

La opción nuclear ante el desafío de asegurar el suministro energético

Alfonso de la Torre

El presente documento recopila y comenta información relacionada sobre la respuesta de la opción nuclear al desafío energético. No trata de establecer baremos de idoneidad ni de pontificar la solución milagrosa, pues no existe. Procura exponer datos, hechos y valoraciones y trata servir de ayuda para clarificar una opción cargada de pasiones.

El texto plantea la validez de la opción nuclear que es utilizada por 31 países y por la cual apuestan claramente las economías emergentes de Asia. Se resalta que existen recursos, tecnologías válidas e investigación en su mejora y renovación, y que los resultados técnicos y económicos de su uso son correctos y competitivos, constatando la gran demanda de energía futura.

This document compiles and comments on information related to the response of the nuclear option to the energy challenge. It does not try to establish a standard of suitability or propose a miraculous solution, because there is none. It is an attempt to clarify data, facts and assessments and tries to serve as an aid to clarify an option charged with passion.

The text discusses the validity of the nuclear option, which is used by 31 countries and which the emerging economies of Asia clearly back. It stresses that there are valid technologies, resources and research on how to improve and renovate it, and that the technical and economic results of using it are good and competitive for the large energy demand expected in the future.

PLANTEAMIENTO

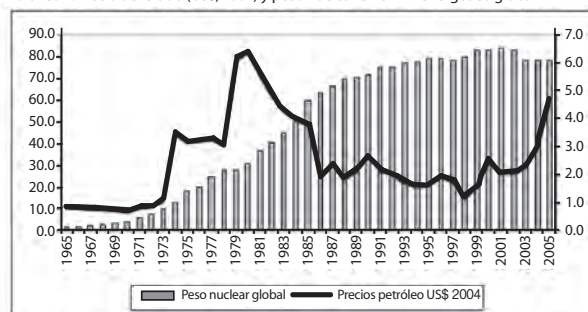
La preocupación por la garantía del suministro crece entre los gobernantes y gobernados. A esta preocupación se suma el debate energético sobre las fuentes a utilizar. Es necesario racionalizar la exposición de las ventajas y debilidades de cada solución pues no existen "piedras filosofales" y las utopías pueden ser demasiado costosas cuando no conducen a situaciones de desastre de complicada solución.

La solución energética única no existe, pues de ser así, ya se habría decantado. Hay consenso generalizado en aceptar que pasa por la máxima diversificación de fuentes energéticas, aprovisionamientos y tecnologías. No existe ninguna energía excluida y las soluciones deben ser aceptables medioambientalmente y responder al desarrollo sostenible de las naciones. Solo con una visión global del hecho energético y de la interacción con la realidad socioeconómica podrán comprenderse los caminos de salida al desafío existente. Planteamientos maniqueos en la búsqueda de la solución energética terminan falseando o imposibilitando las conclusiones.

Hay que aprender del camino recorrido y pensar que el reto está en resolver el abastecimiento energético a 8.500 millones de humanos que consumirán 15 000 Mtep en un plazo de 20 años, coincidiendo con el calentamiento terrestre, con el declive de las reservas de petróleo y gas, y con el compromiso ético de corresponsabilidad con las generaciones futuras. Las utopías son necesarias para el progreso del ser humano, pero está en su voluntad y discernimiento que los sueños de paraísos terrenales terminen siendo eso, solo sueños.

Constituye una llamada de atención de este desafío que la Unión Europea, que importa el 50% de sus necesidades energéticas, si no emprende medidas correctoras, elevará ese valor hasta 75% en 20 años, creando una situación de dependencia estratégica. España hoy importa el 80% de su energía y la tendencia es a que sea aún mayor.

Gráfico 1. Precio del crudo (US\$, 2004) y peso nuclear en el mix energético global



Fuente: AIE Y BP Statistical Review of World Energy 2005

Figura 1- Correlación entre el precio del petróleo y el desarrollo nuclear

La energía nuclear aporta ventajas indiscutibles por su densidad energética, limpieza de gases del efecto invernadero, estabilidad económica del precio del combustible y competitividad del coste de operación, calidad de abastecimiento, garantía de potencia y de aprovisionamiento. Además, es intensiva en conocimiento y ofrece amplias posibilidades de desarrollo tecnológico, p.ej, la fusión. Hoy en día no es la panacea energética como tampoco lo es ninguna energía con el actual grado de conocimiento. Con la fusión, sí lo pudiera ser.

No se trata, por tanto, de simplificar

la cuestión con energía nuclear sí o no, ni crear la disyuntiva entre nuclear ó renovables, o de intentar sustituir las restantes energías por una específica. La solución, hoy y parece que para un extenso mañana, no puede ser excluyente sino complementaria. En cualquier caso, ese futuro seguirá siendo nuclear pues frente a las reticencias y dudas existentes en algunos países desarrollados existen las certezas en otros que ante todo necesitan resolver sus necesidades.

PROYECCIONES Y EXPECTATIVAS DEL CRECIMIENTO MUNDIAL

Incremento del Consumo de Energía Primaria

El consumo mundial de energía primaria alcanza en la actualidad la cifra de 10.579 Mtep y su equivalente calórico se acerca rápidamente al generado de forma natural en el interior del planeta, valor que es solo 1,6 veces mayor. Además, el consumo está creciendo con ritmos cercanos al 3 %, y las proyecciones para un escenario de referencia en el período 2001-2025 indican que se puede mantener en el 1,8% y que podría alcanzar hasta el 2,4% en un escenario de mayor exigencia. Hoy, 1.300 millones de habitantes carecen de acceso a la energía eléctrica y continúan accediendo a la biomasa (madera) como base de subsistencia.

Las mayores expectativas de crecimiento radican en las economías emergentes para las que se anuncian incrementos medios entre el 2,7% y el 3,5%. Se citan de forma específica en el Pacífico: China e India y en América latina, Brasil. Los analistas apuntan a crecimientos prolongados y sostenidos en estos países y zonas circundantes y que pudieran situarse entre el 3% y el 5% . Dichos valores son hasta tres veces superiores a los esperados en las economías industrializadas y anuncian, además, el surgimiento de potentes focos económicos asimétricos que vaticinan modificaciones de orden geopolítico y geoestratégico.

Hay que anotar que la intensidad energética decrecerá reduciéndose a un valor medio anual del 1,2%, lo que será un factor corrector de las anteriores subidas en consumo y en la demografía.

Crecimiento Demográfico

En la misma línea de exigencia están las proyecciones publicadas en los dife-

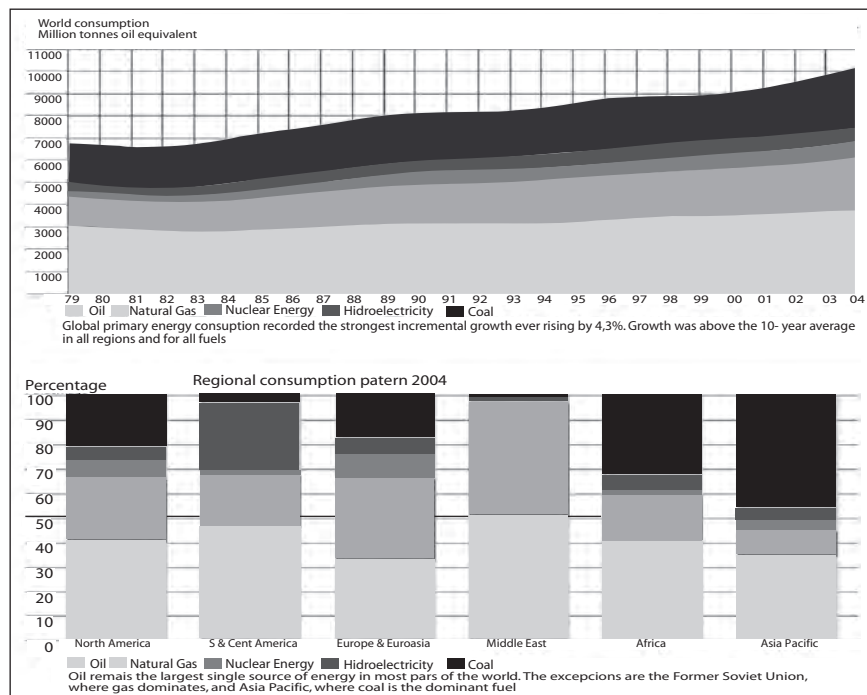


Figura 2-Evolución del consumo de energía primaria y distribución regional

rentes informes de instituciones supranacionales tales como el Wold Energy Council ó la Agencia de energía nuclear de la OCDE que coinciden en predecir para las próximas tres décadas una tasa de crecimiento demográfico del 25% y que en términos energéticos será del 50%. Poniéndole números a lo dicho, estamos hablando de incorporar 2.000 millones de nuevos seres humanos, casi la población de China e India, a los 6.500 millones actuales y de consumir adicionalmente, al menos 5.000 Mtep y que en algunas publicaciones llega a los 10.000 Mtep.

No podemos quedarnos solo hablando de energía. Hay que citar también que habrá que incrementar la actual actividad minera o resolver el abastecimiento de agua potable a la nueva población cuando todavía quedan 1.300 millones de humanos sin este suministro. El IV Foro mundial del agua recién concluido en Méjico, en marzo de este año, ha advertido a este respecto de la latencia de conflictividad bélica que podría afectar a 3.000 millones de habitantes.

Se puede dudar, siempre, de las predicciones a tan largo plazo y poner en entredicho futuros catastrofistas pero, circunscribiéndonos al tema energético, si echamos una mirada a la evolución del pasado reciente encontramos que la población mundial ha crecido en estos últimos 150 años casi siete veces y el consumo energético se ha multiplicado por 100 desde el advenimiento de la industrialización

En España, el consumo de energía

primaria creció en 2003 un 3,14% y en los últimos 25 años ha acumulado un 80%. En energía eléctrica estos crecimientos son sostenidos desde hace una década. Solo en los últimos 5 años lo ha hecho en un 54%. Sirve como referencia ilustrativa citar que una familia de cuatro miembros de inmigrantes llegada a España implica a corto plazo un consumo anual adicional de 12,8 tep, al adaptarse a los hábitos de consumo.

El Desarrollo Sostenible

Hablar del presente y del futuro energético requiere no olvidar uno de sus puntos de partida, que el 20% de la población actual consume el 60% de los recursos energéticos y que las sociedades que agrupan a ese restante 80% de la población, países en desarrollo, claman por acercarse, cuando menos, a los niveles de vida de los países desarrollados. Como entre éstos también hay diferencias en sus logros ¿Cuál es entonces el modelo a seguir?

Mientras en las economías emergentes sus gobiernos se enfrentan a la necesidad "imperiosa" de acercarse a grados de bienestar "mínimamente aceptables" que puedan ofrecer a sus ciudadanos, en las economías desarrolladas se han incorporado nuevos valores o más bien han revivido los antiguos que han conformado una nueva cultura como es el "desarrollo sostenible" que guía sus políticas de actuación. Hoy en día, el "desarrollo sostenible" es un referente cultural incuestionable y aceptado para

la labor ejecutiva de gobierno y que ya aparece en la tarea y regulación legislativa.

Las sociedades avanzadas, conscientes de los efectos y consecuencias del rápido crecimiento desencadenado por el advenimiento de la sociedad industrial, tratan así de reenfocar la utilización de los recursos y tecnologías y marcar las pautas de una nueva política medioambiental. Se busca conciliar los factores de progreso de las economías, que priman la eficiencia productiva, la eficacia gestora y la prestación de servicios de alto valor añadido con una "gestión del presente que haga posible el futuro" y con una gran atención a la conservación del medioambiente.

Pero a los países en desarrollo se les plantea un difícil dilema, cuando tratan de incorporar esta "gestión sostenible" a su acción de gobierno, al tener que priorizar sus "necesidades" de abastecimiento y de producción, y para conseguir el acceso a nuevos mercados para esos productos. Para ello necesitan acelerar las fases de la industrialización para disponer cuanto antes de nuevas capacidades y conocimientos que les permitan retomar el ritmo de la historia y mejorar el bienestar de sus ciudadanos.

Las consecuencias son conocidas. Unos países depuran sus vertidos contaminantes y reciclan las basuras de sus industrias y ciudades, estableciendo complejas, caras y exigentes regulaciones para la producción, mientras que los otros intentan capturar esas actividades ofreciendo competitivas condiciones económicas y condiciones regulatorias menos rígidas. En los primeros, el estado tiene controles democráticos y poderes independientes mientras, en muchos de los segundos, no ocurre así. Difícilmente se puede pensar en las generaciones futuras cuando no se puede asegurar la continuidad de las presentes.

El desafío energético que la humanidad afronta es un reto social de magnitudes y dimensiones descomunales y que se acomete desde la existencia de importantes asimetrías que hacen muy difícil y arriesgada su gestión. Las soluciones proclamadas por un 20% de la humanidad, aunque se acepten por el restante 80% no se entienden de la misma forma y las velocidades de aplicación serán también diferentes. Lo peligroso es que en esta carrera cualquier fallo de previsión inicial ó traspíe puede hacer retrasar o impedir la llegada y las consecuencias pueden tornarse de-

sastrosas incluso para el largo plazo.

DEMANDA Y RECURSOS ENERGÉTICOS

Cobertura de la Demanda

En datos de la Agencia Internacional de la Energía, AIE, la cobertura de la demanda energética está resuelta hoy en un 87% por los combustibles fósiles (petróleo 34%, carbón 24%, gas 21%), nuclear 6,5%, y las renovables 14%, incluyendo en éstas a la hidráulica.

En este desglose destaca por su importancia el petróleo, pues esta materia prima es hoy insustituible y rige el ritmo de la economía. Destaca su casi absoluto protagonismo en el abastecimiento del sector del transporte, que supone el 32% del consumo de energía primaria en la OCDE y el 22% en el mundo.

En segundo lugar y como energía final que abarca el 16,1% de la energía primaria, el suministro eléctrico, universal, sencillo de uso, versátil, potente, accesible, normalizado con una incuestionable potencialidad de crecimiento futuro. La energía eléctrica casi se ha triplicado en los últimos 30 años pasando desde los 6.111 TWh hasta 16.661 TWh. En la actualidad su producción presenta el siguiente desglose en energías primarias: 40% carbón, 19% gas, 26% hidráulica, 16% nuclear, 7% petróleo y 2% renovables.

De cara al futuro, la gestión de los recursos energéticos tendrá que resolver los condicionantes del declive de las existencias de gas y petróleo, las medidas de prevención del efecto invernadero con las penalizaciones derivadas de la comercialización de los derechos de emisión, los ajustes de precios derivados del mercado al competir combustibles y tecnologías asociadas, y la capacidad de responder al desafío de la economía que exige, ante todo, la garantía del suministro.

Equivalencia Energética de Combustibles		
Tipo de combustible	Equivalente energetico (J/Kg)	Incremento por kg combustible 2,59 millones
Nuclear	76.9x10 ¹²	2,54 millones
Carbón	29.6x10 ⁶	1
Gas	61.0x10 ⁶	2,06
Fuel	46.8x10 ⁶	1,58

Figura 3 Fuente: CSN-Seguridad nuclear, no 36, 3otrim-05

dero con las penalizaciones derivadas de la comercialización de los derechos de emisión, los ajustes de precios derivados del mercado al competir combustibles y tecnologías asociadas, y la capacidad de responder al desafío de la economía que exige, ante todo, la garantía del suministro.

Reservas de combustibles fósiles

Cuando hablamos de recursos nos movemos en el terreno de la incertidumbre por la variabilidad de los parámetros involucrados: ciencia, tecnología, económicos, culturales y de mercado. Así, pueden existir hoy bienes sin valor ni uso pero que adquieren valor económico gracias al desarrollo del conocimiento y de la tecnología. También la mejora en la eficiencia tecnológica y en los procesos o el cambio de hábitos culturales como el ahorro y la eficiencia energética pueden alterar los ritmos de consumo y extender las duraciones de las reservas. Tan importantes es saber la existencia cierta de vetas de un mineral como valorar su coste de extracción.

Antes de todo, conviene recordar que los combustibles fósiles son finitos y que la fecha de su agotamiento se puede evocar más que conocer y siempre junto con un factor de incertidumbre

Evolución de las Reservas Probadas de Petróleo y Gas y su duración. Factor R/P					
	1984	1994	2004	Duración Reservas R/P actual	Evolucion R/P 1981 a 2003
Petróleo-10 ⁹ Barriles	761	1017	1185		
Petróleo-%	100%	134%	156%	42 años	31 a 42 años
Gas-10 ¹² M ³	96	142	179		
Gas-%	100%	148%	186%	67 años	59 a 67 años

Figura 4. Fuente:BP-estadísticas 2004. Factor R/P=Reservas/Producción=nº años

asociado. Con los datos actuales que necesariamente son conservadores, el carbón puede tener existencias de 200 años ó más; el petróleo y el gas están en el orden de los 40 a 60 años. Estas cifras coinciden con las referentes al combustible nuclear, pues el uranio utilizado actualmente para la energía nuclear de fisión con los actuales reactores y con la actual tecnología, también tiene una duración de 50 años. Estos números deben tomarse con mucha precaución, pues como se ha dicho, el coste de extracción ó factores ambientales o de otro tipo hacen desechables, hoy, alternativas que en el caso de presión del mercado serían viables.

Léase detenidamente la figura 4 de evolución de las reservas de los combustibles fósiles en estos últimos 30 años. Puede comprobarse como esas reservas de gas y petróleo se han incrementado un 156% y un 186%, respectivamente y como el número de años de duración de aquellas se han mantenido en el rango de los 40 a 60 años en paralelo a la multiplicación del consumo. También puede consultarse en la figura 5 la geopolítica subyacente en la distribución de esas materias primas.

Pero, además, antes de la fecha de agotamiento de un recurso está la fecha del cenit de su producción. Hubbert, geólogo minero, propuso a mitad del siglo pasado su famosa curva en forma de campana con respecto a la explotación del petróleo y determinaba que el ritmo de su producción alcanzaría su cenit a principios de este siglo. La interpretación de este punto de inflexión era que con su superación, el mercado empezaría a emitir señales de corrección por estar ante el final del ciclo de explotación fácil y barato, generando un proceso de realimentación que a su vez modificaría el consumo, bien en

<i>Evolución Reservas de Uranio</i>	<i>1993</i>	<i>Factor R/P-</i>	<i>2003</i>	<i>Factor R/P</i>
<i>-Mt U millones toneladas Uranio-</i>	<i>Mt U</i>	<i>Años duración Recursos</i>	<i>Mt U</i>	<i>Años duración recursos</i>
convencionales conocidas < 80 US\$/kgU	2,10	31	3,54	52
convencionales conocidas entre 80 y 130 US\$/kgU	0,96	14	0,98	14
esperadas a coste < 130 US\$/kgU	4,43	65	6,69	98
Total	7,48	110	11,21	164
Incremento Reservas	100%	110	149%	164

Figura 6. Fuente: Libro rojo NEA/OIEA 1993 y 2003. Este libro se edita cada 2 años

precios y cantidades o estimulando tecnologías o combustibles alternativos.

La hipótesis de Hubbert parece que está siendo aceptada por los analistas actuales aunque con muchas precauciones. La necesidad de sustituir un bien económico hoy insustituible, aunque sea a largo plazo, animará el desarrollo científico y tecnológico, quizás hasta hoy aletargado al no encontrar justificaciones que acelerasen su desarrollo.

Reservas de combustibles nucleares: Uranio

En lo referente al uranio, los recursos presentan una evolución similar a la de los combustibles fósiles tanto en la evolución de sus inventarios como en la duración estimada de las reservas (ver figura 6). Los valores se cuantifican en función del coste de extracción. Existen algo más de tres millones de toneladas al coste de extracción inferior a 132\$/kg en recursos RAR o razonablemente asegurados. Esos recursos son 14 millones de toneladas

si se suman la totalidad de las actuales previsiones. En la actualidad el coste de extracción está en las 109 US\$/KgU. Los datos cambiarán probablemente con la nueva publicación del libro de la NEA/OCDE que se revisa cada dos años.

El cálculo de la duración de las reservas oscila, en consecuencia, entre los 50 y 160 años, en la hipótesis de mantenimiento del parque actual, con el crecimiento esperado y con la necesidad de realizar las inversiones precisas en minería y refinó. En previsiones de la OIEA, en estos 20 años se pueden incorporar alrededor de 150 reactores.

La producción actual de uranio, 37.000 t, es la mitad respecto a su consumo, 68.453 t, pues está adaptada a la situación del mercado que presenta un exceso de existencias a causa del aprovechamiento del uranio de alto enriquecimiento, 95%, proveniente del desarme militar acordado entre Estados Unidos y Rusia. El precio de la materia prima se ha multiplicado por cinco en los últimos tiempos, aunque a causa de la descomunal potencialidad energética del uranio, (figura 3) y su escasa repercusión en los costes, 20% del coste final de producción del kWh, su impacto queda muy reducido. No cabe duda, pues es ley en la minería y en tantas otras actividades económicas, que ante las primeras señales de alerta que el mercado genere, se incrementarán las inversiones en nuevos centros de producción ó en la ampliación de los existentes, poniendo en marcha la explotación de nuevos yacimientos ahora en espera así como la búsqueda de otros nuevos. (figura 7)

Debe aclararse que la duración de las reservas está fijada para la actual tecnología de reactores térmicos y no

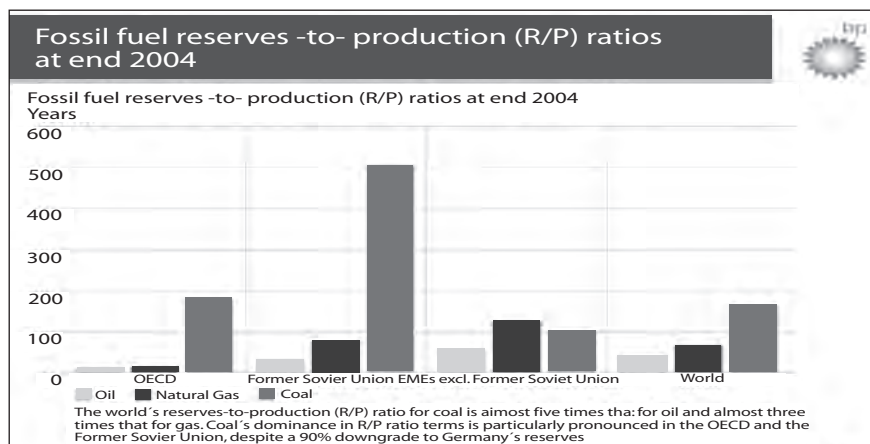


Figura 5. Fuente: Estadísticas BP-2004

se consideran otras como los reactores reproductores que dispararían los recursos al convertir el Uranio-238 en combustible, los reactores de uranio natural y agua pesada como los canadienses CANDU, la utilización del plutonio mezclado con uranio natural mediante combustibles MOX, ni se cuantifican los ahorros obtenidos mediante las mejoras en el rendimiento y los incrementos de potencia, ni la apertura de la tecnología de reactores de torio, elemento cuatro veces más abundante que el uranio.

Ubicación Reservas Uranio	2,5MtU a <80\$/kg
Australia	24%
Kazakhstan	17%
Canada	13%
Sudáfrica	9%
Rusia	6%
Namibia	6%
EE.UU.	4%
Níger	3%
Uzbekistan	3%

Figura 7 Fuente: Areva.B.Barré-All about Nuclear jul 2003

Piénsese, además, que el Uranio utilizado en las centrales nucleares tiene un enriquecimiento de hasta el 5% y que cuando se “quema” en el reactor en un período de 3 años, todavía mantiene un contenido en uranio entre el 91% y el 96%, junto con el 1% de plutonio producido y el resto del 3% al 5% de productos de fisión residuales. Es decir, el combustible mantiene una descomunal cantidad de energía extraíble, aunque con otras tecnologías.

Condicionantes Ambientales. Acuerdo de Kyoto y emisiones de gases del efecto invernadero

La preocupación científica al comprobar que como mínimo estamos ante un proceso antropogénico de calentamiento acelerado del planeta, a partir de la era industrial y fuertemente correlacionado con la generación de CO₂ y demás gases relacionados con el efecto invernadero, a causa de la utilización de los combustibles fósiles, han motivado la redacción de los acuerdos de Kyoto.

Este documento plantea que las emi-

siones de gases del efecto invernadero antes de 2012 sean en volumen un 5,2% inferiores al valor de 1990. Hay una asignación de compromisos de emisiones que afectan a los países industrializados y que se aplica al sector energético e industrial pero no al del transporte, que supone el 33% de las emisiones, ni a sectores domésticos e industriales de pequeño tamaño. Los países en desarrollo no están obligados por el acuerdo (anexo1) y Estados Unidos, 25% de las emisiones, no lo ha firmado. No hay acuerdos de promoción directa de la I+D para remediar este problema pero se incentivan proyectos limpios en la emisión de gases.

Este acuerdo es, por tanto, una necesaria carta de concienciación política antes que una herramienta real para hacer frente al cambio climático pues la generación de gases va a seguir incrementándose aunque de una forma más controlada en los países industrializados

que hoy son responsables del 60% de éstos. Es así que en datos de la Agencia de información norteamericana, Energy Information Administration, se señala que incluso con el cumplimiento de lo firmado, las emisiones esperadas para el período 1990 y 2025 duplicarán el valor inicial fijado, pasando de 5.872 Mt CO₂ a 10.361 MtCO₂.

A raíz de este acuerdo ha surgido un comercio de derechos de emisión que terminará de entrar en vigor en 2008 y que penalizará las fuentes de generación de gases contaminantes y en consecuencia la utilización de los combustibles fósiles (alrededor 10€ ó 20€/tCO₂, como cifra inicial de referencia). Se han creado dos procedimientos de compensación de emisiones mediante la promoción de nuevas inversiones en tecnologías limpias ya sea en los propios países como en países en desarrollo. El protocolo firmado desechó, por el momento, incluir entre éstas a la nuclear. Son los

Reservas, Producción y Necesidades de Uranio			
Reservas Razonablemente Aseguradas-RAR Según coste extracción . Toneladas Uranio	< 40\$/kg U	<80\$/kg U	<130\$/kg U
Reservas RAR tU	1.730.495	2.458.152	3.169.238
Resto Reservas: Probables	800.000	1.100.000	1.400.000
Resto Reservas: Hipotéticas-23% + Especulativas-77%	-----	5.900.000	9.800.000
Total Reservas	2.530.495	9.458.152	14.369.238
Capacidad Teórica Actual de Producción (tU) a <80\$/kg U	2010	2015	2020
Centros existentes y contratados	45.295	43.612	43.005
Centros existentes y contratados y expectativas	51.155	63.712	62.185
Estimación de necesidades de uranio-tU	2010	2015	2020
Escenario bajo consumo	70.605	76.705	73.495
Escenario alto consumo	73.280	84.410	86.070
Duración Recursos con inversiones en Producción	Consumos 2010 N° años	Consumos 2015 N° años	Consumos 2020 N° años
Años recursos RAR con escenario bajo/alto consumo	25-24	32-39	43-47
Años alto consumo con RAR+Probables /total	35	42-112	53-167

Figura 8 Fuente: NEA, libro rojo Uranio 2003

Emisiones directas de CO2				
Central 1000 MWe, operando el 75 % horas año	Carbón	Fuel	Gas	Nuclear
Consumo anual combustible	2,52 Mt	1,52 Mt	1700 Mm3	27,2 t UO2
CO2 emitido	7,8 Mt	4,7 Mt	3,2 Mt	----

Figura 9 Fuente: Le concours Medical

Figura 10 Fuente. EDF-cálculo según normativa ISO 14040. El cálculo se hace a igualdad de energía generada entre otras condiciones para cada fuente considerada

Emisiones de CO2 en ciclo completo.			
Fuente energética	Generado en operación	Generado en resto ciclo	Total g/KWh
Carbón 600 MWe	892	111	1003
Fuel oil	839	149	988
Turbina gas	844	68	912
Diesel	726	169	895
Bombeo hidráulico	127	5	132
Fotovoltaica	0	97	97
Hidroeléctrico	0	5	5
Energía Nuclear	0	5	5
Generador Eólico	0	3	3

Nota: El Protocolo de Kyoto surge en la denominada "Conferencia de las Partes" en la Convención Marco sobre el Cambio Climático de la ONU, en diciembre de 1997. Para su cumplimiento ya se ha ratificado por 129 países que superan al 55% de países y que han sumado más del 55% de emisiones. Está ratificado y en vigor en España.

de vida de las diferentes alternativas y aplicando la norma ISO14040, que homogeniza los criterios de potencia, horas de funcionamiento, energía producida, etc....

Condicionantes Ambientales. Gestión de los residuos industriales y radiactivos

Un segundo aspecto es la generación y control de los residuos de todo tipo producidos en los procesos productivos. Una primera aproximación es disponer del inventario y valoración de volúmenes y que se puede observar en la figura 11. La segunda cuestión está en las características de esos residuos que pueden ser química y biológicamente tóxicos y peligrosos, ó radiactivos ó inertes.

Una frase pronunciada recientemente en una conferencia por la anterior Vicepresidenta y Comisaria de Energía y Transportes de la UE, Loyola de Palacio, resume perfectamente la situación de los residuos radiactivos: "La cuestión de los residuos radiactivos está controlada pero no resuelta, en cambio, el cambio climático ni está controlado ni está resuelto". Conocemos su inventario y cantidad, donde están y se producen, que están reclusos de forma controlada y que tenemos tecnologías para su gestión, pero ni hemos definido inequí-

vocamente la opción técnica a seguir, ni hemos consensuado socialmente su aceptación, ni la hemos aprobado.

Mientras, los residuos industriales peligrosos, como por ejemplo el mercurio o el cadmio y que son de mayor toxicidad que los nucleares, solo están procesados y controlados en algunos países y desde fechas recientes pues la industria minera y la utilización de esos metales lleva muchos años funcionando.

Los residuos nucleares se pueden clasificar en dos grandes grupos, los de baja y media actividad y los de larga vida con el combustible gastado. Los residuos de baja y media actividad tienen plenamente definidas su gestión, reclusándolos en almacenes accesibles durante un período de hasta 300 años en que son, ya, materia inerte. En el caso de España debe citarse que existe una política plenamente definida y unas actuaciones modélicas reflejadas en el centro de El Cabril, en Córdoba.

En lo que se refiere a la gestión del combustible gastado, existe a nivel mundial una situación de espera. En estos momentos, la cantidad acumulada en el mundo de este combustible de 250.000 toneladas. Alrededor del 30% se reprocesan para recuperar el uranio no quemado y el plutonio obtenido, y que pueden ser empleados nuevamente como combustibles. Cuando no se ha acometido la política de reprocesamiento, este combustible se encuentra en los emplazamientos de las centrales y la política es juntarlos en un emplazamiento temporal único que mejora su gestión.

A efectos de comparación entre los volúmenes de los residuos nucleares y no nucleares viene bien realizar la siguiente comparación con datos de la anterior Unión Europea con 15 miembros, UE-15, y 375 millones de habitantes.

Anualmente se producen 2.700 Mm³ de residuos convencionales (7,3 m³/habitante), de los que son residuos tóxicos 1,7% (0,12 m³/habitante) y tan solo 50.000 m³ son radiactivos (0,13 l/ habitante). A su vez, de ésta cantidad, solo son de alta actividad y larga vida 500 m³ (1,3 cm³/ habitante cantidad contenida en un dedal de coser). Este cálculo de los residuos radiactivos se ha hecho con la hipótesis de reactores de 1.300 MW y el reprocesamiento del combustible.(fuente: EU DG TREN D.Taylor Radiactive waste-DISTEC 2000)

En aplicación al caso español, que no ha adoptado la política de reprocesamiento, la totalidad del combustible gastado, transcurridos los 40 años de operación de las centrales, ocuparía el volumen de un paralelepípedo de un metro de altura dis-

denominados "mecanismos de desarrollo limpio" y los de "aplicación conjunta".

En la actualidad, la energía nuclear ahorra la emisión anual de 2.160 Mt CO₂ que corresponde a la generación eléctrica de 2,7 TW del parque nuclear mundial en 2004. Para este cálculo se ha supuesto que es generado con el actual "mix" energético térmico de la UE-25 (54% carbón, 33% gas, 11% petróleo). Este ahorro equivale al obtenido por la producción hidráulica según se indica en datos del OIEA y supone el 17% de las emisiones anuales de los países de la OCDE ó el 67% de las emisiones de los países de la anterior UE-15.

A efectos informativos se ha incorporado una comparación de emisiones de CO₂, realizada entre los ciclos

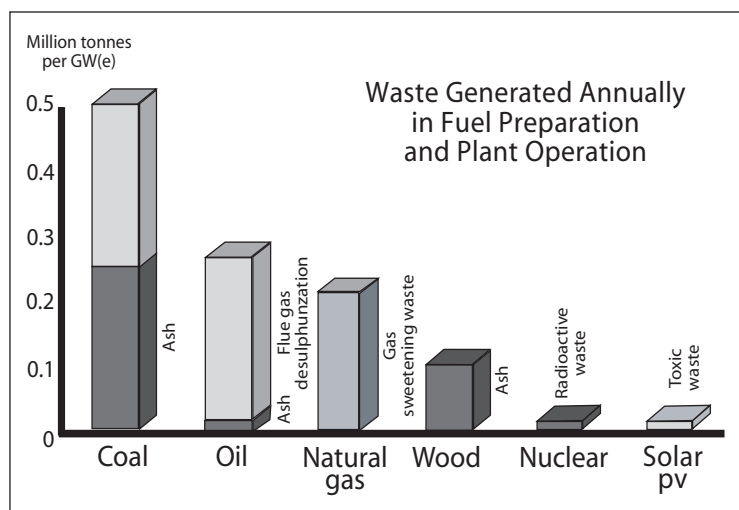


Figura 11 Fuente: Q2-01574 / FS Series 3/01/E/Rev.1

puesto sobre la superficie de un campo de fútbol, casi 1 hectárea.

En los países de la OCDE que disponen de la tecnología nuclear, la gestión de los residuos radiactivos está planificada y además existen organismos reguladores independientes que la controlan y supervisan, ya sea en entes públicos ó privados, aunque con diferentes formulaciones. En lo que respecta a España, los Planes nacionales de gestión de los residuos radiactivos son elaborados por la empresa pública ENRESA y presentados al gobierno. Inventarios, políticas, presupuestos con aplicación de tasas para creación de fondos y actuaciones quedan allí expuestos junto con los calendarios de las actuaciones.

Debe aclararse con respecto a la gestión del combustible gastado que existen tecnologías disponibles para su inmediata ejecución, por ejemplo el enterramiento profundo o en siglas AGP, con la interposición previa de barreras tecnológicas de protección, en zonas geológicas adecuadas (granitos, arcillas,). En Finlandia, Olkiluoto, y en Estados Unidos, Yucca Mountain, están definidos emplazamientos para este fin, el primero con la aprobación parlamentaria y el segundo con la presidencial pero sometida a la necesaria aprobación parlamentaria. Otros programas están en marcha en Francia, Suecia, Canadá, etc..

También están en marcha importantes investigaciones para la separación de radionucleidos y su transmutación en elementos inertes. De lograrse su desarrollo, se conseguirá una radical disminución de los residuos de larga vida y se eliminará prácticamente el problema. No hay definidas fechas concretas para su aplicación.

Lo anteriormente expuesto sirve para entender la situación de espera en la gestión del combustible gastado y la opción

que hoy hay expectativas de solución cada vez mejores. Además, hay que incidir en que el combustible gastado en vez de un residuo puede ser considerado una fuente energética por el 95% de uranio 238 y el 1% de Plutonio que lo compone. Esto plantea la preocupación de la proliferación nuclear, pero su solución es plenamente factible si existe voluntad política.

Proyecciones de consumo futuro

Hay consenso absoluto en querer que las energías renovables sean la solución energética de la humanidad, pero también la ciencia y la técnica acotan enormemente ese deseo con los condicionantes y la reducción de expectativas que su desarrollo y utilización tienen. Hay esperanzas, muchas sólidamente fundadas, de su próxima disponibilidad pero también y al mismo tiempo, muchas incógnitas a despejar.

Las proyecciones a 30 años realizadas por los analistas de la AIE indican que continuará, incuestionablemente, la primacía de los combustibles fósiles que mantendrán la cobertura entorno al 80% del abastecimiento junto con las energías renovables que coparán el 15% y la energía nuclear con el resto.

La energía eléctrica, como energía de uso final, proseguirá incrementándose en su uso por el creciente valor que incorpora y tendrá una horquilla de crecimiento que hará que su contribución oscile entre 34% y el 40%, con un incremento anual del 2,3% y con valores del 3,2% en los países desarrollados.

Estas previsiones son fruto de un doble análisis. De una parte el correspondiente a parámetros técnicos relacionados con

actual de acometer soluciones temporales. No hay que precipitarse en adoptar soluciones a las que se les exige en este momento que sean reversibles y recuperables, atendiendo a un criterio de responsabilidad intergeneracional porque no se debe dejar a las generaciones futuras un problema para el

la disponibilidad de los combustibles y la utilización de tecnologías y por otra a la situación del mercado que toma en consideración las restricciones ambientales con las repercusiones en costes.

En lo que se refiere a la energía eléctrica debe recordarse que no es almacenable en términos industriales y que obliga a considerar nuevos factores técnicos como garantía de potencia y estabilidad de red a la hora de utilizar las fuentes energéticas lo que puede restringir la aplicación de algunas tecnologías. Más adelante se comenta esto.

POLÍTICAS ENERGÉTICAS ACEPTADAS

Hay consenso unánime en que el modelo energético de referencia que los gobiernos deben seguir para asegurar el suministro pasa por definir una "cesta" ó "mix" energético en el que participen todos los combustibles existentes. No existe ninguna energía excluida en este empeño. Eso sí, cada gobierno aplicará para su exacta definición los condicionantes específicos nacionales. También deben diversificarse proveedores, tecnologías y aprovisionamientos geográficos. Las soluciones deben ser ambientalmente aceptables y debe promoverse el uso de las energías renovables.

Aunque existe consenso globalizado a nivel de instituciones supranacionales y nacionales, económicas y políticas, gubernamentales y privadas, en la totalidad de esos principios, no ocurre igual por parte de algunos agentes sociales y grupos de presión y ello pesa en el periódico examen ante las urnas y en la gestión política. A su vez esta incertidumbre incrementa el riesgo financiero y regulatorio ante las posibles inversiones afectadas, aplazándolas o sustituyéndolas, aun cuando solo sean soluciones a corto plazo desde el punto de vista energético. La opción nuclear está en esta situación.

Las políticas promovidas buscan el abastecimiento universal atendiendo al crecimiento. Que la energía sea accesible en precio y con un producto fiable y de calidad promoviendo el funcionamiento de un mercado transparente y que su utilización sea sostenible ambientalmente. En los cuadros que se incorporan (figuras 12 y 13) quedan expuestas en forma resumida.

TECNOLOGÍAS DISPONIBLES Y LA OPCIÓN NUCLEAR

Solamente se realizan unos comentarios sobre la garantía de potencia, las

Bases de una Política Energética			
Atender al Crecimiento	Energía Disponible	Energía Accesible	Energía Aceptable
-Población -Económico -Energético -Estabilidad Institucional	-Calidad y fiabilidad en suministro -Todos los recursos son necesarios -Diversificación fuentes y proveedores	-Suministrar a precio accesible -Transparencia mercado. No subvenciones -Respeto al Medio Ambiente	-Objetivos medio-ambientales y actitudes públicas -Afrontar cambio climático -Tecnología limpia y usos locales

Figura 12 Fuente. WEC-2000 Houston

Figura 13 Fuente. WEC-2000 Houston

Desarrollo de Políticas Energéticas

Reformar el Mercado: libre elección, libre comercio, organismos superiores
 Mantener todas las opciones energéticas
 Reducir riesgos políticas de inversiones en proyectos clave.
 Hacer más baratos los proyectos en países pobres
 Sistema de Precios fiable que incorpore todos los costes: externalidades
 Promover una mayor eficiencia energética: linealidad PIB/tep
 Asegurar financiación para protección medioambiental
 Garantizar suministro a precios asequibles: países pobres
 Financiar I+D: evitar duplicidad
 Mejorar la educación y la información pública
 La ética como referencia en la gestión del sistema energético:
 promover auditorías medioambientales y energéticas

renovables y la nuclear. Se omite entrar en las energías fósiles que por su importancia merece una extensión muy superior y para las cuales cabe citar las perspectivas optimistas de uso limpio del carbón mediante las nuevas tecnologías limpias de quemado del carbón y el secuestro del carbono.

Condicionantes de la generación eléctrica: La garantía de potencia

Las diferentes tecnologías que se exponen, mayormente, serán utilizadas, salvo en el caso de la solar térmica de baja temperatura, en producir energía eléctrica centralizada, pero existen condicionantes específicos derivados de esta intermediación.

La energía eléctrica tiene como característica más importante que no es almacenable en términos industriales. Debe ser consumida a medida que se produce y en consecuencia exige que exista una red dotada con una "garantía de potencia" o centrales dispuestas en cualquier momento a conectarse a plena potencia en los tiempos demandados y capaces de seguir la exigente curva de demanda del mercado. Un segundo aspecto está en la estabilidad de la red, término con el cual

abarcamos los servicios adicionales de potencia reactiva, tensión, frecuencia y respuesta ante las rampas de encendido y apagado y las oscilaciones con los indeseados transitorios.

Por ejemplo, en el caso español, diariamente el sistema requiere que entre las 7 y las 13 horas se duplique la potencia operativa desde un valor inicial de referencia de 17.000 MWe a un máximo de 38.000 MWe y a un ritmo equivalente de 2 a 3 centrales nucleares de 1.000 MWe por hora. Además, las puntas de demanda ocurren

en invierno a las 19,00 horas cuando ya no hay luz solar y en verano en valores próximos a los de invierno cuando no hay disponibilidad hidráulica o incluso viento (la calma veraniega con el bochorno de calor).

La cobertura de esta demanda requiere combustibles almacenables y tecnologías de gran potencia con gran capacidad de mantenimiento ante la dureza de ese mercado, es decir energías de base. La planificación de un sistema eléctrico que debe garantizar el suministro no puede basarse en energías discontinuas que desde luego tienen su papel apoyando al sistema pero que quedan liberadas de responder ante una situación de exigencia. No se pueden sumar alegremente potencias de energías renovables y añadir las de los combustibles fósiles, ni mucho menos sustituir unas por las otras.

La garantía de potencia significa, finalmente, que en su cómputo anual 3.000 MWe eólicos equivalen a 1.000 MWe fósiles y solo en teoría, pues no sabemos si dispondremos de esa potencia cuando la necesitemos y de si en un momento dado se colapsará esta generación por fallo en la estabilidad de la red.

Las Energías Renovables

Las energías fósiles ya desplazaron a las renovables en su día por sus características de almacenamiento, continuidad y gran potencia en el transporte. Colón llegó a América gracias a la energía eólica pero hoy llegamos gracias a turbinas alimentadas por derivados del petróleo. Y esta situación no ha cambiado. Nadie se plantea volver a la navegación a vela. Sin embargo, las energías renovables si tienen un importante papel que cumplir aportando su producción pero sin garantía de continuidad. Bienvenidas sean, pero su papel en el suministro se limitará a completar a la energía de base o de producción constante y garantizada. Existen teorías de lograr la producción descentralizada a partir de pequeñas potencias, pero no hay referencias de avances ni teóricos ni reales en su desarrollo que plantea inconvenientes muy importantes.

La energía solar tiene unas grandes expectativas pero requiere todavía sustanciales avances tecnológicos y comerciales. Debe resolverse su escasa eficiencia con valores del 15% en la fotovoltaica y su elevado coste, 5\$/W a 10\$/W junto con la necesidad de cubrir amplias extensiones de territorio (1000 MWe exigen 80 km², que solo operaría con luz solar presente y usando la tecnología mas avanzada). ¿Cubrir el desierto de paneles solares como alguna propuesta dice tendría consecuencias medioambientales?

La energía eólica, lastrada por la variabilidad del viento y subvencionada con posibilidades de expansión, tiene importantes condicionantes técnicos derivados de la estabilidad de red a causa de su intermitencia y del colapso de los nodos asociados en las redes de distribución en momentos de gran producción. España está posicionada como el tercer país del mundo en energía eólica instalada con cerca de 10.000 MWe operativos, potencia que finalmente sólo es aprovechable entre un 20% y 30% por la variabilidad del viento.

También existen muchas esperanzas en los biocombustibles con experiencias de aplicación muy prometedoras en Brasil. En su debe está la necesidad de dedicar enormes extensiones de territorio si queremos que su producción sea masiva para alimentar un parque automovilístico mundial de más de 1.000 millones de automóviles y esto puede colisionar con las necesidades de cultivo agrícola de alimentos y quizás, también

medioambientales por ser un monocultivo. Se puede citar al respecto la ponencia sobre el hidrógeno presentada por el doctor Eisenbeis en el aula de Repsol en marzo de 2003 y donde citaba que en cálculos de OCDE habría que dedicar el 20% de las tierras de cultivo al cultivo de plantas productoras de etanol para abastecer del 10 al 15% de la demanda de combustible.

La hidráulica tiene un grado de desarrollo importante pero casi siempre con un coste ambiental que puede ser elevado. En España está prácticamente agotada para grandes proyectos. No olvidemos la dependencia de caudales hidrológicos importantes y que los embalses tienen un plazo de vida por soterramiento de su fondo con los arrastres.

Las energías renovables, incluida la hidráulica, suministran hoy cerca del 12% de la energía mundial y quizás podrían abastecer a una humanidad que modificase radicalmente el censo de su población y reestructurase su entorno social y económico, modificando sus costumbres y muy probablemente con unas consecuencias ciertamente dramáticas. ¿Cuál sería el modelo propuesto?

La energía nuclear.

La energía nuclear es intensiva en capital, en conocimientos y en intensidad energética. Su desarrollo ha sido fulgurante durante el pasado siglo.

En 1951 se lograba experimentalmente en Idaho, Estados Unidos, por vez primera, la generación de electricidad a partir de la fisión nuclear. Tres años después esta producción se lograba a nivel de técnica en un reactor ruso y en 1956, la central inglesa de Calder Hall lograba hacerlo,

conectándose a la red eléctrica por primera vez y abría la época de su utilización comercial. En 1968 lo hacía la primera central española, la central José Cabrera.

En la actualidad el censo de reactores nucleares en el mundo es de 443 centrales nucleares en 31 países con una potencia instalada de 359 678 GWe y que logran una producción de 2500 TWh, el 17% de la energía eléctrica mundial. El 2% de este parque está en España y los países con más de 15 reactores son: Estados Unidos (104), Francia (59), Japón (56), Canadá (18), Corea (20), Alemania (17), Reino Unido (23), India (15), Rusia (31) y Ucrania (15). La experiencia acumulada sumando la totalidad de horas de funcionamiento supera los 11.000 años.

En datos del OIEA tomados de la Base de Datos "PRIS" existen en la actualidad 25 reactores en construcción con una potencia de 19.866 MW. A destacar, en China y Rusia 4 unidades, con 4.600 MW y 3 775 MW; en India 9 unidades con 4.092 MW y 3 unidades en Japón con 3.237 MW. Además están en fase de planificación otros 73, correspondiendo 33 a China, 12 a Japón, 9 a Rusia y 6 a Corea. En la Unión Europea 13 de los 25 países cuentan con 149 reactores. (fuente: OIEA y Nukem)

En la figura 15 se puede comprobar como ha evolucionado esta energía y como son las economías de Asia Pacífico las que apuestan últimamente por ellas.

Hoy en día, existen decisiones políticas contradictorias con respecto a la energía nuclear que van desde el abandono a largo plazo aprobado en algunos países europeos: Suecia, Alemania, Bélgica y Holanda, hasta la decisión contraria de decidir nuevas inversiones en Finlandia y Francia, en lo que respecta a Europa y China e India en Asia. Sin embargo, en el primer caso, el abandono de la energía nuclear se ha hecho con acuerdos a muy largo plazo y el cumplimiento de los calendarios impuestos tropieza con innumerales dificultades, como es el caso de Holanda con su central de Borselle que se ha postergado sine die, o el de Alemania, que tiene un horizonte hasta 2020 o el de Suecia que había acordado el abandono nuclear en 2010 y hasta la fecha solo lo ha hecho con 2 reac-

tores y acumulando importantes retrasos y fuertes compensaciones. También está el caso de Suiza que en referéndum ha decidido continuar con la opción nuclear.

Hay que añadir, además, que existe intención de reanudar anteriores proyectos en varios países del este europeo (Eslovaquia, Bulgaria y Rumania) y en Corea y Taiwan.

El parque nuclear mundial presenta unos resultados satisfactorios y sus instalaciones son seguras si se operan de acuerdo con la normativa establecida y bajo la autoridad de un organismo regulador independiente. El incumplimiento de estas premisas originaron los dos accidentes reseñados en la historia nuclear en las centrales de Harrisburg y Chernobyl. El primero sin consecuencias externas y el segundo con una cifra de cerca de 57 muertos directos reconocidos en el reciente estudio de la Agencia Mundial de la Salud y de otros organismos de Naciones Unidas junto con varios miles de afectados que han podido desarrollar la enfermedad cancerígena, tratable médicamente en su mayoría y la contaminación de la zona limítrofe que ha motivado evacuar una población muy elevada en número de las poblaciones cercanas, con los costes sociales y psicológicos asociados. Además, se relaciona una mortandad asociada en los trabajadores que actuaron en fases posteriores limitada en un número inferior a la decena del millar. Han quedado determinadas zonas contaminadas en Bielorrusia sobre todo, y en Rusia y Ucrania con valores que en algún caso alcanza en zonas muy determinadas 5 veces el valor de referencia natural (1 a 5 Ci/km²) pero con isótopos, Cs-137, que tiene de vida media 30 años. En zonas con contaminación hasta 20 Ci/km² ha retornado una población de 200.000 habitantes.

Fuentes energéticas renovables	Producción 2000-Gtep	Producción 2020-Gtep
Biomasa	1,1	1,7
Eólica	0,003	0,02
Fotovoltaica + térmica solar	0,002	0,09
Hidráulica	0,2	0,4
Geotérmica	0,01	0,09
Maremotriz	x	2x
Total	< 1,35	< 2,5
% consumo total	15%	20%

Figura 14 Fuente: Areve. B.Barré. All about Nuclear

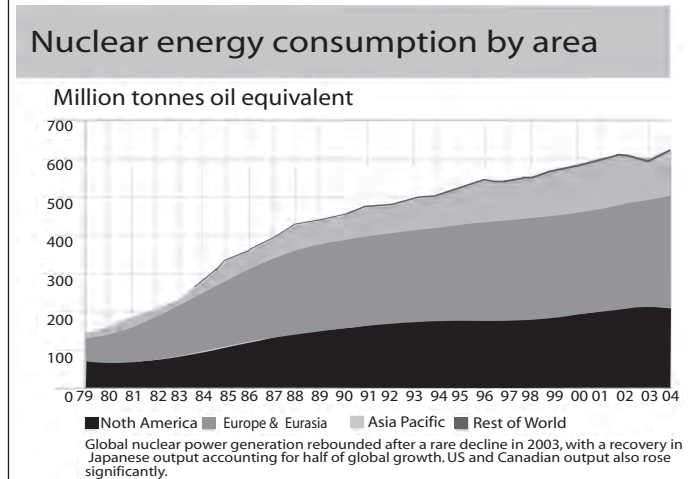


Figura 15

Es conveniente hacer un comentario aclaratorio a este respecto. Lo importante es la dosis absorbida que depende de varios factores que miden la incorporación de los radionucleidos a las vías tróficas y al ser humano. Además, hay que aislar este hecho de los propios procesos biológicos de envejecimiento y de vida. Sólo de esta forma se pueden valorar las consecuencias específicas de este accidente e independizarlas. Las dosis calculadas (media anual) para las zonas afectadas oscilan entre 4 y 40 mSv con picos superiores (el valor legal establecido para profesionales de la industria nuclear es de 20 mSv). La mayoría de los afectados lo han sido por una deficiente planificación de actuaciones en la gestión del accidente. La comparación de estas consecuencias con los de otros usos tecnológicos o no tecnológicos, por ejemplo el automóvil, la hacen completamente asumible.

La Tierra, hospedaje rabiosamente vivo, es un planeta radiactivo en proceso de enfriamiento radiológico desde su formación celeste hace 4.500 millones de años, con minerales radiactivos como el uranio y el torio, con la historia de un reactor natural formado hace dos millones de años en Oklo, Gabón. La vida se ha desarrollado y se desarrolla en este entorno en donde de forma natural se recibe en nuestra era, pues fue superior en anteriores eras geológicas, una dosis radiactiva anual entre 2 y 10 mSv según el lugar de residencia y la altura. En la actualidad la actividad humana: industrial, médica y energética, añade un 10% más, 0,33 mSv. De este valor solo el 0,03 mSv, es decir, el 1%, procede de la generación eléctrica, el resto es de origen médico básicamente e industrial.

Un dato empírico ayuda finalmente a entender el sentido y significado de lo anteriormente expuesto. Japón dispone de más de 54 reactores nucleares en funcionamiento, la tercera potencia mundial en este sentido, así como una importante y completa industria nuclear relacionada con la totalidad del ciclo de combustible junto con una línea puntera en investigación y desarrollo. Y hablamos de Japón, la única nación que ha sufrido los efectos del arma nuclear.

En la figura 15.1 se muestra el cronograma de la evolución de los diseños de reactores nucleares. Se pueden identificar cuatro épocas bien diferenciadas en su historia. La primera corresponde al período de lanzamiento comercial. En la segunda tiene lugar la fase de inversión del actual parque nuclear y que resultó acelerada por las crisis del petróleo de los 70.

La tercera fase recoge la madurez de la industria nuclear tras cerca de 30 años de experiencia con las mejoras de diseño identificadas. Se mejora en la economía de cons-

trucción, seguridad operativa y ante el exterior con la reducción de la probabilidad de fusión del núcleo y la optimización económica en el diseño y en explotación comercial (figura 16). Pertenecen a esta fase los modelos APWR 600 y 1000 y ABWR 1000 (con varias unidades en Japón) y el europeo EPR de 1300 MWe (próxima construcción de unidades en Francia y Finlandia

Ya en la fase de desarrollo están los sistemas evolutivos de la generación 3+ que prosiguen incorporando nuevos diseños y equipos en base a los últimos avances en tecnología y a la última experiencia operativa.

Por último está la denominada IV Generación con un horizonte establecido en 2030. Un reciente artículo de los experimentados y prestigiosos investigadores del CIEMAT, José López Jiménez y José Luis Díaz, en la revista de la Sociedad Nuclear Española de septiembre de 2005 trata sobre este asunto. Los aspectos que son objeto de investigación son: refrigeración con metales líquidos, reactores de alta temperatura-900 °C, uso del torio como combustible, mejora de la obtención de energía del uranio y plutonio, desarrollo de reactores reproductores que multiplican los recursos de uranio por 50, etc..

Dos iniciativas se han desarrollado con este fin. La Generación IV, nacida en 2000 impulsada por los Estados Unidos y que agrupa a grupos privados industriales y gubernamentales y en la que participan: Argentina, Brasil, Canadá, Francia, Japón, Corea, Sudáfrica, Suiza y Gran Bretaña. Ha concretado seis sistemas de reactores objeto de investigación: Refrigeración por sodio, de alta temperatura, refrigerados por agua supercríticos, reproductores refrigerados por plomo, por gas y por sales fundidas.

La iniciativa INPRO es una colaboración internacional surgida en el OIEA en 2001 que busca un reactor con mejoras en la seguridad, sostenibilidad, la economía y evitar la proliferación. Participan en este empeño, LA UE, Argentina, Canadá, China, Alemania, India, Holanda, Rusia, España, Suiza y Turquía.

Podemos resumir lo dicho sobre las investigaciones en curso en que se trata de disponer de un reactor con tecnología estandarizada y de reducido coste, intrínsecamente seguro, y que evite la proliferación nuclear, descartando el máximo accidente LOCA hasta ahora postulado, que incluso eliminaría las zonas de restricción exterior

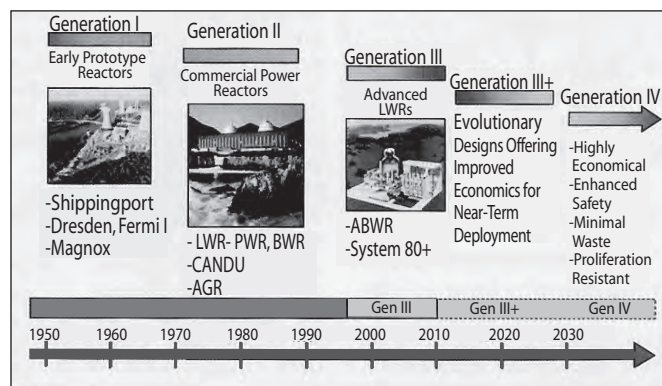


Figura 15.1 Evolucion de los sistemas nucleoelectricos

y de mínimo impacto en caso de accidente entre otros factores. (figura 16).

Tras 50 años de experiencia y acumular 11.000 años-reactor de seguimiento operativo diario de esta tecnología, la madurez de la industria nuclear está permitiendo la reducción de los períodos de construcción, ahora posibles en 4 ó 5 años, de los plazos de concesión de las autorizaciones administrativas con el ejemplo del nuevo proceso planteado en Estados Unidos que reduce éstas a dos y que dan garantía a la inversión, la mejora de los ciclos de operación gracias al mejor aprovechamiento del combustible con ciclos de 18 y 24 meses entre paradas de recarga y con mantenimientos optimizados y que ahora también se realizan durante la operación, y con la mejora de la gestión global junto con las ventajas derivadas de la estandarización de equipos y procedimientos.

También en la extensión de las autorizaciones de funcionamiento que en un principio se habían planteado para 40 años y ahora se propone para 60 años. Esta práctica es general en Estados Unidos y también en Europa, Japón, Corea. En Suiza no hay límite temporal administrativo pues hay potestad para suspender la licencia en cualquier momento. En estos momentos, las dos terceras partes de los 104 reactores americanos, 70 reactores, están o entrarán en ese proceso. 39 reactores ya disponen de autorizaciones para 60 años.

Además, la cooperación e intercambio de información y experiencias a nivel internacional ha permitido que las mejores prácticas sean identificadas y aprovechadas logrando una incuestionable mejora de la seguridad. Las organizaciones WANO e INPO agrupan a los operadores de centrales nucleares en el mundo y en Estados Unidos, respectivamente, y son foros de inapreciable valor y signos de calidad. Todo lo anterior ha permitido la reducción de costes de operación y la mejora de la utilización de los reactores.

En la figura 16.1, queda reflejada la confianza obtenida en la explotación del

Innovación y simplificación en el diseño de nuevos modelos de Reactores Nucleares



Válvulas	Bombas	Tuberías	Conductos Ventilación	Volumen de edificación CS I	Cables
-50%	-35%	-80%	-80%	-45%	-70%

Simplificación de los sistemas de seguridad

A- Refrigeración del Reactor por convección natural

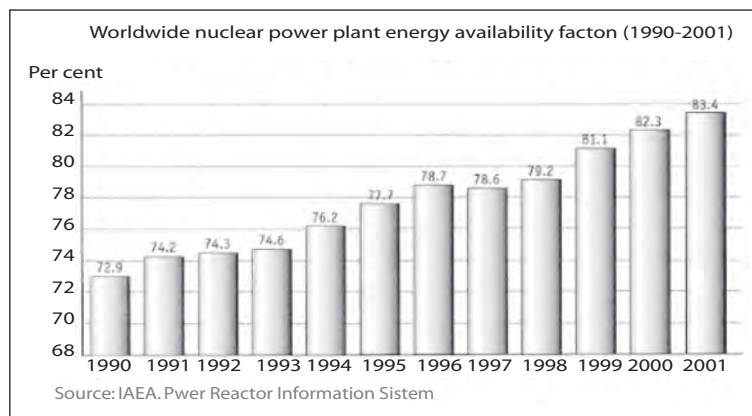
B- Descarga de tanques de agua por gravedad

C- Eliminación del accidente de fusión del núcleo

D- Reducción drástica de la probabilidad de accidente y del daño en caso de ocurrencia

Figura 16

Figura 16.1 Evolución de la disponibilidad del parque mundial de CC.NN



parque mundial de reactores nucleares, pudiéndose observar como en los últimos años la disponibilidad energética del parque mundial de reactores ha crecido un 10%, de forma que hoy el 84% de la potencia instalada (356 GWe) está disponible para abastecer la red, hito muy difícil de alcanzar por otras tecnologías, teniendo en cuenta que en el 16 % de la energía no suministrada restante está incluida la pérdida a causa de los tiempos de mantenimiento y de las averías fortuitas.

Sirva de ejemplo de la madurez alcanzada en la explotación de los reactores españoles, que el incremento de la potencia desde los años 90 mediante instalación de equipos más eficientes, mediciones más ajustadas y la eliminación de pérdidas de calor sin afectar a la producción nuclear del núcleo, ha supuesto incrementar su potencia en casi 500 MWe.

Resta dedicar un comentario a los costes de generación nuclear. La debilidad en el campo económico de la energía nuclear está en que al ser una energía muy intensiva en capital y con largos plazos de amortización está expuesta a la fluctuación financiera y al riesgo de cambio. Pero la fuerte estabilidad en el coste anual de explotación que está asegurada por la baja repercusión que en

23 gas, 13 nucleares, 19 eólicos, 6 solares, 24 cogeneración y 10 otras) siguiendo un protocolo de solicitud y recogida de la información. Supone vida útil de 40 años, 85% de factor de carga y tasa de descuento entre el 5% y el 10%.

Tal como indica el profesor Alonso, el estudio de los resultados indica la clara ventaja de los proyectos de gas a la hora de la inversión y de los proyectos nucleares de cara a su explotación. Téngase aquí en cuenta el peso del precio de los combustibles y la capacidad de alcanzar factores de

su cálculo tiene el coste de combustible amortigua dicha debilidad. Existen muchos estudios presentados al respecto. Se hace referencia aquí, a un artículo muy reciente del profesor Agustín Alonso en la revista del CSN, Seguridad Nuclear, y que recoge los resultados del trabajo: Projected Costs of Generating Electricity. 2005 Updated. (figura 17). Se ha realizado en el seno de la AIE-OCDE con datos procedentes de 130 proyectos (27 carbón,

carga del 85%. Es el mercado el que debe ahora decidir aunque existen otros dos factores que modifican el resultado final: son factores intangibles de indudable importancia: el riesgo regulatorio y la aceptación social.

No se hace aquí mención a los costes de las externalidades con el final del ciclo, aunque si hay que citar que en el sector nuclear es donde más probablemente están inventariados y analizados.

Por último resta un comentario sobre la energía de fusión. Esta, constituye un reto al que el intelecto nunca renunciará, pues es la misma energía que mantiene el sol y las estrellas del universo. De lograr su control y uso se resolvería el problema energético de la humanidad. Existen dos líneas de investigación en confinamiento magnético y en confinamiento inercial. En el primero está el proyecto ITER que cuenta con la participación de España y con el objetivo de progresar en experimentos con vista a su utilización comercial a muy largo plazo. El segundo ligado al desarrollo de láseres de gran potencia.

No hay fechas concretas de disponibilidad y los trabajos prosiguen en el área experimental, mas avanzados en el confinamiento magnético con el ITER como estrella y un presupuesto de casi 5.000 millones de euros que deberá posibilitar instalar el reactor de experimentación en Japón tras finalizar los trabajos que se llevarán a cabo en Cadarache, Francia y que tiene una organización soporte en Barcelona para la administración y logística.

BREVE COMENTARIO SOBRE EL VECTOR HIDRÓGENO

Son de actualidad en el mundo energético las referencias al hidrógeno como futuro combustible apto para el transporte y también para el resto de sectores económicos. El hidrogeno es un vector energético, es decir es energía final como la eléctrica pues apenas existe libre en la atmósfera (200 Mt) y su producción

Evaluación de costes de las diferentes tecnologías

	Coste Inversión US\$/KWe	Coste Generación US\$/MWh (tasa descuento 5 %)	Coste Generación US\$/MWh (tasa descuento 10 %)
Nuclear	1000-2000	21-31	30-50
Carbón	1000-1500	25-50	35-60
Gas	400-800	37-60	40-63
Eólica	1000-2000	35-95	45-140
Riesgos	Financiero	Coste Combustible	Coste Combustible

Figura 17 Referencia. CSN-Seguridad nuclear no 36 -A.Alonso-Origen OCDE-AIE

es fuertemente endotérmica, es decir, el proceso consume más energía que la que después se obtendrá con su oxidación. Por este principal motivo la economía del hidrógeno solo será viable si el proceso total de su producción es económicamente rentable, considerando todos los factores no técnicos asociados. En la actualidad se producen 50 Mt ó su equivalente de 55 Gm³. Esta producción equivale al 2% de la demanda de energía primaria mundial y para su producción mediante electrolisis sería necesaria la dedicación de 104 reactores nucleares.

Su obtención se puede hacer mediante la electrolisis del agua o con la disociación de la molécula de agua a temperaturas en el orden de los 2000 °C ó por reformado, esto es por rotura de la molécula de los hidrocarburos o mejor del gas natural. Los dos primeros procedimientos son limpios de generación de gases del efecto invernadero pero no así los restantes (producir una tonelada de hidrógeno a partir del metano o gas natural genera 7,75 toneladas de CO₂ y a partir del vapor de agua un 30% menos).

La disociación de la molécula de agua también se puede conseguir mediante procesos termoquímicos con temperaturas en el rango de los 500 °C y los 1.000 °C añadiendo compuestos químicos como iodo-azufre, vanadio-cloro, bromo-calcio-hierro, azufre y cloro y así hasta 3.000 ciclos estudiados. Solo en los primeros se tienen fundadas esperanzas. Un factor limita su desarrollo, la elección de catalizadores o de membranas pues los primeros utilizados de platino-rutenio tienen un coste prohibitivo para su comercialización y por eso se trabaja en encontrar otros. La utilización de materiales a las temperaturas citadas es otro obstáculo.

La capacidad energética del hidrógeno está muy penalizada según se utilice en forma de gas o de líquido. 1 kg de H₂ equivale a 3 kg de gasolina ó 33 KWh y 1 m³ de gasolina equivale a 3.300 m³ de hidrógeno a 1 bar ó 4 m³ a 200 bar ó 10.000 KWh. Es lógico comprimir el gas a 300 atm, o utilizar hidruros para su utilización ó licuarlo.

Se piensa su utilización en las pilas de hidrógeno tanto para automoción como generación de calor industrial como generación eléctrica. Estamos hablando de la deseada creación de una red distribuida de energía

Las energías renovables tienen una oportunidad para ser utilizadas en la generación del hidrógeno mediante la electrolisis (eólica-solar) o directamente disociando la molécula de agua si se alcanza la temperatura de 900 °C por concentración de paneles solares, pero si hablamos de las descomunales

cantidades industriales que serían necesarias para abastecer el transporte, el 25% del consumo de la energía primaria mundial, entonces nos enfrentamos a que al ser energías sumamente distribuidas, sometidas a la irregularidad climatológica y por consiguiente además muy costosas es muy improbable que se consiga la enorme producción demandada. Como solo el proceso de electrolisis está limpio de emisiones de gases del efecto invernadero, volvemos a la problemática de generación eléctrica con renovables ya citada. Si vamos al reformado del gas o compuestos del petróleo estamos generando CO₂ en cantidades importantes y además con la penalización económica de los derechos de emisión.

La energía nuclear a través de los reactores de alta temperatura que alcanzan los 900 °C pueden suministrar el calor demandado por los ciclos termoquímicos antes citados. Los trabajos en la Generación IV antes citados y los prototipos experimentales que desarrollan Japón, Francia y Estados Unidos, cumplen estas condiciones. Japón tiene un reactor de estas características refrigerado por helio de 40 MWt, a 930 °C y 300 atm en operación conectado a una planta de producción de hidrógeno del ciclo I-S y con volúmenes de producción de decenas de litros a la hora y la expectativa de su plena disponibilidad a nivel industrial en 2017.

Los planes existentes apuestan por introducir el hidrógeno en el transporte público a finales de la próxima década como primer paso. Hay previsiones en Japón de utilizar en 2020, 5 millones de coches con pilas de combustible que consumirán 387 Gm³ de H₂ (la producción actual es de 55 Gm³ por reformado de hidrocarburos); en la UE existe fecha de inicio de esta experiencia en 2020 sin definir volúmenes, al igual que en los Estados Unidos en 2015.

En la figura 18 se puede consultar una previsión para la generación del hidrógeno y el papel que se le asigna a la energía nuclear.

CONCLUSIÓN

El reto energético al que se enfrenta la humanidad es de proporciones gigantescas. To-

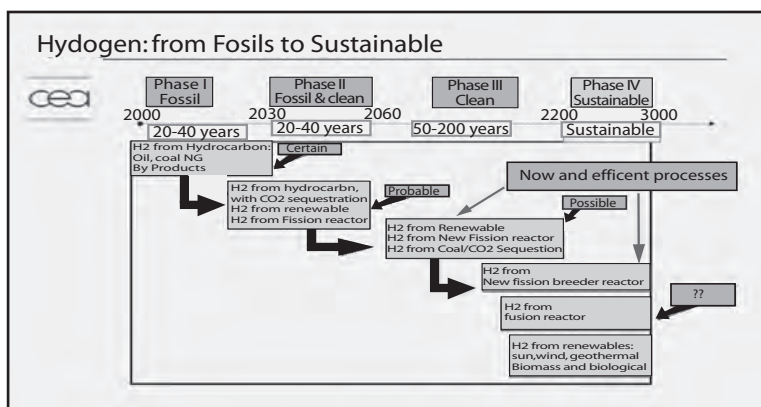


Figura 18 Fuente CEA- P.Luchesse, "H2 Production via Innovative Processes. The High Temperature Road", 1st Assembly Meeting, Bruselas, 20 Enero 2004

das las energías son necesarias, sabiamente gestionadas, para afrontar las necesidades presentes y futuras. El modelo es conseguir un desarrollo sostenible con un compromiso medioambiental. Ninguna energía está desechada. Cada sociedad debe crear su cesta energética diversificada pero sin demonizar ninguna opción.

La energía nuclear, ahora de fisión, juega un importante papel transitorio en este empeño, al moderar el precio energético y ser un factor de garantía de suministro en el presente. En el futuro resolviendo el abastecimiento energético si se logra dominar la fusión nuclear.

A medio plazo, hay reservas comprobadas disponibles para seguir utilizando las energías fósiles y la nuclear y las tecnologías seguirán siendo mejoradas resolviéndose el suministro energético. Pero a largo plazo, será la energía nuclear de fusión y las renovables las que resolverán las necesidades energéticas de la humanidad. Hay que continuar preparándose para que llegado el momento la humanidad esté preparada. Los errores se pueden pagar muy caros.



Alfonso de la Torre y Fernández del Pozo, es secretario general de la Sociedad Nuclear Española