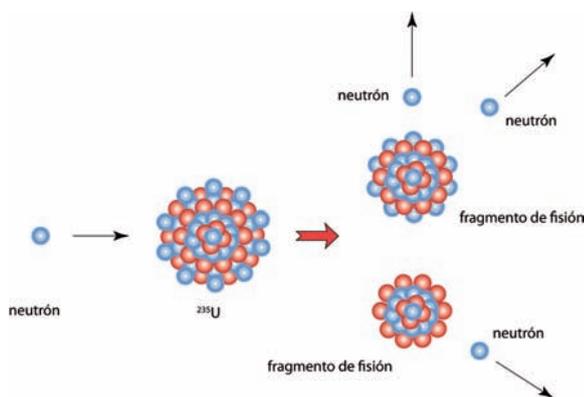


# La transmutación de los residuos radioactivos

Daniel Cano Ott

## 1. Introducción

En 1938, Lise Meitner, Otto Hahn y Fritz Strassman [1] observaron que el bombardeo de átomos de Uranio con neutrones lentos daba lugar a otras especies químicas más ligeras como el bario. Interpretaron el fenómeno como la ruptura del núcleo de Uranio en dos núcleos de masas inferiores y bautizaron el proceso con el nombre de fisión nuclear, no tardando mucho en advertir que la suma de las masas de los productos de la fisión era inferior a la masa del núcleo original. Los cálculos realizados por Meitner y Frisch [2] concluyeron, acertadamente, que la energía liberada era enorme, tratándose de un proceso no conocido hasta la fecha en el que la diferencia de masas era transformada en energía a través de la famosa relación de Einstein  $E=mc^2$ .



**Figura 1.** Un núcleo es bombardeado con un neutrón y fisiona dando lugar a dos fragmentos y neutrones secundarios.

El físico húngaro-estadounidense Leo Szilard ya llevaba tiempo persiguiendo la generación de energía a partir de reacciones nucleares. Llegó incluso a solicitar una patente ante el Almirantazgo Británico sobre la reacción en cadena, un mecanismo a través del cual una reacción nuclear es utilizada para iniciar una secuencia infinita de reacciones y generar energía. En 1939, cuando Leo Szilard y el recién llegado a EEUU y premio Nobel Enrico Fermi oyeron hablar de la fisión nuclear, concluyeron inmediatamente que ésa era la tan buscada reacción. Anticiparon que los neutrones resultantes de una fisión podrían ser utilizados para inducir más reacciones en los átomos de uranio circundantes.

Fermi, tras realizar una serie de importantes experimentos en su laboratorio, materializó el concepto. El primer reactor nuclear de la historia, el PILE-1, entró en operación en la Universidad de Chicago en Diciembre de 1942. Nunca sabremos cómo hubiesen evolucionado las cosas si el mundo no hubiese estado en guerra en aquél momento, pero la historia es conocida por todos: el proyecto Manhattan y el desarrollo de la bomba atómica.

Terminada la guerra, el Congreso de los Estados Unidos promovió el desarrollo de la tecnología nuclear de uso civil, a través de la creación de la Comisión de Energía Atómica. Fijó como objetivo la construcción de un reactor nuclear para la producción de electricidad y la demostración de su viabilidad comercial. En diciembre de 1951, el *Experimental Breeder Reactor I* generó la primera electricidad de origen nuclear. Seis años después entró en operación la primera planta nuclear comercial en Shippingport, Pensilvania, para suministrar electricidad a la ciudad de Pittsburgh.

## 2. La energía nuclear: situación actual y expectativas

Contrariamente a la percepción de una fracción significativa de la opinión pública, las aplicaciones de la tecnología nuclear son fundamentalmente civiles y pacíficas. A día de hoy, tan sólo ocho países disponen de un arsenal nuclear declarado, mientras que 56 países operan reactores de investigación civiles y en 30 hay 439 reactores para la generación de electricidad. Un informe de la Comisión Europea [3] interpreta estas diferencias en la percepción pública como consecuencia de la falta de información sobre los beneficios de la energía nuclear.

Los 439 reactores en operación suministran una potencia eléctrica total de 372 GWe (gigavatios eléctricos). Dicha cifra es tres veces superior a la capacidad total de generación de Alemania a través de todas sus fuentes, equivale a toda la electricidad generada en 1960 y representa el 16% de la demanda mundial actual. En España, el consumo de electricidad nuclear es superior al 20% gracias a los 7.7 GWe que suministran las 8 centrales en operación. En Europa la cifra se acerca al 30%, aunque el ejemplo francés demuestra que es posible alcanzar niveles próximos al 80%.

Además de la producción de energía, muchos países disponen de reactores nucleares experimentales para la investigación. Dichas instalaciones son de gran utilidad y ofrecen fuentes intensas de neutrones para la investigación en áreas como la medicina, la biología y las ciencias de materiales, además de servir para producir radioisótopos con aplicaciones médicas e industriales. España, con un historial de cinco reactores experimentales dedicados a la investigación, ya no posee ninguno en operación.

Los argumentos a favor del uso de la energía nuclear han ido evolucionando con el tiempo. La primera generación de centrales surgió de la necesidad de reducir la contaminación producida por las centrales térmicas de carbón. Los argumentos actuales a favor de su uso están más relacionados con el grave problema de cómo garantizar el suministro y la estabilidad del precio de la energía:

- **El crecimiento de la demanda.** El aumento de la población mundial y el desarrollo industrial van a tener como consecuencia que el consumo eléctrico en el 2030 duplique el valor actual [4]. Incluso en escenarios que consideran una mejora sustancial en el ahorro energético y un incremento significativo en la implantación de energías renovables, parece necesario mantener la fracción de la energía nuclear en la producción total.
- **La producción estable y la seguridad en el suministro.** La energía nuclear ofrece estabilidad de suministro eléctrico, con porcentajes del tiempo durante el cual la planta suministra energía del 90% [5]. Esta estabilidad no puede ser alcanzada por otras fuentes como la eólica o la solar, que dependen de factores meteorológicos incontrolables. Además, la abundancia y dispersión geográfica del uranio natural favorecen la estabilidad del suministro en comparación con los combustibles fósiles.
- **La competitividad económica y la estabilidad del precio a largo plazo.** Un estudio económico realizado en el 2005 por la OCDE [6] sitúa a la energía nuclear entre las más competitivas. Los costes de producción se sitúan entre 4 y 5.5 céntimos de euro por kWh y son comparables o inferiores a la producción con gas y carbón y hasta tres veces inferiores a la producción con energías renovables. El precio del kWh de origen nuclear está dominado por el coste de construcción de la central y no por el precio del uranio, de forma que las subidas en el precio del combustible nuclear tendrán un impacto más moderado en el coste final de producción.
- **La necesidad de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros gases invernadero para combatir el cambio climático.** Una importante fracción de la comunidad científica sostiene que el planeta experimenta un cambio climático provocado por la actividad humana. Por ello, se ha comenzado a regular y limitar a nivel internacional las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros gases que acentúan el efecto invernadero. La energía nuclear es, a día de hoy, la fuente energética utilizable a gran escala con menor tasa de emisiones.

Las razones aquí expuestas no están exentas de crítica pero parecen haber propiciado un relanzamiento de la energía nuclear.

El debate sobre su uso a nivel europeo ya está sobre la mesa, pero el verdadero incremento global de la energía nuclear no está teniendo lugar en los países desarrollados, sino en grandes países en rápido desarrollo como China e India. China ha completado la construcción y comenzado la operación de ocho reactores nucleares durante los últimos cinco años, otras ocho centrales estarán acopladas a la red eléctrica en los próximos cinco años y existen planes para otros 80 reactores más. Y, los objetivos del programa energético nacional indio son igualmente ambiciosos y contemplan la construcción de entre 20 y 30 nuevos reactores para el 2020.

### 3. Riesgos asociados a la energía nuclear

Existe una preocupación legítima ante el uso de la energía nuclear y ante el previsible aumento del parque mundial de reactores nucleares. En particular, existe preocupación por la

seguridad de las instalaciones, por un posible incremento de proliferación y, muy especialmente, por la gestión final de los residuos radiactivos de alta actividad (RRAA). Sin tratar de minimizar estos riesgos, en realidad es posible presentar argumentos bien sustentados frente a estas objeciones:

- **La seguridad de los reactores.** La amplia experiencia acumulada durante la operación de los reactores existentes, en particular durante los incidentes y accidentes, ha permitido analizar las causas de los fallos e incorporar nuevos elementos de seguridad activa y pasiva adicionales a las centrales en operación, en construcción y en fase de diseño. Comparados con otras instalaciones industriales peligrosas, los reactores nucleares son muy seguros. El accidente de Chernóbil, instalado en la conciencia social, parece desmentir esta aseveración. Sin embargo, el informe UNSCEAR de Naciones Unidas [7] sobre el accidente y sus consecuencias concluye que fue consecuencia de una violación aberrante del protocolo de seguridad de la central y de algunas características del diseño del reactor (tipo RBMK). Varios sistemas de seguridad críticos fueron desconectados para realizar un experimento y el reactor fue llevado a un régimen de operación fuera de los límites de seguridad impuestos por su diseño. Tras una serie de incidentes, el reactor acabó sobrecalentándose, dando paso a la formación y posterior explosión química de hidrógeno en el núcleo. Conviene citar que, a pesar de la gravedad del accidente, el exhaustivo estudio epidemiológico realizado por el Foro de Chernóbil [8] y dirigido por la Organización Mundial de la Salud y la Organización Internacional de la Energía Atómica (OIEA), concluyó que el número directo de víctimas fue de 56 (hasta el 2004) y que la tasa esperada de aumento de mortalidad debido al cáncer es inferior al uno por mil sobre la población expuesta (6.6 millones). Las consecuencias de Chernóbil son comparables a las de otros trágicos accidentes asociados a una práctica negligente de la actividad industrial, como el de Bhopal en la India [9]. Un accidente nuclear, igual de grave desde el punto de vista del reactor, fue el ocurrido en la Isla de las Tres Millas (TMI), en EEUU. Sin embargo, sus consecuencias fueron muy reducidas y apenas han trascendido a la opinión pública gracias al muy superior diseño de los reactores occidentales. A diferencia de la central de Chernóbil, el material radioactivo liberado por el núcleo en TMI quedó retenido en el edificio de contención y no hubo impacto alguno sobre la salud de la población. Aunque pueda resultar paradójico, TMI es considerado un éxito desde el punto de vista de los mecanismos de seguridad operativos en las centrales.
- **La proliferación de armamento.** A este respecto conviene recordar que el 80% de los países que utilizan la energía nuclear no tienen programas militares nucleares ni, al parecer, la intención de acometerlos. Además, la producción de energía nuclear no ha sido “ni la causa de” ni “el camino hacia” la producción de armas nucleares en ninguno de los países que las ha desarrollado. Por el contrario, los programas militares han precedido o se han desarrollado independientemente de los programas nucleares civiles. El verdadero problema reside en la

voluntad que los estados tengan de desarrollar armas de destrucción masiva, ya sean nucleares, químicas o bacteriológicas, y la única estrategia para combatir las es a través de los mecanismos de control internacionales (salvaguardias de la OIEA), los tratados de no proliferación, la presión de la comunidad internacional y la reducción de las tensiones geopolíticas. A este último respecto, un futuro energético y económico incierto no es el escenario más propicio para limitar el número de conflictos.

- **La gestión de los residuos radioactivos de alta actividad (RRAA).** Es el verdadero aspecto técnico en el debate actual sobre la energía nuclear y el punto sobre el que están incidiendo los esfuerzos en investigación y desarrollo. Hoy en día existen estrategias complementarias que, de ponerse en práctica, lograrían resolver el problema desde un punto de vista tecnológico. Es sobre este asunto que versará el resto de este artículo.

#### 4. La gestión de residuos nucleares

La comunidad científica lleva estudiando durante varias décadas la viabilidad del almacenamiento geológico de los residuos de alta actividad. Curiosamente, existe un depósito generado de forma natural mucho antes de la aparición del ser humano. Hace 2000 millones de años, en el Precámbrico, una veta de mineral especialmente rica en el isótopo  $^{235}\text{U}$  del Uranio inició una reacción en cadena de forma espontánea. La reacción se mantuvo durante un periodo de 500.000 años, dando lugar a lo que se conoce como el reactor natural de fisión de Oklo, en Gabón [10]. Sus residuos radiactivos, unas 5 toneladas de fragmentos de fisión y 1.5 toneladas de plutonio, han permanecido inmovilizados geológicamente en la zona.

Según nuestro estado del conocimiento actual, la solución del almacenamiento geológico ofrece las garantías necesarias para que los efectos de los residuos sobre la biosfera y el hombre sean muy bajos e inferiores a los producidos por la radiación natural. Sin embargo, su aplicación se encuentra con las naturales reticencias por parte de la población a la hora de asignar emplazamientos geográficos.

Dado que el uso masivo y sostenido de la energía nuclear requerirá aumentar continuamente la capacidad de almacenamiento, parece lógico pensar necesaria una solución más compatible con la opinión pública.

Por otro lado, e independientemente de cuál sea el futuro de la energía nuclear, es necesario que los residuos ya generados se gestionen sin perjuicio para nuestros descendientes. Parece inaceptable que una sociedad avanzada, aún disponiendo de los medios tecnológicos para resolver un problema, opte por transferirlo a las generaciones venideras por razones meramente políticas o económicas.

Por este motivo, los países que disponen de centrales nucleares están investigando sobre cómo minimizar la generación de residuos radiactivos y reducir drásticamente la capacidad necesaria de almacenamiento final.

#### 5. Conceptos y opciones tecnológicas para la minimización de los residuos de alta actividad

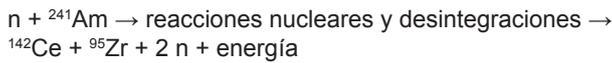
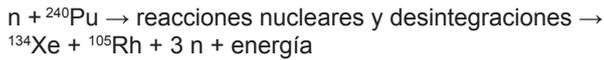
A pesar de las incertidumbres sobre el escenario energético futuro y otras consideraciones políticas, tecnológicas y sociales, la mayor parte de los países con centrales nucleares están evaluando diferentes combinaciones de nuevas tecnologías para la minimización de los residuos [11]. Las soluciones propuestas se agrupan en tres grandes áreas no excluyentes:

- Nuevos conceptos de reactores avanzados, con más eficiencia y grado de quemado del combustible, que permitan reducir la cantidad de residuos de vida larga por unidad de energía generada.
- La separación de los residuos en diferentes componentes y la transmutación de una fracción de los mismos como parte de un combustible nuclear, transformando así un problema medioambiental en una fuente de energía.
- Técnicas de almacenamiento a largo plazo de una pequeña fracción, en masa y en volumen, de los residuos.

Las diferencias entre los constituyentes del combustible nuclear irradiado permiten optimizar la estrategia de su gestión. Los residuos se diferencian en tres grandes grupos:

- **El uranio y buena parte de los materiales estructurales.** Representan casi toda la masa y volumen pero tienen una actividad específica muy baja. Podrían ser almacenados en superficie o incluso (en el caso del uranio) utilizarse como elemento combustible para futuros reactores avanzados.
- **Los fragmentos de fisión de vidas cortas (de hasta 30 años).** Son muy radiactivos durante unas pocas décadas. La separación de estos fragmentos de fisión, en particular  $^{137}\text{Cs}$  y  $^{90}\text{Sr}$ , del resto del combustible irradiado simplificaría notablemente la gestión ya que, tras un periodo de almacenamiento por algo más de 200 años, pierden la mayor parte de su actividad. Su gestión puede realizarse utilizando almacenamientos temporales centralizados que alivien la carga de los almacenes definitivos.
- **Los actínidos resultantes de la activación del uranio** (Pu, Np, Am, Cm, y otros actínidos transuránicos). Constituyen el grupo de residuos que ofrece mayores dificultades de gestión: son materiales altamente radiactivos que pueden tener interés proliferante para la fabricación de armas, generan importantes cantidades de calor por radioactividad y se mantienen activos por periodos muy largos de tiempo, desde miles hasta cientos de miles de años.

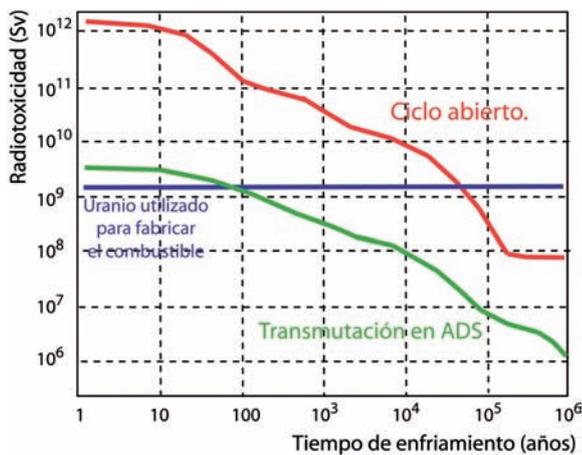
Los esfuerzos de investigación, desarrollo e innovación tecnológica (I+D+i) en la gestión de los residuos se centran en la eliminación de los actínidos transuránicos. Es posible afirmar que una tecnología adecuada permitiría su reutilización para producir energía durante su transmutación en isótopos de los dos grupos anteriores, mucho más fáciles de gestionar. En este contexto, transmutar significa usar neutrones para inducir reacciones nucleares, principalmente la fisión o la absorción (ver Figura 2), y transformar una especie nuclear de larga vida en otra de vida mucho más corta.



**Figura 2.** Esquemas de transmutación del  ${}^{240}\text{Pu}$  y el  ${}^{241}\text{Am}$  a través de una serie de reacciones nucleares, captura neutrónica y fisión, y desintegraciones. Durante el proceso se emite la energía asociada a la fisión y el resultado son productos son estables o con vidas medias cortas.

Para poder realizar la transmutación de forma eficiente es necesario separar los actínidos del combustible irradiado en sus componentes químicas. La transmutación conlleva una separación previa, por lo que conceptos aparecen asociados en la literatura científica como Separación y Transmutación (SyT).

En la actualidad parece haber un consenso casi unánime, con alguna que otra notable excepción, sobre la necesidad de usar alguna forma de SyT para garantizar una utilización sostenible y masiva de la energía nuclear. Es el camino para reducir la cantidad de residuos a gestionar hasta en un factor 100. La SyT permite optimizar simultáneamente el aprovechamiento del almacén geológico y del combustible nuclear, dado que los residuos de alta actividad dejarían serlo y se convertirían en una fuente de energía.



**Figura 3.** Comparación de la evolución de la radiotoxicidad del combustible irradiado para el ciclo abierto (un solo uso y almacenamiento) y un escenario de transmutación con ADS (sistema asistido por acelerador). La línea azul, utilizada como nivel referencia, muestra el nivel de la radiotoxicidad del uranio empleado para fabricar el combustible nuclear. En el escenario de transmutación, el nivel de referencia se alcanza 1000 veces antes que para el ciclo abierto.

Las técnicas de SyT, además de necesarias para la sostenibilidad de la energía nuclear, son también de gran interés para aquellos países que decidan reducir o abandonar la producción eléctrica nuclear. En este segundo caso, las técnicas de SyT permitirían reducir sustancialmente el inventario final de residuos legado a las generaciones futuras. Como se puede observar en la Figura 3, la SyT del combustible irradiado (línea roja) permite reducir en un factor 100 la radiotoxicidad del combustible a almacenar (línea verde) y reducir en un factor 1000 el tiempo en el que la radiotoxicidad alcanza el mismo valor que tenía el uranio utilizado para fabricar el combustible de las centrales.

A la luz de los claros beneficios medioambientales y sociales, surge la pregunta sobre cuál es el gasto necesario para desarrollar las tecnologías de SyT. Los costes son elevados y difícilmente asumibles para un país aislado, pero es posible reducirlos sustancialmente si los desarrollos son compartidos por varios países, incluyendo algunos decididos a mantener la energía nuclear. Es posible lograr una reducción aún mayor si se comparten algunas de las instalaciones más costosas para realizar la SyT a escala industrial. Las estimaciones actuales indican que la aplicación de la SyT al ciclo de combustible no alteraría su rentabilidad económica, ya que el incremento el coste del kW nuclear sería tan sólo de un 10-20 %, un precio más que razonable para lograr un enorme beneficio.

Profundizando aún más en las estrategias de cooperación internacional, algunos técnicos y grupos de expertos están estudiando el impacto de la aplicación regional de las nuevas tecnologías, por ejemplo para optimizar la gestión todos los RRAA de la Unión Europea (UE). El intercambio de residuos entre distintos países presenta enormes dificultades políticas y legales, pero los estudios preliminares indican que las ventajas técnicas serían muy importantes.

## 6. I+D+i para la minimización de los residuos de alta actividad

EEUU, Japón, Corea del Sur y Rusia están llevando a cabo sendos programas de I+D+i dedicados a la gestión de los residuos. Sin embargo, el verdadero liderazgo del desarrollo de estas tecnologías avanzadas recae en la UE, gracias a su importante participación en los grandes programas internacionales.

### 6.1 Separación y Transmutación

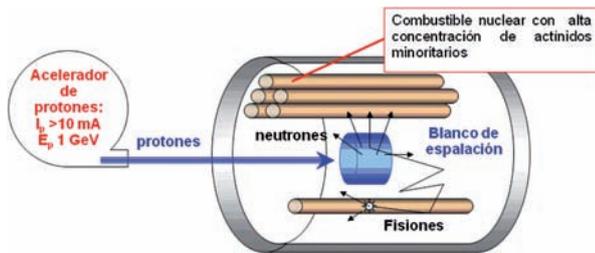
La UE está financiando un ambicioso proyecto de SyT a través de sus programas marco de investigación. La investigación es llevada a cabo por países individuales y está coordinada internacionalmente a través de proyectos europeos en los programas marco de la UE. Las actividades parecen tener asegurada su continuidad en los programas séptimo y octavo.

Respecto a las tecnologías de separación, cabe decir que son prácticamente comunes a ambos programas e incluyen técnicas *hidrometalúrgicas* y *pirometalúrgicas*:

- Las técnicas *hidrometalúrgicas* se basan en la extracción con moléculas orgánicas específicamente selectivas para ciertos elementos actínidos. Constituyen una evolución del proceso PUREX explotado comercialmente por Francia y su nivel de desarrollo industrial las convierte en las tecnologías de separación favoritas para los combustibles de los reactores actuales.
- Las técnicas *pirometalúrgicas*, menos desarrolladas comercialmente, no utilizan compuestos orgánicos, por lo que son más resistentes a los combustibles muy radiactivos o con una elevada generación de calor.

Los esfuerzos en I+D+i de la UE en tecnologías de transmutación se han centrado en el desarrollo de los sistemas nucleares subcríticos asistidos por acelerador, llamados ADS por el acrónimo del inglés *Accelerator Driven System*.

Los ADS (ver Fig. 4) son sistemas diseñados para eliminar actínidos al mayor ritmo posible. Su subcriticidad, es decir, la falta de necesidad de mantener una reacción en cadena, les otorga mayor flexibilidad para esta tarea que la que tienen los reactores críticos. Pueden utilizar combustibles clásicos y/o combustibles especialmente eficaces para la transmutación, altamente enriquecidos en plutonio y actínidos minoritarios y con bajo contenido en uranio. El uso del segundo tipo de combustibles, óptimos desde el punto de vista de la eficiencia para la reducción de actínidos transuránicos, es prácticamente inviables en reactores críticos.



**Figura 4.** Esquema de un sistema subcrítico asistido por acelerador (ADS) para la transmutación de actínidos y eventual producción de energía. Consiste en un acelerador de protones, con energías de 1 GeV y una corriente de 1 mA, acoplado a un blanco de espalación que actúa como fuente de neutrones y a un núcleo subcrítico con combustible rico en actínidos minoritarios.

Para lograr sostener la tasa de transmutación, los ADS son operados por una fuente externa de neutrones, generada y controlada por un acelerador de partículas cargadas. Las partículas cargadas, generalmente protones de 1 GeV de energía, impactan contra un blanco y producen neutrones a través de reacciones de *espalación*: reacciones en las que un núcleo pesado emite una gran cantidad de nucleones como resultado del choque con un protón de alta energía. Las variantes de ADS más favorecidas actualmente son los sistemas con un espectro neutrónico *rápido* y refrigerados por plomo o una mezcla de plomo y bismuto.

Los diferentes proyectos de I+D+i europeos sobre los ADS han cubierto multitud de aspectos diferentes como la ingeniería, diseño y seguridad, materiales, combustibles, aceleradores de alta intensidad, fuentes de espalación y datos nucleares básicos. La participación española en estos proyectos ha sido y sigue siendo intensa. Equipos de investigación españoles del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), Empresarios Agrupados, ENRESA, el Instituto de Física Corpuscular de Valencia (IFIC-CSIC) y las Universidades Autónoma de Madrid, Complutense de Madrid, de Santiago de Compostela, de Sevilla, de Valladolid y Politécnicas de Cataluña, de Madrid y de Valencia lideran líneas de investigación básica y aplicada muchas de las áreas descritas.

## 6.2 Reactores de Generación IV

El desarrollo de los reactores de Generación IV (GEN-IV) viene coordinado por el *Generation IV International Forum* (GIF) [12]. Tienen como objetivo principal la generación de energía eléctrica con mucha más eficiencia, más seguridad, menor producción de residuos y menor riesgo de proliferación.

Pese a la mayor eficiencia de los ADS, algunos diseños de reactores de GEN-IV también pueden contribuir a la reducción del inventario de RRAA. Los diseños mejor posicionados son los reactores rápidos refrigerados por plomo (LFR), por gas/helio (GFR), sodio (SFR) y algunas versiones del reactor refrigerado por agua supercrítica (SCWR). Estos sistemas pueden reducir el inventario de todos los actínidos de los RRAA, con limitaciones sobre las cantidades de actínidos minoritarios y Pu eliminadas por ciclo. Si su implantación se retrasase podrían llegar a ser incapaces de gestionar todos los residuos acumulados antes de su puesta en marcha y volverían imprescindibles a los ADS.

Los reactores de alta temperatura (HTR) y muy alta temperatura (VHTR) podrían adaptarse también para realizar grandes quemados de Pu, aunque no de otros actínidos transuránicos. A una escala más larga de tiempos, los reactores de sales fundidas (MSR) podrían actuar como verdaderos transmutadores gracias a su reprocesado en tiempo real del combustible.

## 7. Contribuciones de la Física Nuclear Española en el escenario internacional

La comunidad española de Física Nuclear mantiene un papel destacado en el escenario internacional de la investigación básica orientada hacia la transmutación. Las líneas de investigación se encuadran en cuatro grandes áreas.

### 7.1 Datos Nucleares

El diseño de cualquier sistema nuclear precisa de herramientas de cálculo y simulación. Tales códigos toman como punto de partida librerías evaluadas de datos que describen las propiedades de los núcleos (estructura nuclear) y sus mecanismos de reacción (secciones eficaces) a diferentes energías.

En el campo de la estructura nuclear, investigadores del IFIC realizan experimentos sobre la contribución de la desintegración de diferentes isótopos radioactivos al calor residual de los reactores nucleares. Dichas medidas son de relevancia para cálculos relacionados con la seguridad de los reactores. Además, investigadores del CIEMAT, el IFIC y la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) están diseñando experimentos pioneros para el futuro laboratorio europeo FAIR [13] sobre la tasa de emisión de neutrones en fragmentos de fisión. Los resultados facilitarán, entre otros, simulaciones más precisas sobre la cinética de los reactores.

Desde el punto de vista de las secciones eficaces, investigadores de la Universidad de Santiago de Compostela (USDC) realizan experimentos sobre las reacciones inducidas por protones de alta energía. Los datos obtenidos han permitido una modelización más exacta de los blancos de espalación necesarios para los ADS. Además, en uno de los mayores proyectos internacionales sobre medidas de reacciones inducidas por neutrones. El proyecto conllevó, entre otros aspectos, el diseño y construcción de la instalación  $n_{TOF}$  en el laboratorio europeo CERN [14], así como la realización de medidas de fisión y captura neutrónica. Los resultados producidos para actínidos (uranio, neptunio, plutonio y americio) y materiales estructurales (plomo y bismuto) han tenido un gran impacto y serán de gran relevancia para el diseño de ADS y reactores de GEN-IV.

## 7.2 Modelización y evaluación de datos nucleares

Antes de poder ser utilizados, los resultados de las medidas deben ser evaluados y comparados con otros datos disponibles. Investigadores de la Universidad de Sevilla (USE) se dedican activamente al desarrollo códigos y modelos nucleares que permiten una interpretación teórica de los datos experimentales sobre mecanismos de reacción. Gracias a dichos modelos es posible extender los datos experimentales sobre un rango continuo de energías y obtener información sobre los canales de reacción para los que no hay ninguna información experimental.

## 7.3 Experimentos integrales

Las librerías de datos nucleares evaluadas deben ser verificadas y calibradas antes de su utilización para el diseño final de sistemas nucleares de potencia. Para ello, es necesario construir maquetas a gran escala, denominadas experimentos integrales, que reproduzcan algunas de las propiedades macroscópicas de los sistemas nucleares. La comparación de las simulaciones con los resultados de los experimentos integrales permite estudiar el comportamiento de los ADSs y reactores y mejorar sustancialmente la precisión de los códigos simulación y las librerías de datos disponibles. Investigadores del CIEMAT lideran y realizan sendos experimentos integrales en diferentes laboratorios internacionales y comparan sus resultados con los de otros equipos.

## 7.4 Desarrollo de instrumentación científica específica

Los desarrollos tecnológicos realizados para la investigación básica permiten mejorar sustancialmente los sistemas de control y monitorización de los reactores nucleares y futuros ADS. Equipos de investigación del CIEMAT, IFIC, UPC y USDC están desarrollando detectores de neutrones y rayos gamma que permitirán monitorizar con mayor precisión el comportamiento de sistemas nucleares. También desarrollan sistemas de adquisición que contribuyen a mejorar la fiabilidad de los datos registrados por los diferentes sensores.

## 8. Conclusiones y comentarios finales

El aumento de la población mundial y el incremento general de la demanda en países en desarrollo hace que el problema del suministro energético sea más importante que nunca. La humanidad necesita un suministro energético garantizado, sostenido y económico, que minimice las tensiones geopolíticas y cumpla con la legislación internacional sobre el medio ambiente.

Una gran variedad de estudios realizados concluyen que, aún para los escenarios más favorables en términos de ahorro y eficiencia energética y tasa de implantación de energías renovables, la energía nuclear deberá aumentar significativamente su potencia actual en el 2020 para poder cubrir la demanda mundial.

La utilización a mayor escala de la energía nuclear implica encontrar soluciones tecnológicas de la gestión de los residuos radiactivos socialmente aceptables. Si bien la gestión final en un almacén geológico es segura y viable, presenta dificultades desde el punto de vista de la aceptación

pública. Por ello, existe un consenso generalizado sobre la necesidad a aplicar técnicas de Separación y Transmutación de la componente de los residuos que ofrece más dificultades para la gestión a largo plazo: los actínidos transuránicos como el plutonio, el neptunio, el americio y el curio.

La transmutación de los actínidos puede realizarse de una forma flexible y muy eficiente en ADS, sistemas subcríticos asistidos por acelerador. Dicha solución también es atractiva para países que pretendan abandonar la producción de energía nuclear.

La transmutación también será posible en los futuros reactores de Generación IV. Además de aportar mayor seguridad y una eficiencia de quemado mucho más alta del combustible que los reactores críticos actuales, ofrecerán también la posibilidad de transmutar actínidos a un ritmo más modesto que los ADS.

## Agradecimientos

Las investigaciones realizadas en España han sido realizadas gracias a varios proyectos de investigación financiados a través de los Planes Nacionales de I+D+i del Ministerio de Educación y Ciencia, la empresa nacional de los residuos radioactivos ENRESA y varios proyectos de los Programas Marco de la Unión Europea.

## Referencias

- [1] O. HAHN AND F. STRASSMANN, *Naturwissenschaften* **26**, 756 (1938).
- [2] L. MEITNER, F. STRASSMANN, AND O. HAHN, *Z. Physik* **109**, 538 (1938).
- [3] Informe IPTS de la Comisión Europea: "Percepción pública y comunicación eficaz del riesgo", <http://www.jrc.es/home/report/spanish/articles/vol82/SCI4S826.htm>
- [4] *World Energy Outlook 2006*, OECD/IEA, ISBN 92-64-10989-7, <http://www.worldenergyoutlook.org>
- [5] Energía 2006, editado por el Foro Nuclear, <http://www.foro-nuclear.org/>
- [6] *Projected Costs of Generating Electricity*, OECD/ IEA NEA 2005,
- [7] Informe UNSCEAR-2000, <http://www.unscear.org/unscear/en/chernobyl.html>
- [8] *Informe de la OMS sobre los efectos de Chernóbil*, [http://www.who.int/ionizing\\_radiation/chernobyl/who\\_chernobyl\\_report\\_2006.pdf](http://www.who.int/ionizing_radiation/chernobyl/who_chernobyl_report_2006.pdf)
- [9] *El accidente de Bhopal*, <http://www.proteccioncivil-andalucia.org/Documentos/Bhopal.htm>
- [10] *Las edades de Gaia*, J.E. LOVELOCK, Tusquets Editores
- [11] *Nuevas tecnologías para gestionar residuos radiactivos de alta actividad*, E. GONZÁLEZ ROMERO, Vértices – La revista del CIEMAT, 2 (2007)
- [12] Generation IV International Forum, <http://gif.inel.gov/>
- [13] [http://www.gsi.de/fair/index\\_e.html](http://www.gsi.de/fair/index_e.html)
- [14] <http://www.cern.ch>

**Daniel Cano Ott**

*Centro de Investigaciones Energéticas,  
Medioambientales y Tecnológicas – CIEMAT. Madrid*