

Evolución de los ciclos de combustible para mejorar la sostenibilidad a largo plazo de la energía nuclear

E. M. González-Romero

La sostenibilidad requiere en el caso de la energía nuclear la optimización del uso del uranio, la minimización de los residuos, la competitividad económica y la aceptación pública. Varias opciones del ciclo del combustible nuclear, como el reciclado del combustible, los sistemas nucleares de espectro neutrónico rápido, y las técnicas de separación y transmutación permiten contribuir a la optimización de los aspectos ligados a la sostenibilidad a largo plazo. Sin embargo, la evolución del ciclo tendrá que realizarse a un ritmo que garantice en cada momento la competitividad económica con otras opciones energéticas y la aceptación pública.

Sustainability, for nuclear energy, requires the optimization in the natural resources utilization, nuclear waste minimization, economic competitiveness and public acceptance. A number of options for the nuclear fuel cycle, as the fuel recycling, fast spectrum nuclear systems, partitioning and transmutation, might contribute to largely improve the long-term sustainability. Still, the deployment of these new fuel cycles and new nuclear technologies has to follow the pace imposed by the mandatory economical competitiveness and public acceptance, that both must be granted at every moment.



ENRIQUE M. GONZÁLEZ-ROMERO es doctor en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense de Madrid. En 1993 inicia sus actividades en investigación en distintos aspectos de la Energía Nuclear. Desde 1997 dirige, primero el grupo de Transmutación de Residuos Radiactivos, después la Unidad de Innovación Nuclear y actualmente la División de Fisión Nuclear del Ciemat. Miembro del comité ejecutivo de la Plataforma Tecnológica Europea para la energía nuclear sostenible, SNETP, y de la plataforma española para la investigación en energía de fisión nuclear, Ceiden.

ASPECTOS DE LA SOSTENIBILIDAD DE LA ENERGÍA NUCLEAR

La energía nuclear lleva proporcionando electricidad de forma competitiva y predecible durante más de 50 años, demostrando que es una tecnología de la que se puede depender a medio plazo. Sin embargo, al hablar de sostenibilidad de la energía nuclear hacemos intervenir más aspectos. Sostenibilidad implica viabilidad en el presente y en el futuro, a corto, medio y largo plazo. Esta viabilidad a su vez involucra aspectos técnicos, económicos y sociales.

Entre los aspectos técnicos de la sostenibilidad destacan la disponibilidad de materias primas, ubicaciones, equipos y personal formado para construir y operar centrales nucleares y todos los elementos del ciclo del combustible nuclear asociado. Desde la perspectiva de los reactores de la tecnología actual, asumiendo su operación durante muchas décadas o siglos, aparecen posibles limitaciones

tanto al principio como al final del ciclo.

Para operar la central hay que suministrarla de combustible, que actualmente es en su gran mayoría uranio enriquecido, preparado a partir del uranio extraído de minas. Esto significa que, para el combustible de los reactores actuales, dependemos de las existencias en la naturaleza de un bien limitado y que por lo tanto podría comprometer su sostenibilidad.

Si bien es verdad que la cantidad de uranio en la corteza terrestre es muy importante y que siempre se pueden buscar nuevos yacimientos, la cantidad de uranio identificada como extraíble depende de los costes que se esté dispuesto a pagar por la extracción. En el informe conjunto de la NEA/OCDE y el OIEA, Uranium 2009, se estima que la cantidad de uranio razonablemente garantizada a un precio inferior a 80\$/kgU es de 2.5 millones de toneladas, que alcanzan 3.5 millones de tU para un precio inferior a 130\$/kgU, y si se acepta un

coste de hasta 260\$/kgU y se suman los recursos inferidos pero no garantizados, se alcanzan los 6.4 millones de tU. Finalmente, aunque se incluyan los recursos especulativos no se superan los 10.5 millones de tU.

En el año 2008, los reactores nucleares consumieron el equivalente a 59 000 tU, por lo que todos los recursos asegurados o inferidos permitirían, al ritmo de consumo actual, el suministro durante unos 100 años. El periodo de 100 años es casi el doble de la experiencia operativa de la producción comercial de energía nuclear y claramente tiene un enorme interés energético y económico. Por otra parte, esta limitación cobra mayor interés desde el punto de vista de la competitividad económica, pues a pesar de la baja dependencia del kWh nuclear con el coste del combustible, al tener que recurrir a uranio mucho más caro se abren oportunidades de competencia a nuevas tecnologías de energía nuclear (o no nuclear). Las incertidumbres en los costes de operación y mantenimiento de reactores nucleares de nuevas generaciones, impiden hacer predicciones precisas, pero es de esperar que en algún momento a lo largo del presente siglo, los costes del kWh en reactores (rápidos) utilizando uranio y plutonios reciclados serán inferiores a los costes de los reactores actuales usando uranio enriquecido. Finalmente no hay que olvidar que las minas de uranio son motivo de preocupación por su impacto ambiental, durante la explotación y después de su cierre.

El segundo gran aspecto técnico de la sostenibilidad a largo plazo es la gestión final de los combustibles usados y los residuos radiactivos de alta actividad. Se estima que solo en Europa en el año 2000 había unas 37 000 toneladas, a las que se añaden unas 2500 toneladas cada año. Una buena parte de los países con explotación comercial de energía nuclear, tienen planes para utilizar almacenes profundos (500m) en formaciones geológicas estables, AGP, para aislar estos residuos del medioambiente durante largos periodos de tiempo. Aunque esta solución es considerada como viable por toda la comunidad científica y técnica, presenta, en muchos países, importantes dificultades de aceptación pública cuando se intenta encontrar ubicaciones para el AGP. Esta situación podría agravarse significativamente al crecer, con las décadas, la cantidad de residuos de alta actividad a enviar al AGP y, consecuentemente, el número de emplazamientos necesarios. En el marco del grupo de expertos de

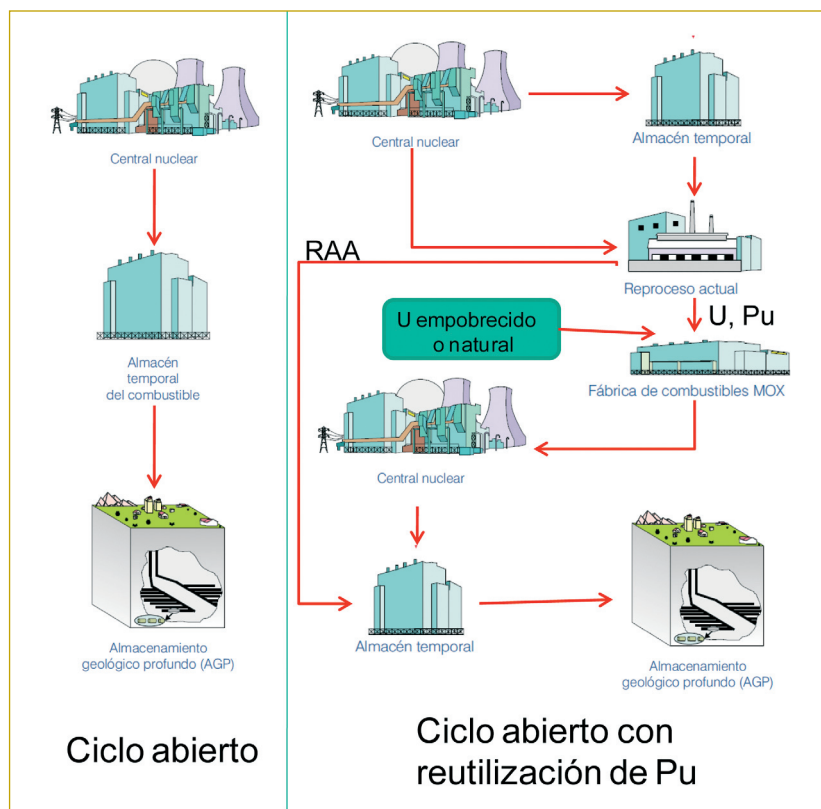


Figura 1.

ciclos avanzados de la NEA/OCDE, los Estados Unidos estimaban que, de mantener la producción nuclear al ritmo actual, podrían necesitar entre 5 y 22 AGP durante el siglo XXI, si se mantiene el ciclo de combustible abierto actualmente en uso, y dependiendo de la potencia instalada y el diseño de los AGP.

Los aspectos económicos de la sostenibilidad obligarán a mantener en todo momento la generación nuclear con ventajas económicas frente a las alternativas para la producción de electricidad aceptables en cada momento. Esto puede obligar a utilizar estrategias adaptativas que varían en función del tiempo al variar también estas alternativas. Por ejemplo, actualmente la competencia con fuentes energéticas como el carbón, el gas y otros combustibles fósiles resulta muy exigente, y deja poco margen para nuevas tecnologías de reactores y del ciclo de combustible. Esta situación puede evolucionar con las décadas si se implantan las medidas de prevención contra el calentamiento global, bien con limitaciones a la producción por fuentes fósiles o bien gravándolas con impuestos especiales.

Finalmente, los aspectos relacionados con la aceptación pública, están actualmente en una situación muy delicada y difícil de predecir tras el accidente de Fukushima, pero la capa-

cidad de la energía nuclear de producir electricidad de forma masiva, sin emisiones de efecto invernadero, a un coste reducido y de forma predecible tanto en precios como garantizando el suministro, siguen siendo argumentos tan importantes como antes del accidente en Japón. De hecho los principales productores de energía nuclear actuales y probablemente los futuros, USA, Francia, Japón, China e India han indicado directa o indirectamente, que tras revisar exhaustivamente las implicaciones del accidente, mantendrán la energía nuclear como uno de sus pilares en la generación de electricidad.

Aunque no se discutirá en mayor detalle en este artículo, es importante mencionar que la formación de personal cualificado para el diseño y operación y la disponibilidad de emplazamientos para las nuevas generaciones de centrales nucleares, son elementos claves y aún no resueltos para la sostenibilidad de la energía nuclear (y de otras tecnologías de generación).

EL CICLO ABIERTO, DIRECTO O CON RECICLADO PARCIAL DEL PLUTONIO

En la actualidad, la mayor parte de la generación de electricidad nuclear utiliza, de hecho, el ciclo abierto en el que los reactores nucleares, con un

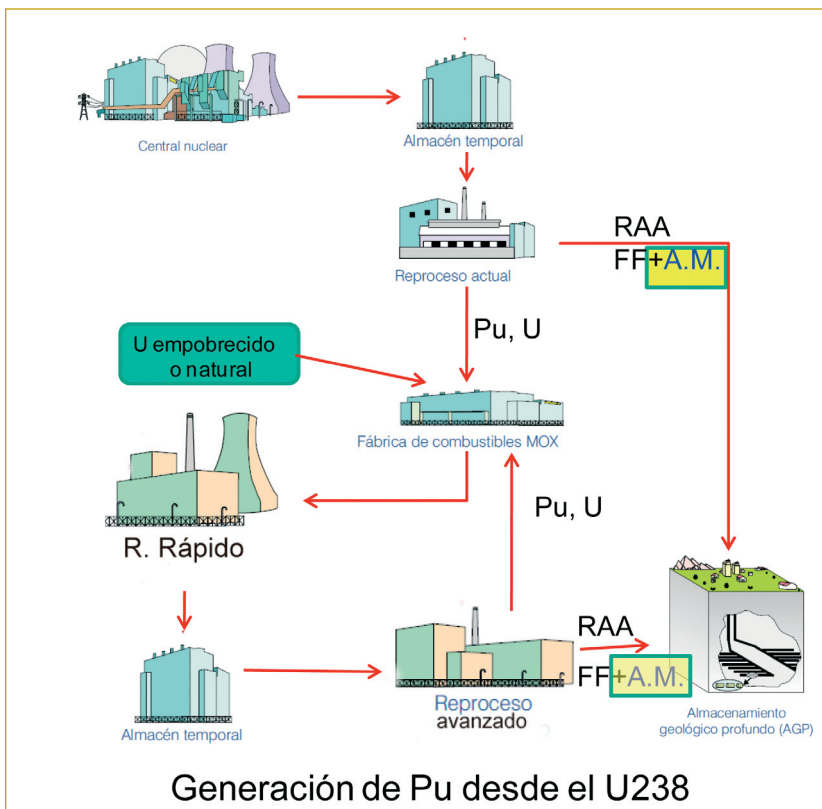


Figura 2.

espectro de neutrones moderado por agua (ligera o pesada) o por grafito, consumen ^{235}U extraído de las minas y concentrado en forma de uranio enriquecido, que una vez utilizado, es almacenado temporalmente y podría ser enviado directamente a los AGP para su gestión definitiva, figura 1.

Con la tecnología disponible ésta es la solución económicamente más competitiva, que permite una generación de electricidad a precios similares (ligeramente superiores o inferiores dependiendo del país) a los de los combustibles fósiles, pero sin la emisión de CO_2 ni otros gases de efecto invernadero. Sin embargo, como se indicaba en el apartado anterior, este tipo de ciclo de combustible tiene dificultades para mantenerse de forma indefinida, tanto por el suministro de combustible como por la continua generación de residuos que necesitarían de más espacio en los AGP.

Esta dificultad puede ser gestionada parcialmente en la actualidad, aplicando un reciclado parcial del plutonio como hacen Francia, Japón y otros países con la tecnología de fabricación de combustibles de óxidos mixtos, MOX, o en el futuro evolucionando hacia un ciclo cerrado, con reactores rápidos, que sea capaz de reutilizar los combustibles usados producidos en la actualidad.

La tecnología de reciclado de plutonio necesita el reprocesado del combustible usado. En la actualidad se utiliza la tecnología PUREX de la que se han construido más de 15 plantas de uso civil desde la década de 1950, en 7 países (Bélgica, Alemania, India, Rusia, Reino Unido, Francia y Japón), siendo Francia y Japón los que hacen un mayor uso comercial del plutonio.

La tecnología PUREX actual genera esencialmente tres corrientes: plutonio para el MOX, uranio irradiado que puede ser utilizado en el MOX o almacenado y los vidrios de residuos que contienen los fragmentos de fisión, residuos de activación y el resto de los actínidos y que tienen que ser almacenados en los AGP.

Reutilizando el plutonio, una vez más en los mismos reactores térmicos en base a estas tecnologías probadas (PUREX y MOX), se podría conseguir, según las estimaciones de la NEA/OCDE y del proyecto RED-IMPACT del 6º Programa Marco de Euratom, mejorar el aprovechamiento del uranio extraído de la mina entre un 5 % y un 30 %, a la vez que se reduce ligeramente (<10 %) el inventario de actínidos y de la radiotoxicidad a largo plazo que debe ser almacenada finalmente en el AGP. Utilizando exclusivamente reactores térmicos, PUREX y MOX es difícil mejorar estas prestaciones, dado que la degradación en la

seguridad intrínseca inducida por la presencia de cantidades importantes del isótopo ^{240}Pu del plutonio, limitan el contenido en plutonio de los elementos MOX y la fracción del núcleo en que se puede substituir el uranio enriquecido por MOX. Además, tras la irradiación el vector isotópico del plutonio en el MOX se degrada significativamente, dificultando su eventual reprocesado con PUREX y su viabilidad como combustible en reactores de espectro térmico.

CICLO CERRADO CON RECICLADO DE URANIO Y PLUTONIO

Aunque algunos reactores de tercera generación como los EPR podrían estar optimizados para mejorar su capacidad de reutilización de plutonio, en cualquier caso es poco probable que en la práctica el plutonio se recicle más de una vez en reactores térmicos, por lo que no se podrá cerrar el ciclo de forma completa. Para beneficiarse de un ciclo cerrado completo es necesario cambiar de tecnología y utilizar los reactores de neutrones rápidos.

Los neutrones rápidos proporcionan unas secciones eficaces más favorables a la fisión respecto a la captura y un mayor número de neutrones por fisión. Esta mejor economía neutrónica permite utilizar el exceso de neutrones para convertir más ^{238}U , del combustible o de zonas especiales del reactor, en ^{239}Pu . Dependiendo del diseño del reactor, según se está quemando material fisil (^{235}U o ^{239}Pu) se puede conseguir generar tanto material fisil nuevo (^{239}Pu) como se consume o incluso más. Esto significa un mejor uso de los recursos naturales, usando todo el uranio extraído de la mina, no solo el ^{235}U (0.7 %) sino también el ^{238}U (más del 99 %). Además al mejorar la relación fisión/captura se reducen los residuos de vida larga por unidad de energía producida.

Aunque son poco utilizados de forma comercial se han operado reactores rápidos en varios países (Estados Unidos, Reino Unido, Alemania, Francia, India, Japón, Rusia y Kazajstán) desde hace más de 50 años. Es una tecnología ampliamente ensayada y aunque con poca implantación comercial existen varios ejemplos notables por su experiencia de utilización, fiabilidad y servicios. Por ejemplo, el BN350 en Kazajstán ha operado desde 1972 y desde 1996 ha proporcionado 50 MW eléctricos y 45 000 litros de agua destilada al día, o la amplia experiencia operativa de Phenix, en Francia y BN600, en

Rusia, con factores de carga superiores al 70 % durante casi 20 años. Recientemente, en julio de 2010, China ha conseguido la criticidad de su nuevo reactor rápido CEFR y Francia ha propuesto construir el nuevo demostrador de reactor rápido, ASTRID, antes del 2020. Aunque la tecnología está operativa, hasta que llegue el momento de su comercialización más generalizada, hay una colaboración internacional, que incluye nueve países más la Unión Europea, con un esfuerzo muy importante para mejorar las prestaciones y sostenibilidad de estos reactores rápidos y dar lugar a los reactores de Generación IV. Esta colaboración plantea tres opciones tecnológicas de reactores rápidos: gas, plomo y sodio, siendo esta última la más desarrollada. La plataforma tecnológica para la energía nuclear sostenible SNETP, está fomentando la iniciativa industrial europea ESNII para la construcción de, al menos, un prototipo de cada una de estas tecnologías.

Combinando las tecnologías del reprocesado PUREX, fabricación de MOX con alto contenido de plutonio y los reactores rápidos, en un futuro próximo será posible implementar un ciclo cerrado para el combustible nuclear con un multireciclado completo del plutonio y el uranio, figura 2.

Como se ha explicado antes, al introducir los reactores rápidos en el ciclo de combustible, es posible reciclar el uranio y el plutonio tantas veces como sea necesario para aprovechar toda su energía, en particular toda la del ^{238}U , sin penalizaciones importantes en la seguridad aunque puede requerir mejoras en el proceso PUREX. Esta utilización del ^{238}U , vía ^{239}Pu , consigue que la energía generada por kilo de uranio extraído de la mina se multiplique por un factor entre 30 y 50, extendiendo las reservas de uranio desde 100 años a miles de años.

Por otra parte al consumirse en los reactores, solo las pérdidas de plutonio y uranio acaban en los almacenes de residuos, lo que reduce drásticamente los residuos. En unidades de radiotoxicidad a largo plazo se dividen por 10.

Aunque como hemos visto la tecnología está ensayada y es utilizable, hay un gran esfuerzo de I+D para mejorarla. Con los precios actuales del uranio enriquecido, del reprocesado y de construcción, los reactores rápidos no son competitivos con los reactores actuales, pero probablemente lo serán en el futuro y actualmente pueden ser competitivos con otras fuentes de energía.

Si además de reciclar de forma continua uranio y plutonio también se

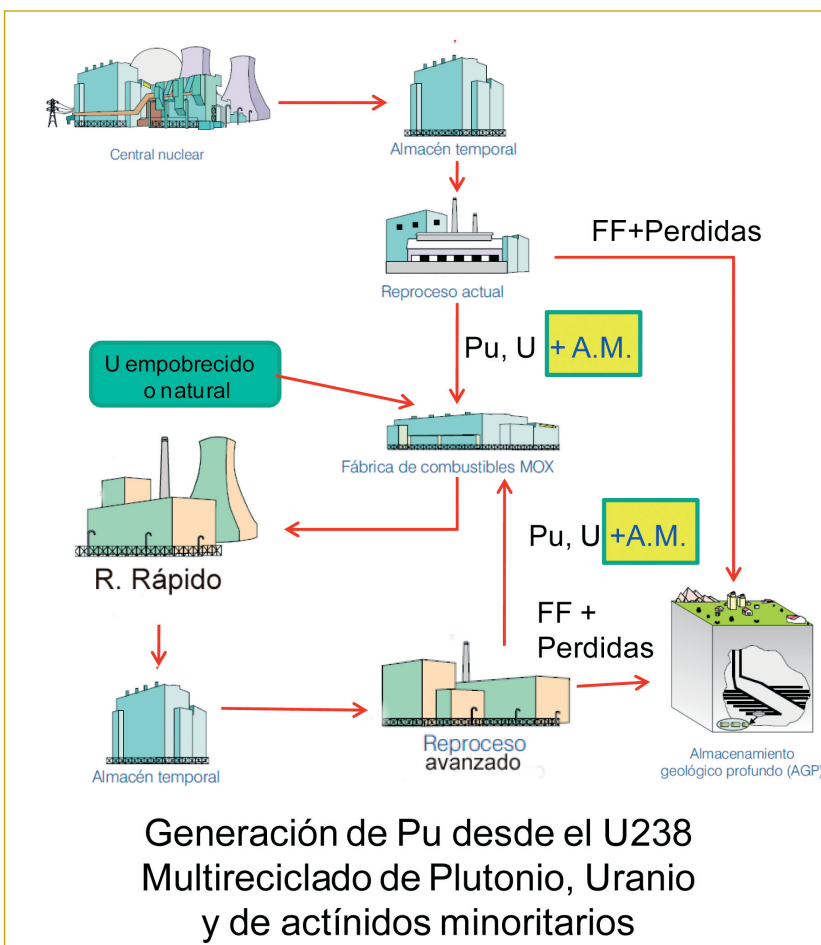


Figura 3.

reciclan los actínidos minoritarios, se consigue reducir la cantidad de residuos de vida larga en un factor 100, quedando solo el 1 % en radiotoxicidad a largo plazo, figura 3. La ganancia energética es ligeramente superior pero la dificultad tecnológica es muy superior, pues necesita incluir nuevas tecnologías de reprocesado, actualmente solo disponibles a nivel experimental y escala de laboratorio.

Por otra parte, los reactores rápidos diseñados para producir electricidad están limitados en su capacidad transmutadora, siempre podrán transmutar sus propios residuos, pero salvo para países con grandes parques de reactores rápidos puede ser difícil transmutar completamente el legado de los residuos producidos por los reactores térmicos actuales y futuros. Para evitar estas dificultades se han diseñado los transmutadores dedicados conocidos como ADS.

CICLO CERRADO CON SEPARACIÓN Y TRANSMUTACIÓN

El ejemplo más genuino de tecnologías para mejorar todos los aspectos técnicos de la sostenibilidad a largo

plazo de los reactores nucleares está en las tecnologías de separación y transmutación. Estas tecnologías dan tanta importancia a la minimización de residuos de vida larga como al aprovechamiento de recursos naturales y la competitividad en la generación de electricidad, que, utilizando técnicas avanzadas de reciclado y reactores avanzados, consiguen optimizar estos parámetros simultáneamente. Esta tecnología está en fase de investigación y debería estar totalmente demostrada y utilizable para el 2040.

Para implementar la transmutación de forma intensiva es necesario diseñar un nuevo sistema nuclear que funcione de forma segura con combustibles con contenidos isotópicos mucho más complicados que los de los reactores de producción de electricidad. El concepto específico más avanzado es el ADS, que a diferencia de los reactores convencionales es subcrítico, por lo que por, si mismo, no es capaz de mantener la reacción en cadena y se para alcanzando un estado seguro. Para que no se pare hay que mantener en funcionamiento un acelerador de partículas que pro-

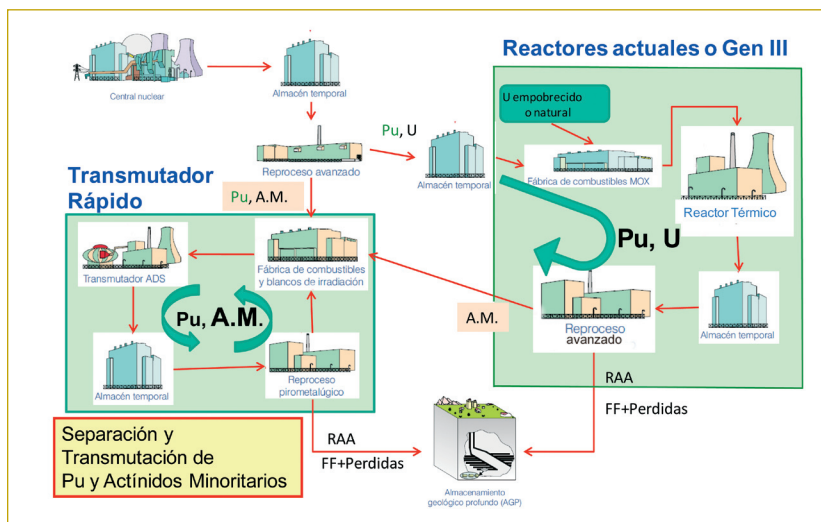


Figura 4.

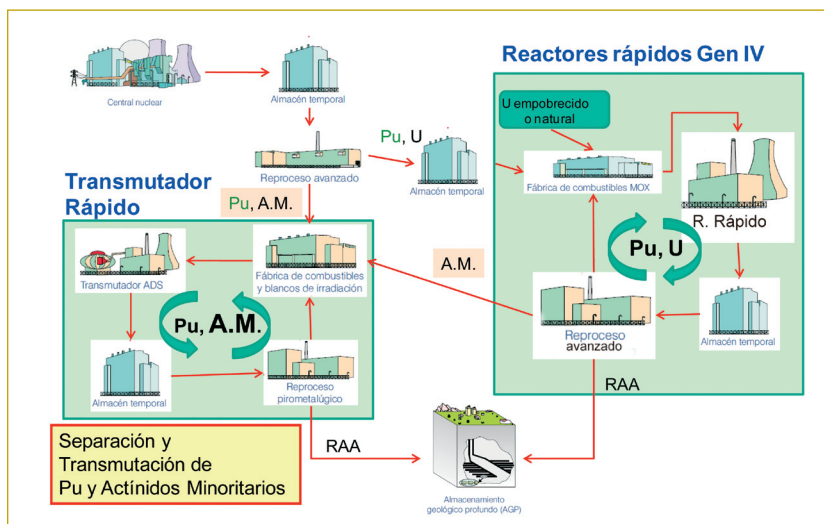


Figura 5.

porciona los neutrones extra necesarios. Con este diseño los ADS serán capaces de funcionar con combustibles especiales para transmutación con alto contenido en plutonio y actínidos minoritarios. La propuesta más avanzada de demostrador de este tipo de sistemas es el proyecto MYRRHA (Bélgica) que se diseñó en proyectos del 6º Programa Marco y se está terminando de diseñar en el 7º Programa Marco. El gobierno Belga ha confirmado su aprobación en marzo de 2010 comprometiendo más de 400 millones de euros. El prototipo forma parte de la Iniciativa industrial Europea Nuclear, ESNII.

También hacen falta nuevos sistemas de reprocesado, que permitan separar en componentes y reciclar los combustibles usados de todos los tipos de reactores incluidos en el ciclo. En la actualidad se desarrollan y evalúan a escala de laboratorio nuevas versiones del sistema PUREX que

permitirían separar cada actínido por una parte, como DIAMEX y SANEX, o extraer todos los actínidos de forma conjunta, como en el sistema GANEX. Además se están evaluando técnicas en medio no acuoso, piro-metalúrgicas, mucho más resistentes a la radiactividad y calor para poder reprocesar combustibles con características extremas.

Combinando las tecnologías de reprocesado avanzado y actual es posible construir un ciclo de combustible nuclear con todas las ventajas de la separación y la transmutación, utilizando reactores térmicos como los actuales para reciclar en parte el plutonio y el uranio, y cerrar el ciclo reutilizando los restos de plutonio y los demás actínidos en un transmutador dedicado tipo ADS, figura 4. También se puede conseguir el mismo resultado combinando reactores rápidos para reciclar completamente el uranio y parte del plutonio y cerrar el ciclo reutilizando

los restos de plutonio y los demás actínidos en un transmutador dedicado tipo ADS, figura 5.

En ambos casos se aprovecha el potencial energético y se reducen al mínimo los residuos radiactivos enviados al AGP. Los mismos estudios de la NEA/OCDE y RED-IMPACT estiman las ganancias en la generación de electricidad por unidad de masa de uranio extraído de la mina en un factor entre 30 y 50, a la vez que se reducirían los residuos finales de vida larga enviados al AGP (en masa de transuránicos o en radiotoxicidad) en un factor superior a 100. Esta reducción en residuos implica que 200 años tras la transmutación se alcanzarían los mismos niveles de inventario de radiotoxicidad que en el ciclo abierto necesitarían 200 000 años.

Finalmente es importante mencionar que en los foros internacionales como NEA/OCDE, OIEA, GNEP (EEUU) y Rusia se evalúan soluciones regionales en que la cooperación entre varios países con distintas políticas para la energía nuclear, permite minimizar los costes de desarrollo de las nuevas tecnologías, y reducir los riesgos de proliferación asociados a una eventual dispersión de las técnicas de reprocesado y compartir instalaciones costosas optimizando su uso. Los estudios de estos escenarios muestran un importante valor añadido tanto para los países suministradores de servicios como para los receptores, que pueden gestionar sus residuos de alta actividad de una manera menos costosa y en plazos mucho más reducidos.

REFERENCIAS

- Uranium 2009: Resources, Production and Demand, NEA 6891, OECD 2010.
- Advanced Nuclear Fuel Cycles and Radioactive Waste Management. NEA 5990, OECD 2006.
- Red-Impact: Impact of Partitioning and Transmutation and Waste Reduction Technologies on the Final Nuclear Waste Disposal. W. von Lenza et al. 2008. FZ Jülich, Report Vol. 15.
- Nuclear Fuel Cycle Transition Scenario Studies. Status Report. NEA 6192, OECD 2009.
- The Sustainable Nuclear Energy technology Platform. A vision report. EUR 22842. 2007. www.snetp.eu.
- SNETP Strategic research agenda 2009. Mayo 2009. www.snetp.eu.■