

Perspectivas de la energía nuclear en Europa¹

Resumen

Este artículo se suma al debate sobre el papel de la energía nuclear en el ámbito del desarrollo sostenible, proporcionando una visión general de su situación actual y de las perspectivas de futuro en Europa. Las principales preocupaciones económicas y ambientales que la energía nuclear podría mitigar –la dependencia energética, la contaminación atmosférica y el cambio climático– son analizadas en el ámbito de tres marcos temporales. Especialmente importantes son las cinco grandes cuestiones asociadas a la energía nuclear: la gestión de residuos, la seguridad ante la proliferación, la seguridad de las operaciones, la competitividad económica y la aceptación pública. La principal conclusión es que es poco probable que la capacidad nuclear de Europa cambie significativamente en los próximos dos decenios. Sus perspectivas después de 2025 dependerán de la ponderación relativa de los beneficios y desventajas de la energía nuclear, así como las implicaciones en el ámbito de la sostenibilidad a largo plazo de la utilización de todos los recursos energéticos.

Bob
Van der Zwaan

Policy Studies Department,
Energy Research Centre
of the Netherlands (ECN)

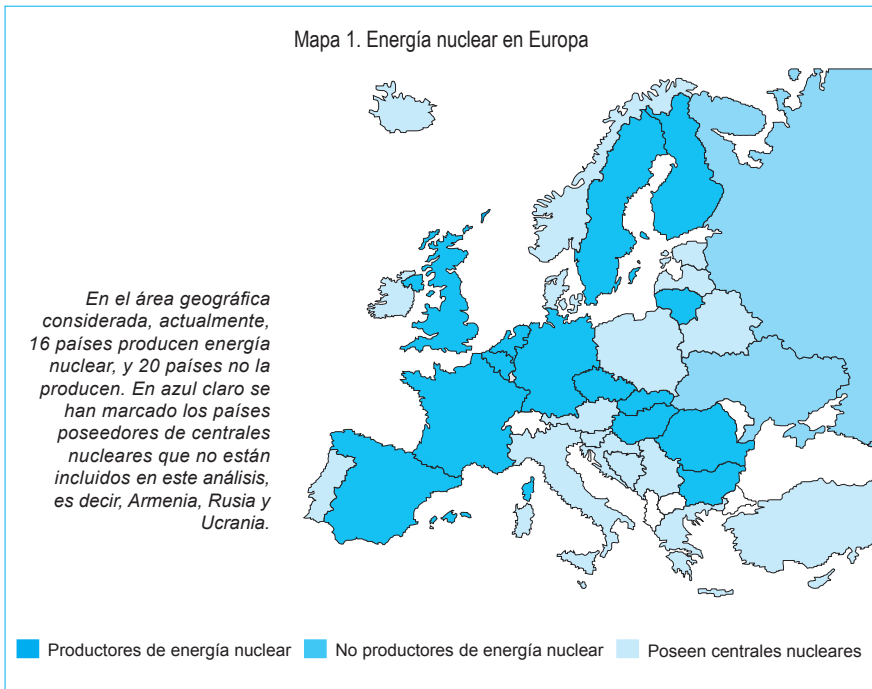
1. Introducción

Es difícil predecir con un mínimo de certeza qué pasará en el siglo XXI con la energía nuclear. Sin embargo, los factores que determinarán su futuro son bastante claros. El objetivo de este artículo es analizar la posible contribución de la energía nuclear al desarrollo sostenible en Europa desde la base de las principales fuerzas directrices implicadas. Las reservas acerca de los residuos radiactivos, la proliferación nuclear, los accidentes en los reactores, la competitividad económica y la opinión pública siguen siendo las preocupaciones legítimas que pueden obstaculizar las decisiones en el ámbito de la política sobre la energía nuclear. Sin embargo, las preocupaciones sobre la seguridad del abastecimiento energético, la contaminación del aire a escala local y el cambio climático a escala global constituyen los principales motivos para volver a evaluar su participación potencial en el *mix* energético europeo. Mientras algunos países europeos, como Austria e Italia, no tienen en la actualidad planes para aumentar la capacidad nuclear, y otros se han comprometido legalmente a eliminar gradualmente la producción nacional de energía de origen nuclear, como Alemania y Suecia, otros, como Finlandia y Francia, mantienen la decisión de preservar una parte significativa de energía nuclear para la generación de electricidad. Las recientes orientaciones políticas en algunos países, entre los que se encuentran los Países Bajos y el Reino Unido, muestran

¹ Artículo publicado en *Int. J. Global Energy Issues*, Vol. 30, Nos. 1/2/3/4, 2008. Traducido por Francisco Joaquín Cortés García.

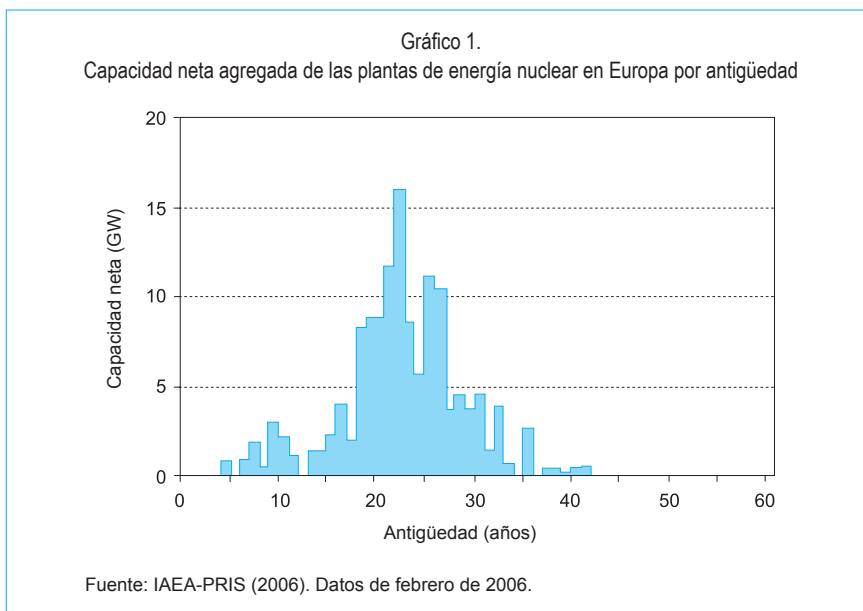
que la energía nuclear está reapareciendo en la agenda política. Este artículo revisa algunas de las principales cuestiones relativas a las perspectivas a largo plazo de la energía nuclear en Europa, así como los principales argumentos relevantes para la sostenibilidad en este contexto.

En este artículo, cuando hablamos de Europa, nos referimos a todos los países europeos que no formaban parte de la extinta Unión Soviética, excepto los tres Estados bálticos. Por tanto, no sólo haremos referencia a los miembros, sino también a los no-miembros de la actual Unión Europea (UE), como por ejemplo Turquía. En la práctica, sin embargo, este artículo se centrará principalmente en los países que poseen en la actualidad capacidad energía nuclear (ver Gráfico 1): 15 miembros de la UE (Bélgica, Bulgaria, República Checa, Finlandia, Francia, Alemania, Hungría, Lituania, Países Bajos, Rumanía, Eslovaquia, Eslovenia, España, Suecia y Reino Unido) y Suiza. Ocasionalmente se hará referencia al alguno de los 20 países restantes que hoy no producen energía nuclear². Es preciso tener en cuenta que el Mapa 1 también muestra algunos países no incluidos en este estudio, tres de los cuales con energía nuclear local: Alemania, Armenia, Rusia y Ucrania.



² En la actual UE-27, la ratio entre los que tienen y no tienen energía nuclear es de 15 a 12.

Las proyecciones de la futura contribución de la energía nuclear en Europa varían ampliamente en función de los supuestos establecidos. De igual modo, los países europeos mantienen diferentes opiniones sobre el papel específico de la energía nuclear, así como sobre las cuestiones energéticas en general. Dado que la opiniones son muy desiguales, el objetivo de este trabajo no es tanto hacer una previsión como identificar y analizar de forma muy sucinta los factores que influirán en el futuro de la energía nuclear europea, intentando ser lo más descriptivos posible, así como evitando hacer prescripciones. Se realiza una valoración de cómo las diferentes hipótesis acerca de estos factores pueden llevar a diferentes escenarios para la energía nuclear. Uno de los principales determinantes para el futuro de la energía nuclear en Europa es la distribución por edades de las actuales centrales nucleares. El Gráfico 2 muestra la capacidad total de los reactores nucleares conectados a la red europea en función de los años en los que han estado operativos. Mientras sólo una pequeña parte del total de la capacidad instalada se corresponde con reactores con una antigüedad de 40 años, la gran mayoría ha estado operando por los menos 10 años. Aunque la mayoría de los reactores han sido diseñados para funcionar entre 30 y 40 años, existe una tendencia en la actualidad a prolongar la vida útil de los reactores entre 50 y 60 años.



Se prevé que el consumo de energía y electricidad en Europa continuará creciendo al menos hasta 2030, y probablemente más allá de este año, aunque de forma más moderada que en otras partes del mundo, y, en particular, que en los países en desarrollo (ver, por ejemplo, IEA, 2006a; IIASA/WEC, 1998). La creciente demanda de energía será uno de los argumentos clave en el debate sobre el futuro de la energía nuclear en Europa. El aumento del uso de la energía no se puede explicar sobre la base de los cambios demográficos previstos si se tiene en cuenta que se espera que la población europea disminuya hasta 2050. El principal motor del aumento proyectado en el consumo de energía será el crecimiento económico (expresado en términos de PIB). La OCDE ha estimado que el PIB crecerá aproximadamente a razón de un 1,5% anual hasta el año 2050, y hasta un 3,6% en el caso de los países europeos con economías en transición, reconociéndose en ambos casos bastante incertidumbre (IEA, 2006b). El escenario base de la IEA (2006b) supone un aumento de la eficiencia en el consumo final de energía por unidad de PIB (eficiencia energética) aproximadamente de entre un 1 y un 2,6% al año según la OCDE y la EIT europea respectivamente. Esto nos lleva a una tasa de crecimiento del consumo total de energía en Europa de entre un 0,5 y un 1% al año hasta mediados de siglo. Como una gran parte del crecimiento previsto en el uso de la energía se estima que se producirá en el sector de la electricidad, todas las opciones de generación de energía, incluida la energía nuclear, serán consideradas.

En el Capítulo 2 de este artículo pasamos a describir el contexto económico y social por el que el futuro de la energía nuclear en Europa debe ser entendido, y se describen las principales cuestiones medioambientales a las que la energía nuclear puede contribuir a paliar. En particular, el cambio climático, la polución del aire, la disponibilidad de recursos, la seguridad energética, la competitividad económica, así como la aceptación y la opinión públicas. En el Capítulo 3 se examinan tres características, tan fundamentales como negativas, de la energía nuclear que aún son motivo de gran preocupación –los residuos radiactivos, la proliferación nuclear y los accidentes en los reactores– y se evalúa cualitativamente cada uno de ellos en términos de los riesgos potenciales que implican. El capítulo acaba con una evaluación de las perspectivas para la energía nuclear en Europa en tres periodos de tiempo, hasta 2025, 2050 y 2100, sobre la base de los argumentos presentados en los Capítulos 2 y 3. Como el futuro de la energía nuclear en Europa también se verá afectado por la evolución de los acontecimientos que tienen lugar en otras partes del mundo, el Capítulo 4 recoge de forma muy sumaria algunos de los “vínculos extra-regionales”. En el Capítulo 5 se plantean algunas observaciones finales.

2. Contexto socioeconómico y ambiental

Abordar el papel de la energía nuclear en el ámbito del establecimiento de modalidades de consumo energético sostenible requiere de un análisis de indicadores ambientales, económicos y sociales, usados para la energía nuclear al igual que para otras opciones energéticas (Bruggink and Van der Zwaan, 2002; NEA, 2001; Rothwell and Van der Zwaan, 2003).

2.1. Cambio climático y contaminación del aire

De acuerdo con un escenario empresarial razonable, las previsiones de consumo de energía en el mundo y en Europa consideran un aumento gradual pero constante del nivel de emisiones de gases de efecto invernadero (GHG), debido a la predominancia de los combustibles fósiles en el suministro de energía primaria (IPCC, 2000). Como contraste, la energía nuclear emite bajos niveles de gases de efecto invernadero, incluso si se considera la cadena completa de combustible nuclear, incluyendo la extracción y enriquecimiento de uranio así como la construcción de la planta de energía. Normalmente, la energía nuclear no emite más que un pequeño porcentaje de gases de efecto invernadero por unidad de electricidad generada en comparación con el carbón, el petróleo o el gas natural, y sus niveles están en el mismo orden de magnitud que el de las energías renovables, como la eólica o la energía solar. Hoy en día, la energía nuclear, junto con la hidroeléctrica, son las modalidades de generación de electricidad a gran escala que menos gases de efecto invernadero generan, y como tales, evitan a escala mundial la emisión de 2 Gt de CO₂ de un total de 25 Gt de emisiones de CO₂ antropogénicas. Como la mitigación del cambio climático se ha convertido ahora en uno de los desafíos globales más grandes para la humanidad, la baja emisión de GHG de la energía nuclear hace que ésta alcance una nueva consideración.

Si la energía nuclear se mantiene en el *mix* energético con objeto de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, esto sólo puede contribuir a abordar el problema del cambio climático cuando se amplíe de manera significativa a escala mundial (Sailor *et al.*, 2000). Si la energía nuclear se multiplicara por diez (inimaginable expansión en la actualidad, especialmente en términos de velocidad de construcción de los nuevos reactores), podría contribuir a la reducción total de emisiones de CO₂ en la segunda mitad de este siglo en un 30% (Van der Zwaan, 2002). Por lo tanto, en un escenario tan difícil, la energía nuclear sólo puede ser una parte de la solución, debiendo ser complementada por los drásticos esfuerzos por

descarbonizar los combustibles fósiles, como por ejemplo a través de la captura y almacenamiento de CO₂ (CCS), un despliegue masivo de las energías renovables, las soluciones que se extienden más allá del sector de la energía (la energía nuclear no es adecuada para el sector del transporte), y/o medidas de eficiencia de largo alcance, a fin de lograr una reducción de las emisiones de CO₂ hasta un tercio de su nivel actual a finales de siglo.

Es evidente que la energía nuclear no es la panacea para la reducción deseada del nivel de emisiones de gases de efecto invernadero. Si los objetivos de mitigación de los gases de efecto invernadero de algunos países europeos siguen siendo tan ambiciosos como en la actualidad (que implican, por ejemplo, una reducción de las emisiones de CO₂ en un 50% a mediados de siglo), la energía nuclear podría resultar, por el momento al menos, un componente esencial en la cartera de opciones de reducción de emisiones. Europa es la región más grande del mundo en términos de capacidad instalada de producción de energía nuclear: dispone de 137 Gw de capacidad nuclear instalada frente a los 330 Gw de capacidad mundial. Dado que la energía nuclear representa un tercio del uso de electricidad de la Unión Europea, Europa cuenta, en principio, con una buena posición para incrementar el papel de la energía nuclear en la gestión del cambio climático. A pesar del hecho de que el crecimiento de la energía nuclear en Europa se enfrenta al actual estancamiento, y que la planificación y construcción de nuevas plantas implican mucho tiempo, la energía nuclear puede, no obstante, contribuir significativamente a la reducción de emisiones adicionales de CO₂ en un par de décadas. Esto requeriría una ampliación sustancial de la capacidad nuclear que también ayudaría a mitigar algunos problemas ambientales y sanitarios relacionados con la contaminación del aire a escala local y regional al no generar emisiones de, por ejemplo, SO₂, NO_x, Hg u otras partículas; a diferencia de la opción contraria basada en los combustibles fósiles, sólo generaría unos bajos niveles de residuos radiactivos en la atmósfera.

2.2. La disponibilidad de recursos y la seguridad energética

En la actualidad, otra razón para mantener la expansión de la capacidad nuclear podría estar relacionada con el incremento de la seguridad energética europea al reducir su dependencia de las importaciones de combustibles fósiles, especialmente gas natural de Oriente Medio y Rusia³. En un escenario razonable, la dependencia

³ Téngase en cuenta que los primeros argumentos en torno a la seguridad energética surgen en la década de los setenta del siglo XX. Fueron casi inexistentes cuando se inició el programa *Atoms for Peace* en la década de los cincuenta.

por parte de la UE de las importaciones energéticas aumentará del 50% en la actualidad hasta el 70% en 2030 (EU, 2000). Las preocupaciones sobre la seguridad del suministro energético impulsaron las inversiones en energía nuclear en Europa durante la crisis del petróleo en la década de los 70, a pesar de que Europa no posee grandes recursos de uranio nacional. En el futuro, eventos similares bien podrían dar lugar a un nuevo y vigoroso interés por la energía nuclear y a la construcción de nuevas plantas. La existencia de recursos nacionales de uranio natural no es una condición necesaria para mejorar la seguridad energética a través de la energía nuclear. Las razones están relacionadas con el hecho de que el uranio se encuentra ampliamente disponible, es fácilmente almacenable y, en términos de la contribución de los costes de los recursos a los costos de producción total de electricidad, accesible a buen precio. A escala global existe una diversa y estable lista de productores de uranio, y el espacio relativamente pequeño que es necesario para su almacenamiento implica que los reservorios pueden ser fácilmente construidos. Además, dado que el costo de los recursos de uranio pesan poco en los costes totales de generación de electricidad, la energía nuclear es poco sensible a las fluctuaciones del precio del uranio, de modo que los *choques* de precios y la volatilidad de los mercados propios del sector del petróleo y del gas natural en este caso no existirían.

Habida cuenta de la gran reserva mundial de recursos de uranio, Europa puede incluir con seguridad la energía nuclear entre las opciones que le permitan reducir su dependencia de la importación de energía. Existen algunas advertencias. En primer lugar, la energía nuclear sigue siendo, al menos por el momento, una alternativa sólo en el sector de la electricidad. No es sustituta del petróleo como combustible de vehículos probablemente por un largo tiempo, a menos que los obstáculos técnicos importantes acerca de la producción de hidrógeno a través de la energía nuclear se puedan superar⁴. En segundo lugar, con independencia de las ventajas de la energía nuclear sobre la utilización del carbón en términos de voluminosidad y las correspondientes necesidades de recursos de transporte, existen límites al valor de sustitución de energía nuclear dada la abundancia, la propagación y la asequibilidad del carbón en todo el mundo. En tercer lugar, la energía nuclear, en principio, posee un gran valor en su capacidad para mejorar la independencia energética, sobre todo cuando se reemplaza el gas natural importado, y más aún cuando este gas se origina en regiones inestables fuera de Europa. En muchos casos el gas natural será difícil de sustituir, ya que la energía nuclear no tiene la flexibilidad ni la

⁴ Otra de las aplicaciones futuras de la tecnología nuclear fuera del sector de la electricidad podría estar relacionada con la producción de petróleo procedente de las arenas de alquitrán.

adaptabilidad del gas natural, que es particularmente apto para el pico de carga y el equilibrio de las necesidades. Sin embargo, el fondo de seguridad energética de la energía nuclear sigue siendo significativo.

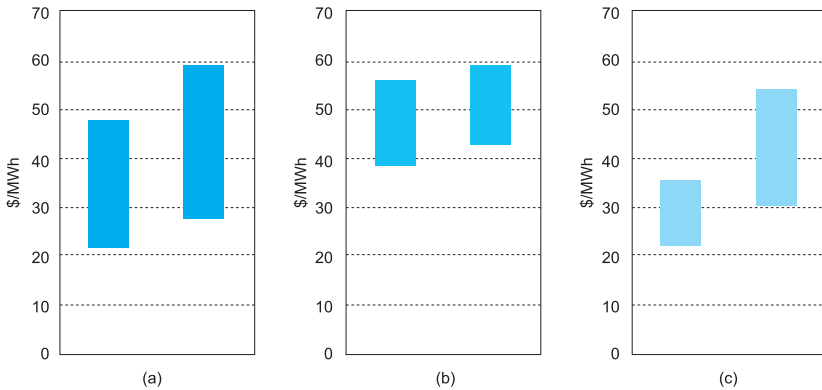
Sin embargo, a veces se expresan preocupaciones en relación con las cantidades estimadas recuperables de uranio a un precio determinado, y si los recursos globales de uranio están en consonancia con los escenarios de consumo de este siglo. Existen varias razones para considerar que dichas preocupaciones son injustificadas (Bunn *et al.*, 2005). Una duplicación del precio del uranio afectaría a los costes de producción de electricidad en tan sólo unos puntos porcentuales. Por lo tanto, mientras que grandes cantidades de uranio son todavía objeto de extracción al precio actual de 40-50 \$/kgU, las reservas de uranio son a menudo valoradas a precios tales como 130 \$/kgU. La Agencia de la Energía Nuclear (NEA) estima que los recursos mundiales de uranio convencional disponible a menos de 130\$/kgU, ascienden a cerca de 17MtU (OECD, NEA and IAEA, 2002). Por diversas razones, esta estimación debe ser calificada como conservadora. En primer lugar, muchos países no informan de las categorías de baja confianza o con costes tan elevados como los 130\$/kgU. En segundo lugar, las estimaciones de 17MtU están limitadas a los recursos convencionales: por ejemplo, depósitos en los que el mineral de uranio es lo suficientemente rico como para justificar su extracción al precio indicado, y no se tienen en cuenta los casos en los que el uranio puede ser producido como un subproducto. En tercer lugar, los bajos precios del uranio y las reservas militares liberadas en las dos últimas décadas prácticamente eliminaron los incentivos para una exploración de uranio complementaria, de modo que existen grandes cantidades de uranio por descubrir, en particular, en las categorías de más alto costo, y que no están incluidas en las estimaciones de la NEA. Es alta la probabilidad de que la cantidad de uranio disponible por debajo de 130 \$/kgU sea superior a 17MtU. El Gráfico 2 muestra cuatro escenarios de consumo mundial acumulado de uranio a partir de las siguientes tasas de crecimiento en la producción de energía eléctrica de origen nuclear: -2, 0, 1 y +2%. Las tasas de crecimiento corresponden a los siguientes factores de expansión de energía nuclear respectivamente: 0,1; 1,0; 2,7 y 7,2 en 2100 en comparación con el valor normalizado de 2500 TWh generado en el año 2000 –asumiendo una demanda promedio de uranio de 19 tU/TWh. La línea horizontal representa la estimación conservadora de 17 MtU de recursos totales de uranio para todo el mundo a un precio máximo de 130 \$/kgU. El Gráfico 2 demuestra que incluso ante una expansión significativa de la energía nuclear durante el siglo XXI, los recursos de uranio estarán disponibles a precios que tendrán un efecto limitado (<10%) sobre los costes de producción total de electricidad.



2.3. Costes y competitividad económica

Los costes y la competitividad económica, así como los estímulos adicionales, como los subsidios públicos en algunos casos, se encuentran entre los principales determinantes para que las tecnologías específicas puedan estar presentes en el sector eléctrico. Básicamente, la energía nuclear es capaz de hacer frente a sus dos principales competidores en el sector de la electricidad: el carbón y el gas natural. El Gráfico 3 muestra la comparativa de costes totales de producción de electricidad para el carbón, gas natural y las centrales nucleares para dos tasas de descuento que permiten valorar los costes y beneficios futuros, o bien, diferentes entornos de inversión. La parte de estos costes correspondiente a la inversión inicial puede ser dos veces mayor tanto para el carbón como para el gas natural, y tres veces superior para la energía nuclear (OECD, 2005). Sin embargo, como resultado del bajo coste del combustible en el caso de la energía nuclear y en comparación con el carbón y con el gas natural, en términos de costes globales aquélla se constituye en un buen competidor de estos dos últimos. Naturalmente, los costes previstos de generación de electricidad a partir de combustibles fósiles son altamente dependientes del precio vigente de los combustibles. Los costes de la electricidad que

Gráfico 3. Comparativa de costes totales de producción de electricidad para el carbón, gas natural y energía nuclear (en \$/MWh): (a) carbón; (b) gas natural y (c) energía nuclear



Costes para (a) carbón, (b) gas natural y (c) plantas de energía nuclear para dos tasas de descuento (barra de la izquierda, 5% al año; barra de la derecha, 10% al año).

Fuente OECD (2005).

aparecen en el Gráfico 3 cubren la inversión, el combustible, y los gastos de operación y mantenimiento (incluidos los costes asociados a la eliminación de residuos y el desmantelamiento del reactor), pero no incluyen los precios de emisión de CO₂ y las posibles ampliaciones de la vida de las centrales. Recogen un modesto aumento de los precios de los combustibles fósiles en las próximas décadas, pero no reflejan los altos niveles de precios que han tenido recientemente el petróleo y el gas natural. El mantenimiento de precios tan altos aumentaría la competitividad de la energía nuclear. Para las tres alternativas existe una clara dependencia de aspectos como dónde y en qué condiciones de funcionamiento se produce la electricidad. El coste indicado por las barras en los tres histogramas del Gráfico 3 refleja diferentes circunstancias domésticas en países de la OCDE. Si se toma el promedio de esos rangos de coste como una medida comparativa, la energía nuclear marginalmente resulta ser la opción menos costosa, con un coste total de 30 \$/MWh cuando se aplica una tasa de descuento anual del 5%, y sobre los 40 \$/MWh cuando se aplica el 10% anual.

Sin embargo, el alto coste de capital necesario para la construcción de una planta de energía nuclear constituye un obstáculo para los inversores. Desde el punto de vista regulatorio, la incertidumbre jurídica y política a menudo exacerban las dudas de los inversores potenciales. De hecho, cada país europeo que ha de-

sarrollado la energía nuclear ha tenido algún tipo de apoyo del gobierno para hacer frente a estas incertidumbres. El actual proceso de liberalización y desregulación del mercado eléctrico en Europa, y la influencia de la disminución asociada de las autoridades nacionales en la planificación estratégica de la energía, son claras desventajas para las nuevas inversiones en energía nuclear. Sin embargo, los recientes casos de Finlandia y Francia demuestran que es posible construir nuevas plantas de energía nuclear en este entorno económico modificado. Si se pueden garantizar las atractivas condiciones financieras (que implican, por ejemplo, los bajos tipos de interés del capital) que han disfrutado Finlandia y Francia, Europa puede seguir beneficiándose de la competitividad en costes de la energía eléctrica de origen nuclear. Por otra parte, las posibles reducciones en el coste de construcción de centrales nucleares pueden reducir la brecha entre las inversiones destinadas a desarrollar un reactor nuclear y las necesarias para la construcción de una planta de carbón o gas natural (en este último caso se supone que se mantienen constantes). Del mismo modo, una reducción en los tiempos de construcción y de los costes de operación y mantenimiento pueden aumentar el interés por la energía nuclear, incluso si se adoptaran más medidas de seguridad a los reactores y requisitos más estrictos en la eliminación de residuos (MIT, 2003).

Si los problemas del cambio climático se abordan con seriedad, con objetivos que vayan mucho más allá del Protocolo de Kyoto, y si, por lo tanto, las consideraciones sobre la reducción de CO₂ se hubieran convertido en un parámetro económico permanente en la evaluación de proyectos, la energía nuclear y los recursos renovables se beneficiarían de los bajos niveles de emisiones de gases de efecto invernadero. En algunos casos la energía nuclear puede ser la opción más amigable con el clima para la producción básica de energía, dependiendo de la disponibilidad y asequibilidad de las energías renovables en el ámbito considerado. Si para los fines de control climático el carbón y el gas natural son complementados con la CCS –suponiendo que la CCS se desarrolle a partir de innovación y aplicación de tecnologías limpias como se presume que va a ocurrir–, la diferencia de costes de capital entre la energía procedente de combustibles fósiles y la de origen nuclear puede invertirse a favor de la energía nuclear. Los derechos de emisión de CO₂, tal y como fueron determinados desde enero de 2005 en la UE-25 a través del *Emissions Trading System* (ETS), proporcionan a la energía nuclear, en principio, una ventaja en costes en relación a los combustibles fósiles. Los beneficios económicos para la energía nuclear asociados con el ETS, sin embargo, hasta ahora no se han puesto de manifiesto. A más largo plazo, un ETS sostenible y estable puede conducir a renovar las inversiones en la construcción de plantas de energía nuclear. Mientras que los precios del CO₂ ETS ya tienen un impacto en el mercado

que oscila entre los 10-20 €/tCO₂, las inversiones y los precios de la electricidad se verán verdaderamente afectados por los precios de las emisiones de CO₂, cuyas previsiones son de claro crecimiento, favoreciendo a la energía nuclear.

2.4. Aceptación y opinión pública

Los temas relacionados con la aceptación y la opinión públicas se aplican en principio a todas las formas de energía, pero se aplican especialmente en el ámbito de la energía nuclear. Considerando que los actuales debates sobre el cambio climático y la seguridad en el suministro de energía influyen positivamente en la actitud de los ciudadanos hacia la energía nuclear, en el caso de un apoyo en el momento de la creación de nuevas plantas de energía nuclear sigue siendo provisional. Los resultados de una reciente encuesta, realizada entre 18.000 ciudadanos de 18 países que representan a las principales regiones del mundo, muestran que el 62% considera que los reactores nucleares existentes deben seguir utilizándose, pero el 59% no es favorable a la construcción de nuevas centrales nucleares (Globescan, 2005). Además, cuando se les preguntó a los ciudadanos de la UE-25 en lo que los gobiernos nacionales deberían centrarse con el fin de reducir la dependencia energética de la Unión Europea, sólo el 12% respondió en primer lugar que el uso de la energía nuclear debe seguir potenciándose (Eurobarometer, 2006). Dado que los efectos del cambio climático y la vulnerabilidad de la economía europea con respecto a la importación de combustibles se hacen más evidentes, es probable que el cambio paulatino que se ha producido en la última década en la opinión pública desarrolle un menor escepticismo en favor de la energía nuclear. El accidente de Chernóbil ha demostrado de forma clara que un sólo episodio de estas características puede hacer cambiar bruscamente la aceptación pública de una tecnología. Por el contrario, una catástrofe asociada con el cambio climático, o una larga interrupción de la oferta de, por ejemplo, gas natural como resultado de tensiones geopolíticas, pueden conducir a un cambio decisivo en el apoyo a la energía nuclear, tanto en Europa como en otros lugares. Así, la opinión pública, que en una escala de tiempo de décadas, parece constante, no obstante puede estar sujeta a una variabilidad significativa en el largo plazo.

La controversia sobre la energía nuclear ha estado mayormente relacionada con los problemas de los residuos radiactivos, la proliferación nuclear y la seguridad de los reactores, aunque el sentimiento antinuclear procede también de otros orígenes menos identificables. El avance de estos tres elementos sobre el escepticismo de

la población afectaría negativamente al apoyo de la industria nuclear en general. Por ejemplo, una vez que esté en funcionamiento un repositorio subterráneo de residuos en Europa, demostrándose que puede contener residuos radiactivos de forma segura durante escalas humanas de tiempo, los ciudadanos podrán empezar a aceptarlos como una solución satisfactoria y potencialmente permanente para la gestión final del ciclo de combustible nuclear. Del mismo modo, un cambio positivo puede tener lugar si algunos de los más peliagudos temas de la proliferación nuclear son atajados, tales como las ambiciones nucleares de Irán y Corea del Norte. La energía nuclear también puede ser vista con más confianza si la industria nuclear incrementa su récord de seguridad en las últimas décadas. Por supuesto, cualquier incidente grave relacionado con este ámbito, tales como el uso de un dispositivo nuclear o radiológico (“bomba sucia”) por terroristas, o un importante accidente de un reactor nuclear, también supondrán un importante revés para la popularidad de la energía nuclear. Otras cuestiones, tales como la conexión de la energía nuclear con su origen militar (y el secreto asociado y los costes que implican), la complejidad técnica de la ciencia y la ingeniería nucleares, o la invisibilidad de la radiactividad, probablemente seguirán desempeñando un papel importante en la formación de la opinión de los ciudadanos acerca del uso civil y las aplicaciones de la tecnología nuclear. Cómo afrontar estos aspectos a menudo no se ha entendido bien, pero esto cambiará en la medida en que la industria nuclear demuestre que es capaz de aumentar la confianza pública en el ámbito de la seguridad y la eficiencia, y de poner de manifiesto las ventajas relativas de la energía nuclear a través de los mecanismos y medios de comunicación modernos apropiados.

3. Las preocupaciones y perspectivas nucleares en Europa

Contribuya o no de forma significativa la energía nuclear a mitigar el cambio climático global, a disminuir la contaminación atmosférica local y a incrementar la seguridad de suministro de energía, en el siglo XXI deberán abordarse las tres preocupaciones fundamentales relativas al uso de la energía nuclear: los residuos radioactivos, la proliferación nuclear y los accidentes de los reactores (ver, por ejemplo, MIT, 2003).

3.1. Residuos radiactivos

Aunque la producción de residuos radiactivos se pone de manifiesto básicamente en todas las fases del ciclo del combustible nuclear en los estados sólido, líquido y gaseoso, el combustible gastado es la forma más problemática de los residuos, ya que genera calor durante muchos años después de la desconexión del núcleo del reactor y sigue siendo altamente radiactivo durante miles de años. El criterio de gestión del combustible gastado se basa en la “concentración y protección” (por oposición al criterio de “dilución y exposición”, practicado en algunos sectores industriales): la contaminación radiactiva del medio externo del combustible gastado se reduce al mínimo a través de varias capas de contención, incluyendo el depósito geológico ubicado a gran profundidad bajo tierra. Se han realizado estudios que demuestran la fiabilidad técnica de tales depósitos. En cuanto a la implementación real, sin embargo, el manejo y disposición final del combustible nuclear gastado sigue siendo un reto para los gobiernos nacionales y la industria nuclear. Hasta la fecha, ningún país ha aplicado una solución permanente para el almacenamiento de residuos nucleares procedentes de la industria nuclear civil.

Mientras que muchos gobiernos europeos demoran la decisión sobre este tema, se han producido avances en el almacenamiento geológico a gran profundidad en Finlandia, Francia y Suecia. El Gobierno finlandés ha tomado la decisión de iniciar la construcción de un repositorio final de combustible nuclear gastado en el año 2011, cerca de Olkiluoto, que estaría funcionando alrededor del año 2020. Sobre la base de los estudios realizados entre los años 1991 y 2005, el Gobierno francés ha iniciado en 2006 un debate en el Parlamento con objeto de elegir una solución para la eliminación a largo plazo del combustible nuclear gastado. Suecia se comprometió a hacer una propuesta de ubicación en 2007 sobre la base de las actuales investigaciones geológicas en dos lugares candidatos. La principal preocupación en materia de almacenamiento subterráneo es la incertidumbre sobre la integridad de los contenedores de combustible gastado, y si el aislamiento ofrecido por las formaciones geológicas será suficiente durante un periodo de miles de años. El temor es que en algún momento futuro los reservorios empiecen a rezumar como consecuencia de la corrosión y, subsecuentemente, se contaminen las aguas subterráneas. En general, esto explica no sólo la reticencia de los gobiernos para implementar depósitos de residuos finales, sino que también explica la actitud escéptica del público en general. La influencia de la opinión pública sobre la decisión de los gobiernos acerca del entierro subterráneo de residuos nucleares, en particular mediante la oposición local (“no en mi patio trasero” [*Not-In-My-Back-Yard*] o *Síndrome NIMBY*), es un determinante importante por la falta de resolución

de las autoridades actuales. El problema de los residuos de alta radiactividad, sin embargo, es dinámico, ya que las soluciones que contribuyen a su reducción se están investigando. Existen dos vías principales a través de las cuales se podría mitigar: reduciendo el tiempo de vida radiactiva de los isótopos de larga vida a través de procesos de transmutación, y organizando la supervisión internacional de residuos (IMWR). La Comisión Europea está preparando una legislación que cree un marco regulador para los estados miembros de la UE con objeto de adoptar medidas concretas y oportunas para el desarrollo de instalaciones de almacenamiento permanente en profundidad o en superficie. Lamentablemente, todavía no existe ningún proceso para diseñar un enfoque paneuropeo de cara a la eliminación de residuos nucleares, por ejemplo, a través del EURATOM. Los ciudadanos serían menos escépticos una vez que se hayan puesto en funcionamiento los primeros repositorios geológicos y las tecnologías de eliminación hayan demostrado su eficacia. El progreso en los campos de la tecnología de la transmutación y la creación del IMWR contribuirían de forma inequívoca en la actitud pública acerca del problema de los residuos nucleares.

3.2. Proliferación nuclear

La generación de energía nuclear por sí implica el riesgo de que la industria nuclear y las tecnologías relacionadas puedan ser utilizadas para fines no civiles. Entre las principales amenazas de la proliferación de la energía nuclear están el uso de las instalaciones de enriquecimiento y la producción de material fisionable. Los países que utilizan tecnologías de enriquecimiento o los grupos terroristas que poseen uranio altamente enriquecido (HEU) pueden construir fácilmente un dispositivo de fisión básico y usarlo para fines militares o terroristas. Varios isótopos de plutonio están contenidos en el combustible, representando aproximadamente entre el 1 y el 2% de su volumen, y son fisionables y pueden ser utilizados para fabricar un explosivo nuclear. Este problema resulta evidente especialmente cuando el combustible gastado en la industria nuclear civil es reprocesado: el plutonio contenido en el combustible gastado es razonablemente seguro contra el desvío hacia armas de uso inadecuado debido a los residuos altamente radiactivos en los que está implantado, pero su separación durante el reprocesamiento los hace vulnerables para un uso militar o terrorista directo, aunque es de menor calidad que el plutonio de uso militar. La actual crisis política en la comunidad internacional, y países como Irán y Corea del Norte, son prueba de los grandes problemas de la proliferación nuclear, afectando negativamente a la utilización de la energía nuclear para la producción

de energía en todo el mundo. El control mundial de las tecnologías sensibles, el seguimiento de las actividades nucleares, y la protección y eliminación de materiales fisionables como el uranio y el plutonio altamente enriquecido, son aspectos fundamentales para la solución al problema de la proliferación nuclear. A fin de evitar una desviación de materiales fisionables para fines no civiles, es preciso dedicar esfuerzos técnicos y dotar de eficacia a las instituciones internacionales. Su mejora es importante, independientemente de la futura cuota de la energía nuclear en la producción total de energía. La dotación de recursos internacionales y la ampliación del mandato de la Agencia Internacional de la Energía Atómica (IAEA), o incluso del EURATOM, son fundamentales (Lubbers, 2005; Elbaradei, 2005a). Aun cuando la mayor parte de la proliferación nuclear en el pasado se ha producido a través de la tecnología orientada al enriquecimiento de uranio o a reactores de investigación específicos (basados en agua pesada), los más comunes en las centrales nucleares, los reactores están siendo diseñados de manera que son menos propensos a la proliferación y al desvío de tecnología y materiales nucleares. Existen planes para el desarrollo y la fabricación de ese tipo de reactores, en particular los de cuarta generación (ver Tabla 1 y NERAC/GIF, 2002). Los reactores nucleares, sin embargo, incluyendo los de nuevo diseño resistente a la proliferación nuclear, incluyen algún tipo de riesgo de desviación. El progreso en la solución de la crisis nuclear internacional en las próximas décadas pasa por la gestión del comercio de tecnologías nucleares, la protección de materiales nucleares y el fortalecimiento de la eficacia de la IAEA pueden influir positivamente.

Desde los ataques terroristas de septiembre de 2001 en los Estados Unidos, los riesgos nucleares, en particular, han ocupado una gran parte de la atención. Como resultado, las actividades internacionales de seguridad nuclear han ampliado su alcance, especialmente a través de los esfuerzos de la IAEA, ayudando a los países a mejorar el control de los materiales nucleares y los focos radiactivos, protegiendo las instalaciones nucleares y reforzando los controles fronterizos (Elbaradei, 2005b). Se han hecho progresos pero aún queda mucho por hacer; no es inimaginable que los terroristas desarrollen dispositivos radiológicos o de fisión, o que atenten contra instalaciones nucleares. Aparte de la devastación física, las consecuencias económicas, sociales y emocionales que esto implicaría probablemente darían un duro golpe en lo relativo a las perspectivas de la industria nuclear civil.

3.3. Accidentes en los reactores

Entre los riesgos intrínsecos asociados al funcionamiento de los reactores nucleares es la ocurrencia de incidentes y accidentes. Como las consecuencias de los accidentes graves pueden ser muy grandes, y la probabilidad de que ocurran nunca va a ser cero, la problemática sobre los mismos va a existir y cuestionar la aceptabilidad de la energía nuclear. Para una gran parte de la población europea la energía nuclear sigue proporcionando insuficientes garantías de seguridad. La potencial escala de daños de un reactor fue puesta de manifiesto durante el accidente del Chernóbil en 1986, provocando unos 40 muertos de forma inmediata, una contaminación radiactiva de una amplia zona que rodea la central eléctrica, así como un total estimado de varios miles de personas que desarrollaron un cáncer letal como resultado de la exposición a la radiación. A raíz del accidente de Chernóbil, en varios países se abandonó la gran expansión de programas nucleares, causando un duro golpe a la industria nuclear del que todavía no se ha recuperado. Otro accidente de esta magnitud puede ser fatal para su desarrollo en Europa en las próximas décadas.

Tabla 1. Tipos de reactores nucleares en Europa

| | Hoy | A medio plazo | A largo plazo |
|-----------------|-----------|---------------|---------------|
| Generación | I y II | III | IV |
| Tipo de reactor | PWR (92) | | |
| | WWER (22) | EPR (PWR) | GFR |
| | BWR (19) | AP1000 (PWR) | LFR |
| | AGR (14) | WWER (PWR) | MSR |
| | GCR (8) | ABWR (BWR) | SFR |
| | LWGR (1) | ESBWR (BWR) | SCWR |
| | PHWR (1) | HTR | VHTR |
| | FBR (1) | | |

Actualmente desplegados (con el número de reactores entre paréntesis), con despliegue en el corto y mediano plazo (no exhaustivo), y, posiblemente, con desarrollado en el largo plazo (estimado). PWR: Pressurised Water Reactor; WWER: Water Power Reactor; BWR: Boiling Water Reactor; AGR: Advanced Gas-cooled Reactor; GCR: Gas-Cooled Reactor; LWGR: Light Water Graphite Reactor; PHWR: Pressurised Heavy Water Reactor; FBR: Fast Breeder Reactor; EPR: European Pressurised Water Reactor; AP1000: Advanced Pressurised Water Reactor; ABWR: Advanced Boiling Water Reactor; ESBWR: Economic Simplified Boiling Water Reactor; HTR: High Temperature Reactor; GFR: Gas-cooled Fast Reactor; LFR: Lead-cooled Fast Reactor; MSR: Molten Salt Reactor; SFR: Sodium-Critical Water Reactor; SCWR: Super-Critical Water Reactor; VHTR: Very High Temperature Reactor.

Fuente: IAEA-PRIS (2006) y NERAC/GIF (2002).

En los últimos años, sin embargo, la seguridad de los reactores ha mejorado significativamente, tanto dentro como fuera de Europa. Los reactores de primera generación (tipo Chernóbil), es decir, reactores LWGR, no están en uso en Europa, y la cohorte actual de reactores europeos ha tenido un buen historial de seguridad en general. Desde 1986, las probabilidades de accidentes han disminuido considerablemente como resultado de las mejoras en la tecnología de los reactores, los equipos periféricos y en las operaciones con los mismos. Los reactores europeos están equipados con cúpulas de confinamiento; en el caso de la ocurrencia de un accidente con materiales radioactivos, éstos no pueden ser liberados al medio ambiente externo, y las consecuencias pueden ser controladas al máximo. Las interrelaciones hombre-máquina en la planta de operaciones se han perfeccionado considerablemente, y una mayor cultura de la seguridad se ha establecido a través de la creación de un *sistema internacional de notificación temprana*, obligando a los operadores a informar de cualquier incidente (INES).

Los esfuerzos continuados en el mantenimiento y elaboración de normas de alta seguridad se encuentran entre los deseos de una expansión de la energía nuclear en Europa. Existen oportunidades para la mejora de la seguridad del reactor a través de la inversión en I+D asociada a nuevos tipos de reactores. Ya existen diseños innovadores para plantas de energía que hacen un mayor uso de elementos de seguridad pasiva basados en la experiencia constructiva y operativa adquirida en las plantas hasta la actualidad: por ejemplo, el *European Pressurised Water Reactor* (EPR) y el *Pebble-bed High Temperature Reactor* (HTR). Los EPR se encuentran entre los posibles candidatos para la construcción de reactores en Europa en el corto plazo –los dos reactores previstos actualmente en Finlandia y Francia son de este tipo–, mientras que para el largo plazo los HTR pueden ser añadidos a la capacidad nuclear existente. La Tabla 1 nos proporciona una lista no exhaustiva de nombres y tipos de reactores de III generación para su posible implementación a corto y medio plazo. Todo ello contribuirá a la mejora del nivel de seguridad de los reactores de Europa. Además, la UE se encuentra en proceso de creación de nuevas directivas para la mejora de la seguridad de funcionamiento del reactor, el desarrollo de la supervisión de la seguridad y orquestar este asunto a escala europea. Entre las cuestiones que se abordan nos encontramos con medidas para:

- Determinar los fondos suficientes para el completo desmantelamiento de las centrales eléctricas.
- El intercambio de las mejores prácticas de funcionamiento de las instalaciones existentes.

- El mantenimiento de altos niveles de seguridad para las plantas.
- Una mayor transparencia para los ciudadanos.

Estas medidas y estos nuevos tipos de reactores necesitan ser completadas con los requisitos de costes a fin de determinar la competitividad económica de la energía nuclear.

3.4. Perspectivas en Europa

¿Qué implicaciones tienen los argumentos anteriores en las perspectivas de la energía nuclear en Europa? Como se pone de manifiesto en el Gráfico 1, la distribución por edades de la capacidad nuclear instalada, el escenario para el corto plazo, es decir, hasta 2025, estará fuertemente determinado por la actual tendencia a prolongar la vida útil de las centrales. Si no se produce dicha prórroga de la licencia más allá de la edad típica asociada al diseño de los reactores de 40 años, el uso de la energía nuclear se verá fuertemente reducido en 2025. Si, por otra parte, todas o algunas partes de la planta son sustituidas por otras y/o se producen prórrogas de las licencias de hasta 60 años, la capacidad nuclear instalada en Europa en el año 2025 puede ser un poco diferente desde este momento. Tal vez una o dos docenas de reactores, incluyendo, por ejemplo, algunos de los construidos en la década de los 60 en el Reino Unido, o en la década de los 80 en varios países de Europa oriental durante la era soviética, serán retirados del servicio después de 30-40 años de funcionamiento (véase la Tabla 1 para una visión general de los tipos y el número de reactores de I y II generación que están actualmente en uso en Europa). Dado el atractivo económico de la extensión de la vida de los reactores, no hay razón para creer que la renovación de la licencia para que éstos sigan operando, como ya se ha concedido a varias plantas de energía nuclear en Europa, no se mantenga y se aplique a la mayoría de las plantas de Europa. Sin embargo, algunos países pueden mantener sus planes para la eliminación gradual de la generación nacional de electricidad, mientras que otros tenderán a construir nuevos reactores durante las próximas dos décadas. Mientras tanto, algunos Estados que no poseen en la actualidad energía nuclear pueden cambiar de actitud y decidir a favor de la misma, como Italia, Polonia, Turquía o algunos otros pequeños países europeos.

Sin ampliación de la vida y sin la construcción de nuevas plantas, la energía nuclear habrá desaparecido prácticamente del sector energético europeo en 2050. Incluso si todos los reactores nucleares actuales mantienen su actividad hasta

que alcancen la edad de 60 años, no más de 15GWe de la capacidad a día de hoy estarían disponibles a mediados de siglo. Por lo tanto, la construcción de nuevas centrales nucleares en los próximos decenios será determinante para que la energía nuclear contribuya a la generación de electricidad en Europa en 2050. Las decisiones relativas a la construcción de nuevas centrales nucleares se verán positivamente influenciadas si los Estados europeos se comprometen a reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero, mejorar la calidad del aire y aumentar la seguridad energética, así como a introducir nuevos progresos en la industria nuclear en el ámbito de los problemas fundamentales asociados a ella. Los reveses en cualquiera de los cinco “clásicos” problemas (es decir, la gestión de los residuos radiactivos, la proliferación de la seguridad, la seguridad de las operaciones, la competitividad económica y la aceptación del público), sin embargo, dificultarán las nuevas construcciones o la ampliación de la capacidad nuclear de Europa. Entre los obstáculos imaginables para la expansión se encuentran un nuevo aplazamiento de la solución del problema de los residuos nucleares y la materialización del almacenamiento geológico permanente del combustible nuclear gastado, el uso de un dispositivo nuclear o radiológico por un grupo terrorista o un *rogue state*, algún otro accidente en un reactor principal, la ausencia de un papel activo de los gobiernos a la hora de prestar garantías y generar un atractivo ambiente de inversión financiera, o una vuelta al escepticismo nuclear público como consecuencia de cualquiera de dichos obstáculos. Aparte de la ocasional aparición de los libros “verde” y “blanco”, la UE hasta ahora no ha sido capaz de formular una estrategia energética común para sus Estados miembros (EU, 2000). Si la Unión Europea es capaz de darse cuenta de la necesidad de una visión colectiva de cara a la planificación a largo plazo de la energía, el desarrollo de opciones relativas a la planificación a largo plazo implicaría un impulso evidente para la energía nuclear. A escala global, la contribución de la energía nuclear a la producción de energía total hasta 2050 es probable que se mantenga entre un límite superior de participación constante (i.e., en términos relativos) y un límite inferior de capacidad constante (i.e., en términos absolutos). Es posible que la energía nuclear en Europa mantenga una participación constante en la generación de energía hasta el año 2050, pero sólo si la mayoría de los agentes mencionados evolucionan a favor de la energía nuclear.

A medida que se extiendan las nuevas centrales nucleares que se construyan durante este medio siglo, quedará determinada la contribución de la energía nuclear de cara a la producción de electricidad durante la segunda mitad del siglo XXI. La predicción de la naturaleza del sistema energético en un marco de tiempo definido por el año 2100 es notoriamente difícil. En el largo plazo, un factor determinante para el desarrollo de la energía nuclear será si Europa consigue un desarrollo económico

y unas infraestructuras energéticas sostenibles. Mediante esta perspectiva, también deben ser contemplados los aspectos de sostenibilidad de la energía nuclear, así como las posibilidades que tiene la energía nuclear para contribuir a crear caminos hacia la sostenibilidad. Sin embargo, se ha argumentado que la energía nuclear hoy en día no puede considerarse como una forma sostenible de energía, y que ningún recurso energético se ha considerado como tal, incluidas las energías renovables (Bruggink and Van der Zwaan, 2002). Existen muy diferentes reactores y muy diversas tecnologías en relación al ciclo de combustible, por lo que su calificación en términos de sostenibilidad debe realizarse por separado. De los 158 reactores que hay en funcionamiento en Europa en la actualidad, 133 son del tipo LWR (*Light Water Reactor*). Como a lo largo de las próximas décadas los reactores refrigerados por gas en el Reino Unido se están reduciendo progresivamente, esta ratio puede cambiar aún más en favor de la tecnología LWR, y su versión más común, el reactor tipo PWR. Debido a que los reactores LWR continúan dominando la industria comercial de la energía nuclear, por lo menos hasta mediados de siglo, sus propiedades determinarán por el momento la sostenibilidad de la energía nuclear.

Las tecnologías LWR violan varios criterios de sostenibilidad en un futuro previsible. Algunos autores insisten en la necesidad de instituciones sociales que permitan restringir la proliferación de materiales nucleares, y la dificultades asociadas a la tecnología LWR se enfrenta en la actualidad al mantenimiento de su capital social (Rothwell and Van der Zwaan, 2003). Mientras que en el corto y medio plazo la industria nuclear es necesaria para abordar estas cuestiones, en los reactores LWR a muy largo plazo se debería apostar por la eficiencia en el uso de combustible, ya que dependen de los recursos de uranio finalmente agotables. Si los reactores LWR no pueden hacer frente a estos y otros desafíos, la energía nuclear, en algún punto, debe cambiar a otro tipo de tecnología con el fin de que se pueda calificar como sostenible. Los sistemas avanzados de III generación son los sucesores de los actuales reactores instalados, mientras que para el medio plazo un candidato prometedor es el pebble-bed HTR (ver Tabla 1). Estos reactores hacen que la energía nuclear sea más sostenible de forma progresiva. Para el largo plazo, el Departamento de Energía de EEUU ha entablado un diálogo con los gobiernos, la industria y la comunidad científica en todo el mundo para el desarrollo de tecnologías asociadas a sistemas avanzados de IV generación (Tabla 1 y NERAC/GIF, 2002). El propósito de este debate es evaluar la difícil cuestión de las tecnologías de la energía nuclear, incluyendo reactores de neutrones rápidos, y en el largo plazo (en principio en unas pocas décadas, pero probablemente no antes de 2050) mejorar los criterios genéricos de sostenibilidad y los argumentos en relación a los recursos de uranio, la competitividad económica, la

gestión de los residuos radiactivos, la proliferación nuclear y la seguridad de los reactores. Por razones de sostenibilidad, también el tipo de ciclo de combustible, en última instancia, tendrá que ser reevaluado. En las décadas venideras no hay argumentos económicos, o relacionados con los recursos, para desarrollar un ciclo de reprocesamiento de combustible, a menos que esos países ya dispongan de extensas instalaciones de reciclaje como ocurre con Francia y el Reino Unido (ver Bunn *et al.*, 2005). A escala temporal de una centuria o más, sin embargo, una opción puede ser el ciclo en el que el combustible nuclear gastado sea eliminado a largo plazo, y el uranio y el plutonio que se recuperen del combustible gastado se reutilicen. El concepto de desarrollo sostenible rara vez se ha definido con precisión, pudiéndose interpretar de muchas maneras diferentes; la sostenibilidad de la energía nuclear sólo adquiere un significado real si se compara con la de otros recursos energéticos. Para todas sus dimensiones, la energía nuclear debe ponerse en perspectiva con respecto a las oportunidades y deficiencias ofrecidas por otras alternativas como las energías renovables y la CCS aplicada a las plantas de producción eléctrica procedente de combustibles fósiles.

4. Vínculos extra-regionales

El desarrollo nuclear en los Estados Unidos influye en el sector europeo de la energía nuclear, incluso admitiendo que éste último es autónomo en la construcción de reactores y en la capacidad de fabricación de combustible. Diversas tendencias en EEUU pronto afectarían positivamente a la evolución de la energía nuclear en Europa. En primer lugar, la mayoría de las plantas de energía nuclear de Estados Unidos están en proceso de ampliar el periodo de operación de su licencia en 20 años. Si se cumple esto, también es probable que las autoridades europeas aprueben extensiones similares en la vida de los reactores. En segundo lugar, en EEUU se han creado mejores condiciones, en términos políticos y financieros, para la construcción de nuevas plantas de energía nuclear. Una vez que comiencen a ser construidos en EEUU los nuevos reactores, Europa podría seguir su ejemplo. En tercer lugar, a pesar de los obstáculos técnicos, institucionales y sociales del repositorio de Yucca Mountain, se prevé finalmente su puesta en funcionamiento alrededor de 2012. Una vez que Yucca Mountain empiece a recibir residuos nucleares que están dispersos por todo el país, habiéndose convertido en el repositorio operativo para los residuos producidos en el sector de la energía nuclear, se dará un impulso a la construcción de repositorios similares en Europa. En cuarto lugar, los europeos que están convencidos de que la expansión de la energía nuclear

es deseable se reforzará, y en parte se mitigarán algunos recelos de la opinión pública. Por supuesto, los eventuales retrasos ralentizarían el progreso de la energía nuclear en Europa.

Los argumentos relacionados con la seguridad del abastecimiento energético seguirán motivando a los países de fuera de Europa a desarrollar y ampliar las instalaciones domésticas de energía nuclear, no sólo en los países industrializados, como Japón o Rusia, sino incluso países en desarrollo que en la actualidad no tienen apenas proyectos de energía nuclear para la generación de electricidad, tales como China, India e Indonesia. Los importantes planes de expansión en China e India fortalecerán la posición de la industria nuclear mundial, y, por lo tanto, también afectarán a Europa. Mientras, los países europeos serán los principales candidatos a exportar reactores nucleares, tecnología y equipos relacionados a estos países, pudiendo desarrollar en paralelo la tecnología nacional relacionada con la energía nuclear, que es un mercado creciente. La expansión de la demanda del mercado puede generar externalidades positivas de aprendizaje, así como economías de escala. De igual modo, aumenta los retornos de la inversión en I+D, lo que puede contribuir a reducir los costes fijos en la factura total de producción de energía nuclear en Europa. Del mismo modo, el desarrollo económico en otras partes del mundo será la condición necesaria para el desarrollo de la industria nuclear en Europa. Los países de Oriente Medio, así como los de Asia meridional y oriental influirán en el papel de la energía nuclear a escala global, y, por lo tanto, influirán igualmente en Europa y en aquellas regiones en las que se vayan solventando razonablemente los problemas de la proliferación nuclear y del terrorismo. Además, la mejora de los reactores en todo el mundo, así como el incremento de la eficacia del almacenamiento de materiales fisionables y radiactivos de todo el aparato militar nuclear de las ex-superpotencias de la Guerra Fría, especialmente cómo se resuelve el "legado nuclear soviético", afectarán a la reputación de la cultura de seguridad de la energía nuclear. Las actividades nucleares en todas estas regiones requieren de una equilibrada cooperación y coordinación internacionales, y de su éxito dependerá el futuro de la energía nuclear.

5. Conclusiones

Este artículo ha recogido una breve descripción de la situación actual de la energía nuclear en Europa, así como sus perspectivas de futuro en tres periodos de tiempo: hasta 2025, 2050 y 2100. En el corto plazo (2025), la capacidad nuclear

de Europa es poco probable que sea muy diferente de la de hoy en día, dado que la pérdida de capacidad resultante del cierre de algunos reactores más antiguos, probablemente sea compensada, al menos parcialmente, por la construcción de otras nuevas, teniendo presente que se amplíe el periodo de operatividad entre 10 y 20 años para muchos de los reactores existentes. A medio plazo (2050), en la medida en que los países europeos y la UE van a decidir (y gestionar) seriamente acerca de una serie de preocupaciones socioeconómicas y ambientales, que la energía nuclear puede contribuir a paliar, se influiría de forma importante en sus posibilidades. Dependiendo de si, y en cuáles Estados europeos, se hace frente a los cinco problemas “clásicos” que conlleva la energía nuclear (es decir, en términos de los desafíos asociados con la gestión de los residuos radiactivos, la seguridad y la proliferación, la seguridad de las operaciones, los costes económicos, y la aceptación pública), se podrá aprovechar sus ventajas comparativas. El peso relativo de los beneficios y desventajas, así como la complejidad de su interdependencia, seguirá siendo dinámico. La evolución de esta dinámica va a determinar las perspectivas de la energía nuclear hasta la mitad del siglo, incluso más allá. En el largo plazo (2100), el principal factor determinante será, o al menos debería ser, cómo la energía nuclear puede convertirse en una forma más sostenible de producción de energía.

La cuestión de qué otros recursos sostenibles haya disponibles influirá de forma importante y a largo plazo en el ámbito de la energía nuclear. El papel potencial de transición de los combustibles fósiles durante el siglo XXI, que se basan en un recurso agotable e intrínsecamente no renovable, vendrá determinado por el grado de contaminación en que pueden ser consumidos y de lo mucho que pueden ser descarbonizados, además de los aspectos de disponibilidad y costes. A nivel mundial, las energías renovables hasta ahora no han sido utilizadas a gran escala, de ahí que sus impactos externos y los inconvenientes sobre el medio ambiente, relacionados, por ejemplo, con la necesidad de tierras, aún no han llegado a ser problemáticos: su verdadera sostenibilidad aún no se ha demostrado en la práctica, mientras que muchos tipos de la misma necesitan lograr nuevas reducciones de costes para ser plenamente competitivos. El futuro de la energía nuclear se verá afectado por el hecho de que los combustibles fósiles sigan dominando el sistema energético, por la escala en que las energías renovables puedan ampliarse de forma sostenible, y el grado en que las medidas de ahorro energéticas puedan ser implementadas. De cualquier modo, el hecho de que la energía nuclear juegue o no un papel importante en el largo plazo es una cuestión difícil de dilucidar. En cualquier caso, el análisis continuo de las perspectivas de la energía nuclear, así como de todas las tecnologías energéticas, debe llevarse a cabo en términos de su potencial para contribuir a los objetivos del desarrollo sostenible, i. e., incluyendo

el conjunto total de los riesgos ambientales, económicos y sociales adyacentes. Habida cuenta de que las incertidumbres climáticas, políticas y técnicas abundan, lo más prudente sería la adopción en la actualidad de un enfoque de cobertura. Esta estrategia implicaría que se mantenga el espectro energético y que no se excluya en este momento a ninguna de las alternativas que podrían contribuir a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero, a la mejora de la calidad del aire, o a la búsqueda de un suministro seguro de energía en virtud de una demanda creciente de electricidad a nivel global y en Europa.

Reconocimientos

El autor reconoce los comentarios y opiniones de varios colegas y expertos en energía (nuclear), en particular Johannes Bollen, Adel Buckley, Stephen Boucher, Francesco Calogero, Tom Cochran, Johan Finney, Bas ter Haar, Gert Jan Kramer, Ruud Lubbers, Marvin Miller, Martin Scheepers, Geert Verbong, Cees Volkens, Daniel Weisser and Wim Wieldraaijer. Además, aprecia las opiniones aportadas durante la presentación de este trabajo a los participantes en el *International Energy Workshop* (Cape Town, 27-29 June, 2006), el *Pugwash Workshop "Nuclear Non-Proliferation and Disarmament-the role of Europe"* (Amsterdam, 7-8 de junio de 2006) y en la *56th Pugwash Conference on Science and World Affairs* (El Cairo, 10-15 de noviembre de 2006). Las sugerencias de los editores invitados de la IJGEI, Ferenc Toth y Hans-Holger Rogner, así como las de tres anónimos evaluadores, han sido importantes para mejorar el presente trabajo. Los errores, sin embargo, son de responsabilidad del autor.

Referencias bibliográficas

- > Bruggink, J. J. C. and Van der Zwaan, B. C. C. (2002), "The role of nuclear energy in establishing sustainable energy paths", *International Journal of Global Energy Issues*, Vol. 18, Nos. 2-4, pp. 151-180.
- > Bunn, M.; Fetter, S.; Holdren, J. P.; and Van der Zwann, B. C. C. (2005), "The economics of reprocessing vs. direct disposal of spent nuclear fuel", *Nuclear Technology*, Vol. 150, nº 3, pp. 209-230.
- > Elbaradei, M. (2005a), "Reflections on nuclear challenges today", *Alistair Buchan Lecture*, International Institute for Strategic Studies, 6 December, London, UK.

- > Elbaradei, M. (2005b), "Nuclear power: preparing for the future", *Lecture at the International Conference on Nuclear Power in the 21st Century*, 21 March, Paris, France.
- > EU (2000), *Towards a European Strategy for the Security of Energy Supply*, Green Paper, European Commission, Brussels, Belgium.
- > Eurobarometer (2006), *Attitudes towards Energy*, European Commission, Brussels, Belgium.
- > Globescan (2005), *Global Public Opinion on Nuclear Issues and the IAEA-Final Report from 18 Countries*, www.iaea.org/Publications/Reports/gponi_report2005.pdf
- > IAEA-PRIS (2006), *Power Reactor Information System*, International Atomic Energy Agency, www.iaea.org/programmes/a2/
- > IEA (2006a), *World Energy Outlook 2006*, International Energy Agency, Paris, France.
- > IEA (2006b), *Energy Technology Perspectives 2006*, International Energy Agency, Paris, France.
- > IIASA/WEC (1998); Nakicenovic, N.; Grübler, A.; and McDonald, A. (eds.), *Global Energy Perspectives*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- > IPCC (2000), "Special report on emissions scenarios", *Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- > Lubbers, R. (2005), *Moving beyond the Stalemate: Addressing the Nuclear Challenge by Supranational Means*, Clingendael International Energy Programme, The Hague, The Netherlands.
- > MIT (2003), *The future of Nuclear Power*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA.
- > NEA (2001), *Nuclear Energy in a Sustainable Development Perspective*, Nuclear Energy Agency, Paris, France.
- > NERA/GIF (2002), *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems*, US Department of Energy (DOE), Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum, Washington, DC, USA.

- > OECD (2005), *Projected Costs of Generating Electricity*, Organisation for Economic Co-operation and Development, IEA and NEA, Paris, France.
- > OECD; NEA and IAEA (2002), *Uranium 2001: Resources, Production and Demand*, Nuclear Energy Agency (NEA), Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD) and International Atomic Energy Agency (IAEA), Paris, France.
- > Rothwell, G. and Van der Zwaan, B. C. C. (2003), "Are light water reactor systems sustainable?", *Journal of Energy and Development*, Vol. 29, nº 1, pp. 65-79.
- > Sailor, W. C.; Bodasny, D.; Braun, C.; Fetter, S.; and Van der Zwaan, B. C. C. (2000), "A nuclear solution to climate change?", *Science*, Vol. 2888, 19 May, pp. 1177-1178.
- > Van der Zwaan, B. C. C. (2002), "Nuclear energy: tenfold expansion or phase-out?", *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 69, Nº 3, pp. 287-307.

