

BIBLIOTECA
COMILLAS
Ingeniería

13

COMBUSTIBLE NUCLEAR

B. YOLANDA MORATILLA
(coordinadora)

COMBUSTIBLE NUCLEAR
SEMINARIO PERMANENTE EN TECNOLOGÍAS
ENERGÉTICAS

BIBLIOTECA
COMILLAS
Ingeniería

13

PUBLICACIONES
DE LA UNIVERSIDAD
PONTIFICIA COMILLAS

PEDIDOS:
Servicio de Publicaciones
c/ Universidad Comillas, 3
Tel.: 91 734 39 50 - Fax: 91 734 45 70
c.e.: edit@pub.upcomillas.es

AUTORES:

Manuel Lozano Leyva – Lorenzo Francia González
Luis Enrique Herranz – Pablo Zuloaga
Jean-Louis Casabianca – Josep Castellnou i Barceló
Antonio Calvo Roy

COMBUSTIBLE NUCLEAR

SEMINARIO PERMANENTE EN TECNOLOGÍAS ENERGÉTICAS

COORDINADORA:

BEATRIZ YOLANDA MORATILLA SORIA



Patrocina la Cátedra



2013

Servicio de Biblioteca. Universidad Pontificia Comillas de Madrid

COMBUSTIBLE nuclear : Seminario Permanente en Tecnologías Energéticas / autores Manuel Lozano Leyva, Lorenzo Francia González, Luis Enrique Herranz, Pablo Zuloaga, Jean-Louis Casabianca, Josep Castellnou i Barceló, Antonio Calvo Roy ; coordinadora Beatriz Yolanda Moratilla Soria. — Madrid : Universidad Pontificia Comillas, 2013

87 p. — (Biblioteca Comillas. Ingeniería ; 13)

Bibliografía: p. 85-87

D.L. M 28882-2013. — ISBN 978-84-8468-498-5

1. Combustibles 2. Energía nuclear 3. Residuos radioactivos I. Lozano Leyva, Manuel II. Moratilla Soria, Beatriz Yolanda III. Universidad Pontificia Comillas. Cátedra Rafael Mariño Nuevas Tecnologías Energéticas. Seminario Permanente de Tecnologías Energéticas

Esta editorial es miembro de la Unión de Editoriales Universitarias Españolas (UNE), lo que garantiza la difusión y comercialización de sus publicaciones a nivel nacional e internacional.



© 2013 UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
c/ Universidad Comillas, 3
28049 Madrid

© 2013 De todos los autores.

Diseño de cubierta: BELÉN RECIO GODOY
ISBN: 978-84-8468-498-5
Depósito Legal: M-28882-2013
Impreso por R.B. Servicios Editoriales, S.L.

Reservados todos los derechos. Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de este libro por cualquier procedimiento electrónico o mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética o cualquier sistema de almacenamiento o recuperación de información, sin permiso escrito de la UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS.

ÍNDICE

PRESENTACIÓN	9
PRÓLOGO	11
RESUMEN EJECUTIVO	15
CAPÍTULO I. El ciclo del combustible nuclear. De la mina al ATC <i>Manuel Lozano Leyva</i>	17
CAPÍTULO II. Gestión del combustible nuclear	27
<i>Lorenzo Francia González</i>	
CAPÍTULO III. Investigación y gestión del combustible nuclear usado <i>Luis E. Herranz</i>	35
CAPÍTULO IV. La gestión del combustible nuclear gastado. El ATC <i>Pablo Zuloaga</i>	47
CAPÍTULO V. Aspectos económicos de la gestión del combustible nuclear usado	61
<i>D. Jean-Louis Casabianca</i>	
CAPÍTULO VI. Aceptabilidad social de la gestión del combustible nuclear usado	75
<i>Josep Castellnou i Barceló</i>	
CAPÍTULO VII. La participación social en la toma de decisiones combustible gastado	81
<i>Antonio Calvo Roy</i>	
REFERENCIAS	85

PRESENTACIÓN

El Comité de Energía y Recursos Naturales del Instituto de la Ingeniería de España y la Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas de la Universidad Pontificia Comillas decidieron en 2006 aunar sus esfuerzos y establecer el “Seminario Permanente en Nuevas Tecnologías Energéticas”. Se trata de un foro de reflexión y debate sobre soluciones energéticas aplicables, de actualidad, que se desarrolla mediante varias conferencias y mesas redondas a lo largo de un curso académico.

El Seminario cubre un tema de interés y actualidad en el ámbito de las Tecnologías Energéticas y para ello invita a profesionales y académicos de reconocido prestigio a que impartan conferencias sobre las diferentes aproximaciones al tema central escogido, pasando seguidamente a establecer un debate con los asistentes. Entre los objetivos que los organizadores nos hemos marcado en este Seminario se encuentra que el enfoque de los temas abordados sea eminentemente práctico, es decir, se centre en las tecnologías técnica y económicamente viables, comparando desde estos puntos de vista las diferentes alternativas y seleccionando las más interesantes para su aplicación tanto en el contexto internacional como en España. Este planteamiento no es incompatible con el rigor científico, sino que trata de combinarlo con el enfoque aplicado que busca el sector empresarial, con el objetivo de lograr un máximo calado y dar sugerencias a los responsables de gestionar la energía en España.

Se han abierto dos vías para alcanzar la repercusión deseada en estas sesiones de reflexión. Por una parte se ha dispuesto una página web pública accesible tanto desde el Comité como desde la Cátedra en la que se recogen las presentaciones de los diferentes ponentes. De este modo en un plazo casi inmediato es posible analizar la información dada en cada sesión. Por otra parte se elabora una publicación que recoge toda la actividad del

curso y que se realiza a partir de una transcripción de las conferencias, que una vez montada con las figuras más relevantes de las presentaciones es revisada por los ponentes. Esta publicación se elabora tanto en versión papel como digital¹.

Este volumen es la séptima publicación del Seminario Permanente y recoge las actividades que tomando como centro la gestión del combustible nuclear se llevaron a cabo en el curso 2012-13.

Tanto desde el Comité de Energía y Recursos Naturales como desde la Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas esperamos que esta información resulte útil a la sociedad y contribuya a dar elementos y criterios de juicio a los responsables del ámbito energético, tanto de la Administración como del sector empresarial.

Beatriz Yolanda Moratilla Soria

Presidenta del Comité de Energía y Recursos Naturales del IIE.

Directora de la Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas

¹ Las diferentes presentaciones llevadas a cabo en el Seminario Permanente, así como las Publicaciones están disponibles en <http://www.upcomillas.es/catedras/crm/seminario.html>.

PRÓLOGO

Francisco José López García
Presidente de la SNE

La Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas realiza una nueva publicación del Seminario Permanente de Nuevas Tecnologías Energéticas, esta vez sobre la gestión del ciclo del combustible nuclear, centrándose en uno de los aspectos más relevantes de la energía nuclear: la gestión del combustible nuclear usado.

La gestión del combustible nuclear usado y los residuos radiactivos, la preocupación por la seguridad nuclear —especialmente tras el accidente de Fukushima, que ya ha sido abordado en otro de los seminarios permanentes de esta Cátedra— y la proliferación de las armas nucleares son los tres aspectos que más predisponen a la opinión pública contra la energía nuclear.

Las pruebas de resistencia frente a sucesos externos a las plantas realizadas tras el accidente de Fukushima y las consiguientes mejoras de la seguridad acometidas o que se están implantando en las centrales nucleares, tanto en España como en Europa y en el resto del mundo, han incrementado los márgenes de seguridad de las instalaciones y también la percepción sobre la misma de la opinión pública, mostrándose de nuevo en encuestas realizadas recientemente una recuperación de la perspectiva positiva que se tenía hacia la energía nuclear antes del citado suceso.

Son, por tanto, la preocupación por la proliferación de armas nucleares y la gestión de los residuos de alta actividad los aspectos que siguen preocupando en mayor medida a la opinión pública. Estos dos asuntos están relacionados, dado que la gestión del combustible usado, considerando la opción del reprocesamiento, permite eliminar el riesgo de la utilización del plutonio para la fabricación de armas nucleares, cuestión que se ha analizado de forma clara y precisa en este Seminario.

Al igual que en publicaciones anteriores, esta nueva edición llega en un momento especialmente oportuno para nuestro país, al haberse

tomado en los últimos meses dos decisiones legislativas que van a tener un impacto muy significativo, aunque de efecto contrapuesto, sobre las estrategias de gestión del combustible usado y, por ende, para el futuro de la evolución de la energía nuclear en España: la aprobación del emplazamiento del Almacén Temporal Centralizado del combustible gastado y los residuos de alta actividad en Villar de Cañas, donde se han iniciado las actividades previas a la construcción, y la promulgación de la Ley 15/2012, de 27 de diciembre, de medidas fiscales para la sostenibilidad energética, que crea un impuesto sobre la producción de combustible nuclear gastado y residuos radiactivos resultantes de la generación de energía nucleoelectrónica y otro impuesto sobre la actividad de almacenamiento de combustible nuclear gastado y residuos radiactivos en instalaciones centralizadas.

La primera de estas medidas va a permitir resolver a corto plazo uno de los problemas de las centrales nucleares españolas, debido al alto grado de ocupación de las piscinas de almacenamiento de combustible usado. Los costes de esta instalación se incluirán en la próxima revisión del VI Plan General de Residuos Radiactivos, que determinará las tasas de la Empresa Nacional de Residuos, Enresa, a todas las plantas nucleares por la gestión y almacenamiento de los residuos radioactivos y el combustible usado, así como por el desmantelamiento de las centrales.

La segunda medida conlleva la creación de una nueva y elevada carga impositiva sobre la producción de electricidad en centrales nucleares que, junto a la tasa de Enresa, incrementa enormemente el coste variable asociado a la generación de energía eléctrica de origen nuclear. La suma de estos dos costes asociados a la gestión del combustible usado es muy superior al coste de la primera parte del ciclo del combustible nuclear (minería del uranio, conversión, enriquecimiento y fabricación) y puede poner en entredicho la viabilidad económica de unas instalaciones que son fundamentales para asegurar la calidad del suministro y la producción eléctrica sin emisión de gases de efecto invernadero.

Debido a estos factores, la gestión segura y económica del combustible usado va a requerir, en un corto plazo, la valoración de otras opciones alternativas al almacenamiento directo del combustible usado en un almacén temporal y, más tarde, en el definitivo. Una de las opciones disponibles es el reprocesamiento del combustible usado, que tiene ya una gran madurez tecnológica, puede ser económicamente viable, reduce el volumen de los residuos radiactivos de alta actividad y su peligro radiotóxico, elimina parte de las incertidumbres tecnológicas y económicas asociadas al almacenamiento directo y, como se ha indicado anteriormente, permite utilizar el Pu almacenado en el combustible usado en la fabricación de combustible nuevo, eliminándose el riesgo de la proliferación nuclear.

PRÓLOGO

Como solución final a largo plazo para la gestión del combustible usado se deben considerar alternativas como la transmutación nuclear o los ciclos cerrados avanzados de reprocesamiento del combustible para su utilización en reactores avanzados de Generación IV que, además del plutonio, permiten consumir actínidos —que son los productos de fisión de vida media más larga—, lo que reduce enormemente la radio toxicidad del combustible usado.

Estas vías de futuro para la gestión del combustible usado conllevarán el desarrollo de capacidades y programas de investigación, tanto nacionales como internacionales, que permitan realizar el diseño de los nuevos reactores y solventar las incertidumbres asociadas al transporte y el almacenamiento definitivo del combustible nuclear usado.

Asimismo, dado el compromiso a largo plazo que implica la gestión del combustible nuclear usado, es necesario disponer de unas políticas nacionales claras y estables que permitan una gestión óptima del mismo, maximizando la seguridad y los limitados recursos disponibles.

Como conclusión, esta publicación presenta un valioso compendio de trabajos que contribuyen a responder a los retos asociados a la gestión del combustible nuclear usado y a orientar la toma de decisiones para su gestión a largo plazo.

Para finalizar, quiero agradecer a la Cátedra Rafael Mariño, en nombre de la Sociedad Nuclear Española, la realización de este magnífico Seminario y felicitarles por esta publicación, animándoles a seguir en la labor investigadora y divulgativa de la energía nuclear para la que siempre contará con nuestro apoyo.

RESUMEN EJECUTIVO

Ante los retos económicos, energéticos y medio ambientales, la definición de un modelo energético sostenible es una apuesta vital para España. La energía nuclear responde a los criterios de disponibilidad, estabilidad y reducción de las emisiones de CO₂, pero la polémica recurrente en torno a la gestión de los residuos que produce, y el interés suscitado por la construcción del Almacén Temporal Centralizado para el combustible usado y los residuos de alta actividad, en Villar de Cañas (Castilla-La Mancha), ponen de manifiesto que la aceptabilidad de la energía nuclear choca con las legítimas preocupaciones de la sociedad civil.

La sostenibilidad de un modelo energético pasa inevitablemente por su aceptación social y por ello, con el presente libro fruto del ciclo de Combustible Nuclear del Seminario Permanente deseamos contribuir a este debate y establecer a través de opiniones de expertos, las condiciones de sostenibilidad de la gestión del combustible nuclear, dando respuestas concretas a las dudas de los ciudadanos.

En el Capítulo I se presenta el ciclo de combustible nuclear, sus diversas fases desde la mina hasta el tratamiento de los residuos nucleares con las distintas tecnologías actuales disponibles.

En el Capítulo II, se describe el ciclo de gestión de combustible nuclear y se particulariza para el parque nuclear español y la decisión de la creación del almacén temporal centralizado (ATC) en Villar de Cañas.

El Capítulo III trata del estado del arte de la investigación en la gestión del combustible usado, elementos en los que se basa la investigación, las opciones de ciclo de combustible y su futuro y por último la investigación en el almacenamiento en seco en el ATC.

El Capítulo IV presenta el proyecto del ATC en Villar de Cañas, su origen, fases del proyecto y descripción del diseño y operación del mismo.

El Capítulo V muestra que la diferencia entre costes de reciclado y costes de ciclo abierto depende esencialmente de dos cuestiones de alto grado de incertidumbre. Por un lado el precio del uranio y por otro, el coste del Almacenamiento Geológico Profundo, que no se puede evaluar con precisión hoy día.

No obstante hay otros aspectos que intervienen en la toma de decisión sobre cómo gestionar el combustible nuclear usado como son la sostenibilidad tecnológica, medioambiental y social.

En los capítulos VI y VII finalmente se aborda el tema de la aceptabilidad social y el éxito de proyectos nucleares así como el papel de los periodistas científicos y la necesidad de especialización en la información y citando textualmente al autor del capítulo “No debemos confundir lo que vemos, que es noticia; con lo que sabemos, que es conocimiento; ni con lo que sentimos, que es opinión”.

CAPÍTULO I

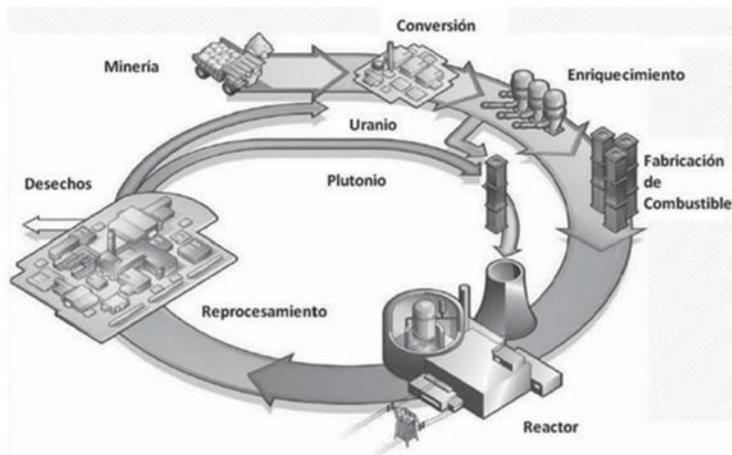
EL CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR. DE LA MINA AL ATC

Manuel Lozano Leyva
Universidad de Sevilla

1. INTRODUCCIÓN

El ciclo del combustible nuclear se divide en las siguientes fases, como puede verse en la figura 1.1.

Figura 1.1.
Ciclo del combustible nuclear



Fuente: elaboración propia

COMBUSTIBLE NUCLEAR

- Minería.
- Concentración.
- Conversión en UF_6 .
- Enriquecimiento.
- Fabricación del combustible.
- Operación del reactor.
- Tratamiento de residuos.

Para un año de funcionamiento de una central nuclear normal, de la mina se extraen unas 20.000 Tm de mineral de uranio al 1%. En la fase de concentración se obtienen 230 Tm de óxido de uranio, lo que supone unas 195 de Tm de uranio. En la conversión la cantidad de uranio se mantiene y tras el enriquecimiento se cuenta con 24 Tm de uranio enriquecido. Tras la conversión del UF_6 en UO_2 para fabricar el combustible, se producen 8.640 millones de KWh de electricidad y se generan 27 Tm de residuos, entre los que se distingue:

- 240 kg de plutonio.
- 23 Tm de uranio.
- 720 kg de fragmentos de fisión y transuránicos.

2. DE LA MINERÍA A LA PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD

La minería del uranio, necesaria para la extracción del mineral, se lleva a cabo fundamentalmente de dos formas: en minas de interior y en minas a cielo abierto. Esto supone un gran coste energético, y tiene además la desventaja de la emanación de radón (^{222}Rn) como producto de desintegración del uranio. El radón emite partículas alfa y, aunque para el ambiente no es un gran problema debido a que sólo tiene 4 días de vida, para los mineros sí lo es.

Gracias a la explosión de una estrella supernova existe el uranio en la Tierra, y además existe en grandes cantidades. Las reservas de uranio están muy repartidas a lo largo de todo el globo, y son suficientemente grandes como para abastecernos durante 100 años con el doble de centrales nucleares de las que ahora hay. Entre las 7 grandes compañías poseedoras de uranio Cameco (Canadá), Kazatprom (Kazakhtán), Rio Tinto (Australia), Areva (Francia), TVEL (Federación Rusa), BHP Billiton (Australia) y Navoi (Uzbequistán) suman en 77% del uranio del planeta y poseen el 61% de la minas, el resto están esparcidas por todo el planeta.

Los procesos dentro de las minas están muy estandarizados. Tras la molienda, disolución y precipitación del mineral de uranio se obtiene el óxido de uranio (también conocido como *yellowcake*). El problema del yellowcake es que para convertirlo en hexafluoruro de uranio (UF_6) tiene que estar

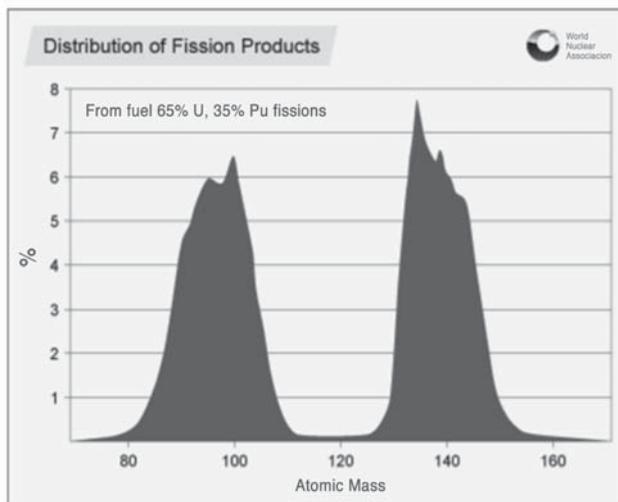
tratado con ácido fluorhídrico, y es un proceso delicado. El UF_6 es el gas más pesado que existe y que puede presentarse de forma natural, aunque no se transporta en forma gaseosa porque es demasiado corrosivo, sino en forma de óxido cristalino en recipientes de acero de unas 15 Tm. Es corrosivo, radiactivo y tóxico, pero ésta última característica es la más peligrosa.

El siguiente paso es el enriquecimiento. El método más extendido es la centrifugación, pues es el que menos energía consume. Se realiza en máquinas de más de 2 metros de alto, con tubos refrigerados, que llegan a alcanzar las 60.000 revoluciones por minuto. Esto supone una fuerza centrífuga de 1.000.000 de veces la fuerza de la gravedad, una fuerza muy intensa. Al meter el UF_6 en la centrifugadora el uranio-235 (^{235}U), que pesa menos que el uranio-238 (^{238}U), se va hacia la zona exterior por simple fuerza centrífuga. Se necesitan unas 10 o 20 etapas para completar el proceso.

La siguiente etapa es la fabricación del combustible. El uranio enriquecido tiene ya una forma de píldora, y varias de estos pellets forman las varillas de combustible, quedando presionadas por unos muelles. Las varillas se meten en los elementos combustibles formando las matrices del reactor (suelen ser de 17x17). Posteriormente, se procede a la producción de electricidad.

La fisión nuclear presenta un inconveniente: cuando los elementos fisioanan, no lo hacen siempre de la misma manera. Se da una distribución estadística de los fragmentos de fisión que puede verse en la figura 1.2. A lo largo

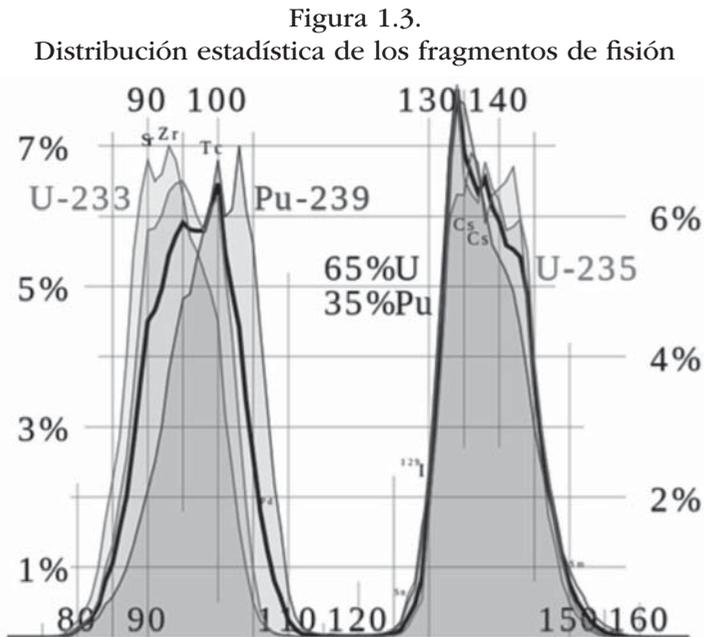
Figura 1.2.
Distribución estadística total de los fragmentos de fisión



Fuente: elaboración propia

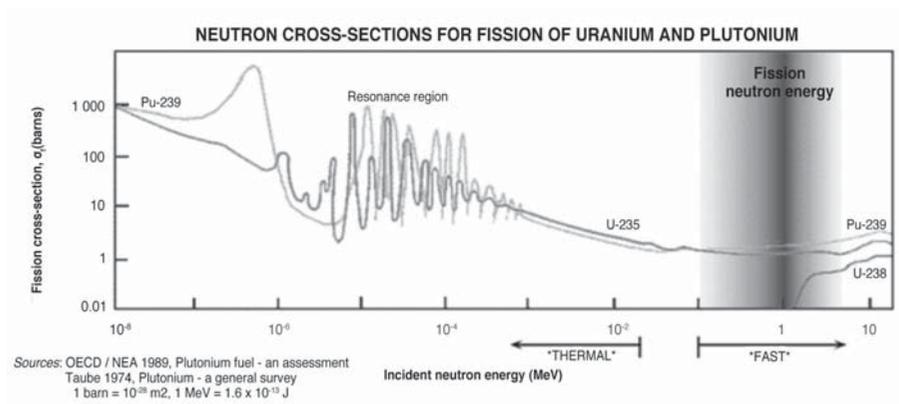
del tiempo, en la varilla comienza a formarse un surtido de fragmentos de fisión y actínidos muy variado, algunos incluso llegan a tener vidas medias de micro segundos y otros de decenas de años. Debido a que se ha quemado un 65% de uranio y un 35% de plutonio (incluso algo de uranio-233) hay tendencia a pensar que podría haber mayor variedad a la hora en dicha distribución, pero no es así. En la figura 1.3, se comparan las distribuciones para el uranio-235, plutonio-239, uranio-233 y la total. Obsérvese como las 3 primeras son muy parecidas, enriqueciendo así el surtido de isótopos radioactivos de fragmentos de fisión que se van acumulando en las varillas.

La probabilidad de que se produzca una dispersión elástica o cualquier tipo de reacción, incluida la fisión en un núcleo sobre el que incide un neutrón se conoce como sección eficaz de absorción de neutrones. En la figura 1.4.a se observa cómo hay una zona más ondulada, que se denomina zona de resonancia. En un medio rico de neutrones, que es el que produce y mantiene la reacción en cadena, cuando se hacen presentes muchos elementos con gran sección eficaz de absorción de neutrones (como el xenón-135) la reacción en cadena llega un momento que se detiene. Esta es la causa por la que hay que reponer el combustible en las centrales nucleares, cuando teóricamente una central nuclear debería poder estar décadas sin cambiar de combustible.



Fuente: elaboración propia

Figura 1.4.a.
Sección eficaz de absorción de neutrones del ^{235}U y ^{239}Pu



Fuente: elaboración propia

3. TRATAMIENTO DE RESIDUOS NUCLEARES

Cuando el combustible gastado sale de la central, todavía tiene entre un 95-96% de uranio. La proporción exacta se muestra en la tabla 1.1. Cada isótopo de uranio tiene un papel muy diferente. Algunos de los fragmentos de fisión son muy volátiles, y sirven para detectar cualquier posible fuga en alguna varilla.

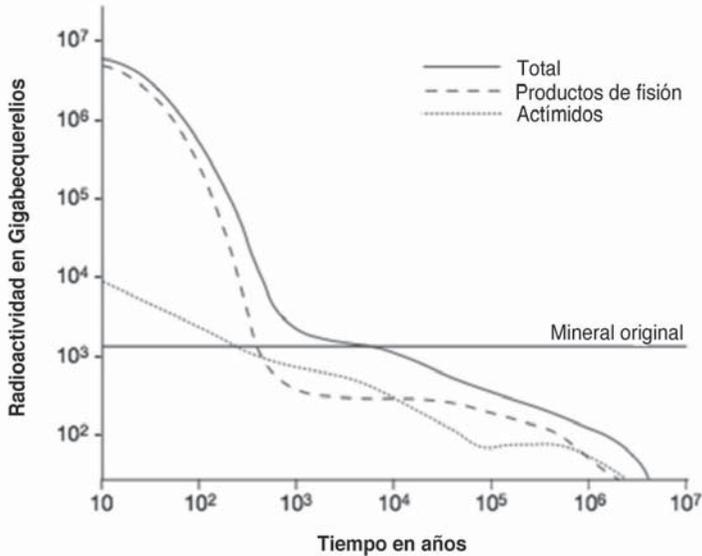
La radioactividad y la toxicidad de todos los elementos van decayendo con el tiempo. En la Figura 1.4.b se muestran estas características y la vida útil de los productos de fisión y los actínidos, nótese que la actividad está en escala logarítmica y en años, por lo que se tarda mucho en recuperar la actividad que tenía el mineral original en la mina.

Tabla 1.1.
Composición de los residuos

95.6%	Uranio (^{232}U : 0.1-0.3%; ^{234}U : 0.1-0.3%; ^{235}U : 0.5-1%; ^{236}U : 0.4-0.7%; ^{238}U : resto)
2.9%	Fragmentos de fisión estables
0.9%	Plutonio
0.3%	Cesio y Estroncio (fragmentos de fisión)
0.1%	Yodo y Tecnecio (fragmentos de fisión)
0.1%	Fragmentos de fisión de vida larga
0.1%	Americio, Curio y Neptunio (transuránicos de vida larga)

Figura 1.4b.

Evolución de la radioactividad de los productos de fisión y los actínidos



Fuente: elaboración propia

Ciclo abierto

Hasta antes de Fukushima, los residuos nucleares eran la primera preocupación en Europa. El combustible nuclear gastado se almacena de manera temporal en piscinas en las propias centrales, y posteriormente en ciclo abierto, se transporta en canisters hasta los almacenes centralizados de los que pasan, en la mayoría de los casos, a unos almacenes subterráneos geológicamente estables. El enterramiento de estos productos reactivos bajo tierra implica tener en mente una escala de tiempo de unos 1000 o 5000 años. Esta opción se lleva a cabo en Finlandia, por ejemplo.

Reprocesamiento

El reprocesamiento consta de las siguientes fases: troceado de las varillas, cizallado y disolución y extracción de los disolventes. Este último se lleva a cabo de través de unos procedimientos químicos muy complejos. Debido a la gran variedad de uranio, el plutonio es mucho más fácil de separar. Se llega a una vitrificación y luego se almacenan en unos

contenedores, mucho más pequeños que los de ciclo abierto, durante unos 100 años.

A pesar de que las fases del reprocesamiento son en general muy complejas y tienen procesos muy delicados, se están optimizando mucho, sobre todo los procesos químicos.

Hay cierto dilema en cuanto al reprocesamiento. Los principales argumentos en contra son que el precio del uranio debe subir mucho para que esta técnica sea rentable, que disminuye la cantidad y el volumen de los residuos pero no los elimina. Por otro lado, los defensores aseguran que los costos están disminuyendo y que hay expectativas de que lo harán todavía más y que supone el primer paso decisivo para la eliminación.

El reprocesamiento debe considerarse en un marco mucho más estratégico y a largo plazo. Dar este paso es posible, de hecho actualmente el gobierno de los Estados Unidos de América está considerando la opción de pasar directamente a la IV Generación, saltándose la tercera. En este sentido la separación del uranio y el plutonio tiene un papel fundamental.

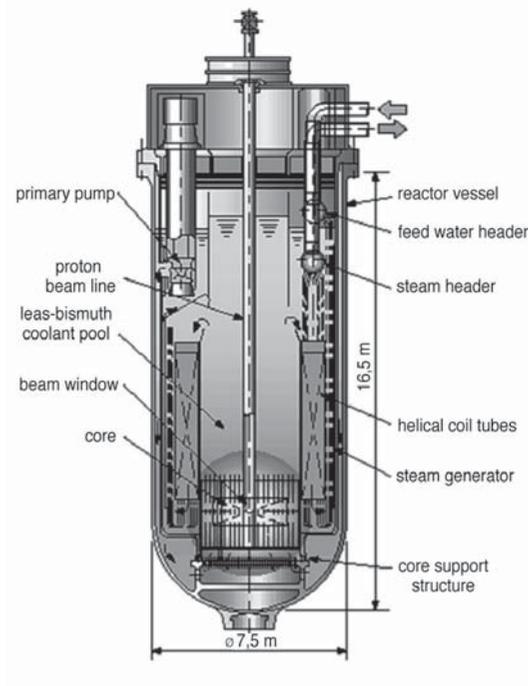
Transmutación nuclear

El Centro Europeo de Investigaciones Nucleares (CERN) está actualmente llevando a cabo un experimento llamado n-TOF (Neutrons Time of Flight), Neutrones en Tiempo de Vuelo. Para ello los investigadores (unas 180 personas, un número mucho más reducido de lo habitual) cuentan con un túnel de 185 metros en el que se inyectan protones a 20g (siendo g la aceleración de la gravedad), obteniéndose un poco más adelante el blanco. En la figura 1.5 puede verse el sistema ADS de aceleración de las partículas.

Los neutrones no se pueden acelerar porque no tienen carga eléctrica (el funcionamiento de los aceleradores de partículas se basa en esta característica eléctrica). Por esta razón, se provecha la sección eficaz de neutrones a distinta energía. Para acelerar estos neutrones se hacen estallar núcleos por espalación, es decir, se estrella un protón sobre un núcleo de blanco de plomo, en este caso, el plomo estalla y de él salen oleadas de neutrones, que son dirigidos por el túnel y en función del tiempo que tarden en llegar al final se puede calcular la energía que posee cada uno.

El objetivo de este proceso es que, por espalación, los neutrones que salen del estallido de cada uno de los núcleos sean capaces de aminorar la radiotoxicidad de los elementos radiactivos de los que se envuelve el blanco de plomo. De esta manera se espera que los neutrones sean capaces de transmutar los residuos radiactivos en elementos que tengan menos actividad. Aunque existe el riesgo de que si el neutrón choca con otra partícula,

Figura 1.5.
ADS (Accelerator Driven Systems)



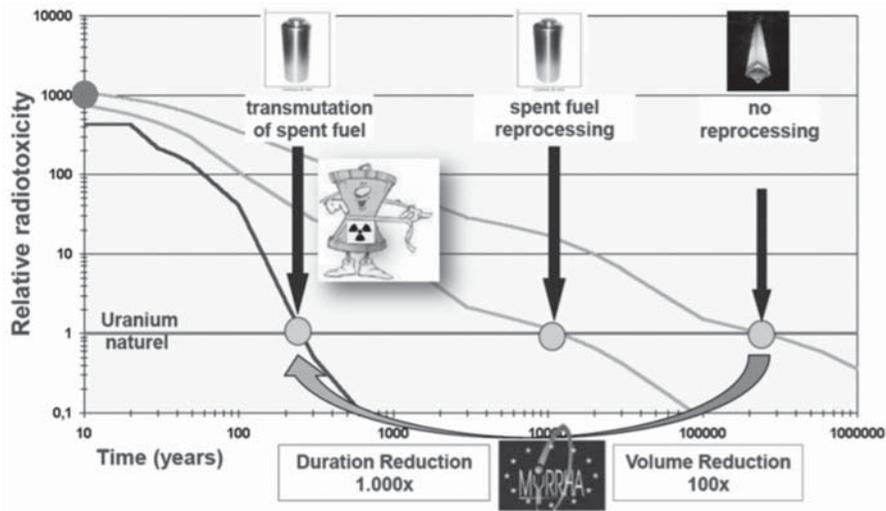
Fuente: elaboración propia

el lugar de hacia la que va dirigida, cause sobre ella el efecto contrario, sin embargo, todos los estudios estadísticos coinciden en que en un sistema controlado por aceleradores se puede disminuir este riesgo.

Una ventaja de esta investigación es que se está produciendo un acercamiento al ciclo del torio que, aunque tiene una serie de problemas, tiene también muchas ventajas, como ser 5 veces más abundante que el uranio, unas 40 veces más eficiente que el uranio, produce menos residuos y que la proliferación es imposible.

En la figura 1.6 se comparan los 3 procesos expuestos (ciclo abierto, reprocesamiento y transmutación). En esta figura se muestra como varía la toxicidad de los elementos radiactivos en función del tipo de proceso con el que se traten (nótese que la escala de tiempo está en escala logarítmica). Con el ciclo abierto habitual, son necesarios más de 200.000 años para recuperar la toxicidad del uranio natural. Con un reprocesamiento este tiempo se reduce más 10 veces, necesitando unos 10.000 años, y con la transmutación se necesitarían apenas 300 años.

Figura 1.6.
Evolución de la radiotoxicidad en función del tipo de tratamiento de residuos



Fuente: elaboración propia

Actualmente la transmutación está en fase científica, todavía no se tiene la tecnología ni la ingeniería necesaria para llevarlo a cabo, lo que la sitúa en un muy largo plazo. Es una técnica pensada como complementación del reprocesamiento, es decir, para usarla sobre los productos una vez reprocesados.

CAPÍTULO II

GESTIÓN DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR

Lorenzo Francia González
UNESA

1. INTRODUCCIÓN

En 2011 la capacidad eléctrica total instalada en España era de más de 105.000 GW, compartida entre las distintas tecnologías. En cuanto a energía nuclear, la capacidad instalada en diciembre de ese mismo año era de 7.850 GW, lo que supone un 8% de la capacidad total. Actualmente, tras la acreditación de nueva potencia a la central de Almaraz, esta potencia de energía nuclear ha aumentado.

La energía nuclear en España funciona dentro del régimen ordinario, régimen que produce dos terceras partes de la electricidad generada en el país. La producción nuclear es siempre muy predecible, suele estar alrededor de los 55 o 60 millones de MWh al año, variando en función del número de recargas de las unidades de las centrales. Con ese 8% de capacidad instalada se abastece, gracias a unos grandes factores de funcionamiento, tanto de disponibilidad como de carga y operación, un 20% a todo el suministro de energía eléctrica.

En España existen 8 centrales nucleares, una fábrica de combustible nuclear en Juzbado (Salamanca) y un centro de almacenamiento de residuos de media y baja actividad en El Cabril (Córdoba). Las centrales en activo actualmente son:

- Santa María de Garoña (466 MW).

- Trillo (1066 MW).
- Ascó I (1032 MW) y Ascó II (1027 MW).
- Vandellós II (1087 MW).
- Cofrentes (1092 MW).
- Almaraz I (1035 MW) y Almaraz II (1045 MW).

En la figura 2.1 se muestran las centrales activas, el centro de almacenamiento de El Cabril, la fábrica de combustible y las centrales que han sido desmanteladas o están en fase de serlo (José Cabrera y Vandellós I).

De las 8 unidades activas, 2 de ellas cuentan con un reactor de agua en ebullición de General Electric BWR-GE (Cofrentes y Santa M^a de Garoña), 6 con un reactor de agua a presión de Westinghouse PWR-W (Almaraz I y II, Ascó 1 y 2 y Vandellós II) y Trillo que es la única que tiene un reactor de agua a presión de Siemens PWR-KWU.

El gran interrogante presente actualmente es el futuro de Santa M^a de Garoña, cuyo periodo de validez finaliza en junio de 2013, mientras que el periodo de validez del resto de centrales no finaliza hasta 2020 o 2021, excepto Trillo que lo hace en noviembre de 2014.

Figura 2.1.
Mapa de las centrales nucleares en España



Fuente: elaboración propia

2. CICLO DE GESTIÓN DE COMBUSTIBLE NUCLEAR

1ª Parte del Ciclo Nuclear (Front-End)

Hasta el año 1997 el mercado eléctrico estaba regulado, pero a raíz de la Ley del Sector Eléctrico de este mismo año el mercado de generación y comercialización de la electricidad se liberalizó.

Hasta entonces, en el mercado regulado, existía un stock básico de uranio que estaba financiado mediante un porcentaje de cargo en la factura eléctrica de los consumidores. Desde entonces se introdujo en el mercado y a partir del Real Decreto R.D 1464/1999 se creó el stock de reserva. Las condiciones que estableció el Real Decreto fueron que:

- el stock de reserva debería ser suficiente para un abastecimiento de al menos 5 años de las centrales españolas;
- cada central estaba obligada a tener almacenada a menos una recarga dos meses antes del final de ciclo;
- requería la fundación conjunta de una reserva física de uranio enriquecido.

El stock de reserva es un stock físico que está almacenado en la fábrica de combustible de Juzbado en forma de polvo, listo para ser *pelletizado*, y a día de hoy (con la última revisión del Real Decreto) el stock de reserva debe ser de 721.000 kg de ^{308}U y 363.000 UTS (Unidades de Trabajo de Separación).

La última condición expuesta por el Real Decreto dio lugar a que las cuatro empresas eléctricas que tenían activos nucleares (Iberdrola, Endesa, Gas Natural Fenosa y HC Energía) crearan, en 1999, la Comisión de Aprovisionamiento del Uranio (CAU). Además de estas 4 eléctricas, ENUSA cuenta con dos representantes en la CAU, los cuales tienen voz pero no voto. ENUSA en la CAU es, a todos los efectos, como un agente de compra de las empresas eléctricas para la gestión del combustible.

La función de la CAU es definir las políticas de aprovisionamiento y las estrategias de cobertura de aprovisionamiento del uranio para medio y largo plazo (asegurarlos para un mínimo de 5 años). La CAU funciona como un *pool* de compras para todos los reactores españoles. Esto supone una serie de ventajas como son:

- El aumento de la capacidad de negociación con los suministradores de uranio. De esta forma se fomenta la competencia entre los distintos proveedores, pudiendo acceder a unos precios más competitivos.
- La diversificación y reducción de riesgos en la compra del combustible, puesto que el número de posibles suministradores de diferentes países es mayor, y se favorece la compra de suministradores principales y de buena reputación frente a los intermediarios.

COMBUSTIBLE NUCLEAR

- Una mayor flexibilidad a la hora de satisfacer las necesidades y la posibilidad de crear estrategias para aprovechar oportunidades a medio o largo plazo en el mercado de stocks.

De esta forma se asegura un mismo precio del uranio enriquecido para todas las centrales españolas.

Los concentrados de ³⁰⁸U que compra España lo hace principalmente a Cameco (Canadá), Rio Tinto (Australia) y Cominak (Francia). La conversión es suministrada por los principales suministradores mundiales: Comurhex, Cameco, Converdyn y Tenex, y el enriquecimiento se reparte entre cuatro suministradores (Eurodif, Urenco, Usec y Tenex). La fabricación del combustible en su mayoría de la fábrica de combustible de ENUSA en Juzbado, que carga los reactores de Almaraz, Ascó, Vandellós II, Garoña y Cofrentes. Trillo trabaja con Areva, y Cofrentes comparte el combustible de ENUSA con el de Areva y Westinghouse Sweden.

En la tabla 2.1 se muestra la producción mundial de uranio enriquecido en 2010 y la previsión para el año 2020.

Tabla 2.1.
Producción mundial de uranio enriquecido en 2010
y previsión para 2020

País	Compañía, planta	2010	2020
Francia	Areva, Georges Besse I & II	8.500	7.500
Alemania – UK – Países Bajos	Urenco	12.800	12.300
Japón	JNFL, Rokkaasho	150	1.500
EE.UU	USEC, Paducah & Piketon	11.300	3.800
EE.UU	Urenco, Nuevo México	200	5.900
EE.UU	Areva, Idaho Falls	–	3.300
EE.UU	Global Laser Enrichment	–	3.500
Rusia	Tenex	23.000	32.000
China	CNNC, Hanzhum & Lanzhou	1.300	7.000
Pakistán, Brasil, Irán	Varias	100	300
Total UTS		57.350	77.100

2ª Parte del Ciclo Nuclear (Back-End)

En España está actualmente vigente el ciclo abierto en cuanto a la gestión del combustible usado, siendo ENRESA el encargado de la gestión de

estos combustibles radioactivos así como del desmantelamiento de las centrales nucleares en España. El coste de esta gestión de residuos actualmente lo asumen las propias centrales nucleares, pero hasta 2005 lo costeaban los propios consumidores a través de un porcentaje en su factura eléctrica. En España no existe el reprocesamiento, únicamente se reprocesó el combustible de Valdellós I y otros residuos de media actividad de esta misma central, que fue enviado a Francia, y los primeros residuos de Garoña que fueron enviados a Reino Unido. ENRESA ha negociado para que vuelvan a España una cantidad equivalente a los residuos enviados a Francia pero en forma de residuos de alta actividad, en menos volumen pero mucho más unificados y mucho más tratables que otros residuos.

Actualmente el combustible usado se almacena en piscinas de combustible en las propias centrales, pero por el retraso que ha habido en establecer el almacén temporal centralizado (ATC), las centrales procedieron a ampliar la capacidad de sus piscinas, pero no en volumen, sino que se restableció a través de los bastidores de almacenamiento en piscina del combustible, haciéndolos más compactos y utilizando boro en su estructura para evitar la masa crítica. Aun así, algunas centrales han tenido que extraer el combustible de las piscinas, en algunos casos para liberar la piscina y poder acceder al desmantelamiento (como es el caso de la central José Cabrera, que se vació la piscina y se produjo un almacenamiento en seco) y en otros por problemas de capacidad, como Trillo que, después de un aumento de capacidad y siendo la central más joven, fue la primera que tuvo que establecer un almacenamiento temporal individual (ATI) de 22 contenedores, y Ascó que pasará a utilizarlo en la próxima recarga de abril. ENRESA es la encargada de diseñar y dar licencia a los contenedores, y las centrales son las encargadas de llevar a cabo las operaciones del ATI y de todas las maniobras dentro de su propio emplazamiento.

En la tabla 2.2 se muestra el combustible que se tenía en España en diciembre de 2011, que suman unas 4.200 toneladas de uranio.

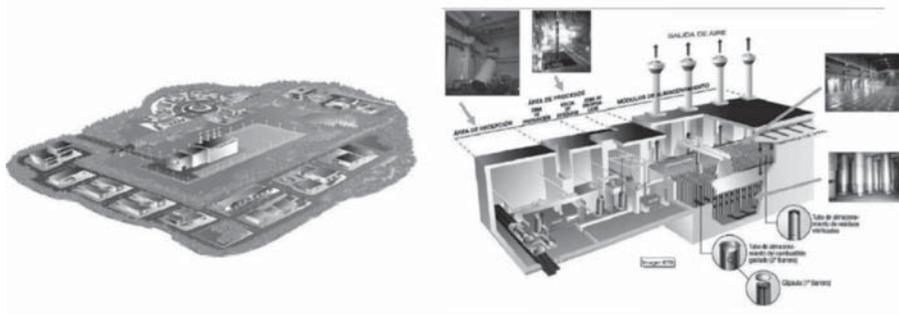
A principios de 2012 se tomó la decisión de tener un (ATC) en España, y su ubicación será en Villar de Cañas (Cuenca). El terreno en el que se ubicará el centro de almacenamiento ha sido adquirido por ENRESA y el diseño técnico y tecnológico ya ha sido realizado, y se espera que esté todo preparado para entrar en operación en 2017. Esto supone un gran impacto en todo lo relacionado con la gestión del combustible usado en las centrales nucleares porque, por ejemplo, esto da lugar a que UNESA y ENRESA, dentro de la asociación paritaria que mantienen, creen un grupo específico de trabajo para desarrollar los criterios de aceptación del combustible usado y de los residuos especiales asociados al combustible en el ATC.

COMBUSTIBLE NUCLEAR

Tabla 2.2.
Combustible almacenado en España en 2011

	combustible gastado almacenado (elementos combustibles)			combustible gastado total (tU)
	en piscina	en seco	total	
Centrales nucleares en operación	12.088	441	12.529	4.127
Garroña	2.105		2.105	370
Almaraz 1	1.264		1.264	583
Almaraz 2	1.192		1.192	550
Asco 1	1.164		1.164	530
Asco 2	1.136		1.136	519
Cofrentes	3.724		3.724	676
Vandellos 2	964		964	435
Trillo	539	441	980	464
Centrales nucleares en clausura	0	377	377	100
J. Cabrera		377	377	100
TOTAL	12.088	818	12.906	4.227

Figura 2.2.
Proyecto del ATC en Villar de Cañas (Cuenca)



Fuente: elaboración propia

El accidente de Fukushima ha tenido un fuerte impacto sobre el mercado de combustibles nucleares y sobre la gestión de éste. Sus primeras consecuencias son visibles en la parada de los programas nucleares de muchos países, extensión de vida y operación a largo plazo de las centrales nucleares, nuevos requisitos y criterios para el ATC y nuevas tasas y medidas fiscales.

CAPÍTULO III
INVESTIGACIÓN Y GESTIÓN
DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR USADO

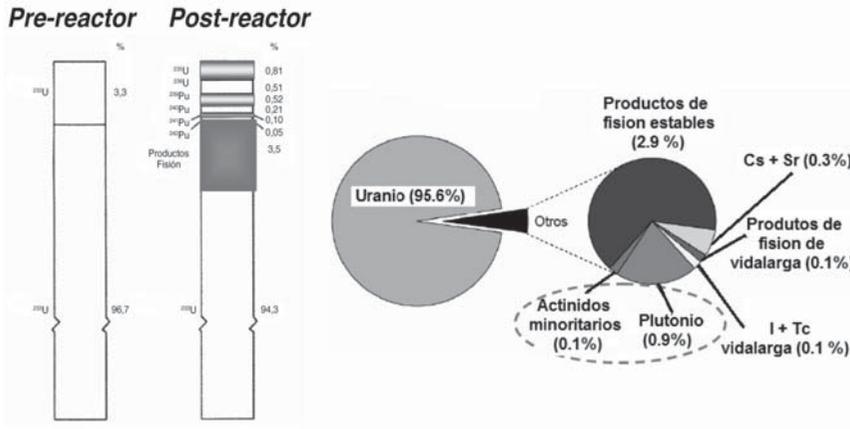
Luis E. Herranz
CIEMAT

1. INTRODUCCIÓN

La motivación para el desarrollo de investigación en la gestión del Combustible Nuclear Gastado (CNG) se basa en tres elementos:

- Características intrínsecas del combustible nuclear gastado; el CNG presenta una *elevada densidad radiactiva*, una *larga duración de la radiactividad* y una *carga térmica agresiva*. La razón última de estas características se halla en su composición (figura 3.1). Previo a su irradiación en el reactor, el combustible tiene un enriquecimiento (i.e., porcentaje de material físil) comprendido entre el 3 y el 4,5%. Tras la generación de energía en el reactor, se puede observar que cuantitativamente no existen grandes cambios en el combustible, siendo casi el 96% uranio. No obstante, existen algunos cambios cualitativos de extraordinaria relevancia que conviene subrayar. Aparecen en el combustible productos de fisión (alrededor del 3%), algunos de los cuales manifiestan gran carga térmica y, más importante aún, actínidos minoritarios (Np, Am y Cm) y plutonio (1% aproximadamente), algunos de cuyos isótopos tienen períodos de semi-desintegración muy largos. Por último, merece especial atención el hecho de que, a pesar de su agotamiento parcial en la producción de energía, el combustible aún contendría entre un 1 y un 1,5%, aproximadamente

Figura 3.1.
Composición del combustible nuclear
tras una irradiación aproximada de 30 GWd/t

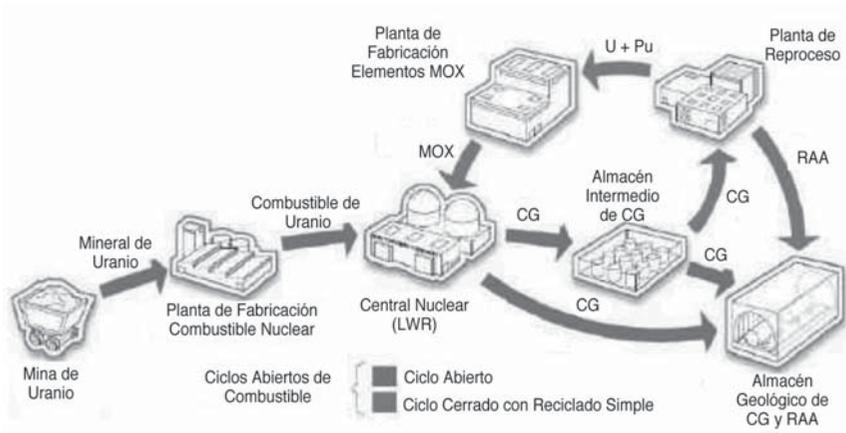


Fuente: Foro Nuclear con modificaciones propias

de isótopos capaces de sufrir fisión; en otras palabras, al extraer el combustible del reactor su potencial para producir energía es aún un 30-40% del que poseía antes de entrar en el reactor.

- Las estrategias de operación. Una vez irradiado existen en distinguas opciones para la gestión del combustible (figura 3.2):
 - *Ciclo abierto:* El combustible se irradia una sola vez y, tras ella, no se considera ninguna utilización posterior; su destino último, después de décadas de almacenamiento temporal, será un Almacén Geológico Profundo (AGP).
 - *Ciclo cerrado:* El combustible irradiado se procesa tras su almacenamiento temporal con objeto de reutilizar los recursos energéticos aún presentes en su composición tras la irradiación; el proceso, industrialmente implantado (Francia, Japón y Reino Unido), se denomina PUREX y permite la recuperación del uranio y plutonio aptos para la generación de energía y la fabricación del denominado combustible de óxidos mixtos, MOX, para su reutilización. Los residuos radiactivos de alta actividad generados en el proceso, son acondicionados mediante vitrificación para su posterior almacenamiento final.
 - *Ciclo cerrado avanzado:* Aún en fase de desarrollo, incluye el ciclo cerrado y la separación y transmutación de los actínidos minoritarios y algunos productos de fisión. El resultado sería una

Figura 3.2.
Opciones de gestión del combustible nuclear usado



Fuente: ENRESA con modificaciones propias

reducción drástica del nivel y la duración de la radiotoxicidad del combustible irradiado, además de la posible reutilización de estos compuestos para producción de energía.

- Evolución de diseños y operación. El incremento del grado de quemado del combustible desde los 25-30 GWd/t de los años 70 hasta los actuales 50-55 GWd/t, supone un ascenso del enriquecimiento inicial del combustible hasta niveles del 4 al 4,5%; este cambio en la composición del combustible ha estado acompañado de la evolución en los materiales de vaina. Asimismo, las propias condiciones en reactor y la optimización de diseños han permitido ir a períodos de irradiación más largos de combustible con tasas de fallo cada vez menores.

2. IDENTIDAD

La caracterización del combustible nuclear irradiado se puede realizar mediante 4 indicadores:

- **Composición:** Tal cual se citó en la sección anterior, la composición del combustible gastado difiere de la composición del combustible no irradiado. La tabla 3.1 presenta los elementos existentes en un combustible irradiado actual (45 GWd/t, aproximadamente).

Tabla 3.1.
Composición del combustible gastado

Elemento	Porcentaje (%)
Uranio (U)	94,8
Productos de Fisión (PF)	4
Plutonio (Pu)	1
Neptunio (Np)	0,06
Americio (Am)	0,05
Curio (Cm)	0,005

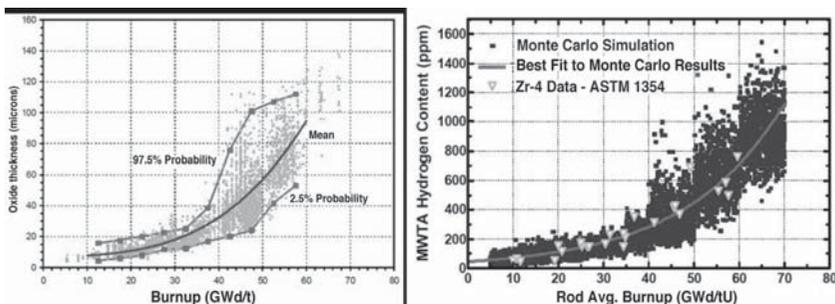
- **Presión interna:** Algunos de los productos de fisión producidos durante la generación de energía en el reactor son gases (i.e., Xe, Kr, I, etc.) y, como consecuencia, presurizan la barra de combustible.
- **Cambios en la vaina:** El contacto de la vaina (aleación de circonio, Zry) con el refrigerante (i.e., agua) durante períodos prolongados, supone su degradación mediante la reacción de oxidación,



Consecuencia de ella, una fracción del metal se transforma en óxido, con la consiguiente pérdida de propiedades mecánicas; y, además, se absorbe una fracción del hidrógeno (H₂) producido, lo que resulta en una fragilización adicional del material metálico remanente. La Figura III-3 muestra la evolución de ambos efectos con el grado de quemado.

- **Estructura:** El aumento del grado de quemado del combustible en busca de la obtención de mayor energía específica, conduce inexorablemente

Figura 3.3.
Cambios en la vaina a lo largo de la irradiación



Fuente: Rashid, Y.R., 2007. EPRI Report 1015048

a la modificación de la estructura radial de la pastilla de combustible. Aparece en la periferia de la pastilla una región de profundidad creciente con el quemado (en torno a las 100-200 μm para quemados de 60-70 GWd/t) donde los granos de combustible se caracterizan por una relación superficie/volumen sustancialmente mayor que en el centro de la pastilla. Este hecho podría dar lugar a un aumento de la liberación de gases y, por ende, de la presión interna de barra.

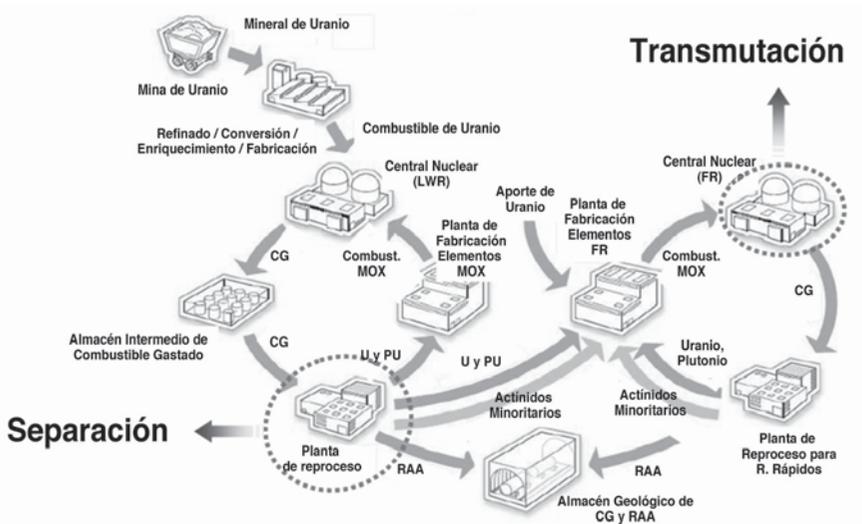
3. OPCIONES DE CICLO DE COMBUSTIBLE

La figura 3.4 recoge todas las opciones de ciclo de combustible descritas anteriormente, incluido el ciclo cerrado avanzado. En él, el uranio y plutonio reprocesados, a diferencia del ciclo cerrado al uso, se utilizan para fabricar combustibles avanzados para Reactores Rápidos Reproductores (RRR). Tras su irradiación en RRR, el combustible permitiría nuevamente repetir su reciclado un número de veces.

El ciclo cerrado avanzado, por tanto, supone una extraordinaria potenciación de la sostenibilidad de la energía nuclear, debido a 4 factores fundamentales:

- Reducción de volumen y carga térmica del residuo.

Figura 3.4.
Ciclo cerrado avanzado



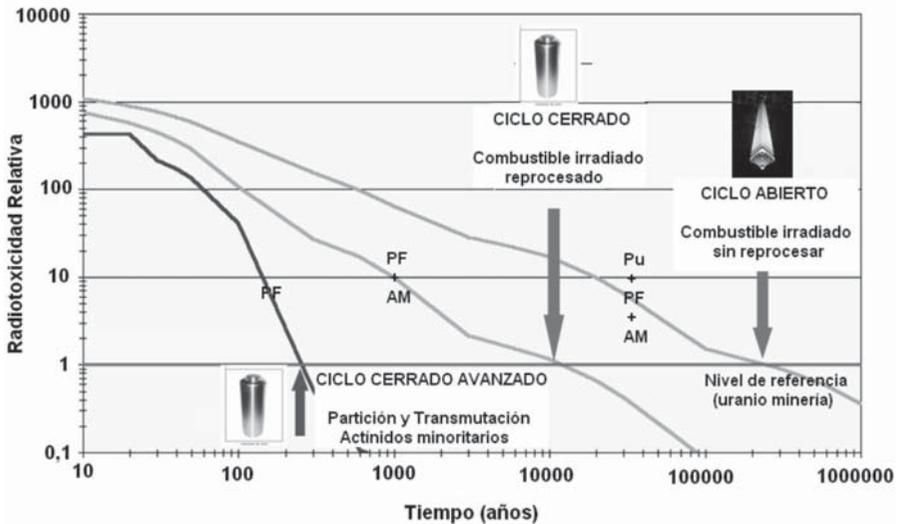
Fuente: elaboración ENRESA con modificaciones propias

- *Disminución de la radiotoxicidad del residuo* (figura 3.5). Aunque el acortamiento temporal de la radiotoxicidad es ya considerable en el ciclo cerrado actual, en caso de separar los actínidos minoritarios de los productos de fisión y la posterior transmutación de los primeros en RRR (o reactores diseñados para tal función —reactores transmutadores—), la radiotoxicidad caería por debajo del umbral admisible en pocos cientos de años.
- *Extensión del horizonte temporal del recurso energético*. Consecuencia inmediata de la existencia de RRR y su capacidad asociada de reciclaje múltiple.
- *Resistencia a la proliferación*. Siempre que el reciclado de radionucleidos transuránicos se haga mediante técnicas de reprocesado homogéneo (i.e., sin separación específica de tales isótopos), el acceso a material apto para la construcción de armas nucleares resultaría más complejo.

Habida cuenta de lo dicho anteriormente, hay que subrayar que el desarrollo de los ciclos cerrados avanzados requiere resolver dos aspectos clave para esta tecnología: la separación de plutonio y actínidos minoritarios, y la transmutación de los actínidos minoritarios en radionúclidos de menor vida media.

La separación de los actínidos minoritarios es compleja. Su elevada reactividad química y su semejanza a la de los productos de fisión

Figura 3.5.
Radiotoxicidad del combustible nuclear gastado



Fuente: ENRESA con modificaciones propias

denominados lantánidos (Nd, Pm, Sm, etc.), en mucha mayor proporción en el combustible, dificultan la partición selectiva de estos elementos. Actualmente existen dos líneas de investigación para lograr la separación de los actínidos minoritarios:

Procesos de Separación Hidrometalúrgica, cuyo procedimiento radica en la extracción en disolventes orgánicos de los actínidos minoritarios presentes en solución acuosa. Es el proceso más desarrollado. Basadas en el proceso PUREX, existen diversas alternativas en desarrollo, tal es el caso de los procesos SANEX o GANEX. Su viabilidad y eficiencia están siendo estudiadas por varios laboratorios; entre ellos merece especial mención la actividad del CEA (*Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives*) en Francia.

Procesos de Separación Pirometalúrgica, cuya base es la separación electroquímica de elementos presentes en el combustible irradiado en medios salinos a elevada temperatura.

Cada una de estas líneas de investigación tiene ventajas e inconvenientes. Aunque su discusión queda fuera del alcance de este capítulo, baste decir que la línea separación hidrometalúrgica se halla en una fase más avanzada de su desarrollo, habiendo realizado incluso ensayos a escala industrial.

La transmutación supone retos de envergadura. Algunos de ellos son: el diseño y construcción de nuevos sistemas de generación de energía, como los reactores rápidos reproductores (RRR) citados anteriormente; el desarrollo de sistemas dedicados únicamente a la transmutación, los denominados sistemas sub-críticos ADS (*Accelerator Driven System*); el desarrollo de nuevos tipos de reciclado; y el análisis de escenarios futuribles para la energía nuclear, en caso de existir la tecnología. Actualmente se contemplan dos vías de transmutación:

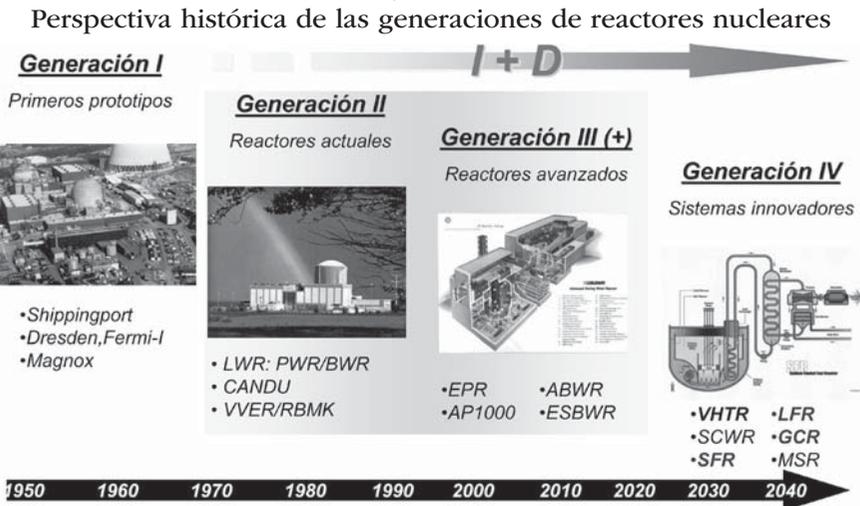
- *Método homogéneo.* Plutonio y actínidos minoritarios permanecen unidos en su separación conjunta del resto del combustible gastado. La principal ventaja, como se dijo en la sección anterior, es la dificultad de proliferación al no disponer individualmente del plutonio; su inconveniente es la existencia de un umbral máximo que podría introducirse en un RRR (2-4%).
- *Método heterogéneo.* Plutonio y actínidos minoritarios se separan y cada uno de ellos se transmuta de manera independiente. Este procedimiento permite gran flexibilidad en el proceso de transmutación, pero ofrece acceso al inventario de plutonio en alguna de sus etapas.

En cuanto a los escenarios actualmente en estudio, existen varios planteados. El primero de ellos es aquel en el que exista amplia disposición de RRR que permitiera la transmutación homogénea; alternativamente, se ha planteado la estrategia denominada de «doble capa», en la que el plutonio separado

se transmutaría en reactores convencionales y los actínidos minoritarios se transmutarían en sistemas sub-críticos diseñados a tal fin; finalmente, cabría aplicar la aproximación homogénea en sistemas sub-críticos con la reducción de inventario como único objetivo (i.e., renunciando a la producción de energía).

La figura 3.6 muestra la evolución tecnológica de las distintas generaciones de reactores nucleares. Los RRR se encuentran en la llamada Generación IV, aunque no todos los de este grupo son rápidos reproductores. Los RRRs contemplados actualmente se distinguen, fundamentalmente, por el refrigerante adoptado en su concepción: sodio, en el caso del SFR (*Sodium Fast Reactor*), plomo o plomo-bismuto, en el caso del LFR (*Lead Fast Reactor*) y gas, en el caso del GFR (*Gas Fast Reactor*). Múltiples aspectos de todos y cada uno de ellos están siendo actualmente investigados, destacando el SFR como la tecnología que parece más próxima en el tiempo, dada la experiencia previa acumulada a través de reactores como Phénix, Super-Phénix, en Francia, o BN-300 en Rusia. Numerosos proyectos se hallan enmarcados en la tecnología SFR dentro de VII Programa Marco de EURATOM (Comunidad Europea de Energía Atómica).

Figura 3.6.



Fuente: Foro nuclear con modificaciones propias

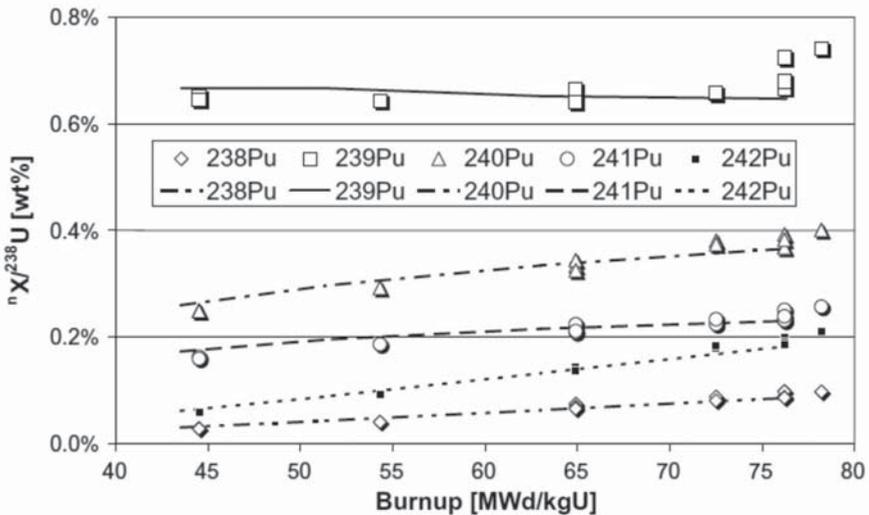
4. ALMACENAMIENTO EN SECO

Con independencia de la gestión futura del combustible irradiado en España, existe una etapa intermedia entre la refrigeración del combustible

en las piscinas del reactor y su destino final, sea almacenamiento definitivo o reproceso avanzado, que requiere asimismo investigación: el **almacenamiento en seco del combustible**. Los criterios de seguridad que aplican son: control de la radiación, evacuación del calor de decaimiento, mantenimiento de la subcriticidad, confinamiento del material radiactivo y recuperabilidad del combustible. Todos ellos apuntan la necesidad de conocer la composición del combustible gastado y mantener la integridad de la vaina del combustible durante las décadas o centenas de años que esté almacenado. La primera tiene implicaciones directas en la criticidad, la eliminación del calor residual y los blindajes; su consecución se logra a través de una caracterización isotópica detallada, lo cual exige disponer de metodologías validadas y bases de datos fiables contra las que comparar.

En el año 2010 se han publicado los resultados obtenidos en proyectos de investigación de isotopía en los que han participado ENRESA (Empresa Nacional de Residuos), ENUSA (Empresa Nacional del Uranio) y el CSN (Consejo de Seguridad Nuclear). A partir de 9 muestras de barras de combustible enriquecidas al 4,5% e irradiadas en la central nuclear Vandellós II (Tarragona) hasta grados de quemado alrededor de 70 GWd/t, se analizó el contenido en más de 50 radionucleidos. En la figura 3.7 se puede observar un ejemplo de tales comparaciones para el plutonio (los puntos representan los datos experimentales, mientras que las líneas son las estimaciones teóricas).

Figura 3.7.
Capacidad predictiva de la isotopía del combustible (plutonio)



Fuente: Journal of Nuclear Materials, 2010

En cuanto a integridad de la vaina durante el almacenamiento en seco del combustible, dos son las amenazas potenciales sometidas a mayor investigación actualmente (figura 3.8):

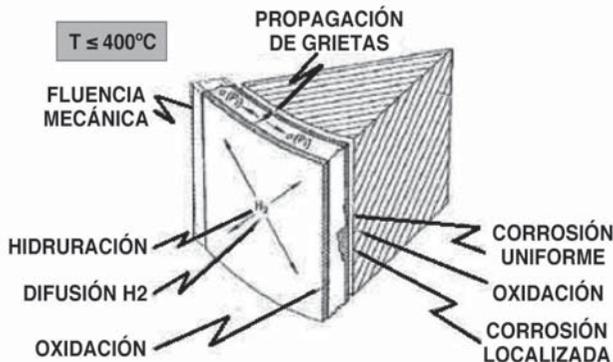
- la deformación por fluencia mecánica fuera de diseño,
- la fragilización por precipitación y reorientación de hidruros de circonio.

El comportamiento de los materiales de vaina está siendo estudiado experimentalmente en condiciones de almacenamiento. El objetivo fundamental es obtener datos mediante los cuales se establezcan leyes que describan su deformación al estar sometidos a una tensión constante a alta temperatura (i.e., por encima del 50% del punto de fusión del material).

El hidrógeno formado por la oxidación del circonio es absorbido parcialmente por la vaina. Su acumulación más allá de las concentraciones de saturación, provoca su precipitación en forma de plaquetas de hidruros que se orientan circunferencialmente. El comportamiento frágil de éstas y su posible redisolución y precipitación posterior en dirección radial a determinadas presiones internas, ha apuntado la necesidad de determinar la máxima carga mecánica que podría resistir la vaina antes de dicha reorientación.

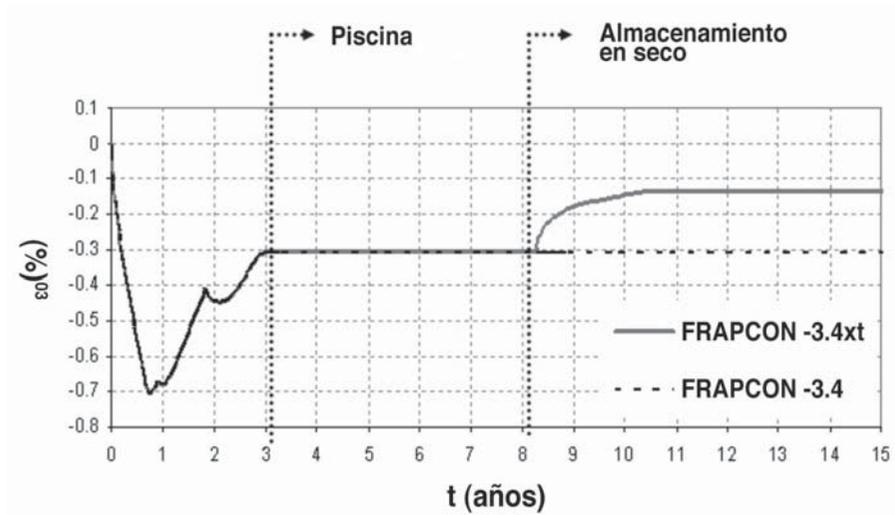
Estudios teóricos realizados en CIEMAT indican que la consideración de ambos fenómenos, fluencia mecánica e hidruración, podrían causar la deformación de la vaina y la alteración de sus propiedades mecánicas, de acuerdo con las capacidades predictivas desarrolladas (figura 3.9). No obstante, estos estudios se consideran preliminares en tanto no exista una validación que acredite la adecuación de las herramientas analíticas empleadas.

Figura 3.8.
Integridad de la vaina



Fuente: elaboración propia

Figura 3.9.
Integridad de la vaina



Fuente: Unidad de Investigación en Seguridad Nuclear, CIEMAT

Además de las amenazas a la integridad de la vaina discutidas en los párrafos anteriores, el deterioro adicional de la vaina por efecto de la formación tardía de hidruros bajo tensión, es asimismo objeto de investigación.

5. CONSIDERACIONES FINALES

La investigación sobre aspectos de la gestión del combustible irradiado es esencial para:

1. Garantizar en cualquier circunstancia su seguridad.
2. Desarrollar opciones tecnológicamente óptimas y viables, que permitan optimizar su gestión.

A largo plazo (20 años) la mirada está puesta en la consecución industrial de la opción avanzada del ciclo cerrado. A pesar de los desafíos tecnológicos sustanciales que plantea, los resultados que se están obteniendo son prometedores. En cualquier caso han de mantenerse los estudios en marcha relativos al Almacenamiento Geológico Profundo, cuya necesidad no desaparecerá incluso si se lograra hacer realidad el ciclo cerrado avanzado. En el corto y medio plazo es imprescindible garantizar el adecuado comportamiento del combustible durante su almacenamiento temporal en seco en los horizontes temporales previstos.

La inminente construcción de un Almacén Temporal Centralizado (ATC) en España supondrá un impulso sustancial a la investigación en esta área. En este sentido, conviene mencionar que el transporte de combustible irradiado así como una posible extensión temporal del almacén de combustible, debería estar apoyada en actividades de investigación específicas.

6. AGRADECIMIENTOS

El autor desea manifestar su agradecimiento al Dr. Francisco Feria, miembro del equipo de la Unidad de Investigación en Seguridad Nuclear, por su apoyo en la preparación del manuscrito.

CAPÍTULO IV
**LA GESTIÓN DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR GASTADO.
EL ATC**

Pablo Zuloaga
ENRESA

1. INTRODUCCIÓN

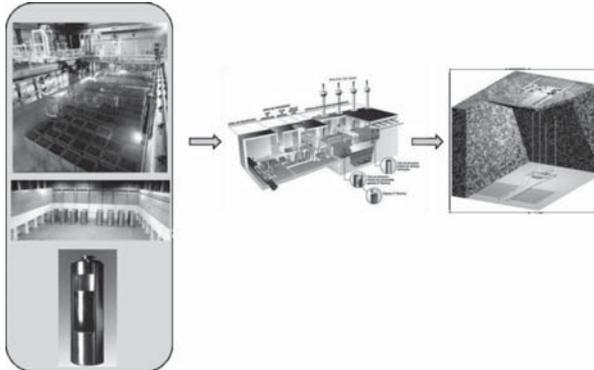
El capítulo que vamos a abordar no trata tan solo el almacenamiento temporal centralizado (ATC) de España, si no que se tratará la gestión del combustible nuclear gastado desde el punto de vista del gestor y dada la importancia del ATC se expondrá el estado actual del proyecto.

Algunos aspectos que condicionan la gestión del combustible gastado son:

- La presencia de materiales energéticos (uranio empobrecido, plutonio, actínidos minoritarios y productos de fisión) que son altamente radiactivos por lo que su manejo debe ser siempre de manera remota.
- Los periodos considerados de gestión ulterior son largos y requieren evaluaciones de seguridad para plazos de centenares o miles de años.
- La radiactividad del combustible gastado generara calor por lo que las condiciones de enfriamiento deben ser cercanas a 1kW/elemento de combustible para su entrega al gestor, en el caso español, ENRESA.

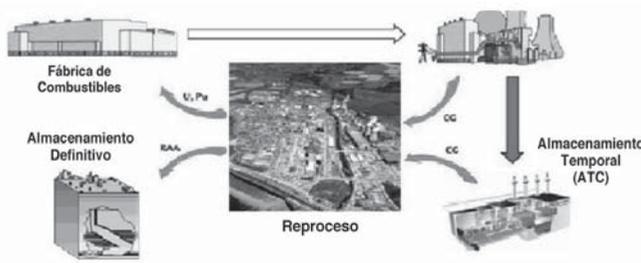
Las opciones de gestión del combustible gastado son dos como pueden verse en la figura 4.1 y 4.2:

Figura 4.1.
Ciclo abierto combustible nuclear gastado



Fuente: elaboración propia

Figura 4.2.
Ciclo cerrado combustible nuclear gastado



Fuente: elaboración propia

- CICLO ABIERTO: la consideración del mismo como un residuo y por lo tanto su almacenamiento definitivo en una formación geológica profunda (AGP) como está recogido en el Plan General de residuos radiactivos en vigor,
- CICLO CERRADO: Actualmente en el ciclo cerrado el combustible gastado se reprocesa y recicla, utilizando el plutonio para fabricar combustible MOX (Mezcla de Óxidos) y el uranio empobrecido para fabricar RepU (Uranio Reprocesado). En el futuro, el ciclo cerrado avanzado supone una separación mejor de los actínidos minoritarios, uranio y plutonio que permitirá la transmutación. El ciclo cerrado también precisa de un AGP para almacenamiento de los residuos aunque disminuyen considerablemente los residuos.

2. GESTIÓN DEL COMBUSTIBLE GASTADO

Almacén Temporal Individualizado (ATI)

La primera actuación para la gestión del combustible gastado es el almacenamiento en las centrales.

ENRESA ha participado mediante acuerdos con los titulares de las centrales, en actuaciones como son los cambios de bastidores de todas las centrales, el licenciamiento y suministro de los contenedores de doble propósito (o almacenamiento seco) y los sistemas de almacenamiento transporte para las centrales de Trillo (Guadalajara) y José Cabrera (Guadalajara) y actualmente se prevee que se cargue combustible en contenedores tipo «hi-storm» en la central de Ascó (Tarragona). Conjuntamente con NUCLENOR se está trabajando en el Plan de Gestión de Combustible para Santa María de Garoña (Burgos) para preparar la central y optimizar el proceso de vaciado de la piscina y minimizar tiempos de vaciado y transferencia.

Actualmente ENRESA es el explotador responsable del ATI de José Cabrera como parte del plan de desmantelamiento y clausura, y para ello se ha llevado a cabo las pruebas de resistencia y seguridad aprobadas por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) posteriores al suceso de Fukushima.

Almacenamiento Temporal Centralizado (ATC)

El objetivo del ATC es el almacenamiento temporal de la totalidad del combustible gastado y residuos de alta actividad del parque español según está incluido en los sucesivos planes generales de residuos desde el segundo plan de 1989 hasta el actual del 2006. Almacenamiento temporal que permita el desarrollo tecnológico y social para el almacenamiento final en el AGP.

La totalidad del combustible gastado supone un reto en el diseño del ATC ya que incluye combustibles gastados de diferentes grados de quemado, de distintas composiciones, dañado o no y las condiciones de entrega para su almacenamiento. Para ello se ha iniciado el diseño con una envolvente que cubre el 95% del combustible previendo que el margen es suficiente para tratar el resto en estudios específicos.

También el ATC debe estar diseñado para recibir los residuos procedentes del reproceso del combustible nuclear gastado de Vandellós 1 (Tarragona) en Francia, tanto los residuos vitrificados de alta como los residuos vitrificados y compactados de media.

Por otro lado, también preparar la instalación para los residuos de media actividad y vida larga básicamente procedentes del interior de los reactores después de su desmantelamiento.

Procedimiento de selección del emplazamiento

El proyecto del ATC tiene su origen en el año 2006 en el 6º Plan de Residuos Radiactivos en el que se definía como un objetivo prioritario. En este año se creó mediante el Real Decreto 775/2006 una comisión interministerial con un comité asesor técnico para definir los criterios y el proceso de selección. En diciembre de 2009 por resolución de la Secretaría de Estado de Energía se convoca la candidatura para que los municipios interesados en albergar el ATC se presentasen y finalmente en Septiembre del 2010 la comisión interministerial emite el Informe propuesta al consejo de ministros encargados de tomar la decisión.

El 30 de Diciembre DE 2011 el consejo de ministros acuerda la designación de Villar de Cañas para el emplazamiento del ATC y se publica oficialmente en el B.O.E. El 20 de Enero de 2012 designando así mismo a ENRESA la realización del proyecto dentro del servicio público esencial de gestión de residuos radiactivos y combustible gastado.

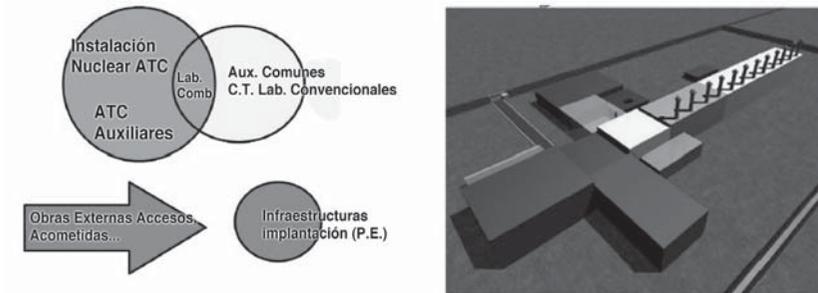
Contenido del proyecto ATC

El ATC constará de una instalación nuclear en la que la parte principal será el ATC propiamente dicho con una vida de diseño de 100 años y un objetivo de vida de explotación de 60 años y además contará con módulo para el mantenimiento de los residuos de media actividad y vida larga no susceptibles de ser almacenados en El Cabril por su alta actividad.

Además se prevé una serie de instalaciones complementarias como son un almacén de espera de contenedores para flexibilizar la operación separando la retirada de las centrales y poder acometer dificultades puntuales de lo que es el proceso principal de transferencia en la celda caliente y almacenamiento en bóvedas. Este almacén temporal permitirá así mismo disponer lo antes posible de capacidad de almacenamiento para resolver problemas puntuales como el retorno de residuos desde Francia o problemas de saturación en piscinas.

Por otro lado, como puede verse en la figura 4.3, dentro del Centro Tecnológico Asociado (CTA) que es parte del proyecto, prevé cuatro laboratorios, uno de los cuales será un laboratorio nuclear, así como un taller de mantenimiento de los contenedores de transporte. El CTA se completa con infraestructuras que facilitarán el asentamiento de empresas en la zona de implantación del ATC, mediante un Parque Empresarial de Vivero de empresas y naves industriales y más laboratorios para uso de las empresas externas a ENRESA.

Figura 4.3.
Proyecto ATC y CTA



Fuente: elaboración propia

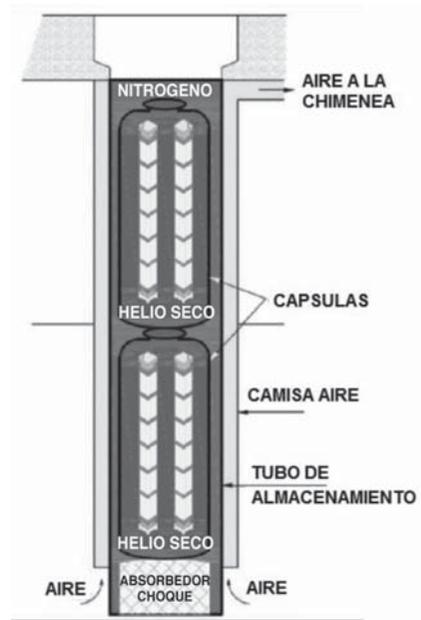
Y las actuaciones externas necesarias de acometidas, accesos, servicios, etc.

Bóvedas de almacenamiento

La tecnología seleccionada para el ATC ha sido el almacenamiento en bóvedas, que como puede verse en la figura 4.4 consiste en un doble confinamiento:

- Primer confinamiento: el combustible se almacena en unas cápsulas rellenas por un gas inerte (helio) para no superar las temperaturas que puedan provocar daño en el combustible a largo plazo y poder ser reutilizado posteriormente.
- Segundo confinamiento: está constituido por un tubo de almacenamiento relleno de un gas inerte distinto al helio para poder detectar cualquier tipo de fuga entre la primera y segunda barrera, y en la parte exterior presenta una camisa para permitir el paso del aire y

Figura 4.4.
Confinamiento Doble



Fuente: elaboración propia

la refrigeración del combustible. El calor residual del combustible se aprovecha para provocar el tiro en la camisa y permitir la refrigeración sin consumo energético externo.

El segundo criterio de diseño ha sido la criticidad, al ser un almacenamiento en seco, por lo que los coeficientes de multiplicación son muy bajos y está previsto llevar a cabo análisis de contingencias en caso de inundación y se pretende resolver las posibles contingencias simplemente con la geometría.

Por último, el concepto de bóveda permite la construcción de blindajes de gran espesor (unos 2 metros) que añade robustez mecánica y el consiguiente seguridad frente agresiones o fenómenos naturales.

La refrigeración como ya se ha comentado, gracias al aprovechamiento del calor residual del combustible, se hará de manera natural, y se calcula que el aire entrará a 42°C día y noche y una temperatura de salida de 71°C. En cualquier caso, el aire de refrigeración no está en contacto con el combustible, ni tan siquiera con la cápsula del primer confinamiento, y en caso de rotura de la chimenea, la temperatura subiría pero no se sobrepasarían las temperaturas máximas.

Por último mencionar que el otro criterio de diseño del ATC ha sido la recuperabilidad, de manera que cuando el combustible usado o las capsulas salgan, se puedan recuperar en buenas condiciones para generaciones futuras.

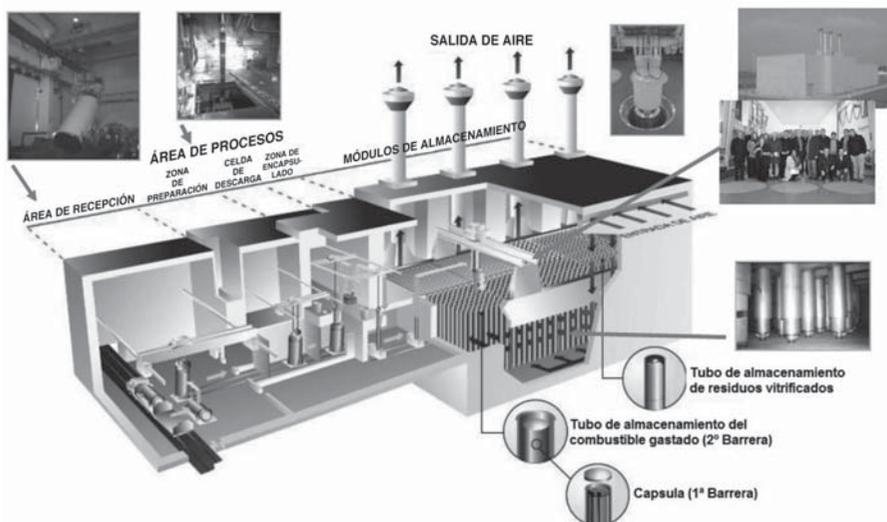
Diseño conceptual del ATC

En la figura 4.5 se puede ver una vista general del proceso del ATC. Conceptualmente se ha tomado como referencia el ATC de Habog (Países Bajos).

En el **ATC**, los contenedores llegan al área de recepción, en los que, una vez descargados del transporte, se colocan en posición vertical y se llevan al área de proceso. En el área de proceso se suelta la tapa superior y se acoplan a una celda caliente de manipulación. Esta celda caliente, aunque se trabajara con otra tecnología sería necesaria disponer de ella para cumplir con la normativa posterior a Fukushima que establece que toda instalación nuclear debe permitir el re-acondicionamiento del combustible en caso de sucesos más allá de las bases de diseño.

En la celda caliente se extrae el combustible de los contenedores de transporte y se pasa a una zona de clasificación para ir rellenando las cápsulas de almacenamiento de acero inoxidable y una vez selladas y llenas de helio seco se pasarán en contenedores de transferencia acoplados a una grúa a los diversos tubos de almacenamiento. Los tubos de almacenamiento se cierran y permanecen varias décadas.

Figura 4.5.
Diseño conceptual ATC



Fuente: elaboración propia

Además del proceso principal, el ATC dispone de un **almacén de espera** de contenedores con capacidad para unos cuarenta contenedores que presenta dificultades de diseño ya que debe ser capaz de albergar cualquier tipo de contenedor existente o futuro.

También el ATC contará con un taller de mantenimiento en donde se podrá llevar a cabo mantenimientos tipo ligeros cada año o cada dos años, o a un mantenimiento en profundidad para cada contenedor cada 5 años. El taller permitirá hasta quince operaciones de mantenimiento al año y hasta cuatro contenedores simultáneamente.

El **laboratorio de combustibles y residuos** básicamente consiste en un laboratorio de celdas calientes, de caracterización de combustible en las condiciones de radiación ya sea a la salida de la piscina de las centrales nucleares o bien después de un almacenamiento temporal. La caracterización del combustible se hará mediante ensayos no destructivos como destructivos de materiales de vaina, así como una pequeña capacidad de ensayos sobre la pastilla de combustible nuclear gastado para reducir los residuos de forma dispersable producidos en el centro.

El ATC se completa con tres laboratorios no nucleares:

Un **laboratorio de prototipos** que será una nave suficientemente grande para poder realizar montajes a escala 1:1 o a escala

industrial de los equipamientos necesarios para el manejo de combustible en el AGP. Será un de premontaje, formación y entrenamiento de apoyo al propio ATC.

Un **laboratorio de materiales**. Este laboratorio está destinado tanto al ATC como al AGP, ya que el ATC contempla un plan de gestión de vida que requiere ensayos en los materiales.

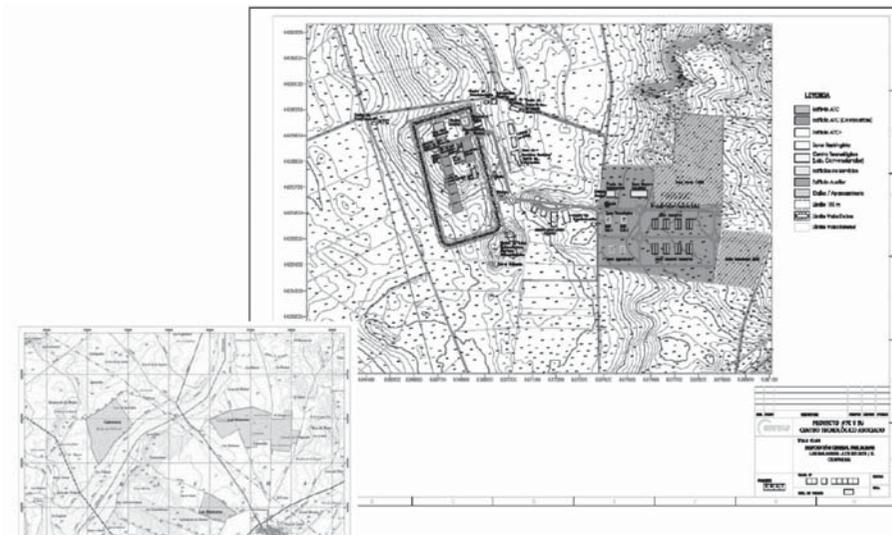
Un **laboratorio de procesos y medio ambiente** que será un laboratorio de química para el estudio de la migración y vigilancia ambiental.

Disposición orientativa

El ATC se implantará en Villar de Cañas, provincia de Cuenca, a unos 130km de Madrid. Para su emplazamiento el ayuntamiento propuso tres zonas, y se seleccionó la llamada Las Balanzas, donde se han adquirido 55 ha con la posibilidad de ampliar con 30 ha, para hacer frente a futuras necesidades.

En la figura 4.6 se puede ver la disposición de los distintos procesos y laboratorios. A la izquierda de la carretera estarán el ATC propiamente dicho y a la derecha las instalaciones no nucleares. Y el CTA. El Parque Industrial estará dividido en una parte más tecnológica y otra más empresarial.

Figura 4.6.
Disposición orientativa ATC de Villar de Cañas.



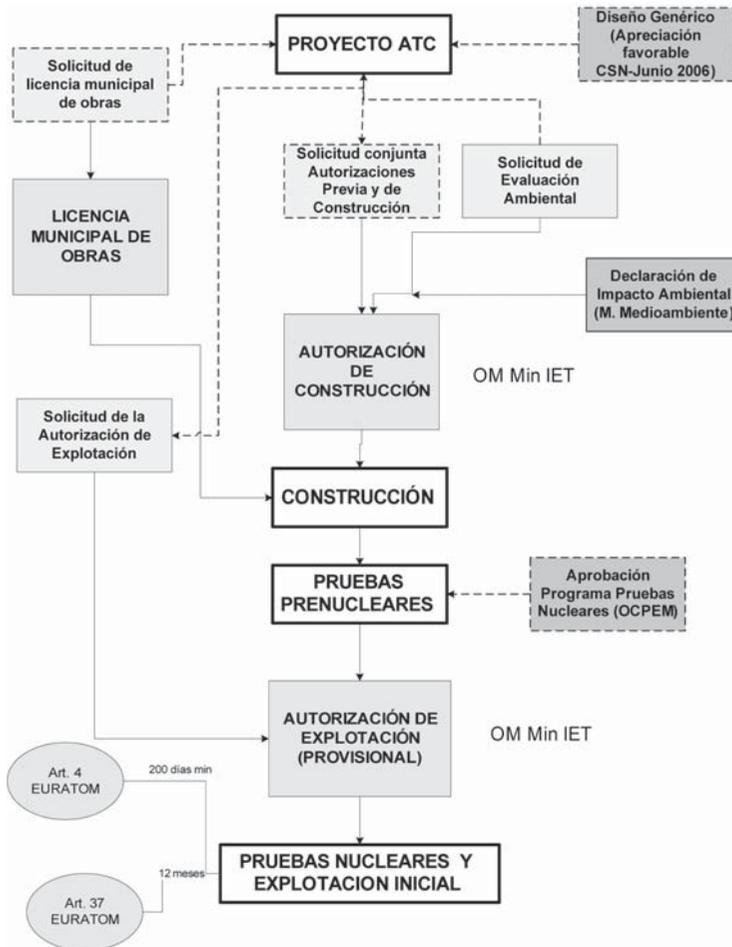
Fuente: elaboración propia

Plan de implantación del Proyecto ATC

El proceso de implantación es un proceso largo y que requiere distintas autorizaciones, en la figura 4.7.

El objetivo de puesta en marcha es de cinco años desde la disponibilidad de los terrenos. Además, también se ha propuesto como objetivo la construcción de la parte no nuclear del Centro Tecnológico y el parque empresarial lo antes posible para dar apoyo a la obra y responder a las expectativas existentes en la zona.

Figura 4.7.
Plan de implantación del ATC



Fuente: elaboración propia

Caracterización del emplazamiento

Actualmente la fase del proyecto que está en curso es la caracterización del emplazamiento. Se han desarrollado dos documentos pendientes de evaluación por parte del consejo (CSN) que son el Programa de Garantía de Calidad y el otro el Plan de Caracterización del Emplazamiento ya que según la legislación actual, hasta que no se ha llevado a cabo la selección del emplazamiento no se pueden desarrollar los documentos.

El Plan de Caracterización incluye los estudios en diversos radios con respecto al emplazamiento del ATC de:

- Cartografía y topografía.
- Geografía y ecología.
- Socioeconomía.
- Climatología e Hidrología.
- Hidrogeología.
- Sismicidad y riesgo sísmico.
- Geología y geomorfología.

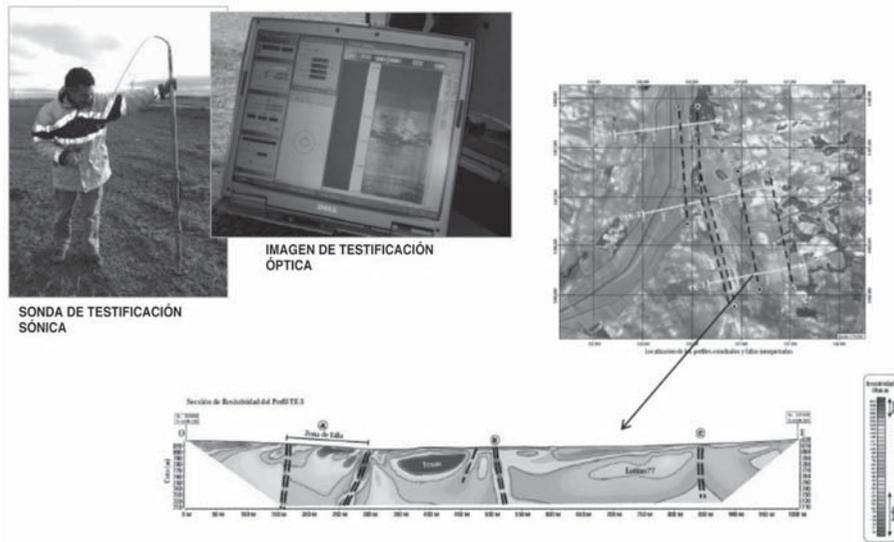
Los anteriores estudios permitirán confirmar los obtenidos en los estudios preliminares a partir de la documentación bibliográfica publicada por el Instituto Geográfico y el Instituto Geominero. En las figuras 4.8 y 4.9 pueden verse algunas imágenes de actividades de caracterización.

Figura 4.8.
Imágenes fase caracterización



Fuente: elaboración propia

Figura 4.9.
Imágenes fase caracterización



Fuente: elaboración propia

Están en curso sondeos de distintos tipos y tecnologías:

- GEOTECNIA.
 - Sondeos: 21.
 - Calicatas: 20.
 - Zanjas investigación geomorfológica: 6.
- SONDEOS INVESTIGACIÓN.
 - 5 Preliminares: 353metros.
 - 6 Sondeos SVC: 513metros.
 - Geofísica de pozo: 8, resistividad, óptico y sónico.

Y a partir de los datos obtenidos en los sondeos, se llevan a cabo estudios:

- GEOFÍSICA.
 - 11 Perfiles tomografía eléctrica (preliminar).
 - 3 Perfiles adicionales de tomografía eléctrica.
 - Ensayo cross-hole (Geotecnia/Sismicidad).
 - Ensayos down-hole (Geotecnia/Sismicidad).
- ENSAYOS HIDRÁULICOS.
 - Al avance de la perforación de sondeos geotecnia.
 - Ensayos de mayor detalle en los sondeos de investigación.

El transporte

Dentro de la gestión del combustible nuclear gastado, un aspecto muy importante es el transporte del mismo desde las centrales al ATC o al AGP.

Actualmente los equipos preparados y licenciados en España no cubren la totalidad del inventario de residuos a parte de la dificultad reglamentaria para el transporte de combustible con grado de quemado superior a 45 GWd/ton.

En cuanto a transporte, Villar de Cañas es un emplazamiento centrado con respecto a todas las centrales nucleares españolas.

Caracterización del combustible

Tanto por las necesidades de transporte como las necesidades de almacenamiento prolongado, en seco, es necesario desarrollar los criterios de aceptación, clasificación y metodología de caracterización.

Como ya se ha comentado, al tener que almacenar la totalidad del combustible es necesario hay que tener en cuenta los distintos tipos de enriquecimiento, quemado, estado físico y se tiene cierta flexibilidad en cuanto al tiempo de enfriamiento.

La clasificación según la Normativa americana de ISG-1 (Interim Staff Guidance-11 de la U.S. NRC; Comisión Reguladora de la Energía Nuclear de Estados Unidos de América) que clasifica el combustible gastado en «Intacto», «no intacto» y «dañado» puede ser insuficiente y requerirse una clasificación adaptada a los requisitos de transporte y de almacenamiento prolongado en seco para las observación en las inspecciones del combustible.

Es particularmente importante mantener en una base de datos el historial de todos los elementos almacenados, desde la fabricación, irradiación y posibles sucesos operativos. El objetivo de este historial es asegurar las necesidades crecientes de dar crédito a diversos aspectos exige muchos datos para reducir incertidumbres así como permitir la gestión a muy largo plazo.

Actualmente un grupo de trabajo UNESA ENRESA con apoyo de ENUSA ha desarrollado un documento para discusión posterior con CSN, aunque será un documento base para desarrollar el documento oficial del ATC.

Para concluir, mencionar la etapa posterior al ATC que es el desarrollo del AGP, en el que se ha estado trabajando durante los años 80 para la búsqueda de emplazamientos mediante barrido por etapas del territorio peninsular y en que se avanzó significativamente hasta que fue necesario iniciar sondeos profundos y debido a un problema de aceptación social se detuvo.

En cuanto al diseño de AGP y evaluación asociada de seguridad se llevó a cabo durante los años 90, y consistió en tres etapas:

1. Diseño conceptual y básico del AGP: *Cápsulas de acero al carbono, colocadas horizontalmente en galerías paralelas con sello cálcico-bentonita.*
2. Reforzamiento de las bases de diseño del concepto.
3. Optimización a través de la revisión de requisitos e incorporación resultados I+D.

La optimización se estudió según tres tipos de roca: para ello se llevó a cabo dos diseños básicos y la valuación del comportamiento (granito y arcilla).

I+D con fuerte participación en laboratorios subterráneos europeos con participación en la plataforma tecnológica de AGP europeos.

Los planes de futuro de I+D para el 2009-2013 con respecto al combustible gastado se caracterizan por un enfoque de caracterización y conocimiento del residuo. También se está teniendo en cuenta tanto la vigilancia, como la monitorización y gestión de vida de las estructuras, como sistemas de confinamiento y el propio combustible gastado con vistas al licenciamiento posterior.

Por último señalar la participación de ENRESA en la plataforma tecnológica de AGP en Europa.

CAPÍTULO V
**ASPECTOS ECONÓMICOS DE LA GESTIÓN
DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR USADO**

D. Jean-Louis Casabianca
AREVA

El objetivo de este artículo es pasar revista a los retos económicos de la economía del ciclo del combustible en su conjunto.

En primer lugar recordaremos brevemente las claves económicas de la energía nuclear para identificar los distintos elementos que componen el precio del kilovatio hora.

En segundo lugar, nos centraremos en la cuestión del coste de la gestión del combustible usado y de los residuos radiactivos, que es sin duda, la que genera más controversia. Para aportar elementos objetivos, se propone recorrer las etapas de la gestión del combustible para desglosar los costes implicados en las dos opciones disponibles en la actualidad, basándonos en un estudio realizado por el Boston Consulting Group en Estados Unidos.

1. ENTENDER EL CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR Y SUS COSTES

La producción de electricidad nuclear – generalidades

El ciclo del combustible nuclear

El uso de uranio para fisión en los reactores comerciales requiere unas transformaciones y unas gestiones posteriores que no son nada triviales, aunque muy bien conocidas y controladas.

La parte inicial del ciclo, antes de la producción de electricidad, se conoce como «front end», y las etapas posteriores a la salida del combustible usado en el reactor como «back end».

El mineral de uranio en su estado natural no es directamente utilizable como combustible nuclear. Para poder ser utilizado en los reactores y producir calor mediante la fisión de los núcleos de los átomos, debe seguir un proceso que combina varias etapas industriales:

- Extracción del uranio.
- Purificación y concentración del mineral.
- Enriquecimiento del uranio en U235.
- Fabricación del combustible.
- Y finalmente irradiación del combustible en el reactor.

En AREVA intervenimos desde la mina hasta la gestión del combustible usado.

En la parte back end, las etapas difieren según la estrategia de gestión del combustible usado, como se verá a continuación. En todo caso, después del uso en el reactor habrá una etapa preliminar de almacenamiento temporal, y se transportará combustible usado o residuos a un almacén definitivo, con el objetivo final de aislar los residuos de manera segura y estable hasta que decaiga la radiactividad.

Dos estrategias de gestión del combustible usado...

Veamos ahora las grandes opciones disponibles para la parte que nos interesa: el back end.

Si el combustible usado se gestiona directamente como residuo, se habla de ciclo «abierto»; si se recicla, de ciclo «cerrado».

- El CICLO ABIERTO, u once-through (de un solo uso) implica que el combustible usado ya no tiene valor y se almacena definitivamente en una Almacén Geológico Profundo (AGP).
- El CICLO CERRADO implica el volver a utilizar lo que se puede recuperar del combustible usado (el 97% en la actualidad) y a introducirlo en el ciclo:
 - Actualmente, el combustible gastado se reprocesa, utilizando el plutonio para fabricar combustible MOX (Mezcla de Óxidos) y el uranio empobrecido para fabricar URE (Uranio Reprocesado Enriquecido). En los reactores actuales, de agua ligera, tras algunas modificaciones se pueden reciclar estos nuevos combustibles reprocesados.

- En el futuro, el ciclo cerrado avanzado supondrá una separación aún más avanzada de las materias (actínidos minoritarios, uranio y plutonio) que permitirá la transmutación, en reactores rápidos.

... *Y un mismo destino: el AGP*

Para la gestión final de los residuos radiactivos, la solución unánimemente recomendada por la comunidad científica a nivel internacional es el depósito definitivo en capas geológicas profundas. Tanto ciclo cerrado como abierto precisan de un AGP para ello, aunque en el ciclo cerrado, disminuye considerablemente su volumen.

Eso se debe al tipo de residuos finales que se gestionan. En el caso del ciclo abierto, como ya hemos visto, se gestiona y finalmente se almacena el mismo combustible irradiado. En el caso del ciclo cerrado, después de la separación y del reciclado del uranio y del plutonio, se incorporan los productos de fisión (es decir el 3% del combustible) en una matriz de vidrio y se acondicionan en una capsula llamada *Universal Canister*, especialmente concebida para aislarlos a muy largo tiempo. Con los residuos tecnológicos y elementos combustibles compactados, que también se almacenan en estos canisters estándares, constituyen los residuos finales.

En la figura 5.1, se comparan las cantidades y características de los residuos generados por la producción de 1,25 Twhe. Mientras que en la opción ciclo

Figura 5.1.
Residuos generados para producir 1,25 TWe



Sin reciclado	Después del reciclado
2 «elementos combustibles + overpack»	3 «UC-V + overpack»
~4 m de altura	1,6 m de altura
~ 50 toneladas	~ 6 toneladas
~ 8 m ³	~1.5 m ³

Fuente: elaboración propia

abierto, hay que gestionar y almacenar definitivamente 2 elementos combustibles de aproximadamente 4 metros de altura, 50 toneladas de masa y 8 metros cúbicos, tras el reciclado se gestionan y almacenan 3 capsulas de 1,6 metros de altura que pesan 6 toneladas y corresponden a un volumen de 1,5 metros cúbicos.

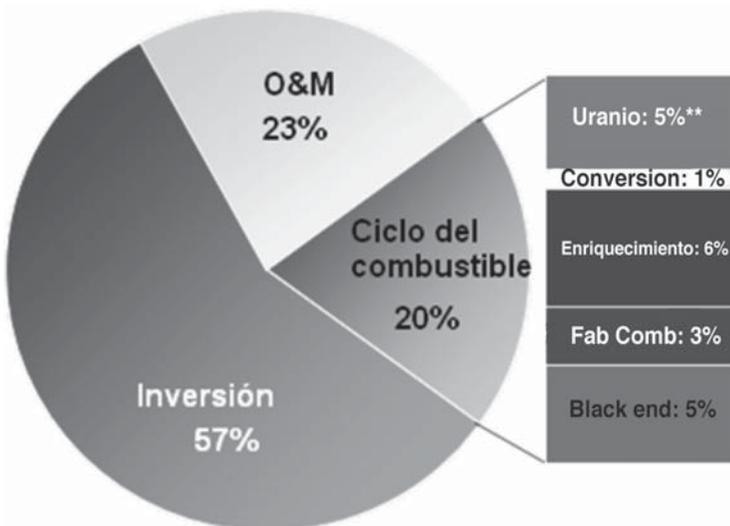
Esta diferencia es fundamental para entender cómo se comparan los costes desde el punto de vista de la gestión y del almacenamiento según el tipo de ciclo que se ha elegido.

Economía y costes del ciclo de combustible – contribución de cada etapa al coste kWh

Para calcular el coste de la generación eléctrica, es decir cuánto cuesta producir la electricidad, se tienen que tener en cuenta todos los gastos incurridos en los procesos que permiten producirla. Se calcula en € por kWh.

Para producir electricidad, tenemos que construir una central, operarla, mantenerla y gestionar el combustible. Según los datos de la OCDE (figura 5.2), en el caso de la energía nuclear, lo que cuesta más es la inversión inicial para la construcción de la central. Sabemos muy bien, ya que es un tema que ha ido adquiriendo más importancia en esta época de crisis, que

Figura 5.2.
Distribución costes energía nuclear



Fuente OECD/AEN 2002 «Trends in the Nuclear Fuel Cycle: Economic, Environmental and Social Aspects»

la nuclear necesita una inversión muy importante. Representa casi el 60% del coste del kWh. Luego hay que operar y mantener la central: los costes de operación y mantenimiento (O&M) son el segundo importe con 23%. Y finalmente tenemos los costes del ciclo del combustible, que representan un 20% en su conjunto (la quinta parte de los gastos).

Entrando en detalle en los costes del ciclo del combustible, obtenemos los datos siguientes:

- Los costes del Front-end representan unos ~ 15% e incluyen:
 - los costes de suministro de mineral de Uranio, que representan una fracción muy pequeña, del orden del 3-5% del coste total de producción de la electricidad en las centrales nucleares. Por ello, las variaciones del precio del uranio natural tienen poca relevancia en el coste del kWh nuclear.
 - los costes de conversión del mineral de Uranio en hexafluoruro de Uranio (UF₆) y enriquecimiento con isótopo ²³⁵U un 7%,
 - los costes de conversión en polvo de óxido de uranio (UO₂) y fabricación de las barras de combustible un 3%. El combustible fresco que se carga en la mayoría de las centrales nucleares occidentales y en España es el UOx, aunque algunas centrales también utilizan combustible MOX, procedente del reciclado del plutonio.
- Los costes del back-end representan un ~ 5% e incluyen:
 - los costes de desmantelamiento de las centrales una vez acabada su vida útil.
 - los costes derivados de la gestión del combustible usado desde la descarga del reactor hasta el almacenamiento final del residuo acondicionado.

Aunque solo representa el 5% de los costes, la parte de los costes de la gestión del combustible usado y de los residuos radiactivos es la que plantea más interrogantes.

2. ECONOMÍA DEL FINAL DEL CICLO

En esta segunda parte, nos centraremos en la economía del final del ciclo del combustible nuclear. Para ello, nos basaremos primero en uno de los informes más recientes dedicados a este tema: el estudio que el Boston Consulting Group realizó en el 2006, sobre la gestión del combustible usado en Estados Unidos. En segundo lugar, detallaremos los costes e incertidumbres asociados a cada una de las estrategias elegidas.

Recordar que existen varios estudios realizados en el pasado que comparan el precio del ciclo abierto y del ciclo cerrado y deducen que no hay una diferencia significativa entre ambas opciones.

La Agencia de la Energía Nuclear (NEA) para la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) realizó en el año 1985 un estudio de mucha ambición —que es todavía el informe de referencia en su versión de 1994—, actualizado en el 2002. La OCDE concluye que los costes de ambas estrategias, almacenamiento definitivo y reciclado, son comparables. Insiste también en que el impacto de la estrategia elegida para gestionar el combustible usado es menor dentro del coste total de la electricidad producida por las centrales nucleares, al representar menos de la mitad de los 5% del total de los costes asociados a la producción.

Por su parte, un estudio realizado en 2006 por el Boston Consulting Group de Estados Unidos, llegó a la misma conclusión que el informe de la OCDE, comparando opciones de ciclo cerrado y ciclo abierto en Estados Unidos. Es este último informe que se analiza a continuación en detalle.

Reciclado en los EEUU: Estudio económico del BCG

Objetivos e hipótesis

Objetivo

El objetivo de este estudio era dar una perspectiva industrial del reciclado en Estados Unidos: El trabajo del Boston Consulting Group se basó en el know-how y los datos de AREVA en cuanto a reciclado y fabricación y AREVA se esforzó en actuar con la mayor transparencia.. Se tuvieron en cuenta los siguientes elementos: aspectos económicos, flujos de combustible usado, financiación y riesgos asociados. Por lo tanto, se excluyeron aceptación pública, temas medioambientales, etc, y tampoco se analizaron ajustes legislativos probables o necesarios.

Se evaluó la posibilidad de la implantación del reciclado en los EE.UU, siendo los principales objetivos:

- Reforzar los aspectos económicos básicos del reciclado.
- Permitir una comparativa entre la opción de ciclo abierto y el reciclado.

El dato económico clave es el coste unitario expresado en \$/kgHM (kg Metal Pesado) de combustible usado. El análisis económico se llevó a cabo mediante un modelo de coste unitario.

Hipótesis

- *Estrategia ciclo abierto:*

En el escenario de ciclo abierto, en el que no se recicla el combustible usado generado en las centrales nucleares de Estados Unidos, se considera una etapa de enfriamiento en las piscinas de 5 años, una etapa de almacenamiento temporal de 20 años en contenedores en seco y luego, o sea 25 años después de la descarga, depósito definitivo en AGP – del tipo que se preveía hacer en Yucca Mountain. Notar que Boston Consulting Group tomo como referencia para calcular los costes del AGP, el almacén de Yucca Mountain.

- *Estrategia ciclo cerrado:*

En la estrategia de ciclo cerrado, 4 años después de su descarga el UOx usado se manda a reprocesar. Se utilizan el Uranio y el plutonio en una planta dedicada para fabricar nuevos combustibles URE (Uranio Reprocesado Enriquecido) y MOX (Oxidos mixtos que se fabrica con plutonio). Allí también se almacenara el combustible MOX usado. Después de 25 años, los residuos finales resultantes del tratamiento se transportan a un AGP para su almacenamiento definitivo.

- ¿Cuales son los Parámetros generales?

- El coste de referencia para el almacenamiento definitivo está basado en las estimaciones del DOE (Department of Energy) del año 2001.
- El precio del Uranio es \$31/lb U3O8.
- La tasa de descuento es del 3%, correspondiente a financiación pública (Government or Federal Corporation).
- Los parámetros específicos del reciclado son los siguientes:
 - Se construye una planta de reciclado de una capacidad de 2500 tHM/año.
 - El factor de densificación para el almacenamiento definitivo de los residuos procedentes de combustible usado reciclado es cuatro comparado con el almacenamiento directo de combustible usado.

Resultados

El coste total actualizado de la gestión del back-end en el caso del ciclo cerrado (figura 5.3) es de 520 \$/kgHM frente a un coste sin reciclado (once-through, Figura 5.4) de 500 \$/kgHM. Esta diferencia muy reducida se debe a dos factores principales:

- Los créditos atribuidos al combustible reciclado, que permite ahorrar UOx fresco se toman en cuenta. No compensan el coste del reciclado pero son ingresos significativos.

Figura 5.3.
Resultados del estudio BCG – Coste de la gestión del combustible usado en EEUU – caso de reciclar el combustible usado

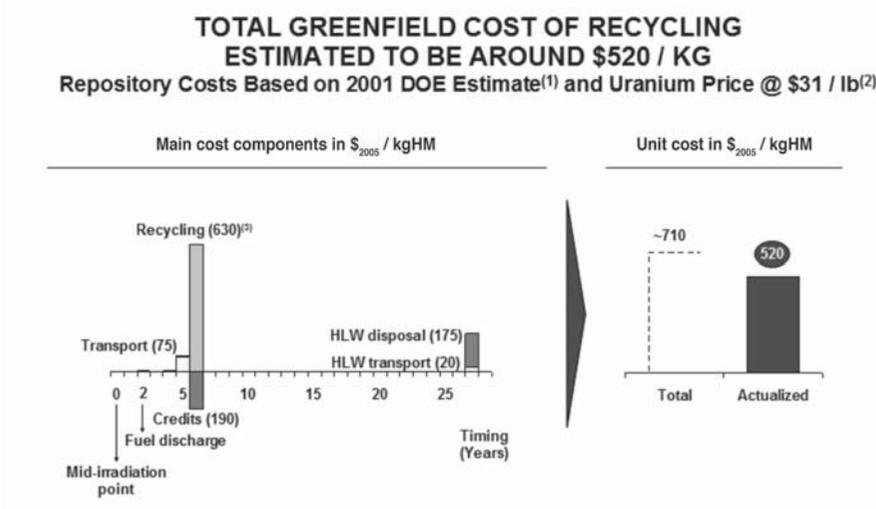
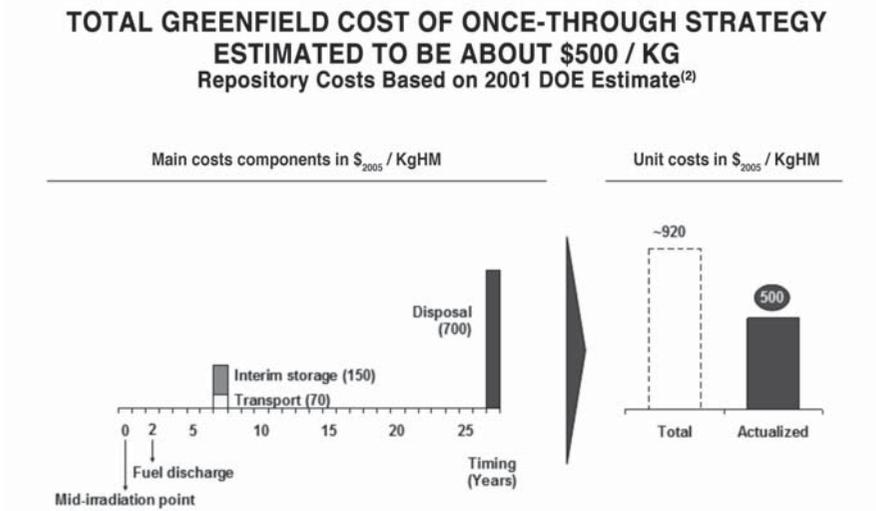


Figura 5.4.
Resultados del estudio BCG – Coste de la gestión del combustible usado en EEUU – caso de almacenar el combustible usado definitivamente



- Lo más impactante es la gran reducción de los costes atribuidos al AGP: 700 \$/kgHM en el caso del ciclo abierto frente a 175 \$ por los residuos de alta actividad.

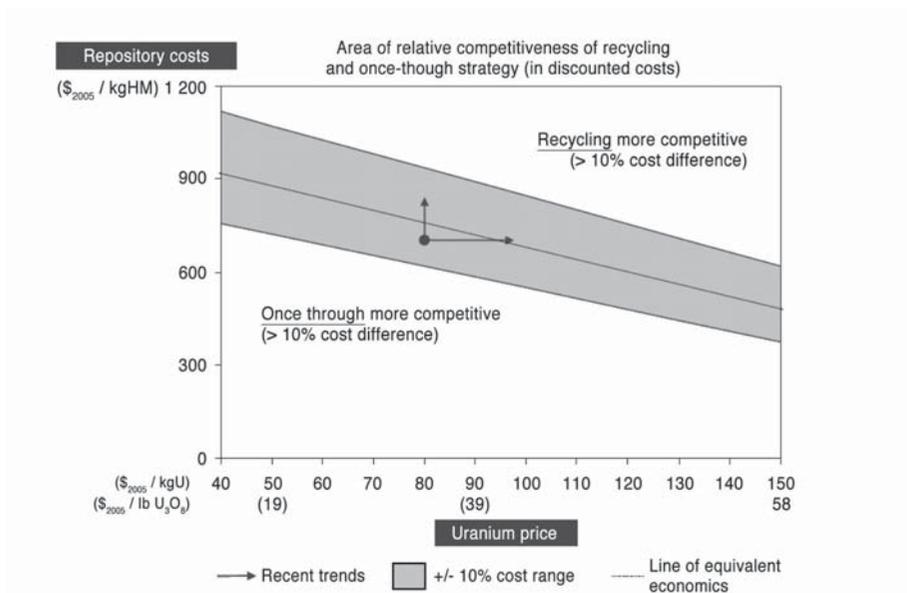
Por lo tanto, concluye que los costes actualizados de ambos ciclos son comparables.

Análisis de sensibilidad

En la figura 5.5, se puede observar la comparación de los costes de ambas opciones, calculadas con una varianza del 95%. Como se ve, estos costes son muy dependientes a la vez:

- del precio del uranio, que permite calcular el crédito plutonio y uranio, y que ha conocido variaciones importantes durante los últimos años.
- del coste del almacenamiento geológico profundo.

Figura 5.5.
Resultados del estudio BCG – análisis de sensibilidad



La gestión del combustible usado: costes, incertidumbres y claves

Comparación de los costes del reciclado vs costes del almacenamiento directo

Como se expone en los párrafos anteriores, el estudio llevado a cabo en 2006 por el Boston Consulting Group en EE.UU. muestra que los costes totales del reciclado y del almacenamiento definitivo son comparables. Llegó a la misma conclusión que la OCDE en el de 1994.

La figura 5.6 presenta el desglose simplificado de los costes y demuestra que, si por un lado, el reciclado supone un coste adicional, por otro lado, hay efectos que permiten afirmar que al final la suma de los costes del back-end sea equivalente en ambos casos.

En este esquema se pone en evidencia el ahorro en combustible nuevo (los créditos), gracias al reciclado del uranio y del plutonio. Estos créditos se deben al hecho de que con 8 elementos UOx usados, se pueden fabricar dos elementos combustibles reciclados: un elemento de URE y un elemento MOX. Dicho de otra manera, reciclar el combustible usado ahorra hasta el 25% de uranio natural.

También interviene la disminución del presupuesto relacionado con el almacenamiento en el caso del reciclado.

La figura 5.7 destaca que el ciclo cerrado es una solución industrial controlada y que reduce el riesgo asociado con la incertidumbre en torno a los costes, al ser una opción desarrollada a escala industrial, con costes fijos y conocidos.

Concretamente, en Francia se han reciclado más de 25.000 toneladas de combustible usado de agua ligera y reciclado más de 100 toneladas de plutonio. Se quema MOX en reactores de agua ligera desde los años 70. En el mundo 40 reactores cargan o han cargado MOX: 36 de ellos están en Europa, (en Francia, 22 reactores, en Alemania, en Suiza y en Bélgica), 3 en Japón y uno en los Estados Unidos.

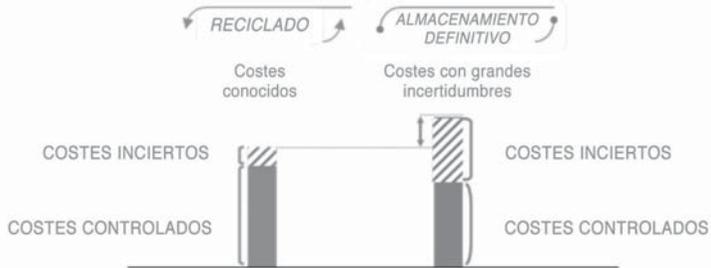
Figura 5.6.

Comparación esquemática de los costes inducidos por cada estrategia



Fuente: www.bcg.com y [OECD-Nuclear Energy Agency www.nea.com](http://www.oecd-nuclear.org)

Figura 5.7.
Comparación esquemática de los costes conocidos o con incertidumbres reciclado vs. almacenamiento definitivo

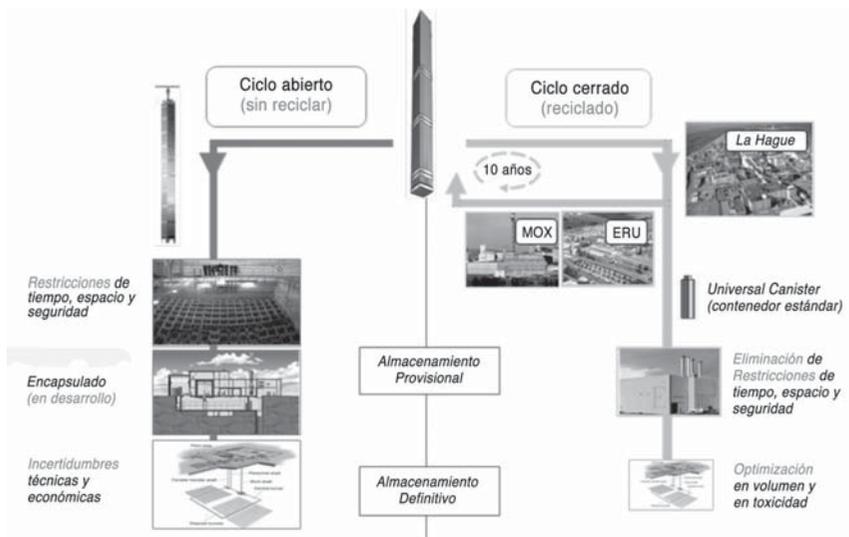


Fuente: www.bcg.com y OECD-Nuclear Energy Agency www.nea.com

Incertidumbres en la 2ª parte del ciclo

- Las incertidumbres relacionadas a la gestión del combustible usado en el ciclo abierto. Si seguimos las etapas de la vida del combustible usado, (Figura 5.8) observamos varias incertidumbres o restricciones en el caso del ciclo abierto que suponen riesgos y costes adicionales:

Figura 5.8.
Etapas de gestión del combustible usado – comparativa ciclo abierto – ciclo cerrado



Fuente: elaboración propia

- restricciones de tiempo, espacio y seguridad en la fase de almacenamiento en piscinas,
- incertidumbres relacionadas con las operaciones de encapsulado en la fase de almacenamiento en seco, en particular antes de trasladar el combustible hacia el AGP,
- incertidumbres técnicas y económicas sobre el AGP.
- Reducción de los costes de encapsulado y almacenamiento geológico en el caso de reciclar el combustible usado.

En el caso del ciclo cerrado, las capsulas de vidrios eliminan las restricciones de tiempo, espacio y seguridad durante la fase de almacenamiento y optimizan el AGP en términos de volumen, toxicidad y por consiguiente de coste.

En un estudio comparativo de costes de almacenamiento geológico de los residuos radiactivos llevado a cabo por Ernst & Young, se evalúan y comparan los costes de encapsulado en varios países.

En el caso finlandés de ciclo abierto (estrategia de almacenamiento definitivo) los costes de encapsulado alcanzan un nivel de cerca de 1,1 euro/MWhe. En el caso sueco, (de ciclo abierto también), se valora el coste por MWhe alrededor de 0,5 euro ya que se beneficia de sinergias, gracias al almacén temporal ubicado en el mismo sitio del AGP.

La evaluación de los costes de encapsulado en el caso francés, es decir en un caso de almacenamiento de capsulas de vidrios, es de 0,1 euro/MWhe. El caso belga presenta estimaciones equivalentes, aunque presentando un desglose de los costes diferente.

Así pues, los costes de encapsulado se reducen por 5-10 en caso de almacenamiento de capsulas de vidrios.

Cuando se considera el volumen excavado en el AGP, las evaluaciones de metros cúbicos por TWhe según los países muestran diferencias significativas. Se reducen por 3-6 en caso de almacenamiento de capsulas de vidrios. Por lo tanto, los costes de almacenamiento definitivo se reducen en 3-4 en el ciclo cerrado con respecto al ciclo abierto.

Conclusiones – Claves de la economía del final del ciclo del combustible

La diferencia entre costes de reciclado y costes de ciclo abierto depende esencialmente de dos cuestiones de alto grado de incertidumbre. Por un lado el precio del uranio y por otro, el coste del Almacenamiento Geológico Profundo, que no se puede evaluar con precisión hoy día. Las tendencias de estos costes influirán en la competitividad de la opción de reciclado.

En cuanto al control de los futuros costes del back-end, observamos una reducción significativa de las incertidumbres asociadas al back-end debido

a la madurez de la tecnológica de reciclado. Sin embargo, el almacenamiento directo supone un importante riesgo económico ya que la tecnología de encapsulado está en desarrollo y normalmente las evaluaciones económicas se revisan al alza.

Por lo tanto, podemos concluir que el reciclado reduce el riesgo económico del almacenamiento definitivo debido a la reducción de volumen, carga térmica y radiotoxicidad y al acondicionamiento de los residuos en capsulas estándares.

Terminar subrayando que hay otros aspectos que intervienen en la toma de decisión sobre cómo gestionar el combustible nuclear usado. Aspectos, que, siendo difíciles de evaluar económicamente, no por ello dejan de ser importantes: la sostenibilidad tecnológica, medioambiental y social se tiene que tener en cuenta. Y, desde este punto de vista, el reciclado presenta unas ventajas fundamentales. Reciclar ahora es una primera etapa que permite limitar la acumulación de un gran inventario de combustible usado y reducir el consumo de recursos naturales hasta el 25%. Además, es una opción que si bien no elimina los residuos totalmente, permite, mientras se sigue desarrollando la tecnología, responder a las legítimas preocupaciones de la sociedad civil sobre esta cuestión, ya que evita dejar la totalidad de los residuos nucleares para las generaciones venideras, lo cual es fundamental para dar confianza al público y al mercado en cuanto a la gestión del combustible usado.

CAPÍTULO VI
**ACEPTABILIDAD SOCIAL DE LA GESTIÓN
DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR USADO**

Josep Castellnou i Barceló
Ex Alcalde de Vandellós

1. INTRODUCCIÓN

Vandellós a principio de los años 60 era un municipio pobre porque vivía de una agricultura casi de subsistencia debido a lo abrupto de la montaña que lo rodea, sin agua y famoso por el viento. En esta época coincidieron dos factores, por un lado la construcción de la central nuclear y por otro la llegada de turistas. A lo largo de estos últimos 40 años, ambas actividades han convivido sin ningún tipo de problema. Ahora bien, este camino no es fácil, en Vandellós I, el proceso de instalación de la central no tuvo muchas decisiones a tomar por ser casi una imposición, pero tampoco hubo ningún tipo de contestación social. Después se amplió a Vandellós II y para él cual se estableció un tipo de convenio entre el ayuntamiento y la central.

Para el desmantelamiento de Vandellós I los procedimientos cambiaron, se creó una comisión local de información pensando en los tres parámetros importantes que son:

- Información,
- Seguridad y
- Desarrollo económico.

Más tarde vino otro parque eólico y por último el ciclo combinado que venía de la contestación social del pueblo cercano, en el que no fue posible su instalación ya que en Vandellós si se aplicaron los procedimientos aprendidos durante el desmantelamiento de Vandellós I.

2. COMBUSTIBLE NUCLEAR USADO

En cuanto a la producción de residuos, siempre queda la duda de si el combustible nuclear usado es residuo o no. ¿Quién es el propietario? ¿Qué se hace con ellos?

EL combustible nuclear usado y los residuos nucleares entran dentro del tema de la aceptabilidad social en cuanto que los mismos deben ser almacenados en el país productor y que no se puede pasar el problema a las generaciones venideras, por lo que hay que proponer soluciones con la tecnología disponible. Esta solución para por un almacenamiento temporal centralizado (ATC) y un almacenamiento geológico profundo (AGP) finalmente.

En cuanto a la gestión de los residuos, en Vandellós se ha tenido ambas formas de gestión, ciclo abierto y ciclo cerrado. En ambos casos la solución para tanto por el ATC como por el AGP aunque con leves diferencias constructivas.

3. VIABILIDAD DEL PROYECTO

La viabilidad del proyecto pasa por tres puntos importantes:

- Justificación del proyecto:
 - Es la necesidad de solucionar un problema, aplicar la mejor tecnología posible y buscar un emplazamiento. La manera en la que se ha elegido el emplazamiento para el ATC en España ha sido la mejor, la más abierta y democrática, mediante concurso de los ayuntamientos que son los que ofrecen su territorio con los condicionantes para que sea viable.
- Concertación:
 - Obtener el máximo consenso político sin inmiscuir a los pueblos.
 - La aceptabilidad social que necesita cualquier proyecto de este tipo para su entorno tanto dentro del municipio como para entornos mayores.
 - La generación de confianza a largo plazo ya que son instalaciones que duran muchos años.
- Generación de un beneficio social y económico.
 - Una oportunidad de desarrollo de la zona de implantación y potencia económica y por ello hay que compensar económicamente para ayudar al pueblo y que se quede aislado.

4. HERRAMIENTAS

Las herramientas que hacen posible la instalación son por un lado si hablamos de residuos la seguridad es un elemento innegociable, ahora bien cuenta con la garantía del estado. La confianza en el Consejo de Seguridad Nuclear se debe a la garantía que ha mostrado en temas de seguridad en sus años de existencia. En cuanto a ENRESA, es una empresa ejemplar en el tratamiento de residuos y en el desmantelamiento de Vandellós I. Dentro de la seguridad también hay que contar con la mejor tecnología posible y la supervisión a largo plazo.

En segundo lugar está la información, es necesario crear una comisión local de información desde el ayuntamiento y buscar el máximo número de participantes interesados: los municipios adyacentes, los stakeholders de la comunidad, el factor empresarial y empezar a trabajar en las fases previas del proyecto, la obra y la producción. La publicación periódica de los acuerdos de la comisión local, un centro de información para que cualquier vecino pueda tener información y la divulgación del proyecto periodistas y stakeholders respondiendo las posibles preguntas. Y por supuesto la formación para que los vecinos puedan crear su opinión y sea entendible el proyecto.

En tercer lugar están los recursos, cualquier instalación debe tener recursos previos a través de un convenio (que en este caso sería ENRESA), después la orden ministerial en función de las toneladas que se descarguen y el concepto fijo, el IBI, el IAE y posibles plusvalías. También es necesaria la asistencia externa, nuestra experiencia nos ha mostrado que hay dos partes participantes; la empresa y la comunidad, y entre ellas debe estar la universidad como elemento independiente y consultorías externas para difundir y asesorar.

Por último el desarrollo. Por un lado están las expectativas inmediatas que puede generar el propio municipio, es decir los planes plurianuales, escuelas, polideportivo, centros tercera edad... La hoja de ruta del ayuntamiento debe estar de acuerdo con los distintos hitos del proyecto: presentación del proyecto, ejecución de la obra y la explotación. Para optimizar el plan de desarrollo integral los ingresos deben hacerse de manera constante, continua no a picos. También debe haber acuerdos locales entre los ayuntamientos, y contar con los municipios del entorno. Ya que la convivencia es con el entorno. En el desarrollo de la comunidad también se incluyen las becas, las empresas vivero... para fomentar la economía de un pueblo a una nueva situación. Por último, las empresas deben acudir al factor empresarial local para lo cual hay que crear una asociación empresarial para que todo sea transparente. La asociación dará también cualificación a las distintas empresas para trabajar en este tipo de obras, planes de formación

a empresarios y trabajadores, y adaptación de los proyectos de la empresa a su entorno. Este último es el más importante para que repercuta en la zona.

5. CONDICIONES PARA EL ÉXITO

Win Win

- Buscar la forma de colaboración que permita el mayor beneficio para cada una de las partes desde la vertiente social política y económica. Buscar que el proyecto sea viable pero que redunde en la zona de implementación.

Diana

- El municipio es el blanco de toda acción.
- La percepción desde el municipio hospedante es distinta a la visión desde el exterior, por lo que la presión será diferente.
- El municipio debe emitir noticias constantemente para evitar que otros lo hagan.
- La acción debe partir desde el municipio y buscar los aliados en el entorno.

Pirámide

- La base debe ser lo más amplia posible y se consigue buscando alianzas en todos los campos.
- Cualquier instalación de este tipo necesita un amplio consenso social por este motivo se debe ampliar su base más allá del municipio (social, política, empresarial, económica).

Ley de Jocas

- A coste 0 la demanda es infinita, por asociaciones, entorno... no hay que crear expectativas que no se puedan cumplir...
- Un proyecto de estas características genera una oportunidad de demanda ilimitada. Es necesario establecer criterios en procedimiento de presentación de intereses compartidos, de distribución y siempre que sea posible de coparticipación.

6. CONCLUSIÓN

Como conclusión, enumerar los distintos factores que han de tenerse en cuenta para conseguir la aceptación social en un proyecto como una central nuclear o cualquier otro tipo de complejo energético.

ACEPTACIÓN

- **Ayuntamientos colindantes:** Hay que contar con ellos.
- **Comisión local:** Hay que crearla.
- **Evaluar el rechazo:** hay que anticiparse al futuro.
- **Prever dificultades:** hay que anticiparse al futuro.
- **Transparencia.**
- **Atención al momento:** intentar los momentos de crispación como campañas electorales y estudiar los tiempos.
- **Comunicación eficaz:** hablar, escuchar y formar.
- **Integración en el proceso:** buscar la integración de todas las plataformas.
- **Optimizar el impacto:** pensar en el futuro.
- **Negociación previa:** desde el anuncio del proyecto hasta la realización del mismo.

CAPÍTULO VII
**LA PARTICIPACIÓN SOCIAL EN LA TOMA
DE DECISIONES COMBUSTIBLE GASTADO**

Antonio Calvo Roy

Presidente de la Asociación Española de Comunicación Científica

Muchas gracias por contar con nosotros, los periodistas científicos. La verdad es que hablar hoy de gestión de residuos y de periodistas puede dar lugar a confusión, sobre todo por cómo está el sector, el de los periodistas no el de los residuos, y si nos atenemos a las acepciones dos y tres que sobre la palabra residuo da el diccionario de la Academia: «Aquello que resulta de la descomposición o destrucción de algo.» Y, la tercera, «Material que queda como inservible después de haber realizado un trabajo u operación.» Quizá sea una buena definición para los periodistas hoy, lamentablemente. Claro que al saber que hablamos de residuos de alta queda deshecho el posible malentendido.

Y, desde luego, me sirve ese estado de cosas en el mundo de la comunicación para mi primera reflexión, en la que quiero situar el papel de Enresa y su política de comunicación casi desde su creación. En este sentido, la figura de Juan Manuel Kindelán ha tenido, a mi juicio, un papel relevante precisamente en la política de comunicación. En su concepción de la información como ejercicio de transparencia.

Porque esa es la palabra, transparencia. Hace tiempo sabemos que es la base de la buena comunicación. Primero, hay que tener algo que decir, y luego hay que decirlo, hay querer decirlo. Ya sabemos que todo lo relacionado con el mundo nuclear es muy llamativo desde el punto de vista de la información. El hongo nuclear sigue siendo una pesadilla recurrente o un arma arrojadiza que, aunque parece que hubiera quedado fuera de

la escena internacional en los últimos decenios, vuelve a cobrar actualidad, lamentablemente, cada poco tiempo, o por accidentes inesperados o por políticas disparatadas, como la de Corea del Norte. Por eso, porque son temas relacionados pero muy diferentes, es muy importante separarlos. Armas nucleares y residuos nucleares, aunque compartan el adjetivo, son sustantivamente diferentes.

En el debate sobre la participación social en la toma de decisiones sobre el combustible gastado, ¿qué tenemos que decir los periodistas, los periodistas científicos? Pues, como en todo lo demás, contar cuantos son y qué les pasa, volver a la esencia de este oficio que consiste en andar y contar, nada más, y nada menos. Pero debemos hacerlo con el rigor y la independencia que se nos debería suponer para todo el ejercicio de nuestra profesión. Siempre, eso sí, que queden periodistas y que sean algo más que residuos y cascotes de empresas en quiebra.

Nuestra tarea no consiste en decir qué hacer con los residuos, sino, más bien, debemos proporcionar información y herramientas para que el público se forme su propio criterio y opine lo que mejor le parezca. Y ello es así porque, como ha dejado escrito Arcadi Espada, «ninguna batalla decisiva de la contemporaneidad puede producirse fuera de los medios». Y hoy la expresión «los medios» incluye esa enorme plaza pública de las redes sociales.

Nosotros los periodistas somos, debemos ser, deberíamos ser, notarios de la realidad, no actores. Una vez más, en este asunto la contribución de los periodistas, en mi opinión, ha de ser la de contar, por supuesto con rigor, las consecuencias de las distintas posibilidades de la gestión de los residuos de alta, el combustible gastado, y para eso tenemos que hacer nuestro trabajo consultando fuentes, jerarquizándolas, permitiendo que los ciudadanos estén informados y puedan formarse su propio criterio. Insisto, su propio criterio, no el nuestro, no el de las fuentes que mejor nos caigan o con las que simpatizamos.

Tenemos, por tanto, la obligación de conocer bien a nuestras fuentes, de saber bien por donde respiran. No solo saber de qué pie cojean, sino saber quiénes son, a quien hay que llamar en cada caso, cómo contrastamos la información. Porque de lo que se trata es de contrastar la información. Ese es el trabajo de los periodistas. No fiarse, contrastar. Pero al decir que no tenemos que tomar partido no quiero decir que debemos ser simples correas de transmisión de datos más o interesados de las fuentes. Si lo que la fuente dice es una barbaridad, tenemos que ser capaces de detectarlo. Tenemos que poner nuestro granito de arena, o algo más de un grano de arena, para evitar el riesgo del desconocimiento, con frecuencia un riesgo no suficientemente valorado.

Por eso, lo primero que tenemos es saber de lo que hablamos. Por eso, creo firmemente en la especialización en la información. Hay que tener

historia, conocimientos, contactos y criterio para hacer bien una información. Sabiendo qué papel debe jugar cada pieza en el rompecabezas de la información: la historia, los conocimientos, los contactos y el criterio. No debemos confundir lo que vemos, que es noticia; con lo que sabemos, que es conocimiento; ni con lo que sentimos, que es opinión. Y no debemos confundir ninguna de las tres, aunque hemos estar provistos de todas para hacer una buena información.

Es decir, tenemos que tener fuentes, contactos, maneras de contrastar la información. Porque, así como todos los enfermos del doctor House mienten, todas las fuentes son interesadas. Todas. Y es necesario saber el interés de cada uno, y es necesario tener otra fuente con la que contrastar la información proporcionada. Tendrán interés económicos, ideológicos o de cualquier otro tipo, pero todas tienen intereses. Todas las fuentes quieren arrimar a la sardina de su interés el ascua de la noticia.

Pero, además de la información pura, el hecho de que tratemos cuestiones que no son de dominio público nos va a obligar con frecuencia a hacer divulgación, además de hacer información. Esto se debe a que algunas de las cuestiones que se han de tratar en estas informaciones, insisto, no son de dominio público y no son bien conocidas o son incluso completamente desconocidas. Y así como el cronista deportivo no se ve en la obligación de explicar qué es una eliminatoria a doble vuelta, el periodista que hable de residuos radioactivos quizá tenga que dedicar unas líneas a explicar la diferencia entre almacenamiento geológico profundo y en superficie, entre ATC, AGP, etc.

Me gustaría terminar con las mismas palabras que, la verdad, utilizo mucho últimamente, quizá con la esperanza de que se hagan realidad de tanto repetirlas. Y termino con ellas no solo porque me parece que recogen una posición muy acertada sino por dejar de hacer caso, por una vez, a Winston Churchill cuando decía: no caigamos en el pecado de la coherencia. Creo que los periodistas de hoy debemos tratar de ser como el periodista Manuel Chaves Nogales. De él dice Antonio Muñoz Molina en el prólogo del libro que recoge sus crónicas de la Guerra Civil que «no se casaba con nadie. En su integridad intelectual, en su independencia política, en su radical toma de partido por los seres humanos de carne y hueso frente a las abstracciones genocidas de las ideologías de su tiempo, el comunismo y el fascismo, a la altura de Chaves Nogales solo está George Orwell». Ya me gustaría, insisto, que los periodistas de hoy fuéramos como Chaves Nogales, aunque no creo que eso sea posible. Pero, al menos, deberíamos intentarlo.

REFERENCIAS

6th GRWP;C.II.1.3 Strategic action lines.

A low carbon nuclear future: Economic assessment of nuclear materials and spent nuclear fuel management in the UK, Smith School of Enterprise and the Environment University of Oxford March 2011.

BCG, 2006. Economic Assessment of Used Nuclear Fuel Management in the United States.

BUNN, M., FETTER, S., HOLDREN, J. P., van der ZWAAN, B. (2003), *The Economics of Reprocessing vs. Direct Disposal of Spent Nuclear Fuel*. Harvard Kennedy School. Project on Managing the Atom, December.

BUNN, M., HOLDREN, J. P., FETTER, S. y ZWAAN, B. van der, «The economics of reprocessing v. direct disposal of spent nuclear fuel», Supported by the U.S. Department of Energy (DOE), under Award No. DE-FG26-99FT40281.

DU, Y. y PARSONS, J. E., «Update on the Cost of Nuclear Power», *Center for Energy and Environmental Policy Research Working Paper #09-004*, May 2009.

EPRI, 2007. «An Economic Analysis of Select Fuel Cycles Using the Steady-State Analysis Model for Advanced Fuel Cycles Schemes (SMAFS)», 1015387, Technical Update, December. EPRI Project Manager J, Hamel.

Ernst & Young, Comparaison Internationale des coûts de stockage géologique des déchets radioactifs.

G. DE ROO, J. E., «Parsons A methodology for calculating the levelized cost of electricity in nuclear power systems with fuel recycling», *Energy Economics* 33 (2011) 826-839.

HOÖGSELIUS, P., «Spent nuclear fuel policies in historical perspective: An international comparison», *Energy Policy* 37 (2009) 254-263.

http://www.tns-sofres.com/_assets/files/2010.02.22-areva.pdf. May 2013.

International Atomic Energy Agency, Country nuclear fuel profiles – Edition 2005.

JOSKOW, P. L. & PARSONS, J. E., «The economic future of nuclear power», *Daedalus* 138(4), Fall 2009.

KO, W. and GAO, F., «Economic Analysis of Different Nuclear Fuel Cycle Options» Hindawi Publishing Corporation, Science and Technology of Nuclear Installations, Volume 2012, Article ID 293467, 10 pages.

KOTSCHENREUTHER, M., VALANJU, P. y MAHAJAN, S., «Reprocessing free nuclear fuel production via fusion fission hybrids», *Fusion Engineering and Design*, Volume 87, Issue 4, May 2012, pp. 303-317.

LAGUS, T. P. (2005), «Reprocessing of spent nuclear fuel: a policy analysis», *Journal of Engineering and Public Policy* 9, 1-27.

Monographies DEN: Une monographie de la Direction de l'énergie nucléaire Commissariat à l'énergie atomique « L'énergie nucléaire du futur: quelles recherches pour quels objectifs? (2005) ISBN 2-281-11307-8.

NATARAJAN, R. y RAJ, B., «Fast Reactor Fuel Reprocessing Technology: Successes and Challenges», *Energy Procedia* 7 (2011) 414-420.

NUTT, W. M., DUNCAN, Z. y COTTON, T., «Prioritization Criteria for the Selection of Used Nuclear Fuel for Recycling» WM2011 Conference, February 27 – March 3, 2011, Phoenix AZ, 11008.

OECD/NEA, *The Economics of the Nuclear Fuel Cycle*, OECD, Paris, France, 1994.

PARK, B. H. F., GAO, E. KWON, W. KO, «Comparative study of different nuclear fuel cycle options: Quantitative analysis on material flow», *ENERGY POLICY* 39 (2011) 6916-6924.

RAMANA, M. V. y SUCHITRA, J. Y., «Costing plutonium: economics of reprocessing in India», *Int. J. Global Energy Issues*, Vol. 27, No. 4, 2007.

RECKTENWALD, G. D. y DEINERT, M. R., «Cost probability analysis of reprocessing spent nuclear fuel in the US», *Energy Economics* 34 (2012) 1873-1881.

Recycling as an option of Used Nuclear Fuel Management Strategy for Europe, M. CHIGUER, J. – L. CASABIANCA, J. – P. GROS, AREVA.

Recycling as an option of Used Nuclear Fuel Management Strategy for Europe, M. CHIGUER, J. – L. CASABIANCA, J. – P. GROS, AREVA.

SCHNEIDER, E. A., DEINERT, M. R. y CADY, K. B., «Cost analysis of the US spent nuclear fuel reprocessing facility», *Energy Economics* 31 (2009) 627-634.

SILVERIO, L. B. y QUEIROZ LAMAS, W. DE, «An analysis of development and research on spent nuclear fuel reprocessing», *Energy Policy* 39 (2011) 281-289.

The Cost of High-Level Waste Disposal in Geological Repositories. An Analysis of Factors Affecting Cost Estimates. Nuclear Energy Agency. Organization for economic co-operation and Development. (1993).

REFERENCIAS

The Future of Nuclear Power, An Interdisciplinary MIT study, Massachusetts Institute of Technology (2003) ISBN 0-615-12420-8.

The Future of Nuclear Power, An Interdisciplinary MIT study, Massachusetts Institute of Technology (2011) ISBN 978-0-9828008.

VON HIPPEL, F., 2001, Plutonium and reprocessing of spent nuclear fuel«, *Science* 293 (2001), 2397-2398.

WIDDER, S., «Benefits and concerns of a closed nuclear fuel cycle», *Journal of renewable and sustainable energy* 2 (2010) 062801.

World nuclear Info – <http://www.world-nuclear.org/info/inf69.html#R5>.

ZHOU, Y., «Why is China going nuclear? », *Energy Policy* 38 (2010) 3755-3762.

ZHOU, Y., «China's Spent Nuclear Fuel Management: Current Practices and Future Strategies», *Energy Policy* 39 (2011) 4360-4369.

13

BIBLIOTECA
COMILLAS
Ingeniería

La Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas de la Universidad Pontificia Comillas tiene la vocación de servir al debate y la reflexión acerca de la problemática inherente al suministro energético y su sostenibilidad en el medio y largo plazo, así como su solución y la contribución que a ella brindan las Nuevas Tecnologías Energéticas para asegurar el suministro.

El Comité de Energía y Recursos Naturales del Instituto de la Ingeniería de España desde los años 70 ha editado monografías referidas a temas de actualidad y que contienen la experiencia de un grupo de profesionales de reconocido prestigio interesados en la energía.

Fruto de estos intereses mutuos nació el Seminario Permanente de Tecnologías Energéticas, como un foro de encuentro de los profesionales y académicos del sector energético en el que reflexionar sobre las posibles soluciones tecnológicas al problema energético. Este volumen, **Combustible Nuclear**, continúa las publicaciones del Seminario con las que se pretende presentar a la sociedad las soluciones técnicas disponibles para el abastecimiento energético para que ésta pueda formarse un juicio crítico sobre las mismas.

Patrocina la Cátedra

