



UNISCI Discussion Papers

OCHO RAZONES POR LAS QUE EL SECTOR ELÉCTRICO IRANÍ PUEDE PASAR SIN LA ENERGÍA NUCLEAR

AUTOR:¹

JAVIER DE QUINTO
UNISCI / Universidad San Pablo-CEU

1. No es el momento tecnológico para la energía nuclear

Una central nuclear transforma la energía calorífica de un combustible en energía mecánica, y ésta en eléctrica. El calor producido calienta el agua y la convierte en vapor directa e indirectamente. El vapor pasa por una turbina que acciona un alternador produciendo la energía eléctrica, atraviesa luego un condensador donde se convierte de nuevo en agua y, mediante bombas, este agua se vuelve a hacer pasar por la parte caliente del reactor, convirtiéndose de nuevo en vapor y así sucesivamente. En una central térmica convencional, el calor proviene de la combustión en la caldera de un combustible como carbón, petróleo o gas; sin embargo, en una central nuclear, el calor proviene de la reacción en cadena que tiene lugar en el “reactor nuclear”. La regulación del calor que se produce en la fisión nuclear se realiza mediante determinados elementos de control denominados moderadores, que sirven para controlar adecuadamente la cantidad de neutrones emitidos en el proceso de fisión. La forma más utilizada para modificar la cantidad de neutrones es el sistema de las “barras de control”. Son unas barras constituidas por materiales absorbentes de neutrones (principalmente compuestos de boro y cadmio) que se introducen en el núcleo del reactor. Al introducir estas barras disminuye la velocidad de reacción y al sacarlas aumenta. Con este sistema se puede modificar la potencia del reactor. El calor producido en el reactor se extrae mediante un refrigerante que circula alrededor del combustible y puede ser agua (ligera o pesada), gas (anhídrido carbónico o helio), y otros menos habituales como aire, vapor de agua, metales líquidos o sales fundidas.

El combustible utilizado en la mayoría de las centrales nucleares es el uranio. Este tiene dos isótopos el ²³⁸U y el ²³⁵U los cuales se dan en el uranio natural en proporciones del 99,3% y del 0,7% respectivamente.

Los tipos de reactores nucleares pueden clasificarse atendiendo a varios criterios:

Según la velocidad de los neutrones. Reactores rápidos o reactores térmicos.

¹ Las opiniones expresadas en estos artículos son propias de sus autores. Estos artículos no reflejan necesariamente la opinión de UNISCI. *The views expressed in these articles are those of the authors. These articles do not necessarily reflect the views of UNISCI.*



Según el combustible utilizado. Reactores con uranio natural o con uranio enriquecido en U-235.

Según el moderador. Reactores de agua ligera, agua pesada o grafito.

Según el refrigerante utilizado. Agua ligera o pesada, gas, etc.

A continuación veremos los dos tipos de reactores nucleares mas frecuentes que hay en operación:

Reactor de agua a presión (PWR): Es el más utilizado en el mundo. Emplea como moderador y refrigerante el agua ligera. El circuito de refrigeración está sometido a presión para que el agua no pase a vapor. Este agua a presión lleva el calor del núcleo del reactor a un intercambiador de calor donde se genera el vapor que mueve la turbina. En este tipo de reactor existen dos tipos de circuitos, el primario y el secundario. Ambos son totalmente independientes. El combustible utilizado es óxido de uranio ligeramente enriquecido que se presenta en pastillas de 1 cm. de diámetro. Estas pastillas se introducen en un tubo de aproximadamente el mismo diámetro y varios metros de longitud. Los tubos son de zircaloy (aleación de hierro, cromo, níquel, zirconio).

Reactor de agua en ebullición (BWR): En este reactor, el moderador y el refrigerante también es el agua ligera. En este caso, el refrigerante no está sometido a tanta presión como en el caso anterior, con lo cual se encuentra en estado de vapor. Este vapor producido en el núcleo llega directamente a la turbina, sin que exista entre medias un intercambiador de calor. El combustible en este caso es óxido de uranio enriquecido, introducido en el mismo tipo de elementos combustibles.

La incorporación de nuevos grupos nucleares está estancada en los países desarrollados desde hace aproximadamente dos décadas. Esto se explica por razones diversas, entre las que cabe mencionar, los accidentes (Windscale en el Reino Unido, Three Miles Island en los Estados Unidos, Chernobyl en Ucrania), la fuerte oposición social o las desventajas económicas a las que nos referiremos más adelante.

Todo ello no prejuzga que la energía nuclear pudiera volver a vivir una segunda juventud, en un entorno de bajos tipos de interés, de disponibilidad de financiación a largo plazo, de internalización de los costes de emisión de los gases de efecto invernadero, y con una nueva tecnología que aumente la seguridad y rebaje los tiempos de construcción, de forma que pudiera competir con otras tecnologías de generación.

Algunos países altamente desarrollados apuntan con timidez en esa dirección, y muy especialmente Finlandia, pero todavía no es una realidad la nueva generación de reactores pasivos.

Cualquier construcción nuclear que los países en vías de desarrollo pudieran acometer, por el momento ha de basarse en reactores de tecnología tradicional. Y este es el caso de Irán, que está construyendo la planta de tecnología rusa en Bushehr y que a diciembre de 2005 estaba avanzada en un 80%² y otra nueva (todavía en el papel) en la región de Juzistán, al suroeste del país.

² Debe tenerse en cuenta que, a principios de los 70, la compañía AMF instaló en la Universidad de Teherán un reactor experimental de 5 MW y a raíz de este desarrollo se firmaron protocolos de abastecimiento de combustible con los EE.UU. (1974), Alemania (1976) y Francia (1977).



Existe además un riesgo económico consistente en que, al instalar una tecnología nuclear muy madura, es posible que la vida útil de la central no llegue a los 40 años (lo que causa un perjuicio económico), ya que las autoridades que controlan y aprueban el funcionamiento de dichas centrales dejan de considerarla segura. Casos de este estilo han ocurrido, por ejemplo en Bulgaria.

2. La energía nuclear ha sido un error económico

La mayor parte de los países de la OCDE que en los años 1970 y 1980 apostaron por tal tipo de tecnología cometieron un error económico (expresado en unos enormes costes fijos muy difíciles de recuperar a través de las tarifas al consumidor), error mayor cuanto menor era el tamaño de su mercado y error mayor cuanto más fue la dispersión tecnológica.

Efectivamente, en aquellos años, todo los factores que podían encarecer la construcción sucedieron: Los requerimientos de seguridad se vieron incrementados (lo que supone mayores inversiones), los tipos de interés se encarecieron (mayores costes), la falta de financiación en cantidad y plazo llevaron a muchos países a endeudarse en dólares, yenes u otras monedas fuertes que se revaluaron (mayores costes), los plazos de construcción se dilataron (mayor coste de la inversión y mayor tiempo de permanencia del inmovilizado en curso)...

Algunos países, como España, cometieron el error adicional de dispersarse tecnológicamente entre tecnologías (grafito – gas, PWR, BRW, etc) y suministradores (Westinghouse, General Electric, Framatome, KWU...), sin que por ello se sentaran las bases de un desarrollo tecnológico propio en la fabricación de reactores (cosa que si lograron Francia y Alemania por ejemplo) y sin que se aprovecharan economías de experiencia.

En cualquier caso, y a pesar de lo señalado en la primera razón, hoy día, la mejor opción desde el punto de vista económico y de rendimiento energético son la turbinas de ciclo combinado de gas (CCGT), aunque solo sea porque en sectores en los que hay mercados eléctricos competitivos, las empresas deciden instalar este tipo de tecnología casi exclusivamente.

3. La dependencia energética exterior no debe ser motivo de preocupación en Irán

A diferencia de la mayor parte de los países de la OCDE, Irán no debiera preocuparse por la dependencia energética exterior en décadas, por lo que una política energética muy basada en los hidrocarburos no debiera crearle problemas.

Efectivamente Irán, como es conocido, es (y será por muchos años) una potencia petrolera de primer orden. Sustenta esta afirmación que es el segundo país del mundo (tras Arabia Saudita) por nivel de reservas probadas, totalizando 132.500 millones de barriles a finales de 2004 (lo que supone mas del 11% de las reservas del mundo), que al ritmo de producción actual (la capacidad actual de producción iraní esta cerca del máximo técnico) le durarían unos 89 años. Pero, también es importante reseñar el enorme potencial para incrementar sus reservas en el futuro, al menos por tres motivos. Uno es que en los últimos 20 años ha mas que duplicado su nivel de reservas (58.900 millones de barriles a final de 1984).



Otro es que lleva décadas de bloqueo, lo que ha implicado una aplicación sub - óptima de los recursos tecnológicos y financieros disponibles en esta industria. Y finalmente que los estudios geológicos indican indefectiblemente este potencial.

Fig. 1:³

Iranian overview		
CONCEPT	QUANTITY	COMENTS
Crude oil reserves	million barrels	% of total world
as of 31.12.2004	132.500	11,1% (2nd country in the world)
as of 31.12.1994	94.300	
as of 31.12.1984	58.900	
R/P ratio (2004)	88,7 years	

Irán también es el segundo país del mundo por reservas de gas natural (tras Rusia) con 27.500 bcms a finales de 2004, lo que significa más del 15% de las reservas mundiales. Y al igual que decíamos del petróleo, también en gas estas reservas pueden aumentar mucho y casi se han duplicado en 20 años (14.020 bcms a finales de 1984).

Fig. 2:⁴

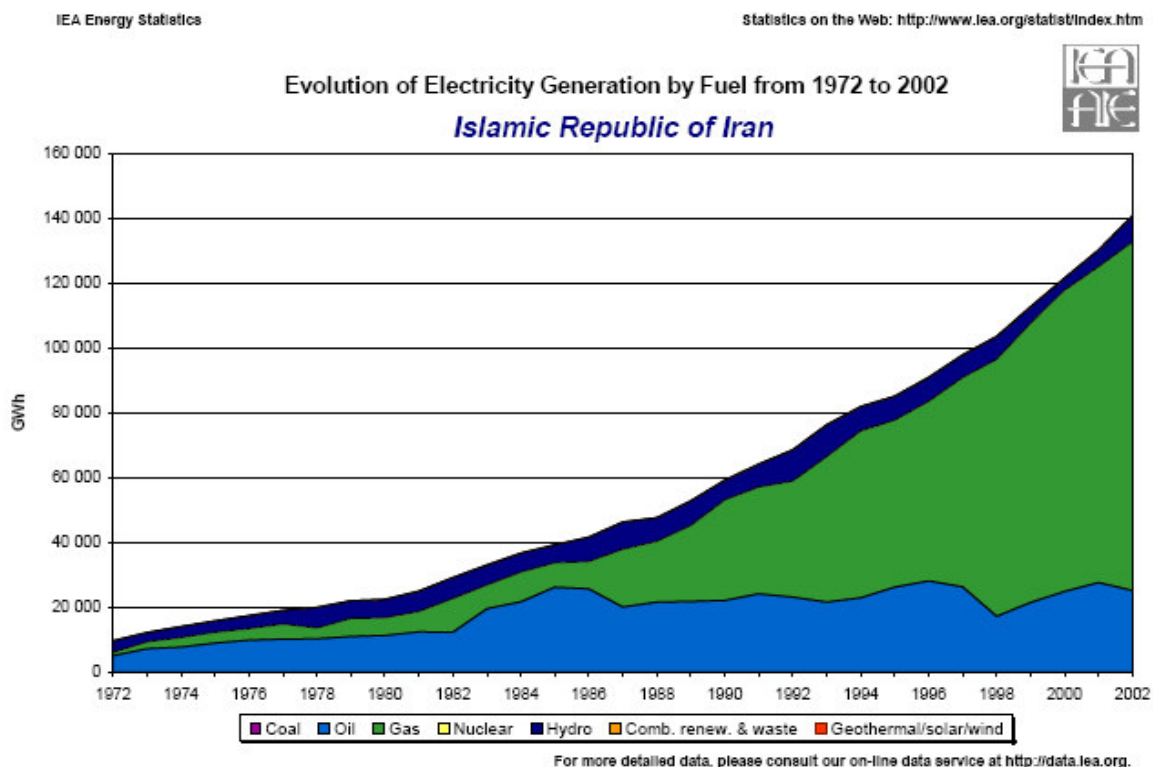
Iranian overview		
CONCEPT	QUANTITY	COMENTS
Natural gas reserves	bcm	% of total world
as of 31.12.2004	27.500	15,3% (2nd country in the world)
as of 31.12.1994	20.760	
as of 31.12.1984	14.020	
R/P ratio (2004)	N/A	

³ BP Statistical Review of World Energy (2005).

⁴ Ibid.

En síntesis, el sector eléctrico iraní ha venido basando el crecimiento de su demanda en el gas, como se puede observar en el gráfico que figura a continuación, lo cuál ha venido siendo una buena decisión.

Fig. 3:⁵



4. Irán no tiene compromisos de reducción de gases de efecto invernadero derivados del Protocolo de Kyoto

Irán hace parte de la Convención Marco de las Naciones Unidas para el cambio climático, dentro del conjunto de países no Anexo I, es decir que no tienen compromisos cuantificados y obligatorios de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero desde el 16 de octubre de 1996. Ratificó el Protocolo de Kyoto el pasado 22 de agosto de 2005 y esta adhesión entró en vigor el 20 de noviembre de 2005.

Al no hacer parte del Anexo I de la Directiva, frente a los mecanismos de flexibilidad del Protocolo de Kyoto, no podrá participar en el comercio de derechos de emisión, pero sí ser receptor de proyectos MDL.

Sus obligaciones al igual que las demás partes sin compromisos cuantificados de reducción se limitan básicamente a la presentación anual del inventario de emisiones de GEI de origen antropogénico, incluir dentro de sus políticas y medidas (según sus criterios y prioridades) el cambio climático, la lucha contra sus efectos y el control de sus emisiones; así

⁵ IEA Energy Statistics, en <http://www.iea.org/statist/index.htm>.



como constituir y nombrar la autoridad nacional designada para el MDL y los criterios de aceptación y rechazo de los proyectos MDL.

En todo caso, y previendo que en un próximo futuro la evolución de este tipo de acuerdos internacionales pudiera implicar una limitación a las emisiones de gases de efecto invernadero en Irán, la mejor apuesta tecnológica en materia energética para Irán no pasa la energía nuclear sino por paliar los efectos negativos de las combustiones (secuestro de CO₂, combustiones limpias, etc). De alguna forma inversiones en esta línea de I+D propiciarían una vida más larga a la utilización de los hidrocarburos en el mundo, lo que redundaría en beneficio de los países con grandes reservas.

Por otra parte, Irán no debe despreciar las posibilidades que a través de los MDL desarrolle energías renovables (la energía nuclear no tiene tal consideración en el MDL), para lo que debiera abrir la generación eléctrica a la inversión extranjera, lo cual es otra cuestión que no vamos a abordar aquí.

5. El sector eléctrico iraní, ni siquiera sumando el de los países vecinos, tiene tamaño suficiente para justificar la amortización de las instalaciones para llevar a cabo el ciclo de fabricación de combustible nuclear completo

A continuación se describen las etapas de fabricación de los elementos combustibles nucleares a partir del uranio presente en la naturaleza en forma mineral.

5.1. Minería y obtención del concentrado de uranio.

El uranio se extrae de la mina mediante técnicas mineras superficiales (a cielo abierto) o subterráneas, dependiendo de la profundidad a la que se encuentre el cuerpo del mineral. El mineral de uranio extraído se envía a una muela, usualmente localizada cerca de la mina. En la muela el mineral es machacado hasta lograr una mezcla fina, la cual es sometida a un proceso de lixiviación⁶ ácida. En la lixiviación del mineral de uranio con ácido sulfúrico (lixiviación ácida) se separa la roca del uranio, el cual queda disuelto. El uranio se recupera de la disolución después precipitándolo como concentrado de óxido de uranio (U₃O₈), que se conoce con el nombre de *yellowcake* (aunque finalmente es de color caqui).

El concentrado de óxido de uranio es el producto que se vende. Se requieren unas 200 toneladas para mantener un reactor nuclear de 1000 MWe generando electricidad durante un año.

5.2. Conversión.

El uranio necesita estar en estado gaseoso para poder ser enriquecido. Así, el proceso de conversión consiste en la transformación del concentrado de óxido de uranio sólido (U₃O₈) a gas hexafluoruro de uranio (UF₆).

⁶ Tratar una sustancia compleja, como un mineral, con un disolvente adecuado para separar sus partes solubles de las insolubles.



5.3. Enriquecimiento isotópico del uranio.

Ésta es la fase de mayor valor añadido del proceso de obtención del uranio enriquecido. La vasta mayoría de los reactores nucleares en operación requieren combustible de uranio enriquecido en el cual la proporción de isótopo U-235⁷ ha sido elevada del nivel natural de 0,7% a alrededor del 3,5% o algo más. El proceso de enriquecimiento elimina sobre el 85% del U-238 mediante la separación del hexafluoruro de uranio en dos flujos: un flujo es enriquecido al nivel requerido y pasa a continuación a la siguiente fase del ciclo del combustible. El otro flujo es agotado en U-235: fundamentalmente es U-238, con menos de un 0,25% de U-235, por lo que, si bien se emplea para otros usos, no se utiliza ya para producir energía.

Las primeras plantas de enriquecimiento fueron construidas en Estados Unidos, y usaban el proceso de difusión gaseosa, pero las plantas más modernas de Europa y Rusia utilizan el proceso de centrifugado, el cual tiene la ventaja de utilizar mucha menos energía por unidad de enriquecimiento y pueden ser construidas en unidades más pequeñas y económicas. La investigación apunta al enriquecimiento mediante láser, que parece ser una tecnología nueva prometedora.

5.4. Segunda conversión.

Tras el proceso de enriquecimiento en uranio, el gas hexafluoruro de azufre se transforma a polvo de dióxido de uranio (UO₂), polvo negro de apariencia metálica, que es un compuesto más estable químicamente y que permite la formación de pastillas.

5.5. Fabricación de elementos combustibles para centrales nucleares

El uranio enriquecido y transformado a polvo de dióxido de uranio (UO₂)⁸ es transportado a la planta de fabricación de combustible donde se prensa en pequeñas pastillas.

Éstas se insertan en tubos finos de, normalmente, aleación de circonio (*zircalloy*) o de acero inoxidable, para formar las barras de combustible.

Las barras son selladas y agrupadas en haces para su uso en el núcleo del reactor nuclear.

⁷ El isótopo del uranio que más fácilmente se divide (fisiona) en un reactor nuclear es el U-235, pero sólo el 0,7% del uranio natural es U-235. Mediante el proceso de enriquecimiento del uranio se puede incrementar el contenido de dicho isótopo. El combustible enriquecido alcanza temperaturas mucho mayores en un reactor y es más eficiente para la generación de electricidad. El uranio contiene dos isótopos: U-235 y U-238. Ambos tienen idénticas propiedades químicas, por lo que la única forma de separarlos es por su peso, ya que el U-238 es más pesado que el U-235.

⁸ La forma ambientalmente más limpia de convertir el hexafluoruro de uranio (UF₆) en dióxido de uranio (UO₂) es mezclándolo con vapor e hidrógeno en un horno.



Fig. 4:



Se necesitan unas 25 toneladas de combustible anuales para un reactor de 1000 MWe.

Como se puede apreciar en el cuadro que figura a continuación, el sector eléctrico iraní es aproximadamente la mitad que el español, bien lo midamos en cuanto a energía producida o en cuanto a la potencia punta demandada (en España del orden de 44.000 Mw; en Irán en torno a 20.000).

Fig. 5:⁹

Iranian overview : electricity		
CONCEPT	QUANTITY	COMENTS
Production	Tw/h	
2004	156 (Spain 278)	No nuke (Spain: 9 groups)
1994	81	

Este tamaño, si bien presenta escala suficiente para la existencia de unos tres o cuatro grupos nucleares, no presenta escala suficiente para acometer el ciclo completo de fabricación de combustible nuclear. Tampoco parece vislumbrarse que en caso de hacerlo, Irán tuviera capacidad para exportar elementos combustibles a países vecinos, de forma que así se compensase, aunque fuese de forma parcial la falta de escala del mercado interior.

6. Muchos países que tienen centrales nucleares para la generación eléctrica, bien no tienen fabricación de combustible, bien no realizan el ciclo completo

Cabe reseñar que hay países muy desarrollados que no tienen centrales nucleares para la generación de electricidad: Austria, Noruega, Italia, Dinamarca, Irlanda, Portugal, Grecia, Polonia...

⁹ BP Statistical Review... op. cit.



Otros países que si tienen, bien no fabrican elementos combustibles o bien lo hacen de forma parcial: Suiza, Holanda, España...

A continuación explicaremos que fases de la fabricación del combustible se acometen en España y que partes no.

En España es la empresa ENUSA la que se encarga de la fabricación de combustible nuclear para alimentación de los reactores nucleares nacionales (también exporta), si bien no realiza todas las etapas aunque las gestione logísticamente.

ENUSA se abastece de uranio procedente de explotaciones mineras de todo el mundo y de las compras que realiza a *brokers* y *traders*. También dispone de una participación estratégica del 10% en la Compagnie Minière d'Akouta (COMINAK), empresa propietaria de una importante mina de uranio en la República del Níger. Durante años, ENUSA contó con explotaciones mineras propias en Saelices - Ciudad Rodrigo (Salamanca), pero en 2001 dejó de producir concentrados de uranio en las mismas.

ENUSA contrata los servicios de conversión a los principales convertidores mundiales, localizados en los Estados Unidos, Canadá, Francia, Rusia y Gran Bretaña y adquiere los servicios de enriquecimiento de los principales suministradores del mercado, EURODIF en Francia (del que ENUSA es propietaria en un 11%¹⁰) en la planta de tratamiento de Tricastin, TENEX en Rusia, USEC en Estados Unidos y URENCO en Gran Bretaña, Holanda y Alemania.

En España, ENUSA efectúa la fabricación de elementos combustibles en sus instalaciones de Juzbado (Salamanca), a partir de los acuerdos de licencia firmados con Westinghouse, para reactores de agua a presión (PWR), y General Electric, para reactores de agua en ebullición (BWR). También tienen programas propios de desarrollo tecnológico y suministra combustible nuclear a las centrales españolas de Almaraz (I y II), Ascó (I y II), Vandellós II, José Cabrera, Cofrentes y Garoña, y exporta a centrales nucleares de Suiza, EDF en Francia, Tractebel en Bélgica, Vattenfall en Suecia y Hew en Alemania.

7. Las centrales nucleares requieren del tratamiento de los residuos nucleares y esto implica disponibilidad de tecnología y altos costes

Se considera residuo radiactivo a cualquier material o producto de desecho que contiene o está contaminado con radionucleidos en concentraciones o niveles de actividad superiores a los establecidos por las autoridades competentes y para el cual no está previsto ningún uso.

Los residuos radiactivos se generan en la producción de energía eléctrica de origen nuclear, en el desmantelamiento de instalaciones nucleares y en la utilización de radisótopos en múltiples actividades en la industria, medicina, investigación, etc.

La gestión de los residuos radiactivos consiste en todas las actividades administrativas y técnicas necesarias para la manipulación, tratamiento, acondicionamiento, transporte y almacenamiento de los residuos radiactivos, teniendo en cuenta los mejores factores económicos y de seguridad.

¹⁰ Irán tomó una participación del 10% en EURODIF en 1975.



La solución para proteger a las personas y al medio ambiente de las radiaciones que emiten los radionucleidos contenidos en los residuos radiactivos, consiste en aislarlos de tal modo que, durante los períodos que permanezcan activos (que pueden variar desde semanas a miles de años) éstos no salgan a la biosfera por ninguno de los caminos posibles y posteriormente, a través de las cadenas tróficas, puedan llegar al ser humano.

Los residuos deben estar acondicionados en estado sólido, e inmovilizados en un material aglomerante, como cemento, asfalto, etc.

Desde el punto de vista de la gestión hay dos grandes tipos en los que se agrupan los residuos: los de baja y media y los de alta actividad, que son completamente diferentes en su comportamiento a largo plazo y, por tanto, su almacenamiento es radicalmente diferente:

- Los *residuos de baja y media actividad* se caracterizan por tener actividades específicas moderadas y los radionucleidos que están presentes en ellos tienen períodos de semidesintegración menores de 30 años. Para mantener aislados los residuos de baja y media actividad existe un amplio consenso en las opciones de almacenamientos en superficie con barreras de ingeniería, o subterráneos a poca profundidad.
- Los *residuos de alta actividad* en un país como España, en el que no se reprocesa el combustible para separar el uranio y el plutonio del resto de los productos generados en la fisión, son los propios elementos combustibles, que, una vez agotada su capacidad útil de ser fisionados, se sacan del reactor y se almacenan en las piscinas de la central nuclear para su enfriamiento y almacenamiento provisional. En los países en que se reprocesa el combustible gastado, los residuos de alta actividad son también los productos de fisión vitrificados y otros residuos, que contienen emisores alfa de larga vida.

Dado que los residuos radiactivos de alta actividad mantienen durante largos períodos su peligrosidad potencial, se han considerado varios métodos para aislarlos, siendo los más relevantes los siguientes:

- Transformación por *transmutación*, alterando el balance de partículas subatómicas, de modo que se lograra la conversión de los radionucleidos en elementos estables. Dicha transformación puede llevarse a cabo en el denominado “amplificador de energía” proyectado para aprovechar la energía procedente de la fisión o transmutación de los actínidos.
- Lanzamiento al *espacio exterior* mediante cohetes espaciales que los alejarían de la atmósfera terrestre.
- Evacuación en el *subsuelo marino*, donde se realizarían sondeos profundos para enterrar los contenedores de residuos.
- Evacuación en los *hielos polares*, anclándolos mediante cables o hundiéndolos en la corteza terrestre mediante fusión con el hielo.
- Almacenamiento en *formaciones geológicas* de gran estabilidad a profundidades de varios centenares de metros.



Las alternativas expuestas en los apartados segundo a cuarto tienen importantes dificultades de índole científica, técnica y económica, además de otros inconvenientes de naturaleza jurídica, ética y de seguridad, como la no recuperabilidad de los residuos o la apropiación por parte de los países productores de residuos, de patrimonios comunes a la humanidad, como los océanos o los casquetes polares.

La alternativa expuesta en el apartado primero está siendo objeto de estudio e investigación a nivel internacional y se están dedicando ambiciosos proyectos de I+D al desarrollo de esta técnica.

Respecto a la alternativa expuesta en el apartado último, en la actualidad existe un amplio consenso en que las opciones de almacenamientos subterráneos en formaciones geológicas, aparecen como las alternativas más razonables y válidas y hacia ellas apuntan los países avanzados.

Cuando se da por finalizada la vida útil de las instalaciones nucleares y radiactivas, se procede a cerrarlas con carácter permanente y comienza la operación de clausura.

En las instalaciones del ciclo del combustible previas al reactor, los residuos están contaminados con radionucleidos naturales (uranio y sus productos de decaimiento) siendo los estériles de minería y de fabricación de concentrados los de mayor volumen. Éstos se deben estabilizar para evitar riesgos radiológicos.

Si después de la vida útil de una central, se opta por su desmantelamiento total (lo que implica la retirada, de todos los materiales, equipos y partes de la instalación que contengan radiactividad por encima de los niveles aceptables, dejando el emplazamiento en condiciones seguras para un futuro uso) se originan los siguientes tipos de residuos radiactivos:

Vasijas del reactor y componentes existentes en el interior del blindaje biológico. Son residuos de gran tamaño, altamente activados y contaminados, que requieren, para facilitar su manejo y transporte, reducción de tamaño en instalaciones blindadas de alta integridad con el consiguiente control ambiental.

Componentes externos al blindaje biológico (cambiadores de calor, bombas de circulación, tuberías, etc.). Aunque están menos contaminados que los anteriores, su gestión es semejante.

Hormigón activado y contaminado. Su demolición da lugar a la formación de aerosoles radiactivos a retener mediante filtros. La mayor parte de la radiactividad se encuentra en las capas del hormigón más próximas a las zonas radiactivas, por lo que, cuando es posible, se separan del resto de las zonas sustancialmente inactivas, que son estructuras de tipo convencional. Hay que tener en cuenta que una gran parte de una central nuclear (alrededor del 80%) no es radiactiva, y, tras exhaustivos controles de seguridad y medidas radiológicas, establecidos por los Organismos Nacionales y Supranacionales, se puede proceder a su derribo, reutilización o evacuación sin restricción alguna.

Sistemas auxiliares y estructuras de edificios. Son materiales ligeramente contaminados, susceptibles de descontaminación.

En todas las operaciones de desmantelamiento, se generan residuos secundarios (líquidos de descontaminación, filtros de gases, etc.) que requieren un tratamiento similar a los residuos del funcionamiento del reactor.



En el desmantelamiento de las instalaciones de etapas posteriores al reactor se obtienen residuos contaminados con productos de fisión y trazas de transuránidos. Presentan un alto nivel de radiactividad las celdas calientes donde se efectúa el proceso de reelaboración del combustible, así como las piscinas de almacenamiento.

La estrategia para tratar los residuos de alta actividad depende de si se ha optado por el *ciclo cerrado* y por tanto, reproceso del combustible gastado, o por el *ciclo abierto*, sin reproceso.

Hay países como Suecia, Canadá, Estados Unidos y España que hasta la fecha han optado por la opción de ciclo abierto, mientras que otros países como Francia, Alemania y Japón han optado por la opción de ciclo cerrado.

En el caso de reprocesar el combustible, es necesario gestionar como residuos de alta actividad los vitrificados derivados de dicho tratamiento, los cuales son introducidos en contenedores de acero inoxidable en cámaras de hormigón refrigeradas por aire, en las propias instalaciones de reproceso, a la espera de su evacuación final.

Existen plantas industriales de reproceso funcionando desde hace varios años en distintos países, como Sellafield en el Reino Unido y La Hague en Francia.

En ambos casos, es necesario disponer de un almacenamiento temporal durante un tiempo más o menos prolongado, para dicho combustible.

El combustible gastado de las centrales nucleares se almacena, en primera instancia, en las piscinas de las propias centrales nucleares. Dentro de las piscinas, el combustible gastado se aloja en bastidores metálicos, bajo agua, que actúa como refrigerante y blindaje contra las radiaciones. La estancia en las piscinas permite el necesario decaimiento radiactivo para su posterior manejo o traslado.

Cabe posteriormente, bien por saturación de la piscina o porque se contemple el desmantelamiento de la central nuclear, aplicar un sistema de almacenamiento utilizando contenedores metálicos o bóvedas, en los que se continúa refrigerando el combustible, generalmente por convección natural.

El almacenamiento temporal del combustible gastado puede realizarse en la propia central o fuera de ésta, de una manera centralizada. Algunos países, como Suecia, utilizan sistemas centralizados de almacenamiento en piscinas que albergan el combustible gastado de diversos reactores.

En cuanto al almacenamiento definitivo de los residuos de alta actividad, la opción internacional, científica y tecnológicamente más segura, consiste en su almacenamiento en formaciones geológicas profundas, que garantizan el confinamiento de dichos residuos durante el tiempo necesario para que su eventual retorno a la biosfera no suponga un riesgo indebido a las personas y al medio ambiente.

Los medios geológicos considerados son: sales, granitos, arcillas, basaltos y tobas volcánicas. La decisión de un tipo de roca u otro depende de las características geológicas de cada país.

Actualmente existen en otros países laboratorios subterráneos a gran profundidad, en distintos tipos de roca, que están completando y verificando los conocimientos adquiridos



sobre el citado concepto de evacuación de residuos (Grimsel en Suiza, Gorleben en Alemania, Yucca Mountain en EE.UU., etc.).

En los EE.UU., desde mayo de 1998, existe una instalación definitiva para almacenamiento de residuos radiactivos de alta actividad, la Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) en el estado de Nuevo Méjico. Esta instalación albergará cerca de 175.000m³ de residuos transuránicos provenientes de los programas nucleares de defensa del Departamento de Energía de ese país.

En el caso español, al comenzar el programa nuclear más tarde que en otros países (Estados Unidos, Francia, Reino Unido, etc.) el problema de la gestión de los residuos de alta actividad no es tan acuciante como en estos países, lo que permitirá disponer de opciones ya contrastadas en los mismos.

En el contexto internacional, fundamentalmente en el marco de los organismos multilaterales, se desarrollan metodologías, conceptos y armonización de principios y criterios reglamentarios en las distintas áreas de la gestión de los residuos radiactivos.

8. Desde el punto de vista de la política tecnológica, para Irán es un error apostar por el desarrollo nuclear

Un país como Irán debiera apostar por el desarrollo de industrias basadas en media intensidad tecnológica, y por ello, su política de desarrollo tecnológico debiera considerar que:

- Dada la globalización de los mercados no es factible competir con la UE, EE.UU, Japón o Rusia en segmentos de alta intensidad tecnológica.
- El mercado interior iraní es demasiado pequeño para actuar como motor del desarrollo tecnológico.
- Dados el nivel de formación (bueno pero no excelente) y las dificultades de acceso y comunicación con otras instituciones tecnológicas internacionales las dificultades en el desarrollo de la alta tecnología es evidente.
- El desarrollo tecnológico energético iraní debiera orientarse a dónde están sus ventajas en recursos primarios: hidrocarburos y energía solar.

Conclusión

En vista a lo anterior, si el gobierno de Irán persevera en su intención de desarrollar el proceso de fabricación del combustible nuclear de forma integral, solo cabe pensar que está cometiendo un error desde el punto de vista energético y de política tecnológica o que la intención en última instancia es acceder al arma nuclear¹¹, cuestión que sobrepasa el propósito de este artículo.

¹¹ Muchos vecinos, mas o menos próximos a Irán ya tienen armas nucleares: Rusia, Israel, Pakistán, India...



Bibliografía

BP AMOCO: *Statistical Review of World Energy*. (Ediciones anuales).

Colegio Oficial de Físicos (2000): *Origen y gestión de los residuos radiactivos*.

Consejo Europeo: “Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 13 de octubre de 2003 por la que se establece un régimen para el comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero en la Comunidad y por la que se modifica la Directiva 96/61/CE del Consejo”, *Diario Oficial de la Unión Europea* L275/32 25.10.2003.

Consejo Europeo: “Directiva 2004/101/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de octubre de 2004, por la que se modifica la Directiva 2003/87/CE, por la que se establece un régimen para el comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero en la Comunidad con respecto a los mecanismos de proyectos del Protocolo de Kyoto”, *Diario Oficial de la UE* ce 13.11.2004.

ENRESA (2005): *Tecnología al servicio del medioambiente*.

International Energy Agency: *Key World Energy Statistics*. (Ediciones anuales).

OECD & IEA: *World Energy Outlook*. (Ediciones anuales).

UNFCCC (1997): *Protocolo de Kyoto sobre el cambio climático*.

UNFCCC (2001): “Los Acuerdos de Marrakech”, adoptados en el período de sesiones en la Séptima Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático, celebrada del 29 de octubre al 10 de noviembre de 2001, en FCCC/CP/2001/12/Add.2 de 21 de enero de 2002, en <http://www.un.org>.

Yabar Sterling, Ana (2001): “Los mecanismos de flexibilidad de Kyoto, otros instrumentos de lucha contra el cambio climático y su aplicación en la Unión Europea”, en *Observatorio Medioambiental*, nº 4, pp. 307-338.

Recursos de Internet

Asociación Española de Evaluación de Impacto Ambiental: <http://www.eia.org>

ENRESA: <http://www.enresa.es>

ENUSA: <http://www.enusa.es>

Naciones Unidas: <http://www.un.org>

Red Eléctrica de España: <http://www.ree.es>