



EL FUTURO CIENTÍFICO DE LA ENERGÍA ESPAÑOLA

Guillermo Velarde Pinacho

Universidad Politécnica de Madrid

1. Introducción

Prescindiendo de cuestiones políticas excluyentes o dogmáticas que tanto han envenenado el panorama energético español y que nada tienen que ver con problemas económicos ni técnicos, la realidad es que España está inmersa en un grave problema energético de difícil solución. Este problema afectará negativamente a su desarrollo económico e industrial y viene reflejado en el hecho de que España importa un 78% de la energía que consume, mientras que la Unión Europea (UE) importa un 53% y los Estados Unidos un 25%.

Sus principales causas se deben al acuerdo entre la UE y España en el reparto de gases de efecto invernadero debido al Protocolo de Kioto y a la moratoria nuclear.

RESUMEN

El problema energético español viene reflejado en el hecho de que España importa un 78% de la energía que consume, mientras que la Unión Europea (UE) importa un 53% y los Estados Unidos un 25%. Las principales causas de este problema energético se deben a dos circunstancias. La primera es el acuerdo entre la UE y España en el reparto de gases de efecto invernadero debido al Protocolo de Kioto y la segunda a la moratoria nuclear. Si se hubiesen ido construyendo las centrales nucleares proyectadas a mediados de la década de los años 70, ahora tendríamos un *mix* energético análogo al francés y la mayoría de los problemas energéticos actuales de España estarían resueltos.

En este capítulo se describen las ventajas e inconvenientes de las diferentes fuentes de energía desde el punto de vista de la contaminación ambiental, las reservas del combustible y su disponibilidad, la seguridad de las centrales y el coste de la energía eléctrica producida.

Asimismo, se expone cuál debería ser la solución al problema energético español y los esfuerzos que deberían realizarse en la I+D de las diferentes energías.

ABSTRACT

The problem of energy supply in Spain comes from the fact that Spain imports 78% of its energy consumption whereas the European Union imports the 53% and the USA the 25%. The main causes of the Spanish energy problem are, both the agreement between the EU and Spain in the sharing of the rate of the Greenhouse gas emissions derived from Kyoto Protocol and the nuclear moratorium. This moratorium stopped the construction of the nuclear power plants projected in the mid-70s. Had these nuclear power plants been constructed, we would have presently an energetic mix similar to the French energetic mix and thus most of our energy problems would have been solved.

This work describes advantages and drawbacks of different energy sources under the perspective of environmental pollution, fuel reserves and their availability, security and safety of nuclear power plants and the cost of the energy produced.

The solution to the Spanish energy problem is also presented together with the recommended efforts that should be done in the R&D of different energy sources.

1.1. Protocolo de Kioto

Los gases de efecto invernadero son aquellos cuyas moléculas contienen tres o más átomos (vapor de agua, dióxido de carbono, CO_2 ; metano, CH_4 , etc.). El CO_2 tiene una vida media en la atmósfera de unos 100 años, mientras que el metano de unos 12 años. Sin embargo, el calentamiento atmosférico producido por 1 kilogramo de metano equivale al producido por 23 kilogramos de CO_2 .

La variación o cambio climático es función de diversas variables: vapor de agua y otros gases de efecto invernadero, variación del flujo energético solar, etc.

Actualmente no existe ninguna teoría científica que permita establecer esta función, por lo que se recurre, como es habitual en ciencias, a modelos. El modelo más aceptado es el «Palo de Jockey», llamado así por la forma de la curva de concentración de CO_2 en la atmósfera en el transcurso de los últimos mil años, y se basa en los datos tomados en los últimos mil años en las capas de hielo de los glaciares, en los anillos de los árboles y del coral (Mann: *Nature*, 1998; y Bradley y Hughes: *Geophysical Res. Letters*, 1999).

Este modelo es la base del Protocolo de Kioto y de los sucesivos Planes Intergubernamentales sobre Cambio Climático (IPCC).

El Protocolo de Kioto fue firmado por la UE en 1997 y ratificado en 2002. De acuerdo con el mismo, la UE debe reducir las emisiones de gases de efecto invernadero una media del 8% durante el intervalo de 2008-2012, respecto a las emisiones del año de referencia 1990. En el reparto de estas emisiones dentro de la UE, España puede aumentar la emisión de gases de efecto invernadero en una media del 15% respecto a las emisiones de 1990.

Debido al gran desarrollo industrial de nuestro país desde 1990, antes de la actual crisis energética emitíamos un 50% más que en 1990, habiéndose reducido actualmente a cerca de un 40%.

Lo aceptado por el Gobierno español, aparentemente beneficioso, es subrepticamente lesivo para los intereses de España, ya que si España intentase alcanzar el nivel de desarrollo de las naciones más desarrolladas de la UE, tendría que instalar nuevas centrales de gas, con la consiguiente emisión de CO_2 y la compra correspondiente de los derechos de emisión.

Si todos los habitantes de la UE tienen los mismos derechos y obligaciones, no se entiende por qué el Gobierno español aceptó emitir, por habitante y año, un 30% menos de los permitidos a otras naciones de la UE.

España no debería haber aceptado el límite establecido por la UE del 15% y tendría que haber luchado por conseguir el doble para que, de este modo, la emisión de gases de efecto



invernadero por habitante y año fuese análoga a la de los países más industrializados de la UE. Solamente la desinformación y la ignorancia explican que el 95,7% de los españoles pidieran que se redujese aún más nuestra emisión de gases de efecto invernadero. *Nunca tanta ignorancia alcanzó a tantas personas.*

1.2. Moratoria nuclear

En la década de los 70 y tras la crisis del petróleo de 1973, el Gobierno español decidió, como consecuencia de un estudio sobre las necesidades futuras de energía en España, construir 6 nuevas centrales nucleares: Lemóniz I y II (en el País Vasco); Valdecaballeros I y II (en Extremadura); Trillo II (en Castilla La Mancha) y Sayago (en Castilla-León) y estudiar la posibilidad de construir 27 en las próximas décadas. En la Tabla 1 se indican las centrales nucleares proyectadas y las construidas (en cursiva).

A finales de los 70 se produjeron manifestaciones masivas en el País Vasco de grupos antinucleares, algunos de ellos radicales, con gritos de «ETA, mátalos». ETA aprovechó la ocasión. El 17 de marzo de 1978 puso una bomba en la zona del reactor de Lemóniz, 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 Lemóniz, matando a Ángel Baños. El 29 de enero de 1981 secuestró al ingeniero jefe de Lemóniz, José María Ryan, asesinándolo el 6 de febrero. El 5 de abril de 1982 asesinó al ingeniero director de la sociedad mixta para la construcción de Lemóniz, Ángel Pascual Múgica.

En 1984 el Gobierno aprobó el Plan Energético Nacional, técnicamente inaceptable, que establecía la paralización de las 6 centrales nucleares en diferente estado de construcción, y negaba la autorización para la construcción de las 27 centrales restantes.

Este plan ha producido uno de los mayores desastres económicos desde la transición política hasta 2004, ya que hubo que compensar a las empresas eléctricas implicadas en estas centrales nucleares con 600.000 millones de pesetas (de 1984) con cargo a los recibos de luz de todos los abonados. Ello supuso aumentar la emisión de gases de efecto invernadero en 48 a 24 millones de toneladas de CO₂ al año, según que las nuevas centrales sustitutorias de las nucleares fuesen de carbón o de gas.

Por otro lado, la decisión de la UE de conceder a Francia (Cadache), en vez de a España (Vandellós), la instalación del reactor de fusión nuclear ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) fue debido, en parte, a que la moratoria nuclear desmanteló la floreciente industria nuclear española, produciendo la dispersión profesional de más de 1.000 físicos e ingenieros nucleares, a pesar de que el emplazamiento español era más económico y técnicamente mejor que el francés.

Tabla 1: Centrales nucleares proyectadas en España

Central	Potencia eléctrica (MWe)	Tipo	Emplazamiento (provincia)	Propietaria-explotador	Autorizaciones Previa	Autorizaciones Construcción	Fecha real o prevista de explotación
José Cabrera	160	PWR	Guadalejara	Unión Eléctrica	BOE 3-4-63	BOE 26-6-64	12-12-1968
Sta. María de Garoña	460	BWR	Burgos	Nucleonor	BOE 17-8-63	BOE 18-5-66	29-03-1971
Vandellós I	480	GCR	Tarragona	Hifrensa	BOE 11-5-67	BOE 23-7-68	ago-72
Almaraz I y II	2 x 930	PWR	Cáceres	Unión Eléctrica / Hidroeléctrica Española Sevillana de Electricidad	BOE 19-11-71		01-05-1981
Lemóniz I y II	2 x 930	PWR	Vizcaya	Iberduero	BOE 5-6-72	BOE 30-3-74	08-10-1983
Ascó I	930	PWR	Tarragona	FECSA	BOE 5-6-72	BOE 26-5-74	1978-1979
Ascó II	930	PWR	Tarragona	FECSA/ENHER/HECSA/HES	BOE 10-5-72	BOE 21-4-75	ago-83
Cofrentes	975	BWR	Valencia	Hidroeléctrica Española	BOE 9-12-72	BOE 18-11-75	oct-85
Santillana	900	LWR	Santander	Electra de Viesgo	BOE 9-4-73		oct-84
Punta Endata I y II	2 x 1.000	LWR	Gipúzcoa	Iberduero	BOE 27-11-73		1980-1981
Trillo I y II	2 x 1.000	PWR	Guadalejara	Unión Eléctrica/Eléc. Reun. de Zaragoza E. I Aragonesas	BOE 15-11-75		1982-1983
Valdecaballeros	2 x 1.000	PWR	Badajoz	Sevilla de Electricidad Hidro. Española	BOE 25-11-75		may-88
Regodola	900	LWR	Lugo	Fenosa/Viesgo/H. Cantábrico	BOE 25-8-76		1981-1982
Sayago	1.000	PWR	Zamora	Iberduero	BOE 25-11-75		1982
Vergara	1.000		Navarra	Iberduero			1981
Oguella I y II	2 x 1.000		Vizcaya	Iberduero			1985
CN de Aragón	2 x 1.000		Zaragoza	FECSA/UE/EI/VERZ			1988-1989
Cabo Cope	1.000	LWR	Murcia	Hidroeléctrica Española			1982-1986
Tarifa	2 x 1.000	LWR	Cádiz	Sevillana de Electricidad			1981
Asperillo	2 x 1.000	LWR	Huelva	Sevillana de Electricidad			1981-1983
Azúlán	1.000		Toledo	HE			1980-1990
Orellana o Puerto Peña	1.000		Badajoz	HE/HE/Sevillana			
Vandellós II	1.000	PWR	Tarragona	ENHER/HECSA/Hidroeléctrica del Segre/FECSA	BOE 12-3-76		1988
Vandellós III	1.000	PWR	Tarragona	FECSA	BOE 12-3-76		1988

Fuente: Sánchez Ron (2001).



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 cerca de veinte años más. Se sustituirá por una o dos centrales de gas de ciclo combinado, que emiten cada una 4 millones de toneladas de CO₂ al año (por cada 1.000 MWe).

Aunque actualmente no existe una verdadera moratoria nuclear, las trabas locales, autonómicas y estatales y la mala experiencia en las Centrales de Lemóniz y Valdecaballeros, difícilmente hacen que una compañía eléctrica se aventure en una empresa de final tan problemático y siempre al arbitrio del gobierno de turno.

2. Fuentes actuales de energía

La actual distribución o *mix* de las diferentes fuentes de energía eléctrica en España viene dada en la Tabla 2.

Tabla 2. *Mix* de generación eléctrica en España

	MW	%	GWh	%	Factor de carga (%)
Fósil	42.722	47	158.178	53	42
Nuclear	7.716	9	55.046	19	81
Hidroeléctrica	16.658	18	26.381	9	18
R. especial	10.021	11	29.416	10	34
Eólica	13.606	15	27.026	9	23
Total	90.723	100	296.047	100	

Fuente: Red Eléctrica Española (2007).

Tabla 3. Previsiones futuras de la potencia eléctrica instalada

	MW 2015	%2015	MW 2030	%2030
Nuclear	7.181	7,5	10.782	8,9
Hidro (excl. bombeo)	14.132	14,7	14.409	11,9
Eólica	22.429	23,3	35.912	29,7
Solar	438	0,5	2.451	2,0
Térmica	52.088	54,1	57.234	47,4
- Carbón	7.312	7,6	6.855	5,7
- Gas	37.725	39,2	37.047	30,7
- Fuel	4.142	4,3	5.522	4,6
- Biomasa	2.909	3,0	7.810	6,5
- Pilas combustible	0	0,0	0	0,0
- Geotérmica	0	0,0	0	0,0
Total	96.268	100,0	120.788	100,0

Fuente: Dirección General de Energía y Transportes de la UE, Sociedad Nuclear Española y Segarra (2008).

Tabla 4. Previsiones futuras de la energía eléctrica producida

Año	Nuclear		Hidroeléctrica y eólica		Térmica (incluye biomasa)	
	GWh	%	GWh	%	GWh	%
2006	60.184	20	54.946	18	186.242	62
2015	58.892	16	85.987	23	225.759	61
2030	89.872	21	118.780	28	216.539	51

Fuente: Dirección General de Energía y Transportes de la UE, Sociedad Nuclear Española y Segarra (2008).

En la Tabla 2 se observa que de las 8.760 horas que tiene un año, las centrales nucleares han operado durante unas 7.100 horas, mientras que las centrales eólicas sólo unas 2.000 horas, es decir, para igual potencia instalada, las centrales nucleares han producido 3,5 veces más energía que las eólicas.

Las previsiones para un futuro *mix* energético, siguiendo una política de promoción de las energías renovables, viene dado en la Tabla 3 para la potencia instalada y en la Tabla 4 para la energía producida.

Sin embargo, para analizar las diferentes fuentes de energía eléctrica en España y poder establecer su desarrollo futuro, deben considerarse una serie de factores, entre los que destacan: la contaminación e impacto social que producen; el coste de la energía eléctrica producida durante la operación de la central y durante el resto del ciclo; las reservas de los diversos combustibles empleados y su disponibilidad; la seguridad de la central; etc.

2.1. Contaminación e impacto social

Los combustibles fósiles emiten CO₂ durante la operación de la central y durante el resto del ciclo, mientras que las energías renovables y la nuclear sólo emiten CO₂ durante el resto del ciclo, según se indica en la Tabla 5.

Es de notar que mientras que las centrales de carbón emiten unos 1.000 gramos de CO₂ por kilovatio hora (g/kWh), las fotovoltaicas un 10% y las eólicas, hidráulicas y nucleares sólo un 0,5% de las emitidas en las centrales de carbón, por lo que se suele decir que estas fuentes de energía son energías limpias.

Sin embargo, aunque la energía hidráulica puede considerarse como una energía limpia bajo el punto de vista de la contaminación ambiental, produce un gran impacto social.

Los embalses de las centrales hidroeléctricas existentes en la actualidad, se han ido construyendo en regiones que por su orografía y su situación resultaban más aptas. La construc-



Tabla 5. Emisiones de CO₂ durante la operación y en el resto del ciclo

Fuente energética	Generado en operación	Generado en resto ciclo	Total g/kWh
Carbón	892	111	1.003
Fuel oil	839	149	988
Turbina gas	844	68	912
Diesel	726	169	895
Bombeo hidráulico	17	5	132
Fotovoltaica	0	97	97
Hidroeléctrica	0	5	5
Energía nuclear	0	5	5
Generador eólico	0	3	3

Fuente: EDF (cálculo según normas ISO 14040) y De la Torre, Rev. SNE (octubre de 2006).

ción de nuevas centrales hidroeléctricas, principalmente en los países industrializados, supondría inundar valles que, por disponer de agua abundante, cubren extensas y pobladas zonas de regadío. La pérdida de estas ricas tierras y desplazamiento de pueblos enteros, aunque sean económicamente compensados, hace que los costes de capital de la central sean elevados, y todo ello unido al impacto social que origina, con lo que esta fuente de energía puede llegar a ser prohibitiva en los países altamente desarrollados.

Esto también se agrava considerablemente si se tiene en cuenta que muchas veces se inundan valles para producir energía eléctrica que no se consume en la propia comunidad, sino que va a parar a otras sin que exista una compensación o canon apreciable. Y aún más, muchas veces estas comunidades que reciben la electricidad de otra, se han caracterizado por su oposición, muchas veces violenta, a permitir que en su comunidad se instalen centrales termoeléctricas.

2.2. Coste de la energía eléctrica producida

El coste de la energía eléctrica producida en las diferentes fuentes de energía depende de una serie de factores como el coste del dinero el tiempo empleado en la construcción de la central, que depende a su vez de problemas administrativos en el municipio, en la comunidad y en el Estado, etc. A modo de orientación, en la Tabla 6 se dan los costes en céntimos de euro por kilovatio hora producido (c€/KWh). El coste del kilovatio hora de una central eólica es el doble del de una nuclear y casi vez y media del de una de combustibles fósiles. Por este motivo, la energía eólica está subvencionada. Respecto a la energía solar termoeléctrica de alta temperatura, puede considerarse que se encuentra en fase de investigación y desarrollo, lo que hace que los costes de la energía eléctrica producida sean tan elevados.

Tabla 6. Costes de la energía eléctrica producida

Fuente de energía eléctrica	Coste de energía (c€/kWh)				Total
	Capital	Operación y mantenimiento	Combustible	Derechos de emisión	
Carbón	0,76	0,74	1,31	1,62-0,81	4,33-3,62
Gas natural	0,53	0,35	2,34	0,70-0,35	3,92-3,57
Nuclear futuras	2,00	0,72	0,27		2,99
Eólica	5,00	1,00	0,00		6
Sola termoeléctrica	145,00	1,00	0,00		146

Fuente: Foro Nuclear (2006) y CESEDEN (2009).

2.3. Reservas y disponibilidad

Se supone que las reservas mundiales de combustibles fósiles son de 0,6 billones métricos de toneladas de carbón, de 1,2 billones métricos de barriles de petróleo y de 170 billones métricos de metros cúbicos de gas. El 80% de la demanda global de energía se obtiene de los combustibles fósiles y en Estados Unidos el 50% de la electricidad producida se obtiene del carbón.

La duración de estas reservas depende de la velocidad de consumo y ésta, a su vez, de la política seguida en las limitaciones de emisión de gases de efecto invernadero. En la Tabla 7 se considera el caso de *mix* actual con emisión de más de 800 ppm de CO₂ y el correspondiente a un *mix* 1/3-1/3-1/3, o sea a un tercio de combustibles fósiles, un tercio de renovables y el restante tercio de nuclear.

Tabla 7.
Duración de las reservas en años, según el *mix* considerado

Fuente energética	Concentración de CO ₂ en ppm	
	más de 800	400
Carbón	300	550
Petróleo	420	4.000
Gas	250	1.700
Nuclear	Sin reproceso	300
	Con reproceso	1.500

Fuente: Wright y Conca (2007).

El 24% de las reservas mundiales de carbón se encuentran en los Estados Unidos, siendo el primer productor China con 2.549 Mt, el primer exportador Australia con 244 Mt y el primer importador Japón con 182 Mt.

Respecto al petróleo, los primeros productores son Rusia con 487 Mt, seguido por Arabia Saudita con 483 Mt;

el primer exportador es Arabia Saudita con 358 Mt y el primer importador son los Estados Unidos con 587 Mt.

Por el Golfo de Adén y por el Estrecho de Malaca circula entre el 50 y 60% de la producción mundial de petróleo, correspondiendo esta área geográfica a naciones políticamente inestables o a gobiernos no democráticos.



El 36% de las reservas mundiales de gas natural se encuentran en Rusia, siendo también el primer productor con 650.993 Mm³, y el primer exportador con 191.892 Mm³. El primer importador son los Estados Unidos con 130.300 Mm³, seguido por Japón con 95.627 Mm³.

En los Apartados 3.6 y 3.7 se analiza la seguridad de las centrales de fisión nuclear.

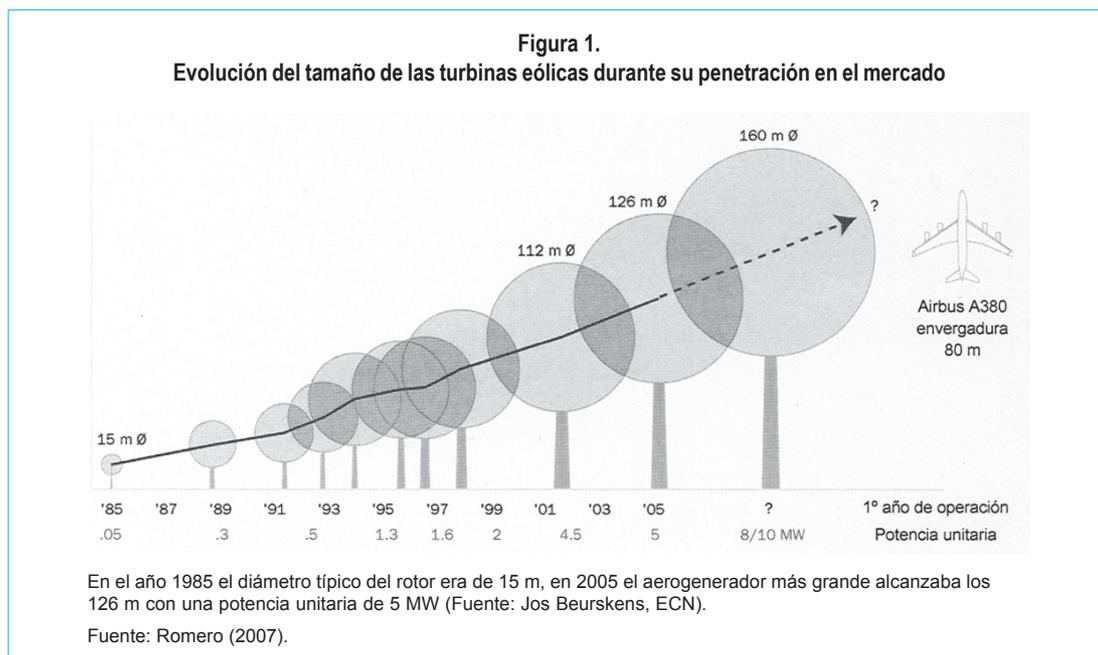
2.4. Análisis de las fuentes actuales de energía

Las centrales de combustibles fósiles tienen la ventaja de que emplean tecnologías conocidas y una gran experiencia en su construcción, operación y mantenimiento. Las de carbón tardan en construirse de 3 a 3,5 años y las de gas de 2,5 a 3 años.

Sin embargo, tienen el gran inconveniente de la emisión de gases de efecto invernadero (véase Tabla 4). Este inconveniente podría atenuarse con la captura, transporte y almacenaje (secuestro geológico) del CO₂. En los países con pozos de petróleo o de gas agotados se inyectaría en ellos el CO₂ producido en las centrales de combustibles fósiles. Es una técnica empleada hace más de 30 años para extraer los restos de petróleo de los pozos semiagotados. En el caso de España, al carecer de pozos de petróleo o de gas, se ha estudiado la posibilidad de inyectar el CO₂ en formaciones areniscas, formaciones salinas y en las cuencas geológicas de los ríos. Sin embargo existe el inconveniente de que el CO₂ se disuelve parcialmente en el agua salina, acidificándola y disolviendo parte de los minerales de las areniscas, que pueden emigrar a la superficie. Se han considerado las cuencas geológicas de los ríos Ebro, Duero, Tajo y Guadalquivir, con un potencial de almacenamiento teórico, no contrastado experimentalmente, de 50 gigatoneladas (mil millones de toneladas) de CO₂. El coste de esta técnica será tolerable en el caso de naciones con pozos de petróleo o de gas, pero quizás fuese prohibitivo en el caso de España.

La energía eólica tiene el atractivo de emplear la energía cinética del aire y que España ocupa un lugar preferente en su desarrollo tecnológico. En nuestro país las regiones de mayor potencial eólico son el Estrecho de Gibraltar, Galicia, el Prepirineo y el Macizo Ibérico. Los parques eólicos en el mar tienen una velocidad del viento mayor y una turbulencia menor, pero su coste de instalación y mantenimiento es mayor que los terrestres.

La potencia de un aerogenerador es proporcional al cubo de la velocidad del aire y a la superficie barrida por el rotor, o sea, al cuadrado de la longitud de las palas. Actualmente están en fase de desarrollo aerogeneradores de 8 a 10 MW con diámetros del rotor de 160 metros, muy superior a la envergadura de 80 metros del gran avión comercial Airbus A 380. En la Figura 1 se representa la evolución de los aerogeneradores, desde 1985 hasta un futuro próximo.



Teniendo en cuenta la Tabla 2, un reactor nuclear de 1.500 MW eléctricos produciría la misma energía eléctrica que 525 aerogeneradores, a desarrollar en un futuro próximo, de 10 MW eléctricos cada uno.

El miércoles 30 de junio de 2004 a las 13h 28m se alcanzó en España un máximo histórico de demanda de energía eléctrica (36.950 MW) con temperaturas de unos 40° C, y en aquel momento todo el parque eólico nacional solamente produjo 130 MW, el 2% de la potencia eólica instalada. Un dato significativo es que las temperaturas máximas y mínimas en España se suelen alcanzar en situaciones anticiclónicas, con viento prácticamente nulo.

Esta situación obliga a tener en reserva, principalmente centrales de gas de ciclo combinado, de igual potencia que la eólica, con el consiguiente aumento en el coste de la energía eléctrica producida.

Por ello se ha considerado emplear, parte de la energía eólica producida, en bombear agua de un pantano para producir hidrógeno del agua como sustituto de la gasolina y del gasóleo, y en desalar agua del mar (para desalar 1 m³ de agua de mar se consume 4 kWh, emitiendo 2 kg de CO₂ si se emplea gas natural). Sin embargo, en las zonas deficitarias de agua, como el Levante español, la intensidad del viento es reducida, no obteniéndose más de 1.000 horas de utilización al año.

Respecto a la energía solar, hay que tener en cuenta que el Sol es un inmenso reactor de fusión nuclear, cuya energía emitida es la energía solar. El Sol funciona por confinamiento gravitacional, que es una de las tres formas de confinamiento consideradas en la fusión nuclear. Se analizará esta forma de energía en el Apartado 4 (energía de fusión nuclear).



3. Energía de fisión nuclear

En 1932 el Premio Nobel Albert Einstein afirmó que nunca se obtendría energía nuclear. Sin embargo, en 1938 los científicos alemanes Otto Hahn y Fritz Strassmann obtuvieron en la Universidad de Berlín la fisión del uranio, concediéndose al primero el Premio Nobel. En 1939 los físicos alemanes exiliados Otto Frisch y Lise Meitner calcularon que por cada kilogramo de uranio fisionado podrían obtenerse 24 millones de kilovatios hora, unos 3 millones de veces la energía obtenida en la combustión de un kilogramo de gasolina. En 1942 el Premio Nobel italiano Enrico Fermi y el científico húngaro Leo Szilard construyeron en la Universidad de Chicago, el primer reactor nuclear experimental.

3.1. Tipos de reactores nucleares

Desde 1943 se han ido estudiando en los Estados Unidos y, posteriormente, en otros países, distintos tipos de reactores nucleares, los cuales deberían cumplir la condición necesaria, pero no suficiente, de ser intrínsecamente seguros (o sea, deben tener el coeficiente de reactividad por temperatura y huecos negativo, o bien ser submoderados).

Desde el punto de vista neutrónico, los mejores reactores nucleares son los de uranio natural-agua pesada (HWR). Por su sencillez técnica, los más apropiados son los de grafito-gas (GGR), empleando uranio natural que habiendo sido desarrollados inicialmente por Francia y el Reino Unido. Por el volumen ocupado, los más compactos son los reactores de agua ligera a presión o en ebullición (PWR o BWR), con uranio ligeramente enriquecido. Los Estados Unidos y la URSS desarrollaron este tipo de reactores de agua ligera para sus submarinos, modificándolos posteriormente para su uso comercial.

No pudiendo competir con los gastos de I+D de los reactores de agua ligera, los países bajo la influencia de Estados Unidos compraron patentes de estos reactores y los países de influencia de la antigua URSS, patentes de los suyos. Actualmente casi todos los reactores comerciales son de agua ligera.

Desde el punto de vista de la seguridad los de grafito-agua ligera se desecharon por peligrosos, al ser intrínsecamente inseguros, 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 su inseguridad intrínseca, este tipo de reactores nunca deben emplearse para la producción de energía eléctrica. Ningún Consejo de Seguridad Nuclear de un país democrático

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. Estos reactores de grafito-agua ligera (LWGR, RBMK), son los popularmente conocidos, desde 1986, como tipo Chernobil.

Durante la Segunda Guerra Mundial, los Estados Unidos construyeron en Hanford (Estado de Washington), y dentro de un recinto militar, 9 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 para la mayoría de las 33.000 cabezas nucleares que tenían en 1966, fueron todos desmantelados entre 1964 y 1987.

Después de la Segunda Guerra Mundial, la URSS construyó 15 reactores de grafito-agua ligera, con los que obtuvieron el plutonio para la mayoría de las 45.000 cabezas nucleares que tenían en 1986, siendo desmantelados entre 1987 y 1992. Sin embargo, a diferencia de los Estados Unidos, y al no tener que someterse a ningún control internacional de seguridad, decidieron construir 18 reactores de este tipo para la producción de energía eléctrica y, en caso necesario, de plutonio para bombas. Para reducir el riesgo, muy probable, de un accidente nuclear, emplearon un complejo sistema de seguridad. Sin embargo no emplearon el edificio de contención, obligatorio en los reactores nucleares productores de energía eléctrica. Construyeron 4 en Chernobil (Ucrania), actualmente fuera de servicio; 2 en Lituania, habiendo parado uno en 2004 y el otro lo harán en 2009; y 12 en la Federación Rusa.

3.2. Distribución de las centrales nucleares

En 2008 había 440 reactores nucleares en servicio, la mayoría de agua ligera (104 en Estados Unidos, 59 en Francia, 56 en Japón... y 8 en España). En construcción hay 42 (7 en Canadá y en Rusia, 6 en la India, 5 en China, 4 en Corea del Sur, 2 en Francia, Bulgaria, Taiwán y Ucrania y 1 en Argentina, Finlandia, Francia, Irán, Japón y Pakistán). Estados Unidos tiene en marcha 9 proyectos, habiendo prolongando la vida de la mayoría de sus centrales nucleares hasta 60 años.

El porcentaje de energía eléctrica nuclear era, en 2008, del 78% en Francia, del 54% en Bélgica, del 48% en Suecia, del 37% en Suiza, del 30% en Japón, del 18% en España, etc.

3.3. Aceptación de la energía nuclear

Durante los últimos años se han ido realizando numerosas encuestas sobre la aceptación de las centrales nucleares. El resultado en los Estados Unidos viene reflejado en la Tabla 8, en donde la mayoría desea que se construyan nuevas centrales nucleares.



Durante décadas se ha favorecido en España la oposición a la energía nuclear, magnificando cualquier accidente nuclear y minimizando los accidentes en otras instalaciones energéticas, como se indicará posteriormente con el accidente de gas del Colegio Público Marcelino Ugalde de Ortuella (Vizcaya). Joseph Goebbels, el Ministro de Propaganda nazi dijo: «La verdad no importa, lo que importa es la propaganda». Desgraciadamente, esta máxima ha sido adoptada por la oposición a la energía nuclear en España.

Tabla 8.
Encuesta sobre la aceptación de las centrales nucleares realizada en los Estados Unidos (2001)

	% sí
Renovar las licencias de operación de las centrales nucleares (julio de 2001)	85
Mantener la opción de construir nuevas centrales nucleares (julio de 2001)	74
Construir nuevas centrales nucleares (julio de 2001)	63
Las centrales nucleares son más seguras que hace 10 años (abril de 2001)	65
Instalar las nuevas centrales nucleares próximas a las ya existentes (julio de 2001)	54

Fuente: Bisconti y Richards (2001): *Nuclear News* (36, 11).

El Ministro de Asuntos Exteriores de Francia, B. Kouchner, dijo (2008):

«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 bajo del mundo y nuestra economía es una de las más limpias, en términos de emisión de CO₂».

En España, los resultados obtenidos (Foro Nuclear y Villafañe & Asociados, 2004) son bien distintos. El 44% está a favor de que la política energética española se coordine en la UE y 35% a favor de que se coordine en España. El 44% es partidario de cerrar todas las centrales nucleares, el 51% de agotar su vida útil y no construir otras nuevas y el 3% de construir nuevas centrales cuando se agote la vida útil de las actuales. Este resultado indica que los españoles no se fían de la política energética de los gobiernos de turno, prefiriendo que se coordine en la UE.

3.4. Ventajas de la centrales nucleares

Las principales ventajas de las Centrales Nucleares son:

- No producen gases de efecto invernadero.
- Tienen una vida larga, que puede extenderse hasta los 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.
- El uranio se encuentra muy repartido, los principales productores son 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*).
- Las centrales nucleares españolas consumen anualmente unas 1.800 Tm de uranio natural. El 17% es de producción nacional, el 21% de Cameco (Canadá), el 13% de Riotinto (Australia y Namibia) y el resto de Tenex (Rusia), Nufcor (Sudáfrica) y Cominak (Níger).
- El enriquecimiento de las 1.800 Tm de uranio natural para obtener 150 Tm de uranio enriquecido, necesarias para abastecer a nuestras centrales nucleares, se realiza: el 40% en EURODIF (Francia, participación de ENUSA), el 20% en URENCO (UE), el 25% en Tenex (Rusia) y el 15% en USEC (Estados Unidos).

3.5. Inconvenientes reales y ficticios de las centrales nucleares

Los principales inconvenientes reales y ficticios son: la contaminación radiactiva en el entorno de la central nuclear; los residuos radiactivos; los accidentes nucleares y la proliferación nuclear.

3.5.a. Contaminación radiactiva en el entorno de una central nuclear

No se producen daños biológicos apreciables. El Instituto Nacional del Cáncer de los Estados efectuó un estudio en las 78 centrales nucleares que estaban en servicio en 1982. El resultado fue que la tasa de cánceres producidos en su entorno era análoga a la media nacional.

Sin embargo, este estudio arrojó como dato curioso que la tasa de enfermedades (coronarias, tumorales...) de los trabajadores de las centrales era inferior a la media nacional. Ello era debido a que estos trabajadores están sometidos a chequeo médico periódico, lo que permite detectar enfermedades incipientes.



3.5.b. Residuos radiactivos

Se ha propuesto diferentes métodos para tratar con los residuos radiactivos, los principales son:

- Almacenamiento temporal de los elementos combustibles irradiados en las piscinas del reactor. Los de baja y media actividad se almacenan en El Cabril y los de alta actividad al futuro Centro de Almacenamiento Temporal Centralizado (ATC).
- Transmutador en fase de I+D. 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 híbrido de fusión-fisión nuclear (LIFE), en fase de I+D. En un reactor de fusión nuclear por confinamiento inercial, cuya cápsula de combustible está 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 fisionan el U238 y el Pu239 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 por espalación en un blanco de plomo producido por protones. En vez 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.

3.6. Accidentes en centrales nucleares civiles

Ha habido diversos accidentes en centrales nucleares civiles, sin que se produjesen víctimas debidas a la radiactividad. Los más importantes han sido:

- 1969: Saint Laurent des Eaux (Francia). Se fundieron 5 elementos combustibles. No hubo escape de radiactividad.

- 1970: Dresden (Estados Unidos). Por error se paró la turbina y ello provocó un aumento de la presión y fuga del edificio de contención. No hubo víctimas.
- 1972: Surrey I (Reino Unido). Se produjo una fuga de vapor de agua: 1 muerto por quemaduras.
- 1979: Three Mile Island (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 1 mSv/año (dosis media recibida al año por una persona por radiografías médicas). No hubo ninguna víctima.
- 2007: Kashiwazaki Kariwa NPS (Japón). Se produjo un terremoto de fuerza 6,8 a 16 km de la Central Nuclear que albergaba 7 reactores BWR con 8,2 GWe. 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 los elementos combustibles gastados, produciendo una contaminación del orden de la millonésima del límite permitido.

Sin embargo, sí se produjo un accidente letal en la fábrica del ciclo del combustible nuclear de Tokaimura en 1999. Un operario de la empresa JCO que operaba esta fábrica, vertió 16 kg de uranio enriquecido en un recipiente inapropiado, alcanzándose la supercriticalidad, cuando el límite máximo autorizado era de 2,3 kg. Este accidente 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 si los operarios de la fábrica hubiesen tenido la calificación y el entrenamiento adecuado.

A las 12:00 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 2 de ellos. 6 altos cargos de la empresa JCO fueron condenados a penas de entre 2 y 3 años de cárcel.

3.7. El accidente de Chernobil

Según se expone en el Apartado 3.1., los reactores de grafito-agua ligera (tipo RBMK o Chernobil) son intrínsecamente inestables durante el arranque y desde un principio fueron desechados como futuros reactores productores de energía eléctrica. Durante la Segunda Guerra Mundial y durante algunos años posteriores, tanto los Estados Unidos como la URSS, instalaron



en centros militares diversos reactores de este tipo para la producción de plutonio para las bombas nucleares, disipando la energía producida a la atmósfera. Sin embargo la URSS, que no tenía que responder ante ningún organismo de seguridad nacional de los establecidos en los países democráticos, decidió construir 18 reactores de este tipo, aprovechando la energía producida para producir electricidad y en caso necesario plutonio para las bombas nucleares.

Con objeto de demostrar que lo que predecían los físicos e ingenieros nucleares sobre lo peligroso que resultaban los reactores de grafito-agua ligera (tipo RBMK o de Chernobil), el equipo de operación de la Unidad 4 de Chernobil decidió efectuar el 26 de abril de 1986 un experimento extraordinariamente peligroso, que nunca hubiera sido autorizado por el Consejo de Seguridad Nacional de un país democrático. Este experimento consistió en cerrar 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 8 dentro del reactor, violando de este modo las normas de seguridad que exigían que hubiese, un mínimo, de 30 barras de control dentro del reactor.

Sucedió lo que estaba previsto en los textos de teoría de reactores. Subió la temperatura y como este tipo de reactores tiene el coeficiente de reactividad de temperatura y huecos positivo durante el arranque aumentó por tanto el número de fisiones y, en consecuencia, creció la energía producida y de nuevo la temperatura, etc. El equipo de operación intentó parar el reactor introduciendo las 162 barras de control extraídas, pero debido al aumento de temperatura, se atascaron y no pudieron pararlo. La temperatura subió hasta fundir todos los elementos combustibles, ardiendo las 1.700 toneladas de grafito que tenía el reactor, y formándose un gigantesco horno.

El accidente se agravó al carecer el reactor de Chernobil de edificio de contención, construcción obligatoria en los reactores nucleares como parte esencial para la seguridad.

Nunca mejor empleada la frase de Eugenio D'Ors: «Los experimentos, con gaseosa».

3.8. Informes sobre el accidente de Chernobil

Cuando se produjo el accidente, el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y el Consejo de Seguridad Nuclear de España encargaron a nuestro Instituto de Fusión Nuclear un estudio sobre lo sucedido.

En los Estados Unidos, aprovechando el estado de Guerra Fría que ambas naciones mantenían, y con objeto de atacar a la URSS por emplear este tipo de reactor, se estimó exageradamente que en 20 años se producirían unos 200.000 muertos. Estas cifras las han ido empleando los grupos antinucleares durante estos últimos años.

Con objeto de determinar lo que verdaderamente sucedió en el accidente de Chernobil, la ONU realizó un amplio y exhaustivo informe realizado por un centenar de médicos, biólogos e ingenieros de 8 organizaciones internacionales, algunas de ellas no proclives a la energía nuclear: el Organismo Internacional de la Energía Atómica (OIEA), la Organización Mundial de la Salud (OMS), el Programa para el Desarrollo de la ONU (UNDP), el Programa de Medio Ambiente de la ONU (UNEP), la Agencia de Asuntos Humanitarios de la ONU (UNOCHA), el Comité sobre Efectos de la Radiación Atómica de la ONU (UNSCER), la Organización de la Agricultura y Alimentación (FAO).

El resultado publicado el 5 de Septiembre de 2005 fue el siguiente:

- **Muertes:** 56 durante el accidente y durante el período 1986-2005, de las cuales 47, principalmente bomberos y trabajadores, murieron por quemaduras durante los primeros días del accidente, y 9, principalmente niños, de cáncer de tiroides (producido por el yodo 131).
- **Enfermos por radiactividad:** 3.940, principalmente por cáncer de tiroides (producido por el yodo 131), que al ser tratados médicamente sobrevivieron estos 20 años.

Como el yodo 131, emisor β , tiene una semivida de 8 días, transcurridos unos pocos meses después del accidente, ha desaparecido por desintegración (quedando sólo trazas). Todos los enfermos por cáncer de tiroides habían sido irradiados durante las primeras semanas. Los médicos estiman que un 1% de estos enfermos morirá debido a los efectos secundarios producidos por el tratamiento médico.

Se observó un ligero aumento de casos leves de leucemia, entre bomberos y trabajadores de la central, que sobrevivieron por tratamiento médico.

No se han observado abortos, ni malformaciones, ni disminución de la fertilidad.

Se han observado trazas del cesio 137, emisor β , con semivida de 30 años, en líquenes y hongos de los bosques de Finlandia y Suecia.

Los 200.000 muertos, que algunos medios de comunicación social han ido repitiendo durante todos estos años, han quedado reducidos a unos 100 (56 más el 1% de 3.940). Raras veces podría aplicarse mejor el dicho churchiliano: «Una mentira repetida suficiente número de veces, vale tanto como una verdad».

Es conveniente comparar este accidente con otros no nucleares. En 1984 el accidente de la fábrica de Bhopal (India) produjo unos 17.000 muertos. En China mueren anualmente en las minas de carbón unos 4.000 mineros. En Ortuella, Vizcaya, el 23 de octubre de 1980 se produjo una explosión debido a una fuga de propano en el Colegio Público Marcelino Ugalde, originando 52 muertos; de ellos 49 eran niños de 5 a 6 años, 2 profesores y una cocinera.



3.9. Proliferación nuclear producida por las centrales comerciales 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 explotar produzca unos cuantos kilotonnes?

En 1962, los Estados Unidos explosionaron una bomba atómica empleando el plutonio obtenido de los elementos combustibles gastados de un reactor nuclear de potencia eléctrica. A partir de entonces, se admitió sin discusión, que con el plutonio obtenido del combustible gastado de un reactor operando para la producción de energía eléctrica se podía construir una bomba atómica análoga a las obtenidas con el plutonio de un reactor plutonígeno.

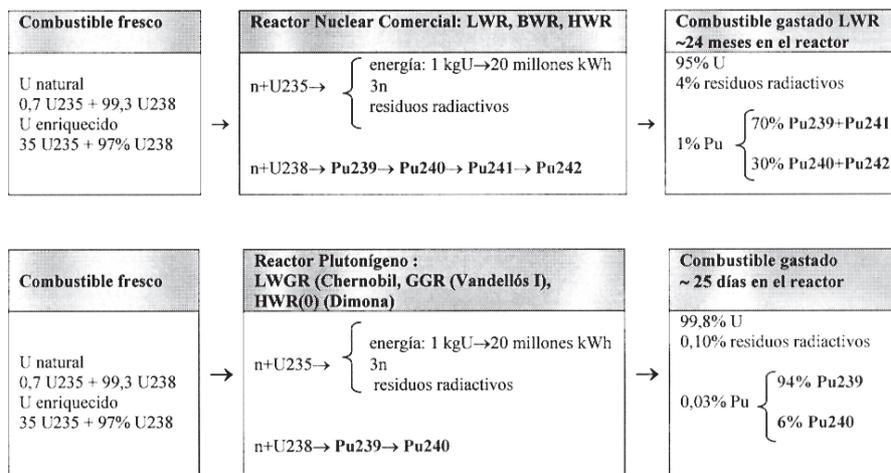
Sin embargo, los datos publicados no ofrecen ninguna fiabilidad, por lo que los resultados siguientes los he obtenido empleando los siguientes códigos: NORMA (hidrodinámico) y CLARA (nuclear), desarrollados por nosotros en la Junta de Energía Nuclear (JEN) entre 1975 y 1979. El código integrado NORCLA desarrollado por nosotros en el Instituto de Fusión Nuclear (DENIM) después de 1980 y que fue el primer código integrado internacional, no clasificado, para cálculos hidrodinámicos y nucleares.

En la Figura 2 se representan los dos casos del combustible gastado de un reactor comercial operando para producir energía eléctrica y de uno plutonígeno o de uso dual. En el primer caso el tiempo transcurrido entre recargas del combustible fresco es de 24 meses, obteniéndose un combustible gastado con un plutonio que contiene un 70% de Pu239 y Pu241 y un 30% de Pu240 y Pu242. En el segundo caso, el tiempo transcurrido entre recargas es de 25 días y el plutonio del combustible gastado contiene el 94% de Pu 239 y el 6% de Pu240.

Teniendo en cuenta que los plutonios Pu240 y Pu242 se fisian espontáneamente, emitiendo neutrones que hacen que en una bomba atómica la explosión nuclear se realice a destiempo, cuanto menos cantidad exista de estos plutonios pares, mayor será el rendimiento de la bomba. Los resultados que he obtenido son los siguientes.

En la explosión de una bomba atómica empleando el plutonio obtenido en un reactor comercial operando para producir energía eléctrica, construida por un país de alta tecnología, como los Estados Unidos, se obtendría la energía nominal con una probabilidad del 45% y un simple fognazo con una probabilidad del 13%. Si la bomba atómica fuese construida por un país de tecnología media o por grupos terroristas, se obtendría la energía nominal con una probabilidad de tan sólo el 2% y un simple fognazo con una probabilidad del 45%.

Esto indica que un país de tecnología media o baja, o un grupo terrorista, preferiría emplear este plutonio en fabricar una bomba sucia (compuesta por parte de este plutonio o del combustible gastado rodeado de un explosivo químico, como la goma 2 eco, que al explotar dispersaría el plutonio o el combustible gastado), en vez de una bomba atómica con tan baja probabilidad de obtener una verdadera explosión nuclear.

Figura 2. Producción de plutonio


4. Energías de fusión nuclear

La importancia de la fusión nuclear se obtiene al comparar los distintos procesos exoenergéticos. En la combustión de un kilogramo de gasolina se obtienen unos 13 kWh; en la transformación de masa en energía se obtienen 24 mil millones de kWh por cada kilogramo de masa; en la fusión de los núcleos pesados (más allá del hierro en el sistema periódico) se obtienen 24 millones de kWh por kilogramo de uranio, y en fusión de los núcleos ligeros (antes del hierro) se obtienen 100 millones de kWh por kilogramo de hidrógeno (deuterio y tritio). Sin embargo, los bajos rendimientos de estos procesos reducen considerablemente estos valores. Desde un punto de vista práctico, una central térmica de mil megavatios eléctricos consumiría anualmente 200 trenes de 100 vagones cada uno llenos de carbón (combustión), un solo vagón lleno de uranio (fisión) o un maletero de un coche familiar lleno de hidrógeno (fusión).

Inicialmente se está realizando la I+D de la fusión de los isótopos del hidrógeno: el deuterio y el tritio. El deuterio se encuentra en el agua a razón de 34 miligramos de deuterio por litro de agua, y el tritio se obtiene al bombardea el litio con neutrones.



4.1. Ventajas e inconvenientes de la fusión nuclear

- **Las principales ventajas** de la fusión nuclear de los isótopos del hidrógeno deuterio y tritio son:
 - La energía producida en la fusión del deuterio contenido en 1 litro de agua (34 mgD/l 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 los problemas en el suministro de los combustibles fósiles.
- **Los principales inconvenientes** de la fusión nuclear son las dos condiciones, necesarias pero no suficientes, para conseguir la fusión nuclear de los elementos ligeros y en particular del hidrógeno:
- **Sobrepasar la temperatura de ignición.** Es la temperatura necesaria para que la energía producida en la fusión nuclear iguale a la energía perdida. Esta temperatura de ignición es teóricamente de 50 millones de grados para la fusión de los isótopos del hidrógeno deuterio y tritio pero en la práctica hay que sobrepasar los 100 millones de grados; 2.500-5.000 millones de grados para el oxígeno, y así va aumentando la temperatura del medio hasta llegar al hierro. A estas temperaturas no existen los estados sólido, líquido ni gaseoso, el medio es un plasma, donde los iones y electrones están separados.
- **Confinamiento.** 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.

4.2. Clases de confinamiento del plasma

A escala macroscópica, existen tres clases de confinamiento: el inercial, el electromagnético y el gravitacional.

- a) **El confinamiento inercial** es el producido cuando numerosos haces (unos 200) de un láser, inciden, lo más uniformemente posible, sobre la superficie de una micropastilla de deuterio y tritio (de un milímetro de diámetro), dando lugar a la ablación de su superficie. Debido a esta ablación, se genera una intensísima onda de presión centrí-

peta (de más de un billón métrico de atmósferas) que comprime la micropastilla, calentándola por encima de la temperatura de ignición (unos 100 millones de grados), con lo cual se produce la fusión nuclear del deuterio y tritio. En la fusión del deuterio y tritio se emite un núcleo de helio 4 y un neutrón, ambos con gran energía cinética, que al chocar con el litio, empleado como refrigerante, produce dos efectos: por un lado, el litio se calienta (aumenta su entalpía) y por otro, el litio 7 se transforma en tritio. El litio caliente se enfría en un generador de vapor de agua. Este vapor alimenta una turbina que hace girar un alternador, produciendo energía eléctrica. El tritio producido se emplea de nuevo, por lo que sólo hay que suministrar deuterio y litio.

Unas pocas microfisiones por segundo pueden dar lugar a un reactor de fusión nuclear de 1.000 megavatios eléctricos.

- b) **El confinamiento magnético** se basa en el empleo de campos electromagnéticos para confinar el plasma. El desarrollo más prometedor es el llevado a acabo en la URSS a finales de la década de los años 50 del siglo pasado, llamado TOKAMAK (*TOrodalnaya KAmera MAgnitnaya*). El TOKAMAK es, en esencia, un transformador en el cual las espirales conductoras del secundario se han sustituido por una sola espiral solenoidal (un anillo o toro) en cuyo interior circulan confinados los electrones y los núcleos de deuterio y tritio.
- c) **El confinamiento gravitacional** es el debido a la fuerza de la gravedad y se produce en las estrellas y en particular en el Sol, dando lugar a la energía solar.

4.3. Energía solar

El flujo energético medio anual a nivel del mar es de 1 kW/m^2 y suponiendo una insolación en el paralelo 40 de 1.500 horas anuales, se obtiene una densidad de energía de 1.500 kWh/m^2 . Esta débil densidad de energía puede aprovecharse como:

- a) **Energía solar térmica de baja temperatura**, empleada en calentar parcialmente agua para usos domésticos y pequeñas instalaciones industriales.
- b) **Energía solar térmica de alta temperatura** (más de 250°C). La energía solar se refleja en numerosos espejos (helióstatos), planos, curvos o parabólicos, concentrándose sobre una superficie, una línea, ó un punto en contacto con un fluido que circula hacia un generador de vapor (si el fluido no es agua), moviendo una turbina de vapor y, a su vez, un alternador.
- c) **Células fotoeléctricas** para pequeñas demandas de energía eléctrica (en el espacio, balizas marinas, señales luminosas, carga de baterías, usos domésticos, etc.).
- d) Células termoeléctricas y termoiónicas.



4.4. Reactores y centrales experimentales de fusión nuclear

a) **Reactores experimentales de fusión nuclear por confinamiento inercial.** El 29 de mayo de 2009 se inaugurará en el Laboratorio Nacional de Lawrence, en Livermore (Estados Unidos) el gigantesco NIF (National Ignition Facility) de unos dos megajulios y, probablemente, tres años después el MJL (*Mega Joule Laser*) cerca de Burdeos (Francia), también de unos dos megajulios. Con estos dos reactores experimentales se espera conseguir la fusión nuclear por confinamiento inercial con ganancia apreciable de energía.

En España comenzó a funcionar en 1983 el DENIM (Instituto de Fusión Nuclear).

b) **Reactores experimentales de fusión nuclear por confinamiento magnético.** Un consorcio internacional en el cual participa España va a construir el reactor experimental ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) en Cadarache (Francia), el cual se espera que entre en operación dentro de 13 años, esperándose que se consiga también obtener la fusión nuclear con ganancia de energía.

c) **Centrales solares térmicas de alta temperatura.** La torre solar de Sanlúcar La Mayor PS-10 emplea espejos planos orientables calentando agua a 500-1.000°C. Es de 11 MW eléctricos produciendo 24 millones de kilovatios hora al año, con un coste de la energía eléctrica producida de 190 céntimos de euro el kilovatio hora.

5. Solución al grave problema energético español

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, y que todo el petróleo que se extrajo en España en 2003 equivale a sólo dos días de refino; todo el gas natural extraído en nuestro país en 2003 supone el 1% del consumo nacional; que el carbón nacional es escaso, costoso de extraer y con azufre; que las reservas hidroeléctricas están aprovechadas al límite y solamente hay cabida para las minihidráulicas, la producción masiva de energía eléctrica que pueda alimentar a grandes núcleos industriales y de población, y que a su vez tenga en cuenta la contaminación ambiental, las reservas de combustible y su disponibilidad y la seguridad de la central, sólo puede hacerse actualmente con la energía de fisión nuclear y con la energía eólica.

Sin embargo teniendo en cuenta que el coste de la energía eólica es aproximadamente el doble de la producida por una central de fisión nuclear, se obtiene que hasta que la energía eólica no sea económicamente competitiva con la de las centrales de combustibles fósiles (incluyendo el coste de los derechos de emisión), la única energía que cumple las condiciones anteriores es la de fisión nuclear, sobre todo con los nuevos tipos de reactores nucleares GIII+ y GIV.

Por todo ello, la solución óptima actual sería la instalación de nuevas centrales de fisión nuclear y dedicar a la I+D parte de las subvenciones que se dan a la energía eólica y solar producida. La I+D debería aplicarse a:

- Nuevos materiales y tecnologías que abaraten la energía eólica.
- Análisis del complejo problema del almacenamiento, transporte y captura del CO₂ en España.
- Fusión nuclear por confinamiento gravitacional o energía solar en el campo de la energía solar térmica de alta temperatura y de nuevas células fotovoltaicas (nanocélulas o de puntos cuánticos).
- Fusión nuclear por confinamiento inercial y magnético.

A medida que se fuesen solucionando estos problemas de I+D, las tecnologías correspondientes se irían incorporando al *mix* eléctrico.

Si se hubiesen ido construyendo las centrales de fisión nuclear que fueron proyectadas a mediados de la década de los años 70 (Tabla 1), ahora tendríamos un *mix* eléctrico análogo al francés, y la mayoría de los problemas energéticos que padecemos actualmente estarían resueltos.

6. Bibliografía

- AGENCIA INTERNACIONAL DE LA ENERGÍA (2008): *Energy Technology Perspectives 2008*.
- CESEDEN (2009): *El cambio climático y su repercusión en la economía, la seguridad y la defensa*. Madrid, Ministerio de Defensa.
- DÍAZ FERNÁNDEZ, J. L.; ROMERO, A.; CARO, R.; MARTÍN, M.; VELARDE, J.; AHNERT, C.; PERLADO, J. M.; MANSO, R.; MÍNGUEZ, E.; VELARDE, G. y CARPINTERO SANTAMARÍA, N. (2007): *La energía y su relación con la seguridad y la defensa*. Monografía 98 del CESEDEN.
- FORO NUCLEAR (2006): *Energía 2006*. Madrid, Foro Nuclear.
- SÁNCHEZ RON, J. M. (2001): *Energía nuclear en España. De la JEN al CIEMAT*. Madrid, CIEMAT.
- VELARDE, G. (2008): «Energía de Fisión y Fusión Nuclear»; en *Cambios Climáticos y Retos Energéticos*. Instituto de España.



- VELARDE, G. y CARPINTERO SANTAMARÍA, N. (2005) «Key Aspects on the Non-Proliferation Measures»; en *Countering Nuclear and Radiological Terrorism*. Springer.
- WRIGHT, J. y CONCA, J. (2007): *The Geopolitics of Energy: Achieving a Just and Sustainable Energy Distribution by 2040*. BookSurge Publishing.