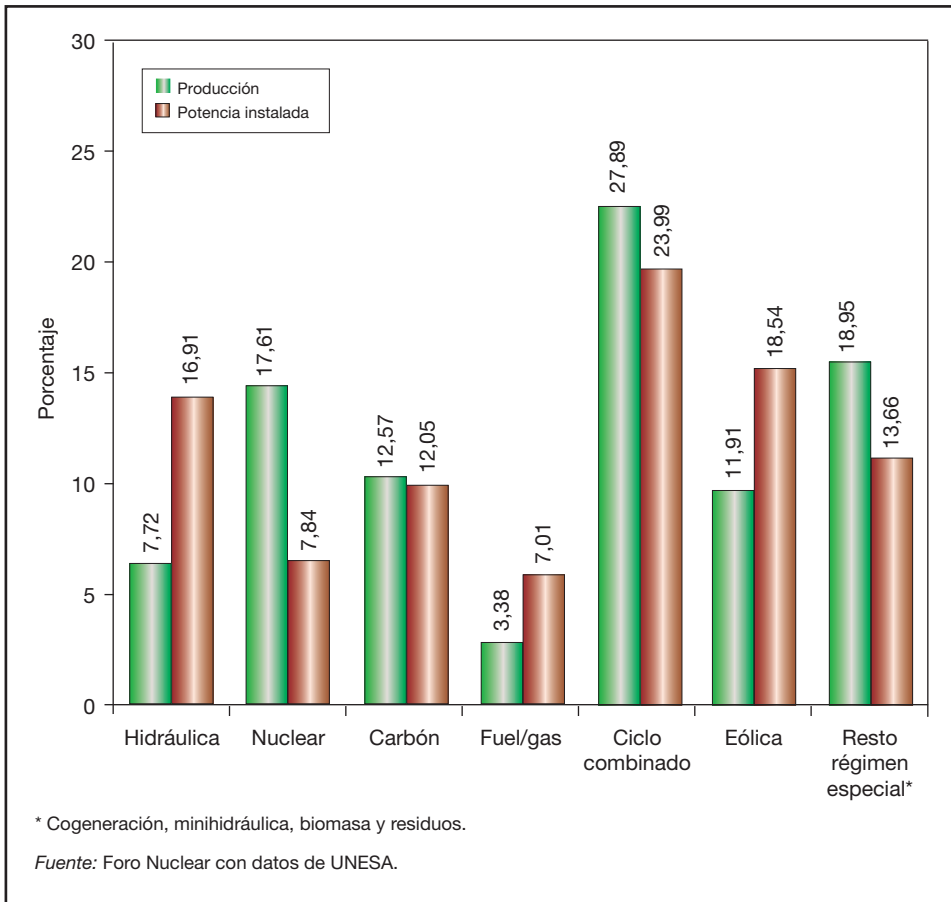
- Que las energías renovables sean económicamente competitivas.
- Que las tecnologías de almacenamiento de energía sean rentables.
- Desarrollar las tecnologías para comercializar vehículos con motor de hidrógeno o pilas de combustible.
- Desarrollar los reactores de fisión nucleares de Generación IV basados en los reactores de alta temperatura y reactores rápidos que pretenden

- reducir costes, la proliferación nuclear y la protección física frente a ataques terroristas.
- Desarrollar la fusión nuclear.
  - Desarrollar redes energéticas transeuropeas y otros sistemas necesarios para disponer en el futuro de una economía con baja emisión de CO<sub>2</sub>.

**Cuadro 2.- PER (2005-2010).**

Indicadores	Situación de objetivo en el año 2010		
	Potencia (megavatios)	Producción (gigavatios hora)	Producción en términos de energía primaria (miles de toneladas equivalentes de petróleo)
<i>Generación de electricidad</i>			
Hidráulica (>50 megavatios)	13.512	25.014	1.979
Hidráulica (entre 10 y 50 megavatios)	3.257	6.480	557
Hidráulica (<10 megavatios)	2.199	6.692	575
Biomásas:			
- Centrales de biomásas	1.317	8.980	3.586
- Cocombustión	722	5.036	1.552
RSU	189	1.223	395
Eólica	20.155	45.511	3.914
Solar fotovoltaica	400	609	52
Biogás	235	1.417	455
Solar termoeléctrica	500	1.298	509
TOTAL ÁREAS ELECTRICAS	42.495	102.259	13.574
<i>Usos térmicos</i>			
Biomásas		(m <sup>2</sup> solar t. Baja T.º)	4.070
Solar térmica de baja temperatura		4.900.805	376
TOTAL ÁREAS TÉRMICAS			4.445
TOTAL BIOCARBURANTES (TRANSPORTE)			2.200
TOTAL ENERGÍAS RENOVABLES			20.129

Fuente: E. Soria (Monografía del CESEDEN, número 26).



**Figura 1.** – Avance estadístico de la industria eléctrica año 2009 y REE: el Sistema Eléctrico Español, Avance del informe año 2009.

En España, se han establecido dos planes energéticos:

- El PEN, de 2002-2011.
- El PER, de 2005-2010.

El PER de 2005-2010 fue establecido en el año 2005 como revisión del anterior Plan de Fomento de las Energías Renovables de 2000-2010. En el cuadro 2, se especifica el PER para el año 2010, último de este PER.

Si se comparan los objetivos del PER en el año 2010 con los del año 2004, dados en del cuadro 3, se observa que las energías hidráulicas y las de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) apenas han variado, mientras que la energía eólica se ha multiplicado por 2,3 y la fotovoltaica por 10,8.

En la figura 1, se indican los porcentajes de la potencia eléctrica instalada y de la energía eléctrica obtenida, en las diferentes clases de energía en el año 2009.

El PER de 2005-2010 se ha extrapolado al año 2016 considerando que la potencia instalada eólica alcanzaría los 29.000 megavatios y la solar los 4.500 megavatios. En los cuadros 4 y 5, pp. 102-103, se han indicado la

**Cuadro 3.**– Energías renovables año 2004.

Energías	Potencia (megavatios)	Producción (gigavatios hora)	Producción en términos de energía primaria (miles de toneladas equivalentes de petróleo)
<i>Generación de electricidad</i>			
Hidráulica (>50 megavatios)	13.512	25.014	1.979
Hidráulica (entre 10 y 50 megavatios)	2.897	5.794	498
Hidráulica (<10 megavatios)	1.749	5.421	466
Biomasas:			
– Centrales de biomasas	344	2.193	680
– Cocombustión	344	2.193	680
RSU	189	1.223	395
Eólica	8.155	19.571	1.683
Solar fotovoltaica	37	56	5
Biogás	141	825	267
Solar termoeléctrica	–	–	–
TOTAL ÁREAS ELÉCTRICAS	27.032	60.96	5.973
<i>Usos térmicos</i>			
Biomasas	(m <sup>2</sup> solar t. Baja T.º)		3.487
Solar térmica de baja temperatura	700.805		51
TOTAL ÁREAS TÉRMICAS			3.538
TOTAL BIOCARBURANTES (TRANSPORTE)			228
TOTAL ENERGÍAS RENOVABLES			9.739

Fuente: E. Soria (Monografía del CESEDEN, número 26).

potencia eléctrica y la energía eléctrica previstas hasta el año 2016 en el Sistema Peninsular.

En el cuadro 6, p. 104, se observa, que respecto a la energía primaria, la dependencia exterior de energías fósiles fue, en el año 2007, del 78% en España, del 53% en la Unión Europea y el 25% en Estados Unidos. Esto indica la gran dependencia exterior (consumo menos producción

**Cuadro 4.– Potencia eléctrica del Sistema Peninsular, punta extrema de invierno.**

Potencia instalada a final del año (megavatios)	Años			
	2006	2008	2011	2016
Hidráulica convencional más bombeo mixto	13.930	13.930	13.930	13.930
Bombeo puro	2.727	2.727	3.700	5.700
Nuclear (1)	7.716	7.726	7.783	7.783
Carbón	11.424	10.728	9.299	8.240
Fuel/gas	6.647	1.831	670	320
Ciclos combinados	15.500	20.620	25.400	30.000
Equipo de punta (turbina de gas, etc.)	–	300	600	3.000
Eólica	11.230	14.980	22.000	29.000
Solar	106	530	1.700	4.500
Minihidráulica	1.811	2.000	2.240	2.450
Biomasa	554	1.560	2.360	2.770
Residuos	444	560	710	960
Cogeneración (2)	6.785	7.000	7.370	7.990
<i>TOTAL POTENCIA INSTALADA</i>	<i>78.877</i>	<i>78.196</i>	<i>97.762</i>	<i>116.643</i>
Punta de invierno	(4) 41.890	46.200	50.800	58.700
Margen	(4) 6.540	5.370	5.239	6.029
<i>TOTAL POTENCIA DISPONIBLE (3)</i>	<i>48.430</i>	<i>51.570</i>	<i>56.039</i>	<i>64.729</i>
Índice de cobertura	(4) 1,16	1,12	1,10	1,10

(1) Se ha supuesto el mantenimiento del número de grupos nucleares. En caso de que se produjera el cierre de algún grupo, el sistema sería capaz de asumirlo, bien a costa de disminuir ligeramente el índice de cobertura, bien con generación de otro tipo de tecnología.

(2) El Plan de Acción 2008-2009 de la Estrategia Española de Ahorro y Eficiencia Energética, propone un objetivo de 8.400 megavatios en el año 2012.

(3) Potencia disponible determinada de antes de cálculo probabilístico.

(4) Las cifras de año 2006 corresponden al valor real de la punta de demanda de diciembre de 2006. La punta máxima anual del año 2006 tuvo lugar en enero de 2006 y ascendió a 42.253 megavatios, con un valor real de potencia disponible de 46.172 megavatios, que representa un índice de cobertura real de 1,09.

Fuente: E. Soria (Monografía del CESEDEN, número 26).



**Cuadro 5.**– Energía eléctrica del Sistema Peninsular.

Balance de energía (gigavatios hora)	Años			
	2006	2008	2011	2016
Hidráulica convencional más bombeo mixto	22.652	27.250	27.070	26.000
Bombeo puro	2.678	3.750	4.250	6.750
Nuclear*	60.126	59.000	59.000	57.000
Carbón	66.006	60.500	52.000	50.000
Fuel/gas	5.905	2.000	880	220
Ciclos combinados	63.506	72.226	80.462	101.430
Equipo de punta (turbina de gas, etc.)	–	540	1.080	3.000
Eólica	22.631	28.500	47.000	62.000
Resto régimen especial	27.607	34.600	45.500	62.500
<i>TOTAL PRODUCCIÓN</i>	<i>271.111</i>	<i>288.366</i>	<i>317.242</i>	<i>368.900</i>
Consumos en generación	–8.907	–9.000	–10.000	–11.000
Consumos en bombeo	–5.261	–6.000	–8.000	–10.000
Saldo de intercambios internacionales	–3.280	–	–	–
<i>TOTAL DEMANDA</i>	<i>253.663</i>	<i>273.366</i>	<i>299.242</i>	<i>347.900</i>

\* Se ha supuesto el mantenimiento del número de grupos nucleares. En caso de que se produjera el cierre de algún grupo, el sistema sería capaz de asumirlo, bien a costa de disminuir ligeramente el índice de cobertura, bien con generación de otro tipo de tecnología.

Fuente: E. Soria (Monografía del CESEDEN, número 26).

nacional) de España de los combustibles fósiles. El carbón se importa de países estables, mientras que el petróleo y el gas se importan de países conflictivos o potencialmente inestables que pueden afectar gravemente a la economía española.

En el cuadro 7, p. 105 se indica la dependencia exterior en la generación de energía eléctrica, en el año 2007, observándose que la dependencia fue del 55% en España, del 24% en Unión Europea y del 2% en Estados Unidos.

Esta gran dependencia exterior de España, podría haberse solucionado si no se hubiese establecido en el año 1984 la moratoria nuclear que impidió la instalación de 33 centrales nucleares que hubiesen producido el 80% de la energía eléctrica española, análogamente a lo sucedido en Francia, tal como se indica en el apartado de «Energía fisión nuclear

en España», p. 123. En el cuadro 8, p. 106, se dan los porcentajes de energía eléctrica prevista en el año 2016 en España y en el año 2015 en la Unión Europea y en Estados Unidos, observándose que la energía eólica prevista en España es 2,1 veces la de la Unión Europea-25, 6,3 veces la de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo (OCDE) de América del Norte, y 19 veces la de la OCDE del Pacífico, mientras que la energía debida al carbón es en España la mitad de la de la Unión Europea-25 y la tercera parte de la de la OCDE.

La causa de este gran aumento de la energía eólica en España y de las otras energías renovables, es debido principalmente a las primas que se aplican estas energías renovables.

**Cuadro 6.**– Dependencia exterior de la energía primaria de España, Unión Europea y Estados Unidos.

Conceptos	España año 2007			Unión Europea año 2007			Estados Unidos año 2007		
	Consumo		Producción	Consumo		Producción	Consumo		Producción
	Millones de toneladas equivalentes de petróleo	Porcentaje	Millones de toneladas equivalentes de petróleo	Millones de toneladas equivalentes de petróleo	Porcentaje	Millones de toneladas equivalentes de petróleo	Millones de toneladas equivalentes de petróleo	Porcentaje	Millones de toneladas equivalentes de petróleo
Petróleo	79	49	–	722	38	115	937	39	310
Gas natural	32	20	–	441	23	184	559	24	499
Carbón	20	13	6	319	17	183	551	23	595
SUBTOTAL	131	82	6	1.482	78	482	3.047	88	1.404
Nuclear	14	9	14	225	12	225	213	9	213
Renovables	15	9	15	184	10	184	117	5	117
TOTAL	160	100	35	1.891	100	891	2.377	100	1.734
Depósito exterior		78			53			25	

Fuente: J. L. Díaz Fernández (comunicación privada).

**Cuadro 7.**– Dependencia exterior en la generación de energía eléctrica de España, Unión Europea y Estados Unidos.

Conceptos	España año 2007			Unión Europea año 2007			Estados Unidos año 2007		
	Generación		Recursos propios	Generación		Recursos propios	Generación		Recursos propios
	Tera- vatios hora	Por- cen- taje	Tera- vatios hora	Tera- vatios hora	Por- cen- taje	Tera- vatios hora	Tera- vatios hora	Por- cen- taje	Tera- vatios hora
Hidrocarburos	116	37	–	813	24	307	920	22	848
Carbón	73	24	19	1.021	31	561	2.128	50	2.128
SUBTOTAL	189	61	19	1.834	55	888	3.048	72	2.976
Nuclear	55	18	55	990	30	990	816	19	816
Eólica	27	9	27	93	3	93	27	1	27
Otras renovables	40	13	40	399	12	399	382	9	382
TOTAL	311	100	141	3.316	100	2.370	4.273	100	4.201
Depósito exterior		55			29			2	

Fuente: J. L. Díaz Fernández (comunicación privada).

## Ventajas e inconvenientes de las energías solar y eólica

Las principales ventajas e inconvenientes de las energías solar y eólica se han ido indicando en los párrafos anteriores.

Las ventajas más importantes son: durante su operación no emiten gases de efecto invernadero; son energías de generación distribuida y carácter modular que permite su uso descentralizado; el Sol y el viento son agentes locales inagotables y gratuitos, no viniendo afectados por las incertidumbres, la escasez o las condiciones geopolíticas.

Sin embargo, sus inconvenientes principales son difíciles de resolver: son energías aleatorias de limitada utilización anual y producen una energía mucho más cara que la nuclear, que aunque tampoco emite CO<sub>2</sub> du-

**Cuadro 8.**– Porcentajes de la energía eléctrica prevista en España, en la Unión Europea-25 y en la OCDE.

Conceptos	Porcentaje				España
	España año 2016	Unión Europea-25 año 2015	OCDE de América del Norte año 2015	OCDE del Pacífico año 2015	
Hidrocarburos	34	24	20	24	Más hidrocarburos Menos carbón
Carbón	14	28	44	37	
FÓSILES	48	52	64	61	
Nuclear	17	23	17	28	Más eólica Más otras renovables
Hidroeléctrica	8	10	12	7	
Eólica	19	9	3	1	
Resto	8	5	3	2	
TOTAL GENERAL	100	100	100	100	
Régimen exterior	36				

Fuente: J. L. Díaz Fernández (comunicación privada).

rante su operación, tiene el problema de los residuos radiactivos en fase de Investigación y Desarrollo (I+D), tal como se expondrá en el párrafo de residuos radiactivos.

En España y Portugal las energías solar y eólica tienen una gran aceptación popular, mientras que la nuclear tiene el rechazo de importantes núcleos de población. Aparte de cuestiones políticas o de intereses económicos personales, esto es consecuencia de dos procesos subliminales: el Sol se asocia al descanso vacacional y el viento a los molinos de viento, que tan genialmente popularizó el Quijote, mientras que la energía nuclear ha sido asociada a las armas nucleares, a Hiroshima y Nagasaki.

Las armas nucleares son la aplicación perversa de la energía nuclear, de igual modo que las armas químicas y biológicas son la aplicación perversa de la química y biología y no por ello se demoniza a la química y a la biología. Una campaña neutral de información sobre las ventajas e inconvenientes de estas fuentes de energía cambiaría considerablemen-

te la aceptación popular, de igual modo a como sucedió en Francia hace medio siglo.

## Costes y primas de las energías renovables

Según el Ministerio de Industria en el año 2009, el coste en España de las energías alternativas, en céntimos de euro el kilovatio hora, es el siguiente: nuclear 3,5, eólica 8,0 y fotovoltaica 40,0.

Para compensar estas diferencias, se han establecido unas primas a las energías renovables de unos 2.000 millones de euros en el año 2007, cuadro 9, 5.800 millones de euros en el año 2009, y que pudiese alcanzar a los 19.200 millones de euros en el año 2020 (P. Mielgo, Red Eléctrica Española), cuadro 9.

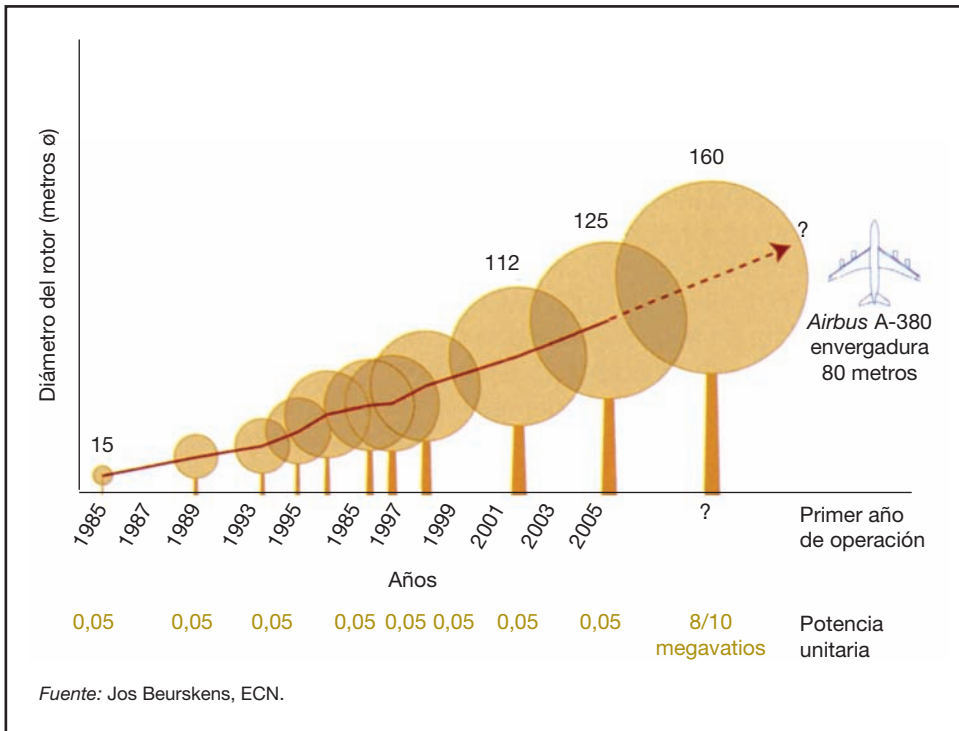
La factura de la energía eléctrica pagada por un consumidor doméstico, se dedica, más de la mitad, a pagar impuestos y a cubrir gastos de la actual política energética:

- 18,7% impuestos (impuesto sobre el valor añadido e impuesto sobre la electricidad).
- 6,1% déficit de tarifa (en parte debido a las renovables).

**Cuadro 9.**– Primas a las energías renovables, año 2007.

Conceptos	Prima en céntimos de euro por kilovatios hora	Energía producida en millones de kilovatios hora	Prima en millones de euros
Solar	39,2	427	168
Tratamiento residuos	5,0	3.427	172
Biomásas	4,4	2.018	89
Eólica	3,7	26.314	971
Hidráulica	3,5	3.953	140
Cogeneración	3,1	16.331	504
Residuos	2,0	2.616	52
<i>TOTAL</i>	<i>60,9</i>	<i>55.086</i>	<i>2.096</i>
Bioetanol	40,70 céntimos de euro/litro		
Biodiesel	31,09 céntimos de euro/litro		

Fuente: J. L. Díaz Fernández (comunicación privada).



**Figura 2.**– Evolución del tamaño de las turbinas eólicas durante su penetración en el mercado. En el año 1985 el diámetro típico del rotor era de 15 metros, en el año 2005 el aerogenerador más grande alcanzaba los 126 metros con una potencia unitaria de cinco megavatios.

- 3,0% compensaciones extrapeninsulares (suministro a las islas).
- 4,1% otros impuestos (Comisión Nacional de Energía, moratoria nuclear, ahorro y eficiencia energética, etc.).
- 22,5% primas a las energías renovables.
- 54,4% total de los impuestos y gastos de la actual política energética.
- 4,6% transporte.
- 16,25 distribución.
- 24,8% generación.

– 45,6% total de la energía eléctrica consumida.

Debido a ello el Ministerio de Industria y Energía español está estudiando reducir estas primas a las energías renovables, especialmente a la solar fotovoltaica, proponiendo una reducción en el número de horas retribu-

das de 1.250 horas para los paneles fotovoltaicos fijos y de 1.644 horas para los móviles, lo que supone, algo menos de 1.000 euros/anuales, reducción manifiestamente insuficiente, teniendo en cuenta la crisis económica en que estamos inmersos.

## Energía eólica

Un 2% de la energía solar (energía producida en la fusión nuclear solar) se transforma también en energía cinética del aire (viento), cuya potencia es proporcional a la densidad del aire, al cubo de su velocidad y a la superficie barrida por las palas (proporcional al cuadrado de la longitud de las palas).

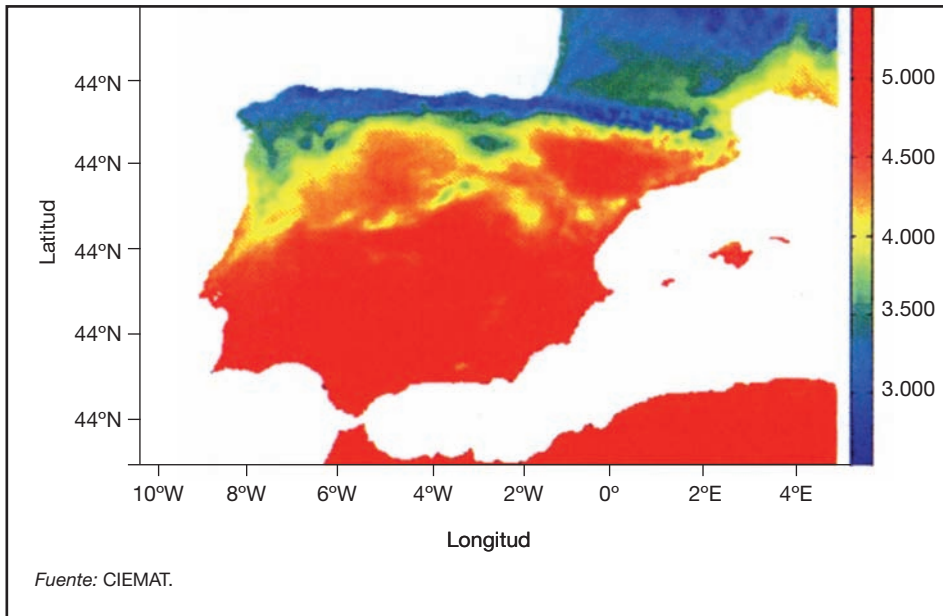
En las regiones de velocidad de viento reducida, si se quiere mantener la misma potencia eléctrica por aerogenerador, es necesario aumentar la longitud de sus palas (si se reduce a la mitad la velocidad del viento la longitud de las palas se debe triplicar).

Por este motivo, una vez prácticamente saturadas las zonas de mayor potencial eólico, se tiende a aumentar la longitud de las palas y, por tanto, la altura del poste del aerogenerador y a instalar parques eólicos en el mar, ya que tienen una velocidad del viento mayor y una turbulencia menor, pero su coste de instalación y mantenimiento es mayor que los terrestres.

**Cuadro 10.**– Potencia eólica instalada, año 2009.

Países	Potencia eólica instalada
Estados Unidos	32.919
Alemania	25.030
China	20.000
España	19.150
India	10.742
Francia	4.655
Italia	4.547
Reino Unido	4.015
Dinamarca	3.384
Portugal	3.301
Resto	14.095
<i>TOTAL</i>	<i>140.951</i>

Fuente: R. Gavela (comunicación privada).



**Figura 3.**– Radiación solar diaria global incidente sobre una superficie horizontal en vatios hora por metro cuadrado y día.

En la figura 2 se representa la evolución de los aerogeneradores. En el año 1985 el mayor aerogenerador tenía una potencia de 50 kilovatios y una longitud de sus palas de 7,5 metros (15 metros el diámetro de la superficie barrida por las palas) y en el año 2005 de cinco megavatios con palas de 63 metros (126 metros de diámetro).

La envergadura del mayor avión comercial actual, el *Airbus A-380*, tiene sólo 80 metros de envergadura.

En el futuro se prevén aerogeneradores de 8 a 10 megavatios con palas de 80 metros (160 metros de diámetro la superficie barrida).

En España, la empresa Gamesa tiene previsto invertir unos 100 millones de euros en el desarrollo del aerogenerador terrestre de mayor potencia en España, el GX10, con potencia de 4,5 megavatios. Tendrá 120 metros de altura y un diámetro de palas de 128 metros.

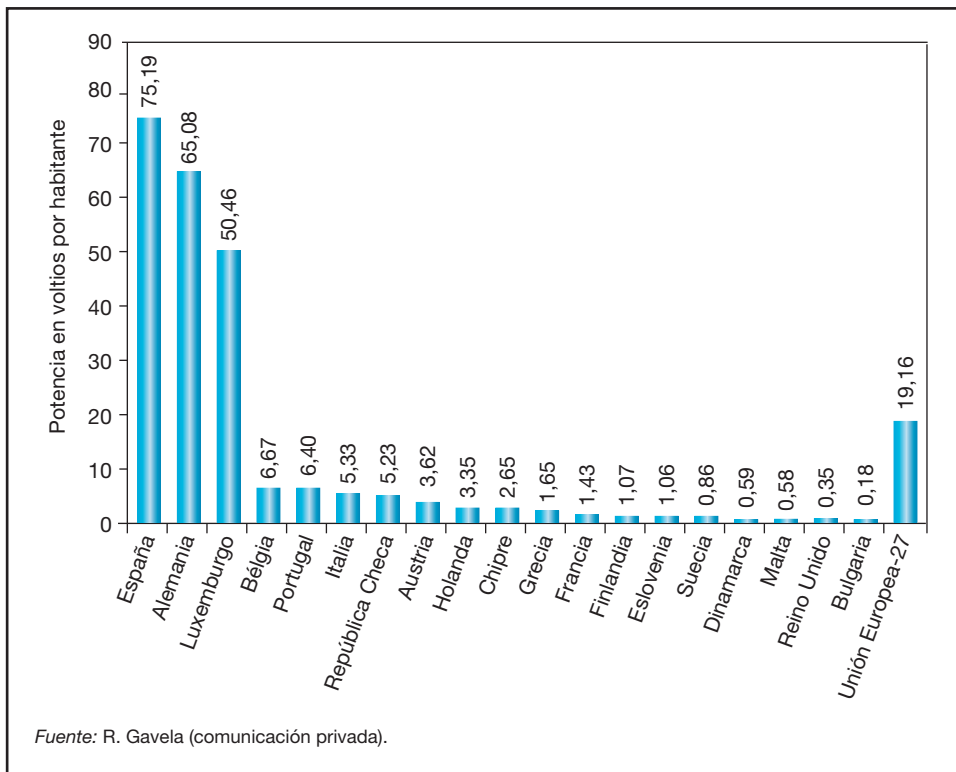
Por otro lado, la instalación de parques eólicos marinos son apropiados en países con amplias plataformas continentales, pero España tiene una plataforma continental muy reducida por lo que la instalación de parques eólicos marinos (*off-shore*) es muy problemática.



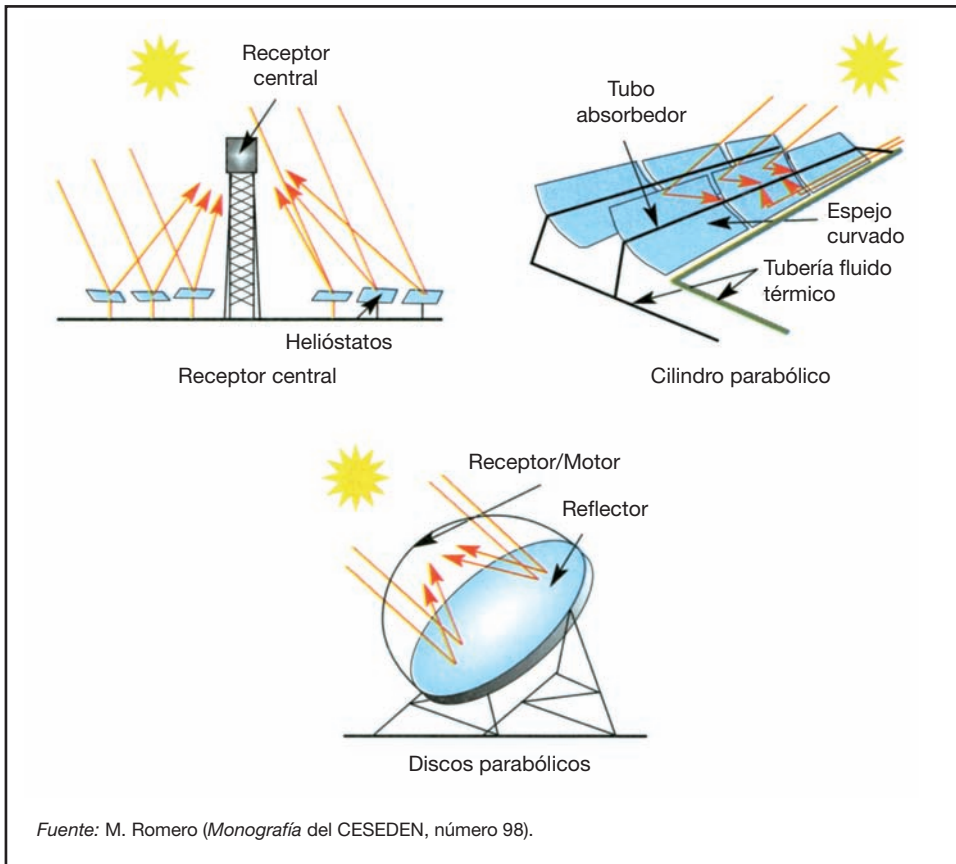
Los casos extremos de funcionamiento de los parques eólicos en España fueron: el de mínima utilización correspondió al miércoles 30 de junio de 2004; a las 13 horas 28 minutos se alcanzó un máximo histórico de demanda de energía eléctrica (36.950 megavatios), mientras que todo el parque eólico nacional solamente produjo (130 megavatios) el 2% de la potencia eólica instalada; las temperaturas eran de unos 40 grados centígrados en casi toda España.

Un dato significativo es que las temperaturas máximas y mínimas en España se suelen alcanzar en situaciones anticiclónicas, con viento prácticamente nulo.

El caso de máxima utilización sucedió el 15 de febrero de 2010; entre las 14 y las 15 horas se obtuvieron 12.700 megavatios hora.



**Figura 4.-** Potencia fotovoltaica por habitante en Europa.



**Figura 5.-** Concentradores de energía solar.

En el cuadro 10 se representa la potencia eólica en el año 2009 en los países de mayor potencial eólico. Según la potencia instalada España es el cuarto país y Portugal el décimo, pero si se considera la potencia instalada por habitante, España ocupa el primer lugar con 0,43 kilovatios por habitante, seguida por Portugal con 0,31; Alemania con 0,30; Estados Unidos con 0,11 y China con 0,02.

Esto indica que mientras no se reduzca el coste de la energía eólica producida para que pueda ser competitiva con las fósiles o con la nuclear, la energía eólica seguirá siendo gravosa para España y Portugal.

En el futuro que el número de horas de funcionamiento medio al año (energía anual obtenida dividida por la potencia instalada) sea del año 2100

**Cuadro 11.- Características técnicas de la energía solar.**

Conceptos	Cilindros parabólicos	Receptor central	Discos parabólicos
Potencia Temperatura operacional Factor de capacidad anual Eficiencia pico Eficiencia neta anual	30-80 megavatios (1) 390 grados centígrados 23-50% (1) 20% 11-16%	10-200 megavatios (1) 565 grados centígrados 20-77% (1) 23% 7-20% (1)	5-25 kilovatios 750 grados centígrados 25% 29,4% 12-2%
Estado comercial Riesgo tecnológico Almacenamiento disponible Diseños híbridos	Disponible comercialmente Bajo Limitado Sí	Demostración Medio Sí Sí	Potrotipos demostración Alto Baterías Sí
Coste vatio instalado: – Euros/vatios – Euros/vatios potencia (2)	3,49-2,34 (1) 3,49-1,13 (1)	3,83-2,16 (1) 2,09-0,78 (1)	11,00-1,14 (1) 11,00-0,96 (1)

(1) El rango indicado se refiere al periodo del año 2005 al año 2030

(2) Euros/vatios potencia se refiere al coste por vatio (pico) instalado eliminando el efecto de almacenamiento de energía, tal y como se hace en la energía solar fotovoltaica

Fuente: M. Romero (Monografía del CESEDEN, número 98).

de las 8.760 horas que tiene un año, lo que representa un factor de operación de 23,9%.

Teniendo en cuenta que las centrales nucleares españolas tienen un factor de operación del 80%, cada central nuclear de 1.500 megavatios necesitaría unos 1.000 aerogeneradores de cinco megavatios para obtener la misma energía anual.

## **Energía solar**

La cantidad de energía solar depositada sobre la Tierra es tres órdenes de magnitud de la demanda mundial de electricidad. Sin embargo, existen determinados factores que reducen este potencial:

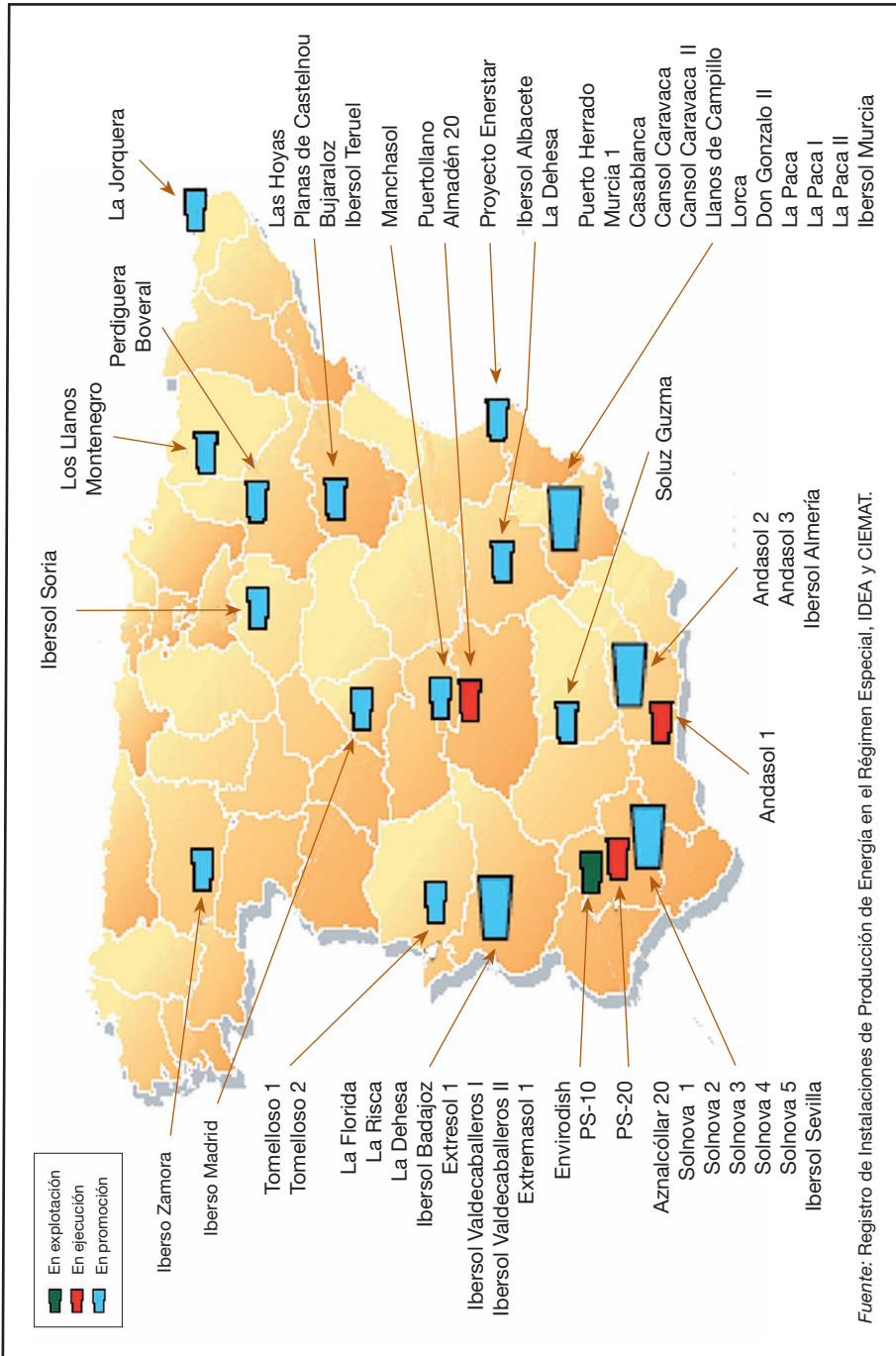
- *Variaciones diarias y estacionales.* Mientras que la densidad de potencia máxima es del orden de un kilovatio por metro cuadrado, el valor medio puede reducirse a un 20%.
- *Latitud.* Las regiones ecuatoriales reciben la mayor radiación solar.
- *Condiciones atmosféricas.* La claridad del aire puede variar entre el 90% en Jartum al 40% en Berlín.
- *Emplazamiento.* Aproximadamente el 1% de la superficie desértica de la Tierra sería suficiente para satisfacer la demanda mundial de electricidad.

En el caso de España y Portugal la mayor parte de su territorio supera anualmente los 1.800 kilovatios hora por metro cuadrado y año, tanto en radiación solar en superficie inclinada correspondiente a su latitud, como en radiación solar directa, figura 3.

Un caso notable y próximo es el de Argelia con un potencial técnico-económico de unos 170.000 millones de megavatios hora al año (la Unión Europea-25 consume 3.000).

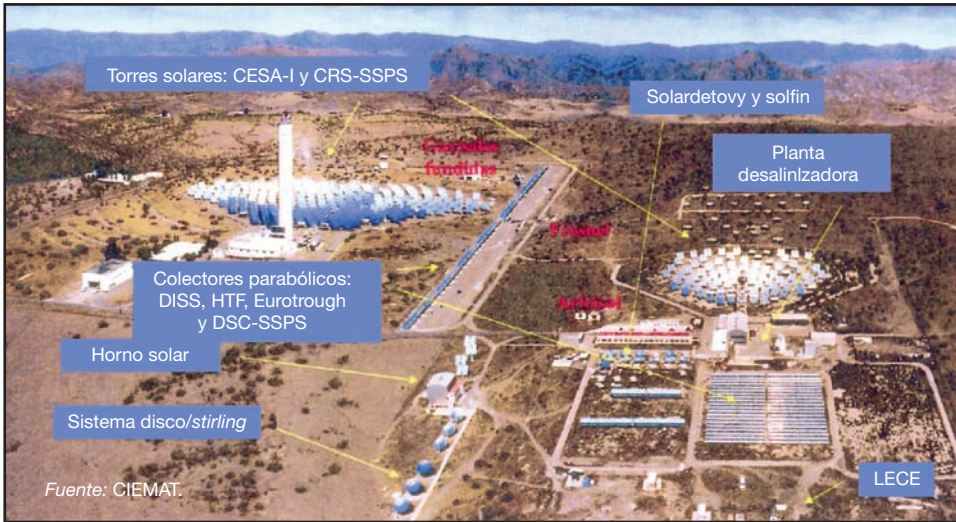
Según los valores anteriores, se observa que la energía solar sobre la Tierra es una energía muy dispersa, por lo que para que pueda ser aprovechada se necesitan grandes superficies o concentrarla:

- *Energía solar térmica de baja temperatura.* Se aprovecha directamente en calentar parcialmente agua para usos domésticos y pequeñas instalaciones industriales.
- *Energía fotoeléctrica.* Se emplean células fotovoltaicas. Actualmente se usa para pequeñas demandas de energía eléctrica (en los satélites, balizas marinas, señales luminosas, carga de baterías, pequeñas edifi-



Fuente: Registro de Instalaciones de Producción de Energía en el Régimen Especial, IDEA y CIEMAT.

Figura 6.- Proyectos de energía solar termoelectrica en España.



**Figura 7.**— Instalaciones de ensayo en la PSA. La Plataforma Solar de Almería es la más completa instalación experimental en el mundo en energía solar de concentración.

- *Energía solar térmica de alta temperatura (más de 300 grados centígrados)*. En la figura, 5 se indican también los principales sistemas de concentración y en el cuadro 11, sus características técnicas.
- Concentradores cilíndrico-parabólicos. Son espejos cilindro-parabólicos que concentran los rayos solares en un tubo por donde circula un fluido.
- Concentradores parabólicos. Son espejos parabólicos que concentran los rayos solares en el foco en donde se encuentra, generalmente, un motor de ciclo *stirling*.
- Sistemas de torre o de receptor central. Constan de un campo de heliostatos que siguen la posición del Sol, reflejando los rayos solares hacia una pequeña superficie en contacto con un fluido, situada en la parte superior de una torre. El fluido circula hacia un generador de vapor (salvo que el fluido sea agua) que mueve un turboalternador.

En la figura 6, se indican los proyectos e instalaciones experimentales españolas, cuyo desarrollo ha sido espectacular, como indican las siguientes instalaciones:

- Planta Solar de Andalucía (PSA), figura 7, Es la más completa del mundo, ya que contiene sistemas de torre, colectores cilindro-parabólicos y parabólicos con motor *stirling*.

- Torre Solar de Sanlúcar la Mayor (Sevilla) PS-10, figura 8. Emplea espejos planos orientables, helióstatos, que enfocan la luz solar sobre una superficie en contacto con un fluido (agua), calentándolo a 500-1.000 grados centígrados. El vapor de agua mueve una turbina de vapor y ésta un alternador. Se construirá en el intervalo de los años 2004-2012 por la empresa Abengoa.
- Tiene 624 helióstatos de 121 metros cuadrados cada uno, la torre tiene 114 metros de altura y la central ocupa 60 hectáreas.
- Tiene una potencia de 11 megavatios eléctricos, produciendo 24 millones de kilovatios hora al año, con un coste total de 35 millones de euros. Esta central se complementará con otras siete (en proyecto), con un total de 302 megavatios eléctricos, produciendo 664 millones de kilovatios hora, con un coste total de 1.300 millones de euros. Torre solar en Fuentes de Andalucía, figura 9, p. 118.
- Concentración por sistemas cilindro-parabólicos en Puertollano, figura 10, p. 119.
- Concentración por sistemas parabólicos con ciclo *stirling* en Villarobledo, figura 11, p. 120.



**Figura 8.- Solúcar PS-10, PS-20 (Abengoa).**



**Figura 9.**– Gemasolar: 17 megavatios eléctricos, receptor central y sales fundidas (como fluido portador y de almacenamiento) en Fuentes de Andalucía año 2011. 304.750 metros cuadrados de helióstatos, 15 horas de almacenamiento, promovida por Torresol Energy/SENER+MASDAR, receptor ensayado en la PSA.

En Amareleja (concejo de Moura, región del Alentejo, Portugal se ha instalado en el año 2008 la mayor planta fotovoltaica de la Unión Europea, de 46 megavatios eléctricos pico, que producirá 93 gigavatios hora el año.

## **Energía de la biomasa**

La energía de la biomasa es la energía de los materiales orgánicos obtenidos en un proceso biológico. Puede emplearse para usos térmicos, para la generación de energía eléctrica y para la obtención de combustibles para el transporte.

En la figura 12, p. 121, se exponen los diversos procesos de transformación energética de la biomasa y en el cuadro 12, p. 122, el estado de desarrollo de las diversas tecnologías para el aprovechamiento también de la biomasa, observándose los elevados costes que tienen todos estos procesos.

En España, según se indica en el cuadro 9, los biocombustibles tienen una elevada prima de 40,70 céntimos de euro por litro el bioetanol y 31,09 el biodiesel. Para poder compensar los elevados costes de producción, la Unión Europea importa aceite de palma de Indonesia (no re-



comendable para el consumo humano y empleado en obtener biodiesel y en España, además, en alguna industria pastelera), lo que ha forzado la tala de selvas tropicales para plantar palmas aceiteras. Brasil obtiene bioetanol principalmente de la caña de azúcar iniciando una peligrosa deforestación de la cuenca amazónica.

Con objeto de evitar el empleo de algunos de los biocombustibles anteriores, Estados Unidos y la Unión Europea han estudiado como futuras fuentes de bioetanol algunas plantas leñosas, como el chopo y el sauce, y algunas herbáceas, como el sorjo dulce y para la producción de biodiesel el cardo y la brassica carinata.

Según M. Romero (*Monografía* del CESEDEN, número 98), se podrían instalar en España unos 20.000 megavatios de potencia eléctrica de la biomasa, produciendo 141 millones de megavatios hora al año de energía.

Esta potencia y energía pueden desglosarse del siguiente modo: monte bajo 2.300 megavatios y 17 millones de megavatios hora año; cultivos forestales de rotación rápida 5.000 y 38; cultivos energéticos 4.700 y 35; residual y biogás 7.300 y 51, respectivamente.

Los principales inconvenientes de la energía de la biomasa, son:

- Elevados costes de recogida, almacenamiento, manejo y transformación, indicados anteriormente.



**Figura 10.-** Iberdrola, Puertollano, 50 megavatios eléctricos.



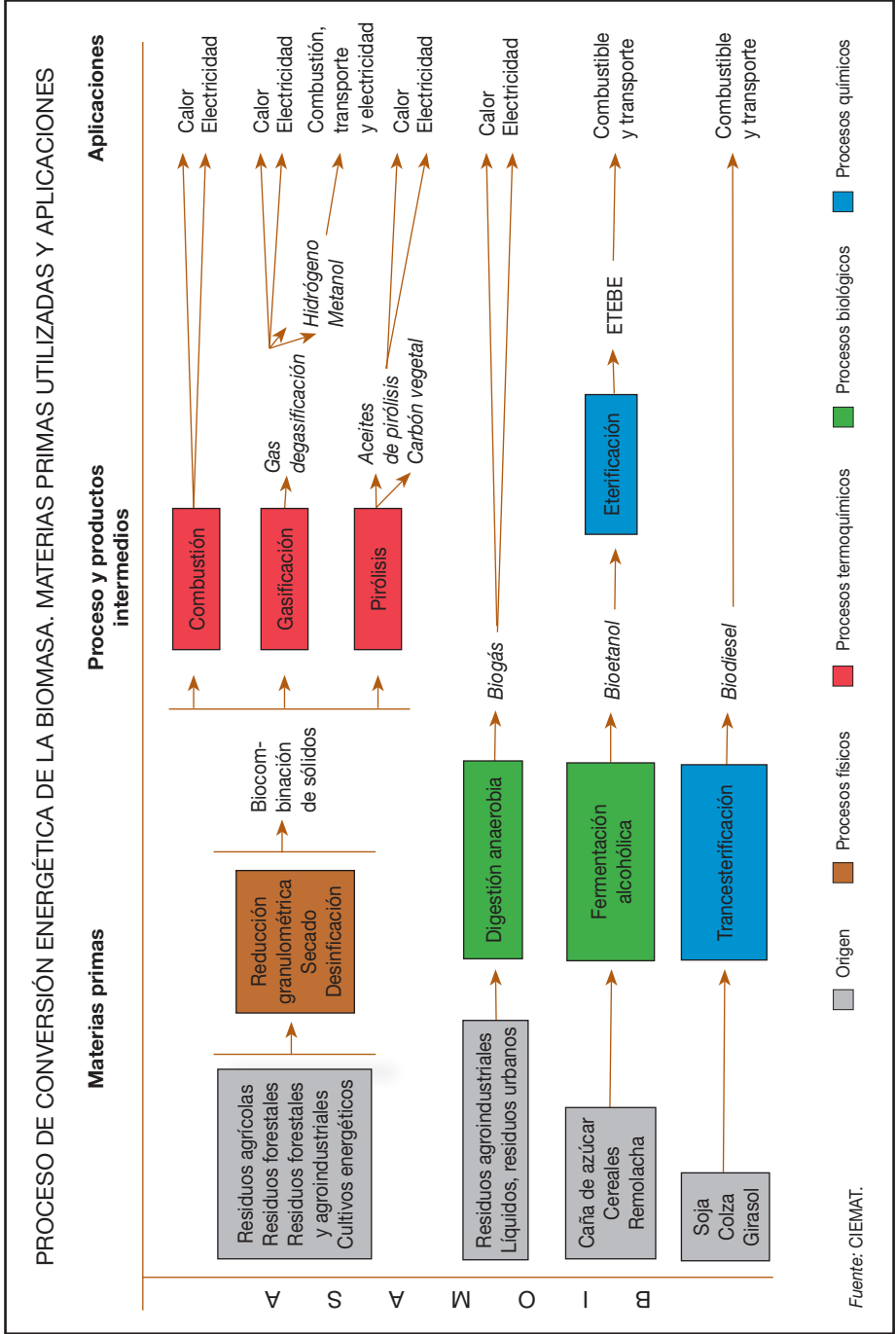
**Figura 11.**– Villarrobledo (*Solar Value más Epurion, ciclo stirling*).

- Bajo rendimiento en la transformación.
- Altos niveles de inversión para potencias pequeñas que serían las más utilizadas.
- Emisión de  $\text{CO}_2$  en la combustión de la biomasa y biocombustibles, aunque de un modo muy forzado, puede considerarse que el balance neto de emisión de  $\text{CO}_2$  es nulo, ya que previamente el  $\text{CO}_2$  fue absorbido por las plantas en el proceso de la fotosíntesis, como parte del ciclo del carbono atmosférico, para después ser emitido en la combustión de biomasa y biocarburantes.

## **Energía de fisión nuclear**

El estado en el año 2009 de los reactores nucleares, es el siguiente:

- 437 reactores nucleares en operación en Estados Unidos 104; en Francia 58; en Japón 54; en España 8 y en la Unión Europea 145.
- 56 reactores nucleares en construcción en China: 21; en Eslovaquia 2; en Rusia 9; en Taiwan 2; en India 5; en Ucrania 2; en Corea del Sur 6; en Argentina 1; en Japón 1; en Francia 1; en Finlandia 1; en Estados Unidos 1; en Bulgaria 2; en Irán 1, en Pakistán 1.



**Figura 12.- Cuadro resumen de procesos de aprovechamiento energético de la biomasa.**

**Cuadro 12.– Principales tecnologías para el aprovechamiento de la biomasa.**

Tecnología	Grado de desarrollo
Fermentación a biotanol	Desarrollo ya comercial, pero con coste muy elevado, baja eficacia y producción (~55 gigajulios/hectárea con celulosa y 75 gigajulios/hectárea con hemicelulosa). Retos: reducción de costes, mejorar productividad, uso de hemicelulosa y uso de lignina. Uso de variedades no convencionales como patata, sorgo o paja de cereal. En España se ha puesto recientemente en funcionamiento Babilafuente (Salamanca) la primera planta comercial europea que utiliza biomasa lignocelulósica para producción de bioetanol.
Producción de biodiesel	Tecnología probada con alto coste y bajo rendimiento (~40 gigajulios/hectárea). Retos: uso de especies oleaginosas de bajo coste, valorización de los subproductos y producción continua.
Digestión anaerobia	Estado comercial excepto los digestores. Alto coste, baja eficiencia y productividad. Retos: escalado, reducción de costes y uso de residuos heterogéneos.
Combustión de biomasa	Comercia, problemas de emisiones y baja eficiencia a pequeña escala (~170 gigajulios/hectárea calor y ~50 gigajulios/hectáreas electricidad). Retos: emisiones, garantías de suministro y calidad de la materia prima y estabilidad de la combustión.
Gasificación de biomasa	Tecnología todavía a escala de demostración, coste moderado y alta eficacia (~80 gigajulios/hectárea electricidad ~160 gigajulios/hectárea cogeneración). Retos: calidad de gas, reducción coste, adaptación a pequeños tamaños para producción de hidrocarburos líquidos ( <i>gas to liquid</i> ) e hidrógeno.
	Tecnología en desarrollo, coste y eficiencia moderados. Produce biocombustibles que pueden almacenarse y transportarse, o utilizarse como producto químico. Reto: calidad y estándares de los productos obtenidos, desarrollo de aplicaciones industriales. Integración en biorefinería.

Fuente: M. Romero (Monografía del CESEDEN, número 98).

- 59 centrales nucleares con permiso de operación de 60 años en Estados Unidos 54; en Holanda 1 y en Suiza 4.
- El porcentaje de energía eléctrica nuclear es del 75% en Francia, del 52% en Bélgica, del 54% en Eslovaquia; del 37% en Suecia; del 40% en Suiza; del 43% en Hungría y del 18% en España.

En el cuadro 13, p. 124, se resumen estos resultados. Actualmente hay 17 países islámicos (los que tienen propuestas más elaboradas son: Marruecos, Argelia, Túnez, Libia, Egipto, Jordania, Siria y Emiratos Árabes Unidos) que están considerando, por primera vez, la instalación de reactores nucleares de potencia para producir energía eléctrica o desalar el agua del mar.

Algunas de estas naciones reclaman el legítimo derecho a instalar reactores nucleares de potencia, incluyendo la petición sospechosa de disponer del ciclo completo del combustible nuclear y basándose en que habiendo firmado el Tratado de No-Proliferación Nuclear (TNP) no pueden desarrollar armamento nuclear.

Sin embargo, los hechos de las últimas décadas han demostrado también que la firma del TNP no garantiza que no se puedan fabricar bombas atómicas.

Entre todos ellos destacan también los programas nucleares de Irán y de los Emiratos Árabes Unidos que, consideran la posibilidad de instalar 14 reactores nucleares con una producción total de 20.000 megavatios eléctricos.

En los Emiratos Árabes Unidos entrarían en servicio en el año 2020 cuatro de estos reactores, que se instalarían entre las ciudades de Abu Dhabi y Ruwais y en Al Fujayrah, en la costa del océano Índico.

## **Energía de fisión nuclear en España**

En España hay actualmente ocho centrales nucleares en operación, cuadros 14 y 15, p. 125. Si se autorizase la explotación de estas centrales hasta 60 años, habría que esperar al año 2031 para que caducase la autorización de explotación de la central nuclear de Santa María de Garoña, tal como sucede con las 18 centrales nucleares de Estados Unidos que tienen un diseño y edad análoga a la de esta central.

**Cuadro 13.**– Número de reactores en operación y en construcción y contribución de la energía nuclear en el total de producción de electricidad en cada uno de los países, año 2009.

Países	Reactores en operación	Reactores en construcción	Producción (teravatios hora)	Electricidad de origen nuclear (porcentaje)
Alemania	17	–	127,64	26,12
Argentina	2	1	7,59	6,95
Armenia	1	–	2,30	44,95
Bélgica	7	–	44,96	51,66
Brasil	2	–	12,98	2,93
Bulgaria	2	2	15,26	35,90
Canadá	18	–	85,31	14,83
China	11	21	70,10	1,89
Corea del Sur	20	6	141,12	34,79
Eslovaquia	4	2	13,08	53,50
Eslovenia	1	–	5,46	37,83
España	8	–	52,89	17,60
Estados Unidos	104	1	796,75	20,17
Finlandia	4	1	22,58	32,87
Francia	58	1	390,00	75,17
Holanda	1	–	3,99	3,70
Hungría	4	–	14,57	42,98
India	18	5	14,75	2,16
Irán	–	1	–	–
Japón	54	1	260,06	28,89
Lituania	1	–	10,03	76,23
México	2	–	10,11	4,80
Pakistán	2	1	2,64	2,74
República Checa	6	–	25,66	33,77
Reino Unido	19	–	62,36	17,45
Rumania	2	–	10,82	20,62
Rusia	31	9	152,98	17,82
Suráfrica	2	–	11,57	4,84
Suecia	10	–	50,04	37,43
Suiza	5	–	26,27	39,50
Taiwan	6	2	41,57	18,10
Ucrania	15	2	77,80	48,59
<i>TOTAL</i>	<i>437</i>	<i>56</i>	<i>2.563,47</i>	

Fuente: Foro Nuclear.

**Cuadro 14.- Centrales nucleares españolas.**

Nombres	Potencia (megavattios eléctricos)	Tipo	Origen tecnológico	Primera conexión (año)	Operación a 60 años
José Cabrera (Guadalajara)	150,1	PWR	Estados Unidos	1968	*2006
Santa María de Garoña (Burgos)	466,0	BWR	Estados Unidos	1971	2031
Almaráz I (Cáceres)	977,0	PWR	Estados Unidos	1981	2041
Almaráz II (Cáceres)	980,0	PWR	Estados Unidos	1983	2043
Ascó I (Tarragona)	1.032,5	PWR	Estados Unidos	1983	2043
Ascó II (Tarragona)	1.027,2	PWR	Estados Unidos	1985	2045
Cofrentes (Valencia)	1.092,0	BWR	Estados Unidos	1984	2044
Vandellós I (Tarragona)	150,0	GGR	Francia	1972	*1989
Vandellós II (Tarragona)	1.087,1	PWR	Estados Unidos	1987	2047
Trillo (Guadalajara)	1.066,0	PWR	Alemania	1988	2048

\* Actualmente clausuradas.

El coste de la energía eléctrica en España, en céntimos de euros por kilovatio hora es de: 3,5 la nuclear; 6,0 la de ciclo combinado; 8,0 la eólica y 40,0 la fotovoltaica.

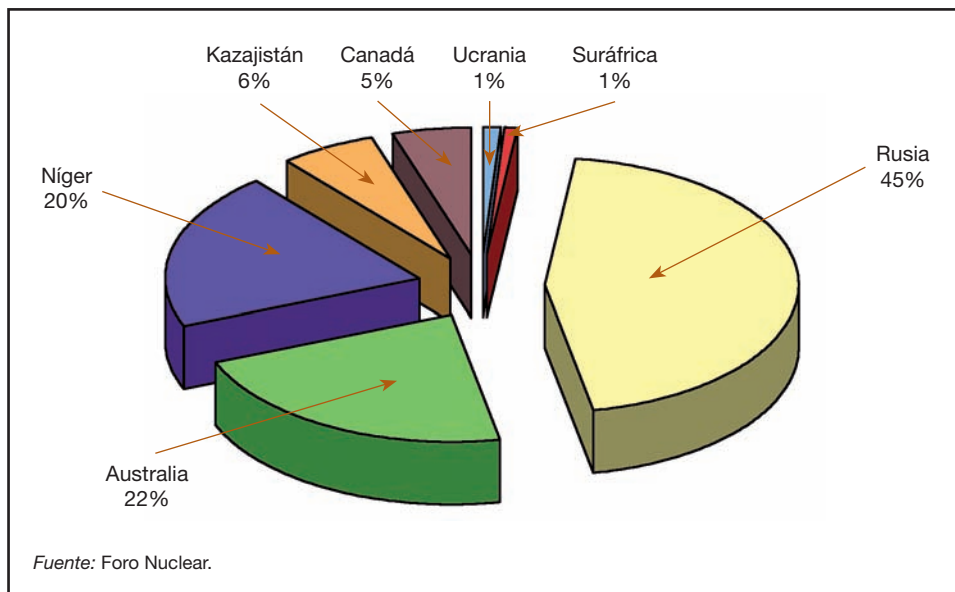
El porcentaje de la energía eléctrica en España es en el año 2010: 30% gas; 18% nuclear; 13% eólica; 12% carbón, 10% hidráulica.

**Cuadro 15.- Centrales nucleares y empresas propietarias.**

Centrales	Empresas propietarias	Porcentaje
Santa María de Garoña	Nuclenor*	100
Almaráz I	Iberdrola, Endesa y Gas Natural	53, 36 y 11
Almaráz II	Iberdrola, Endesa y Gas Natural	53, 36 y 11
Ascó I	Endesa	100
Ascó II	Iberdrola y Endesa	15 y 85
Cofrentes	Iberdrola	100
Vandellós II	Iberdrola y Endesa	28 y 72
Trillo	Iberdrola, Gas Natural, HC Energía y Nuclenor*	48, 34, 5, 15,5 y 2

\* Participada por Iberdrola 50% y Endesa 50%.

Fuente: Foro Nuclear.



**Figura 13.**– Adquisiciones de concertados de uranio, año 2009.

Debido a esta distribución energética anómala, a la infrautilización de las centrales de gas y al coste disparatado de algunas energías, hace que España se encuentre entre los ocho países de la Unión Europea con la energía eléctrica más cara.

Los concentrados de uranio para las centrales nucleares españolas se importan principalmente de: Rusia, Australia y Níger, según se indica en la figura 13.

La Empresa Nacional del Uranio S. A. (ENUSA) de Juzbado, figura 14, fabricó en el año 2009 elementos combustibles para los Reactores de Agua a Presión (PWR) y en Ebullición (BWR) con un total de 326 toneladas de uranio, exportando el 71% de su producción figura 15, p. 130. En el cuadro 15, p. 13, se indican las empresas y también propietarias de todas estas centrales.

En la década de los años setenta, se estudiaron las necesidades futuras de energía eléctrica en España. Se llegó a la conclusión de que para que a finales del siglo XX la producción de energía eléctrica de origen nuclear fuese de un 80%, análogamente a la obtenida en Francia, y así reducir considerablemente la importación de combustibles fósiles, habría que insta-



lar 33 centrales nucleares, tal como indica en el cuadro 16, pp. 128-129. De todas estas centrales sólo entraron en operación 10, las ocho actualmente en operación y las de Vandellós I y José Cabrera, cuadro 2, p. 99. En la figura 16, p. 131, se muestra la central nuclear de Ascó I.

Cuando estaban en diferente fase de construcción las seis centrales nucleares de Lemoniz I y II, en el País Vasco, Valdecaballeros I y II, en Extremadura, Trillo II, en Castilla-La Mancha y Sayago, en Castilla y León, se produjeron una serie de atentados por parte de la banda terrorista ETA:

- El 17 de marzo de 1978 puso una bomba en la zona del reactor de Lemoniz, matando a los obreros Andrés Guerra y Alberto Negro.
- El 13 de junio de 1979, puso una bomba en la zona de las turbinas del reactor de Lemoniz, matando a Ángel Baños.
- El 29 de enero de 1981, secuestró al ingeniero jefe de Lemoniz José María Ryan, asesinándole el 6 de febrero.

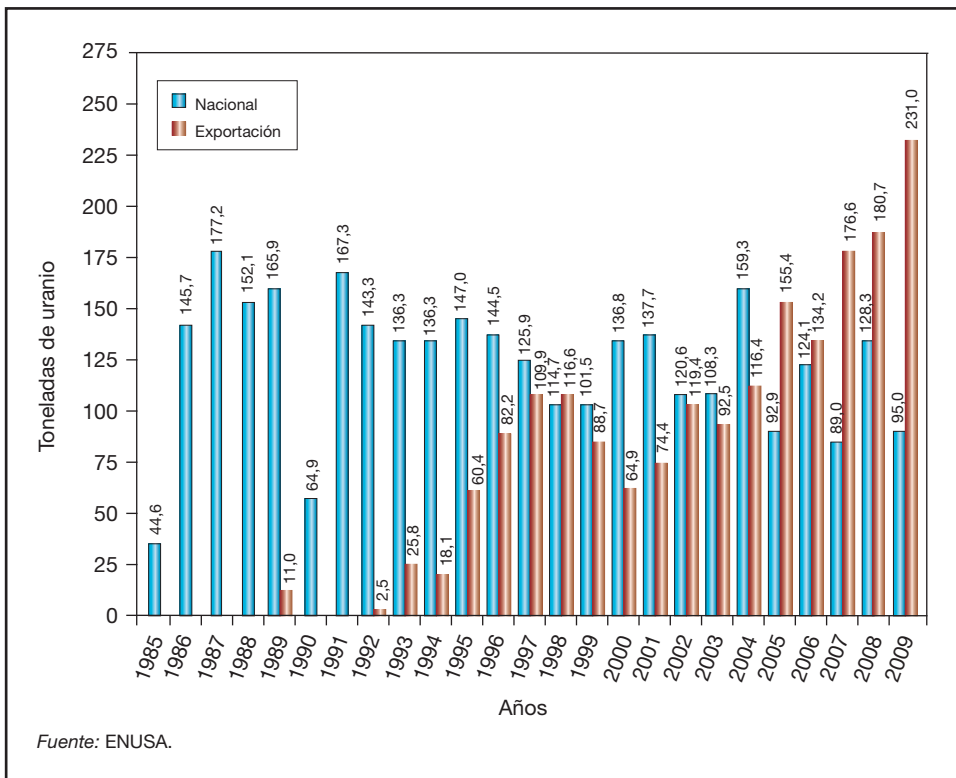


Figura 14.- Cantidades anuales en toneladas de uranio, años 1985-2009.

**Cuadro 16.- Centrales proyectadas en España.**

Centrales	Potencia eléctrica (megavatios eléctricos)	Tipo	Emplazamiento (provincia)	Propietarias explotadoras	Fecha real o prevista de explotación
José Cabrera	160	PWR	Guadalajara	Unión Eléctrica	12-XII-1968
Santa María de Garoña	460	BWR	Burgos	Nuclear	29-III-1971
Vandellós I	480	GCR	Tarragona	Hifrensa	VIII-1972
Almaráz I y II	2 x 930	PWR	Cáceres	Unión Eléctrica/Hidroeléctrica Española	1-V-1981
Lemóniz I y II	2 x 930	PWR	Vizcaya	Sevillana de Electricidad	8-X-1983
Ascó I	930	PWR	Tarragona	Iberduero	1976-1979
Ascó II	930	PWR	Tarragona	FECSA	VIII-1983
Cofrantes	975	BWR	Valencia	FECSA/ENHER/HECSA/HES	X-1985
Santillana	900	LWR	Santander	Hidroeléctrica Española	X-1984
Punta Endata I y II	2 x 1.000	LWR	Gulpúzcoa	Electra de Viesgo	1980-1981
Trillo I y II	2 x 1.000	PWR	Guadalajara	Iberduero	1892-1983
Valdecaballeros	2 x 1.000	PWR	Badajoz	Unión Eléctrica/Eléctricas Reunidas de Zaragoza/Eléctricas Aragonesas	V-1988
Regodola	900	LWR	Lugo	Sevilla de Electricidad Hidroeléctrica Española	1981-1982
Sayago	1.000	PWR	Zamora	Fenosa/Viesgo/Hidroeléctrica del Cantábrico	1982
Vergara	1.000	PWR	Navarra	Iberduero	1981
Oguella I y II	2 x 1.000	PWR	Vizcaya	Iberduero	1985
Central nuclear de Aragón	2 x 1.000	PWR	Zaragoza	FECSA/Unión Eléctrica/E. I. A./Eléctricas Reunidas de Zaragoza	1988-1989
Cabo Cope	1.000	LWR	Murcia	Hidroeléctrica Española	1982-1966
					1981

**Cuadro 16.- (Continuación).**

Centrales	Potencia eléctrica (megavatios eléctricos)	Tipo	Emplazamiento (provincia)	Propietarias explotadoras	Fecha real o prevista de explotación
Tarifa	2 x 1.000	LWR	Cádiz	Sevillana de Electricidad	1981-1983
Asperillo	2 x 1.000	LWR	Huelva	Sevillana de Electricidad	1980-1990
Azután	1.000		Toledo	Hidroeléctrica Española	
Orellana o Puerto Peña	1.000		Badajoz	Hidroeléctrica Española/Hidroeléctrica Española/Sevillana	
Valdellós II	1.000	PWR	Tarragona	ENHER/HECSA/Hidroeléctrica del Segre/FECSA	1988
Valdellós III	1.000	PWR	Tarragona	FECSA	1983

Fuente: J. M. Sánchez Ron, CIEMAT, 2001.



**Figura 15.**– *Fábrica española de Juzbado de ENUSA de combustibles nucleares.*

- El 5 de abril de 1982, asesinó al ingeniero director de la sociedad mixta para la construcción de Lemoniz, Ángel Pascual Múgica.

### **Moratoria nuclear en España**

En el año 1984 el Gobierno aprobó el PEN, técnicamente inaceptable, que establecía que el suministro de gas natural fuese de Argelia, con gasoductos inicialmente a través de Marruecos, la paralización de las seis centrales nucleares en diferente estado de construcción, y no autorizar otras nuevas.

Las consecuencias de esta moratoria fueron las siguientes:

- Hubo que compensar a las empresas eléctricas implicadas en estas centrales nucleares con 600.000 millones de pesetas (del año 1984) con cargo a los recibos de luz de todos los abonados.
- Se produjo un aumento en la emisión de gases de efecto invernadero de unos 36 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> al año, ya que las nuevas centrales sustitutorias de las nucleares fueron también de carbón y de gas.

El 15 de octubre de 2002 el ministro de Economía firmó la orden del cierre de la central nuclear de José Cabrera (Zorita) para el 30 de abril

de 2006 (1968-2006), a pesar de que siendo una central norteamericana podría haberse ampliado su operación hasta 22 años más.

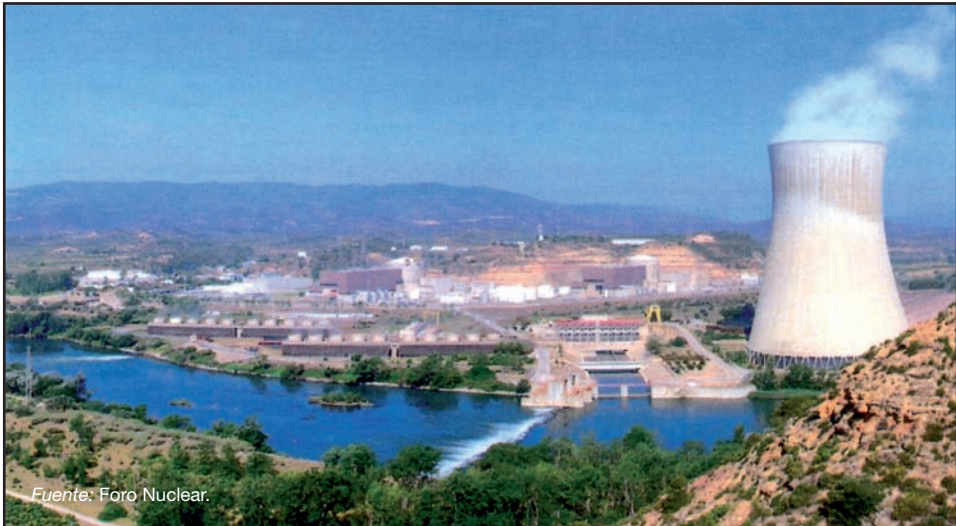
Se sustituirá por una o dos centrales de gas de ciclo combinado, que emiten cuatro millones de toneladas de CO<sub>2</sub> al año (por cada 1.000 megavatio eléctrico).

Las centrales nucleares, como cualquier otra instalación industrial, tienen una serie de ventajas e inconvenientes que es necesario analizar.

### *Ventajas reales*

Las principales ventajas de los reactores de fisión nuclear son las siguientes:

- No produce gases de efecto invernadero.
- Tienen una larga vida: extendida hasta 60 años.
- Producen la energía más barata que existe actualmente: un 80% de la producida en las centrales de combustibles fósiles y menos de la mitad de la producida en las centrales eólicas.
- El coste del uranio es un 5% del coste de generación de la energía eléctrica mientras que los costes del carbón y del gas son un 50% y 70% de los costes de generación de la energía eléctrica.



**Figura 16.-** Central nuclear de Ascó I.

- El uranio se encuentra muy repartido. El 50% en países democráticos o políticamente estables, a diferencia del petróleo que se encuentra concentrado en zonas de permanentes tensiones políticas o en países denominados por el Banco Mundial como LICUS (*Low Income Countries Under Stress*), tal como se indica en el cuadro 17.

### *Inconvenientes*

Los inconvenientes más importantes son:

- Contaminación radiactiva en el entorno de la central nuclear.
- Residuos radiactivos. Reactor Híbrido de Fusión-Fisión (LIFE).
- Accidentes nucleares. Chernóbil (reactor intrínsecamente inestable desarrollado inicialmente para producir plutonio para bombas nucleares disipando la energía a la atmósfera, pero no apto para producir energía eléctrica).
- Proliferación nuclear. En el enriquecimiento del combustible y en el combustible gastado.

**Cuadro 17.**– Reservas de uranio a 130 dólares/kilogramo.

<b>Países</b>	<b>Toneladas de uranio</b>	<b>Porcentaje</b>
Australia	1.243.000	23
Kazajistán	817.300	15
Rusia	545.600	10
Canadá	423.200	8
Suráfrica	435.100	8
Estados Unidos	339.000	6
Brasil	278.400	5
Namibia	275.000	5
Níger	274.000	5
Ucrania	199.500	4
Jordania	111.800	2
Uzbekistán	111.000	2
India	72.900	1
China	67.900	1
Otros	275.100	5
<i>TOTAL</i>	<i>5.468.800</i>	<i>100</i>

Fuente: F. Tarin, *Nuclear España*, número 294, marzo de 2009.

**Cuadro 18.-** Combustible gastado almacenado en las piscinas de cada central nuclear española y el año de saturación de estas piscinas.

Centrales	Combustible gastado almacenado (toneladas de uranio)	Volumen de ocupación (porcentaje)	Año previsto de saturación
Santa María de Garoña	331,30	75,58	2019
Almaráz I	555,00	73,10	2021
Almaráz II	522,00	68,84	2022
Ascó I	471,93	87,03	2013
Ascó II	436,91	80,40	2015
Cofrentes	593,80	64,37	2021
Vandellós II	387,48	63,10	2020
<i>TOTAL</i>	3.298,42		

Fuente: Foro Nuclear.

## Contaminación radiactiva en el entorno de una central nuclear

No produce daños biológicos apreciables. El Instituto Nacional del Cáncer de Estados Unidos efectuó un estudio en los entornos de 78 centrales nucleares que estaban en servicio en el año 1982: la tasa de cánceres producidos en su entorno es análoga a la media nacional. La tasa de enfermedades (coronarias, tumorales, etc.) de los trabajadores de las centrales era inferior a la nacional, también debido al chequeo médico periódico.

## Residuos radiactivos

Los elementos combustibles gastados de una central nuclear de potencia operando para producir energía eléctrica contienen un 95% de uranio, un 4% de plutonio y un 1% de residuos radiactivos. Estos elementos se almacenan primeramente en las piscinas de la misma central nuclear con objeto de refrigerarles.

En el cuadro 18 se indica el combustible gastado almacenado en las piscinas de cada central nuclear española y el año de saturación de estas piscinas.

Posteriormente pueden seguirse dos caminos:

1. *Ciclo abierto*. Los elementos combustibles gastados se encapsulan y se almacenan en un Almacén Geológico Profundo (AGP).
2. *Ciclo cerrado*. Los elementos combustibles gastados se someten al reproceso o reelaboración separando el uranio (el 95% del total), el plutonio (el 1%) y los residuos radiactivos (el 4%). Los residuos radiactivos de alta y media actividad se vitrifican y se almacenan en un AGP.

En España, según el Plan General de Residuos Radiactivos (aprobado en junio de 2006), se propone el ciclo abierto, pero almacenándolos en un Almacén Temporal Centralizado (ATC) durante 60 años, a la espera de decisiones futuras. Los residuos de baja actividad se almacenan en El Cabril, figura 17.

Actualmente se encuentran en fase de investigación y desarrollo dos procedimientos para reducir los residuos radiactivos:



Fuente: Foro Nuclear.

**Figura 17.**– Centro de almacenamiento de residuos de baja y media actividad de El Cabril de ENRESA.



- *Transmutador*. Cada protón de un acelerador produce por espalación en un blanco de plomo unos 15 neutrones, que transmutan los residuos de alta actividad en residuos de baja actividad o en residuos estables. En el mundo hay unas 3.000 toneladas de residuos de larga vida (el 1% de los de alta actividad) y en España unas 60 toneladas. El transmutador tiene un rendimiento del 99%, por lo que transmutaría estos residuos en 30 y 0,6 toneladas. Comprimiéndolos a alta densidad 10 se reducirían en 3.000 litros en todo el mundo y 60 litros en España.
- *Reactor LIFE*. En un reactor de fusión nuclear por confinamiento inercial, la cápsula de combustible está situada dentro de un recipiente entre cuya doble pared circula el combustible gastado de un reactor de fisión nuclear productor de energía eléctrica. Los neutrones de fusión de muy alta energía (14 megaelectrones voltio) fisionan el U-238, el Pu-239 del combustible gastado y transmutan los residuos de alta actividad en residuos de baja actividad o residuos estables. Es una mezcla de un reactor de fusión nuclear por confinamiento inercial y de un transmutador, en donde los neutrones de alta energía se obtienen de la fusión nuclear del deuterio-tritio, en vez de obtenerlos por bombardeo de protones contra un blanco de plomo. En lugar de emplear el combustible gastado, puede emplearse el uranio empobrecido de las colas de una planta de enriquecimiento de uranio, o el plutonio del desmantelamiento de las armas nucleares.

#### *Accidentes en centrales nucleares civiles en países democráticos*

Los principales accidentes ocurridos en las centrales nucleares de potencia productoras de energía eléctrica han sido:

- Año 1969. Saint Laurent des Eaux (Francia). Se fundieron cinco elementos combustibles. No hubo escape de radiactividad.
- Año 1970. Dresden (Estados Unidos). Por error se paró la turbina, se produjo un aumento de presión y un escape del edificio de contención. No hubo víctimas.
- Año 1972. Surrey I (Reino Unido). Fuga de vapor de agua, se produjo un muerto por quemaduras.
- Año 1979. Three Mile Island (16 kilómetros Harrisburg) Estados Unidos. Durante una inspección se dejaron cerradas, por olvido, dos válvulas del sistema de refrigeración de emergencia. Debido a las resinas empleadas en el sistema de depuración del condensado, se obturó una

tubería. Al no funcionar correctamente el sistema de refrigeración de emergencia, se produjo un aumento de temperatura y una fuga radiactiva, dando lugar a una dosis radiactiva sobre la natural (2,4 mSv/año) inferior una mSv/año (dosis media recibida al año por una persona por radiografías médicas).

- Año 2007. Kashiwazaki Kariwa NPS. Se produjo un terremoto de fuerza 6,8 a 16 kilómetros de la central nuclear con siete reactores BWR y 8,2 gigavatios eléctricos. Los reactores se pararon sin percances. Se produjo un incendio en el transformador y una fuga del agua de la piscina en donde se enfriaban componentes radiactivos, produciendo una contaminación del orden de la millonésima del límite permitido.

#### *Accidentes en fábricas del ciclo del combustible nuclear*

En el año 1999. Tokaimura. Un operario de la empresa JCO que operaba esta fábrica, vertió 16 kilogramos de uranio enriquecido en un recipiente inapropiado, alcanzándose la supercriticalidad, cuando el límite máximo autorizado era de 2,3 kilogramos.

Esto se hubiese evitado si en la zona de transvase de uranio no hubiesen existido recipientes con una capacidad igual o superior a la masa crítica; si hubiese existido una adecuada inspección del Consejo de Seguridad Nuclear de Japón y de la propia empresa y por último si los operarios de la fábrica hubiesen tenido la calificación y el entrenamiento adecuado.

A las 12 horas sonaron las alarmas, pero se avisó a las autoridades una hora más tarde y a la población cerca de dos horas después del accidente, 49 personas, entre trabajadores de la fábrica y de los pueblos cercanos, sufrieron los efectos de la radiactividad, muriendo dos de ellos. seis altos cargos de la empresa JCO fueron condenados a penas de entre dos y tres años de cárcel.

#### *Accidente de Chernóbil*

Desde el año 1943 se han ido estudiando, en Estados Unidos y otros países, distintos tipos de futuros reactores nucleares, los cuales deberían cumplir la condición necesaria, pero no suficiente, de ser intrínsecamente seguros, es decir, tener el coeficiente de reactividad por temperatura y huecos negativo, o sea, ser submoderados. Se desecharon, por peligrosos, por ser intrínsecamente inseguros los de grafito-agua ligera (tipo empleado en los reactores de Chernóbil),

debido a que tienen el coeficiente de reactividad por temperatura y huecos en el arranque, positivo (cuando aumenta la temperatura, aumenta el número de fisiones y, por tanto, la energía producida, originando un aumento mayor de temperatura, hasta la fusión del núcleo del reactor). Son reactores sobremoderados. Los restantes tipos de reactores desarrollados en los países democráticos son intrínsecamente seguros, submoderados.

Debido a esto, este tipo de reactores nunca debe emplearse para la producción de energía eléctrica. Ningún consejo de seguridad nuclear autorizaría su construcción. Sin embargo, tienen la ventaja de que son fáciles de construir, baratos y son los óptimos para producir plutonio militar para las bombas atómicas.

Sin embargo, durante la Segunda Guerra Mundial, Estados Unidos construyeron en Hanford (estado de Washington) nueve reactores de grafito-agua ligera, cuya energía se disipaba en la atmósfera. Ante el peligro real de que tarde o temprano se produjese un grave accidente nuclear, una vez que obtuvieron el plutonio militar para la mayoría de las 33.000 cabezas nucleares que tenían en el año 1966, fueron todos desmantelados entre los años 1964 y 1987.

Después de la Segunda Guerra Mundial, la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS) construyó 15 reactores de grafito-agua ligera, con los que obtuvieron el plutonio militar para la mayoría de las 45.000 cabezas nucleares que tenían en el año 1986 siendo desmantelados entre los años 1987 y 1992. Sin embargo, a diferencia de Estados Unidos, y al no tener que someterse a ningún control de seguridad nacional decidieron construir 18 reactores de este tipo para la producción de energía eléctrica, y naturalmente de plutonio militar. Para reducir el riesgo muy probable de un accidente nuclear, emplearon un complejo sistema de seguridad. Construyeron:

- 4 en Chernóbil (Ucrania) (actualmente fuera de servicio).
- 2 en Lituania (pararon uno en el año 2004 y el otro lo harán en el año 2010).
- 12 en la Federación Rusa.

Actualmente la Federación Rusa está introduciendo una serie de mejoras en este tipo de reactores, principalmente reduciendo la submoderación de neutrones, con objeto de obtener un coeficiente de reactividad por temperatura y huecos, a ser posible, ligeramente negativo.

Con objeto de demostrar que era erróneo lo que predecían los físicos e ingenieros nucleares sobre lo peligroso que resultaban los reactores de grafito-agua ligera (tipo RBMK o de Chernóbil), el equipo de operación de la unidad cuatro de Chernóbil decidió efectuar el 26 de abril de 1986 un experimento extraordinariamente arriesgado que nunca habría sido autorizado en un país democrático. Posiblemente subyacía obtener la más alta distinción de la URSS (Orden de Lenin), lo que suponía una serie de mejoras sociales: mayor sueldo, una vivienda mayor, acceso a economatos oficiales, etc. Cerraron la entrada de vapor en la turbina para demostrar que la inercia de la turbina en vacío, era suficiente para mover las bombas de refrigeración de emergencia. Para aumentar la potencia extrajeron 162 barras de control (de las 170 que tenían) dejando sólo ocho dentro del reactor, violando las normas de seguridad que exigían que hubiese, un mínimo, de 30 barras de control dentro del reactor.

Sucedió lo que estaba previsto en todos los textos de teoría de reactores. Subió la temperatura y, por tanto, creció el número de fisiones y en consecuencia aumentó la energía producida y de nuevo la temperatura. (Este tipo de reactores tiene el coeficiente de reactividad de temperatura y huecos positivo durante el arranque). El equipo de operación intentó parar el reactor introduciendo las 162 barras de control extraídas, pero debido al aumento de temperatura, se atascaron, no pudiendo parar el reactor. La temperatura subió hasta fundir todos los elementos combustibles. Al arder las 1.700 toneladas de grafito que tenía el reactor, se formó un gigantesco horno, expulsando a la atmósfera isótopos radiactivos que contenía el combustible. Como nos enseñó Eugenio D'Ors:

«Los experimentos hay que hacerlos con gaseosa.»

El accidente de Chernóbil se produjo en el año 1986 y sólo cinco años más tarde la URSS iba a disolverse como Estado, lo cual explica la situación de inestabilidad que se estaba viviendo. Por otro lado, esta época coincidió con un periodo de guerra fría en el que la propaganda anti-soviética se hallaba en pleno vigor. A la propaganda política se le unió la antinuclear, muy activa en la década de los años ochenta. Todo ello llevó a que la cifra de 200.000 muertos cuajase en los medios de comunicación como resultado del accidente. A partir del año 2002 diversas organizaciones internacionales han realizado una serie de investigaciones llevadas a cabo por equipos multidisciplinares en los que han participado

más de un centenar de biólogos, ingenieros, médicos, ecologistas, meteorólogos, economistas y científicos nucleares, con objeto de analizar los efectos producidos en Chernóbil. Entre otros, podríamos destacar los siguientes informes oficiales:

- Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts and Recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine. The Chernobyl Forum 2003-05. Second revised edition: IAEA, WHO, UNDP, FAO, UNEP, UN-OCHNA, UNSCEAR, WORLD BANK GROUP. Belarus, The Russian Federation and Ukraine.
- The Human Consequences of the Chernobyl Nuclear Accident. A Strategy for Recovery. A Report Commissioned by UNDP and UNICEF with the support of UN-OCHNA and WHO. Chernobyl Report-Final-240102. 25 January 2002.
- Chernóbil Assessment of Radiological and health Impacts. 2002 Update of Chernóbil: Ten years on. Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-Operation and Development.
- World Health Organization. Chernobyl: The true scale of the accident. 5 September 2005.

El 5 de septiembre de 2005 la Organización de Naciones Unidas (ONU) publicó un amplio y exhaustivo informe realizado por un centenar de médicos, biólogos e ingenieros de ocho organizaciones internacionales, la mayoría reacias a la energía nuclear:

- Organismo Internacional de la Energía Atómica (OIEA).
- Organización Mundial de la Salud (OMS).
- Programa para el Desarrollo de la ONU (UNDP).
- Programa de Medio Ambiente de la ONU (UNEP).
- Agencia de Asuntos Humanitarios de la ONU (UNOCHA).
- Comité sobre Efectos de la Radiación Atómica de la ONU (UNSCER).
- Organización de la Agricultura y Alimentación (FAO).
- Federación Rusa.
- República de Ucrania.

Aunque las cifras de muertos y de enfermos por la radiactividad no coinciden, puede establecerse el siguiente límite superior:

- Muertes: menos de 100 durante el accidente y desde los años 1986-2005. De los cuales unos 50 fueron bomberos y trabajadores que murieron por quemaduras durante los primeros días del accidente y unos 10, principalmente niños, de cáncer de tiroides (producido por el I-131).

- Enfermos por radiactividad: menos de 5.000, principalmente por cáncer de tiroides (producido por el I-131) que al ser tratados médicamente sobrevivieron estos 20 años. Como el I-131, es emisor beta, y tiene una semivida de ocho días, al cabo de unos meses después del accidente desapareció por desintegración, quedando sólo trazas. Todos los enfermos por cáncer de tiroides recibieron la radiación durante las primeras semanas. Los médicos estiman que un 1% de estos enfermos morirán debido a los efectos secundarios producidos por el tratamiento médico.
- Ligero aumento de casos leves de leucemia, entre bomberos y trabajadores de la central, que han sobrevivido debido al tratamiento médico. No se han observado abortos, ni malformaciones, ni disminución de la fertilidad.
- Se han observado trazas del Cs-137, emisor beta, con semivida de 30 años, en líquenes y hongos de los bosques de Finlandia y Suecia.

Como resumen de lo anterior, se obtiene que el número de muertos debidos al accidente de Chernóbil durante estos 20 años, más el 1% de los 5.000 enfermos por radiactividad, también puede estimarse en menos de 150.

Esta cifra no coincide con la cifra de 200.000 muertos repetidamente utilizada en la propaganda antinuclear y que es un caso típico en el que puede emplearse uno de los principios de Joseph Goebbels:

«Una mentira repetida suficiente número de veces, vale tanto como la verdad. Cuanto mayor sea la mentira más gente se lo creerá.»

Como comparación con el accidente de Chernóbil, se relacionan dos de los accidentes no nucleares producidos en la misma época:

- El 3 de diciembre de 1984 se produjo el accidente en la fábrica de Bhopal (India) que, aunque a fecha de hoy sigue sin clarificarse el número de víctimas, según el gobierno de Madhya Pradesh se produjeron 3.787 en el momento del accidente. Otras fuentes apuntan a que el número de víctimas es superior.
- En Ortuella (Vizcaya), en el Colegio Público «Marcelino Ugalde», el 23 de octubre de 1980 se produjo una explosión debido a una fuga de propano que causó 52 muertos, de ellos 49 eran niños entre cinco a seis años, dos profesores y la cocinera del colegio.

## **Proliferación nuclear producida por las centrales de fisión nuclear**

La pregunta es: ¿Con el plutonio obtenido de un reactor nuclear operando para la producción eléctrica se puede construir una bomba atómica que al explosionar produzca unos cuantos kilotonnes?

En el año 1962 Estados Unidos explotó un artefacto nuclear empleando el plutonio obtenido de los elementos gastados de un reactor nuclear de potencia eléctrica.

Los datos publicados no ofrecen ninguna fiabilidad, por lo que decidimos desarrollar una serie de códigos de cálculos para calcular la operación de un reactor productor de energía eléctrica y de uno plutónigeno. Los resultados indican que la probabilidad de obtener una bomba atómica que pudiera ser transportada del lugar de fabricación a un objetivo determinado y que la explosión produjese una energía apreciable, es muy reducida.

La proliferación nuclear se puede producir, principalmente, durante la fase de enriquecimiento para obtener el combustible empleado en un reactor comercial de energía eléctrica.

## **Reactores nucleares de las Generaciones III, III+ y IV**

Los reactores nucleares de la Generación I fueron los de Shippingport, Dresden, Fermi I, Magnox de grafito-gas, construidos en la década de los años cincuenta y mediados de los años sesenta.

Los de la Generación II fueron los PWR de agua ligera a presión, BWR de agua ligera en ebullición, CANDU de agua pesada, construidos durante las décadas de los años setenta y ochenta. Los reactores nucleares construidos en España fueron del tipo PWR y BWR, excepto el de Vandellós I que fue del tipo Magnox.

Los de la Generación III, llamados también «evolutivos», emplean la tecnología probada de los de la Generación II pero introduciendo numerosos avances, como diseños estandarizados, sistemas de seguridad mejorados, reducción de la probabilidad de fusión del núcleo, mayor quemado del combustible, etc. Todas estas mejoras suponen un menor coste de capital, vida de 60 años, reducción de residuos radiactivos, etc.

**Cuadro 19.- Centrales nucleares de las Generación III y III+.**

<b>Países (diseñadores)</b>	<b>Tipo</b>	<b>Potencia (megavatios eléctricos)</b>	<b>Estado</b>	<b>Características</b>
<i>Evolutivos (III)</i> Estados Unidos y Japón (GE, Hitachi y Toshiba)	ABWR	1.300	Operación en Japón (1997) Certificado NRC (1997)	Más eficiente Menos residuos Cuatro años en construcción
Estados Unidos y Corea (Westinghouse)	System 80+	1.300 1.400	Certificado NRC (1997)	Mayor flexibilidad
Francia y Alemania (Framatome)	EPR	1.550 1.750	Diseño completado (1997) Certificación (2005)	Seguridad mejorada Bajo coste combustible
Suecia (Westinghouse)	BWR 90+	1.500	En desarrollo	Corta construcción Seguridad mejorada
Japón (Westinghouse y Mitsubishi)	APWR	1.500	En diseño básico	Seguridad híbrida
<i>Pasivos (III+)</i> Estados Unidos (Westinghouse)	AP-600 AP-1000	600 1.100	Certificado NRC (1997) Certificado NRC (2006)	Tres años en construcción Sesenta años de vida
Alemania (Framatome)	SWR-1000	1.200	Diseño (1999)	Alta eficacia combinada Diseño innovador
Estados Unidos (GE)	SBWR ESBWR	640 1.550		



**Cuadro 19.- (Continuación).**

Países (diseñadores)	Tipo	Potencia (megavatios eléctricos)	Estado	Características
<i>Inherentemente seguros</i> Estados Unidos (Westinghouse y DOE)	IRIS	330 módulo	Diseño preliminar Pre-certificación NCR	Seguridad por diseño
Estados Unidos (Combustión+RR)	SIR	320	En desarrollo	Diseño integrado
Suráfrica (Eskom y BNFL)	PBMR	165 módulo	Prototipo en el año 2014	Bajo coste modular Turbina de gas Alta eficacia combinada
ABB Atom	PIUS			
Corea	SMART	330 módulo		Desalación
Rusia	KLT-40S	40	Usado en rompehielo	
Italia (Ansaldo)	ISIS	320		

Fuente: C. Ahnert. «La tercera evolución energética», *Monografía del CESEDEN* (pendiente de publicación)

Los reactores nucleares de la Generación III+, se llaman «pasivos», ya que emplean las leyes naturales de la física como convección natural y gravedad, eliminando los motores eléctricos empleados en los sistemas de control de la reactividad y de refrigeración de emergencia.

Por último, los de Generación IV son reactores rápidos o de alta temperatura que pretenden reducir la proliferación nuclear y aumentar la protección física frente a ataques terroristas. Estos reactores probablemente entrarían en servicio hacia el año 2030.

En el cuadro 19, se relacionan los reactores nucleares de las Generaciones III y III+ desarrollados y en fase de desarrollo, llevados a cabo por diferentes empresas.

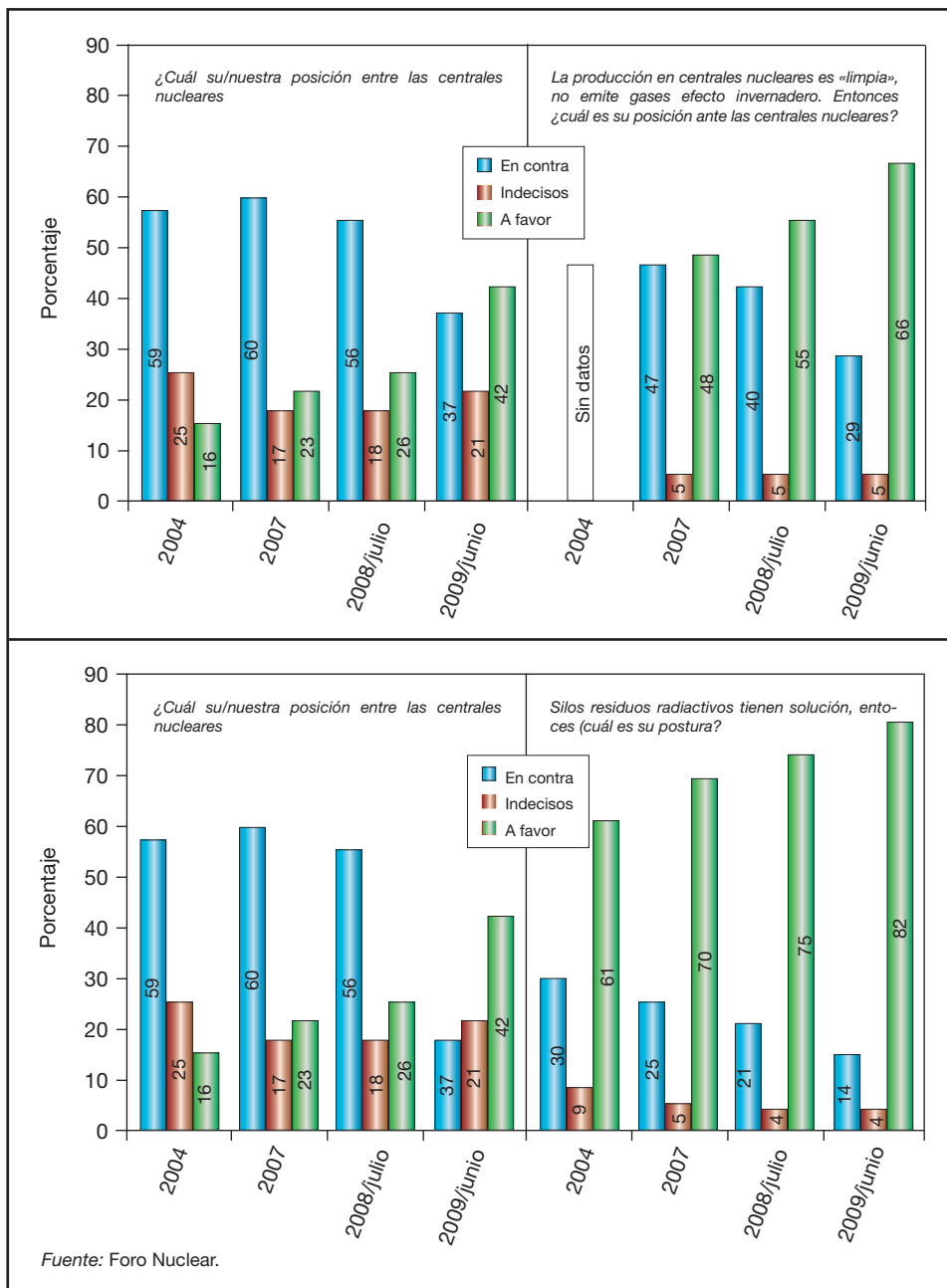
Con objeto de acortan el proceso de puesta en servicio de estas nuevas centrales nucleares, se procederá al Licenciamiento Conjunto de su Construcción y Operación, COL (*Construction and Operating Licence*).

### **Opinión pública sobre las centrales nucleares productoras de energía eléctrica**

En España existía una corriente política contraria a la energía nuclear. De este modo cualquier accidente que se produjese en el turboalternador de una central de carbón o de gas se omitía por falta de interés, pero si este accidente por mínimo que sea, se produjese en una central nuclear, se informaba públicamente que ha habido un accidente en tal central, sin especificar que ha sido en la parte convencional. Todo ello ha ido creando un pozo de preocupación y a veces de rechazo social hacia este tipo de energía.

Sin embargo, al ir siendo paulatinamente informada la población española, sobre las ventajas e inconvenientes de la energía de fisión nuclear y, principalmente, ante la necesidad de obtener una energía barata, segura y de suministro fiable, la opinión pública española ha ido cambiando en los últimos años, según reflejan las encuestas resumidas en la figura 18.

La opinión pública española favorable a las centrales nucleares ha ido aumentando de un 16% en el año 2004 a un 42% en el año 2009. Pero cuando se dice que estas centrales no emiten, durante su operación, gases de efecto invernadero, la opinión favorable aumenta del 48% en 2004 al 66% en 2009, si además se explica que la eliminación de los residuos radiactivos pueden tener solución, la postura favorable aumenta del 61% en 2004 el 82% en el año 2009.



**Figura 18.**— Posición de los españoles ante la producción de energía eléctrica en centrales nucleares.

Como colofón a la opinión pública, cabe destacar las declaraciones del ministro de Asuntos Exteriores de Francia, B. Kouchner quien en 2008, dijo:

«Francia apostó por la energía nuclear. Fue el precio pagado por su independencia, su prosperidad, su libertad... Hoy tenemos un grado de autonomía que beneficia a cada francés. El coste de nuestra electricidad es el más baja del mundo y nuestra economía es una de las más limpias, en términos de emisión de CO<sub>2</sub>.»

Presidente de Estados Unidos, Barack Obama quien en 2010 dijo:

«La construcción de nuevas centrales nucleares creará empleo estable, relanzará la fabricación de bienes de equipo, ayudará a reactivar la economía y permitirá el desarrollo tecnológico del país.»

En el cuadro 20, se expone la encuesta del año 2004 en España sobre la opinión de las diversas fuentes de energía. Se obtuvo que la mayoría creía que las energías eólicas y solar eran las más baratas y la que deberíamos usar en el futuro:

«Nunca tantos se han equivocado tanto.»

**Cuadro 20.**– Encuesta en España sobre las diferentes fuentes energéticas, en porcentaje.

Conceptos	Carbón	Petróleo	Gas	Hidráulica	Nuclear	Solar	Eólica	Biomasa
La que más electricidad da	6,1	18,3	11,2	34,4	15,5	41,9	25,5	3,7
La más fácil de aprovechar	8,1	12,5	9,1	31,3	6,1	48,6	36,1	3,9
La que más riesgos tiene para la salud	21,1	38,5	15,9	1,3	79,6	1,0	0,9	1,8
La que más contamina	33,3	61,2	13	1,0	54,7	0,1	0,3	2,1
La que exige mayor tecnología	3,7	11,3	5,1	11,4	60,6	24,1	12,9	4,2
La más barata	8,9	5,3	6,5	22,4	6,8	56,3	44,9	3,5
La más adecuada para los países desarrollados	4,1	19,1	9,6	18,9	23,7	33,3	23,1	2,5
La energía que deberíamos usar en el futuro	2,8	9,1	7,3	14,9	14	56,3	40,7	4,4

Fuente: Imagen de la Energía Nuclear en el año 2004, Pisos-Foro Nuclear, julio de 2005.

## **Energía de fusión nuclear**

La fusión nuclear es un proceso opuesto a la fisión nuclear. Ésta se produce al bombardear con neutrones los elementos más allá del hierro en el sistema periódico, preferentemente el uranio y el plutonio, produciendo más neutrones que pueden mantener la fisión autosostenida, pero produciendo, también, residuos radiactivos. La fusión nuclear es la energía originada en las estrellas y, en particular en el Sol, y que pretendemos desarrollar en la Tierra; se produce en los elementos del hidrógeno al hierro, preferentemente en los isótopos del hidrógeno: deuterio y tritio. El deuterio se encuentra en el agua y el tritio, aunque no existe en la Tierra, se obtiene en el mismo reactor de fusión nuclear al bombardear el Li-6, empleado como refrigerante, con los neutrones producidos en la fusión nuclear. Como en todo proceso tecnológico, la fusión nuclear tiene una serie de ventajas e inconvenientes que es necesario analizar.

### *Ventajas*

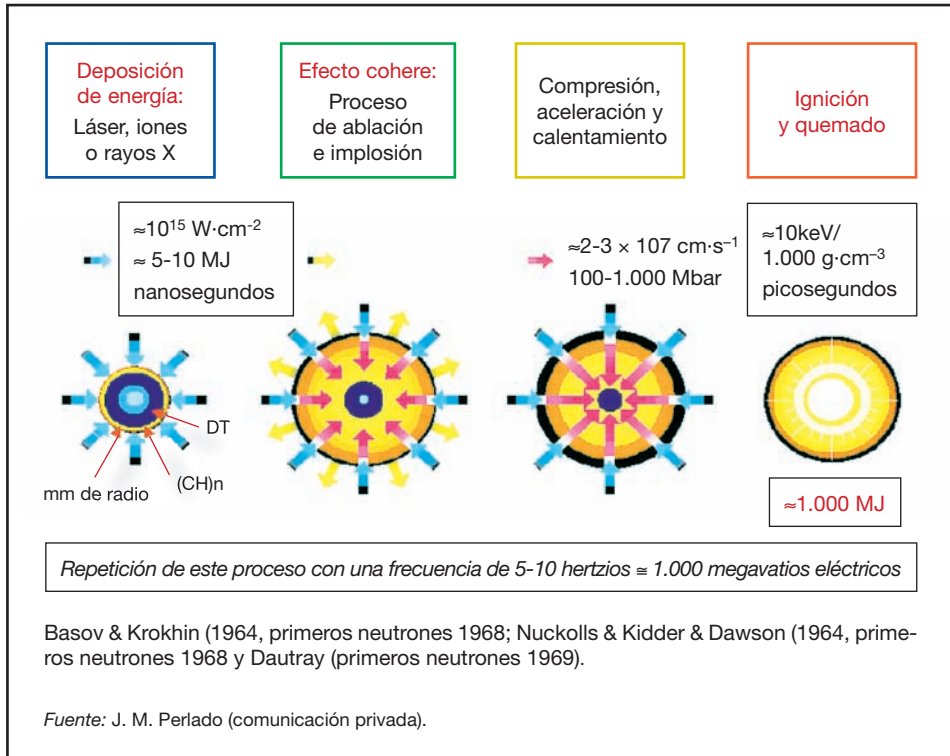
Las principales ventajas de la fusión nuclear, son:

- La energía producida en la fusión del deuterio, contenido en un litro de agua (34 miligramos de deuterio por litro de agua, es equivalente a la energía obtenida en la combustión de 340 litros de gasolina.
- El deuterio contenido en el agua es suficiente para abastecer a la humanidad durante un tiempo superior al transcurrido desde la formación de la Tierra hasta nuestros días, o bien, durante un tiempo superior a la vida esperada en la Tierra, unos 4.500 millones de años.
- El deuterio está al alcance de todos los países, evitando el chantaje energético a que estamos sometidos con los combustibles fósiles.

### *Inconvenientes*

Los principales problemas que hay que resolver en la fusión nuclear, son:

- Para que la energía producida compense a la consumida, es necesario calentar el medio con deuterio y tritio a temperaturas superiores a los 50 millones de grados, típicamente unos 100 millones de grados. A estas temperaturas el medio no es sólido, ni líquido, ni gaseoso, es un plasma, en donde los electrones de los átomos están separados de los núcleos atómicos. Si en vez de los isótopos del hidrógeno se



**Figura 19.**– Fases de la fusión por confinamiento inercial.

emplease el oxígeno habría que calentar el plasma a 5.000 millones de grados.

- Por término medio, en cada millón de colisiones del deuterio con el tritio se produce una sola fusión, luego el plasma debe estar confinado para que el deuterio y el tritio tengan opción de chocar más veces, producir fusiones y por tanto energía.

Este confinamiento puede llevarse a cabo por tres métodos distintos: por confinamiento gravitacional empleando la fuerza de la gravedad (caso de las estrellas), por confinamiento inercial empleando ondas de presión o magnético empleando campos magnéticos, figura 19.

### Confinamiento gravitacional

Las estrellas y, en particular, el Sol, están formadas inicialmente por una bola de hidrógeno que, por efecto de la fuerza de la gravedad, se

han comprimido y calentado hasta alcanzar la temperatura de fusión. La energía solar es la emitida por el reactor nuclear Sol y, por tanto, la energía solar es técnicamente la energía de fusión nuclear por confinamiento gravitacional, aunque habitualmente se la suele incluir dentro de las energías renovables.

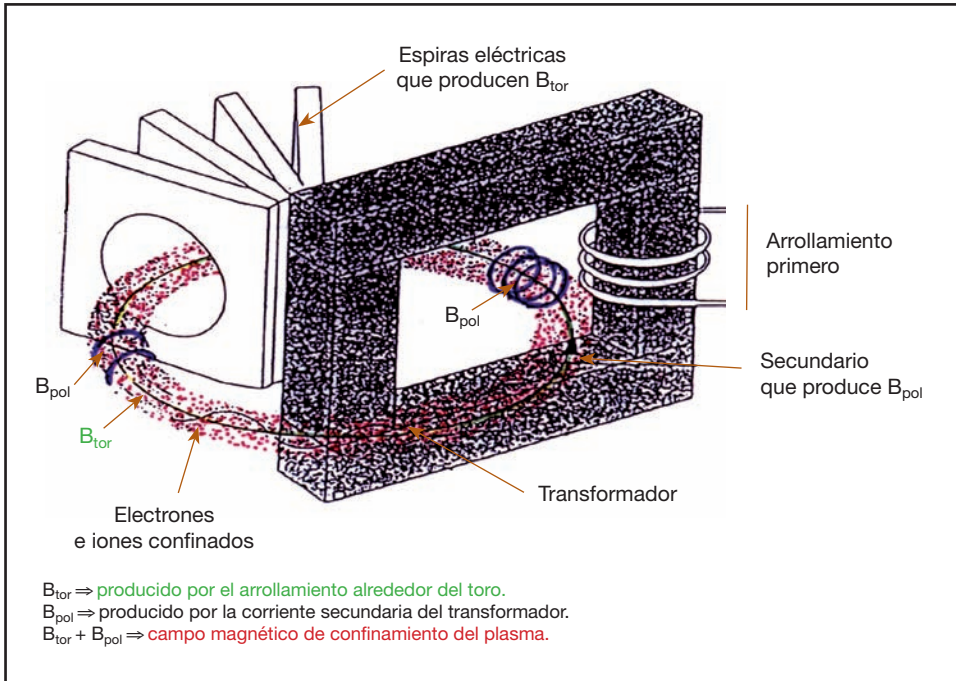
*Confinamiento inercial*

Al incidir los fotones de un láser o haces de iones lo más uniformemente sobre la superficie de una microbola, de un miligramo de deuterio-tritio, se origina un proceso de ablación el cual genera una onda de presión de unos 1.000 millones de atmósferas que comprime la microbola calentándola a la temperatura de fusión, según se describe en la figura 19. Se producen temperaturas y presiones que no se dan en el Sistema Solar, son las que se producen en una supernova.

La energía requerida del láser es de unos 10 megajulios. Con objeto de reducir esta energía se emplean diversas configuraciones, entre ellas, el empleo del efecto *Ulam-Teller* aplicado a las bombas temonucleares. En la figura 20, se indican los principales centros de investigación en el mundo, de la fusión nuclear por confinamiento inercial. Entre ellos se encuentra el Instituto de Fusión Nuclear (DENIM).



**Figura 20.**– Principales centros de investigación en el mundo.



**Figura 21.-** TOKAMK (Torodalnaya Kamera Magnitnaya), URSS finales de los años cincuenta.

### Confinamiento magnético

Se origina por la composición de dos campos magnéticos, figura 21, el toroidal, producido por el arrollamiento eléctrico alrededor de un toro, que a su vez constituye la única espira de un transformador, y el poloidal, producido por la corriente secundaria del transformador. En España, el CIEMAT, antiguamente la JEN, es el Centro en donde se desarrollan estas investigaciones de fusión.

### Reactores experimentales de fusión nuclear

El 29 de mayo de 2009 se inauguró en el Laboratorio Nacional de Lawrence en Livermore (Estados Unidos) el reactor experimental de fusión nuclear por confinamiento inercial NIF (*National Ignition Facility*) en donde se instalará el LIFE para la transmutación de residuos radiactivos y, probablemente, dentro de dos a cuatro años se inaugurará el LMJ (*Laser Mega Joule*), cerca de Burdeos (Francia). Con estos reactores experi-



mentales se espera conseguir la fusión nuclear con ganancia apreciable de energía. En la figura 22 se observa la construcción del NIF, y en la figura 23, p. 152, la fotografía del NIF ya terminado.

Si los resultados obtenidos fuesen los proyectados, en la década de los años 30 se construiría un reactor demostrador de potencia y, si los resultados siguen siendo aceptables, para mediados de siglo se iniciaría la construcción de un reactor de fusión nuclear productor de energía eléctrica. Sin embargo, la experiencia nos dice que en los procesos de I+D no siempre sale todo bien, con lo que la construcción de este reactor podría retrasarse durante la segunda mitad de este siglo.

En el campo de la fusión nuclear por confinamiento magnético, un consorcio internacional, en el cual participa España, va a construir el reactor experimental ITER (*International Termonuclear Experimental Reactor*) en Cadarache (Francia) el cual entrará en operación a finales de esta década o principios de la próxima, con lo cual se espera también obtener la fusión nuclear con ganancia de energía. En la figura 24, p. 153, se representan una maqueta del ITER. Otros experimentos de fusión nuclear en los que participa el DENIM.



Fuente: J. M. Perlado (comunicación privada).

**Figura 22.**– Láser de Nd cristal con energía de 1,8 megajulios en 3 vatios (= 0,35 micras) con 192 haces y que dará una ganancia energética de 30 como máximo (E por fusión/E de iluminación del blanco por láser).



Fuente: Lawrence Livermore National Laboratory.

**Figura 23.**– Fotografía del NIF ya terminado.

### *HIPER*

Es un proyecto europeo, dentro del Programa de Diseño de Grandes Infraestructuras (ESFRI), cuyo objetivo es el diseño de una instalación para la obtención de energía mediante la fusión inercial por láser usando la aproximación de ignición rápida.

### *ELI*

Es un proyecto europeo, también dentro del ESFRI, para el diseño de una instalación con un láser de una potencia de unos exavatios (de muy alta intensidad) capaz de lograr estados de la materia hasta ahora no alcanzados.

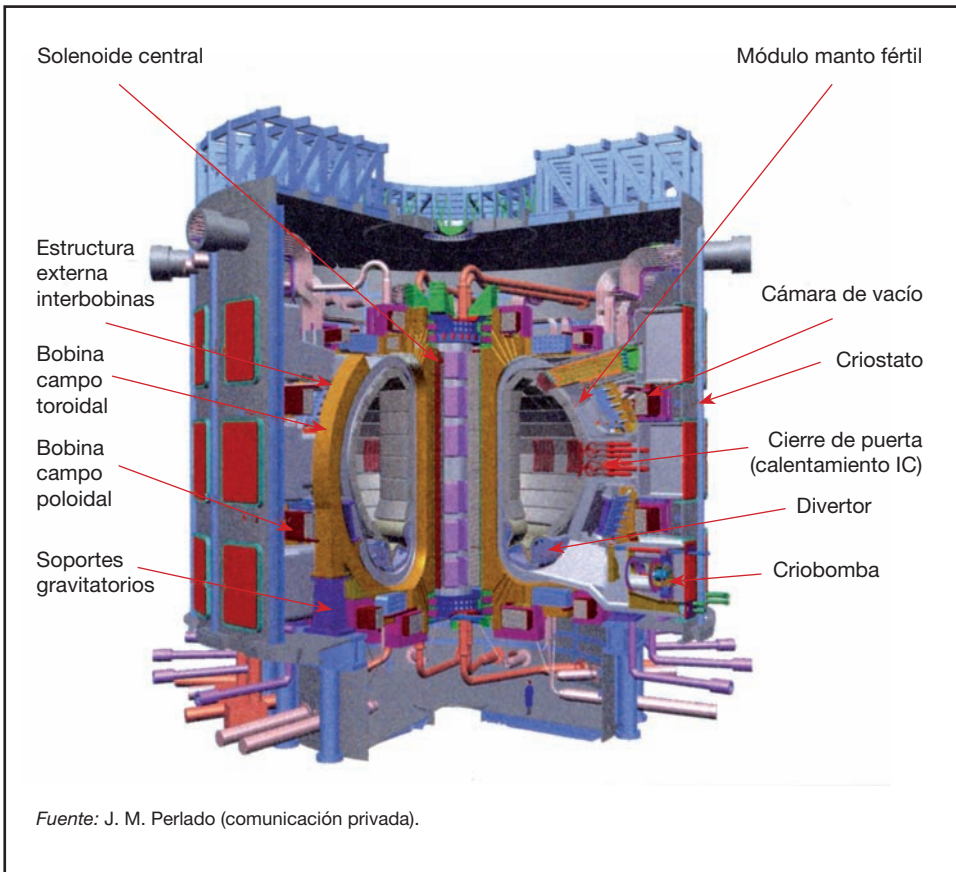
### *TECHNOFUSION*

Es una instalación española realizada entre el Gobierno y la Comunidad de Madrid a través del CIEMAT y del DENIM de la Universidad Poli-

técnica de Madrid. Son instalaciones para la fabricación de materiales avanzados, el estudio de la irradiación, de los efectos plasma-pared, robótica, tecnología de metales líquidos, técnicas de caracterización de materiales sin y con irradiación a escala atómica, micro, meso y macroscópica.

*GETMAT*

Son proyectos europeos integrados en el área de materiales bajo irradiación y de transmutación de residuos radiactivos mediante el sistema de generación de reacciones de espalación con protones acelerados a un gigaelectrón voltio.



**Figura 24.**– Esquema del dispositivo ITER.

caciones, etc.). En la figura 4 se da la potencia por habitante de Europa, resaltando que España tiene la máxima potencia instalada por habitante análogamente a como sucede en el caso de la energía eólica.

### *DENIM*

Es uno de los pocos Institutos de Investigación de la Comunidad de Madrid, fundado en el año 1981 y asociado a la Universidad Politécnica de Madrid. Está formado con personal de pleno derecho de tres Universidades: la Politécnica de Madrid, la Nacional de Educación a Distancia y la de Las Palmas de Gran Canaria.

Colaboran con el DENIM las Universidades Politécnica de Cataluña y la de Alicante, la Fundación para el Fomento de la Innovación Industrial y los centros internacionales de: Lawrence Livermore National Laboratory (Estados Unidos), Rutherford Appleton Laboratory (Reino Unido) Commissariat à l'Énergie Atomique (Francia), Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses (Francia), Ecole Polytechnique (Francia), Institute Laser Engineering, Osaka University (Japón), ITER Cadarache (Francia), Universities of Reno, Berkeley y Wisconsin (Estados Unidos), FZK Karlsruhe (Alemania), University of Thrace (Grecia), Lebedev Physical Institute (Rusia), etc.

### **Experimentos realizados de fusión nuclear**

La viabilidad de la fusión nuclear se basa en los trabajos teóricos y experimentales y en los resultados obtenidos. Con el NIF y el ITER se obtendría la confirmación de la fusión nuclear.

El experimento que demostró la fusión nuclear por confinamiento inercial con ganancia de energía se realizó en el año 1987 es el experimento Centurión Halite, empleando la energía de un haz de rayos X de 100 megajulios y obteniendo una energía de fusión de 10.000 megajulios, con una ganancia de 100. Se efectuó una explosión nuclear subterránea de 100 kilotones para realizar diversos experimentos de física atómica, nuclear y de biología. En uno de estos experimentos se obtuvo un intenso haz de rayos X que al enfocarlo sobre una microbola de deuterio y tritio, se produjo la fusión nuclear, con lo que se demuestra que la fusión nuclear por confinamiento inercial es físicamente posible. El problema radica ahora en obtener un láser o un acelerador de partículas de energía suficiente, de pocos megajulios, capaz de conseguir una ganancia de más de 100.

Se espera que con el NIF, actualmente en operación, se pueda obtener una ganancia apreciable de energía que inicie el camino a un reactor –demostrador de potencia–, paso previo para construir un reactor comercial de fusión nuclear productor de energía eléctrica.

## **Bibliografía**

DÍAZ FERNÁNDEZ, J. K.; ROMERO, A.; CARO, R.; MARTÍN, M.; VELARDE, J.; AHNERT, C.; PERLADO, J. M.; MANSO, R.; MÍNGUEZ, E.; VELARDE, G. y CARPINTERO SANTAMARÍA, N.: «La energía y su relación con la Seguridad y la Defensa», *Monografía del CESEDEN*, número 98, Madrid, 2007.

*Energy Technology Perspectives 2008*, International Energy Agency, 2008.

FORO NUCLEAR: *La energía en el Mundo y en España*, 2009.

VELARDE, G. y CARPINTERO SANTAMARÍA, N.: «Key Aspects on the Non-proliferation Measures», *Springe*, Countering Nuclear and Radiological Terrorism.

VELARDE, G.: *Energía de fisión y fusión nuclear en cambios climáticos y retos energéticos*, Instituto de España, 2008.

VELARDE, G.; DÍAZ GONZÁLEZ, J. L.; CARPINTERO SANTAMARÍA, N.; CERVERA, J.; AHNERT, C.; CARO, R.; MÍNGUEZ, E. y VELARDE, J.: «La crisis energética y su repercusión en la Economía, Seguridad y Defensa», *Documentos de Seguridad y Defensa*, número 18, del CESEDEN, Madrid, 2008.