



Gestión del combustible gastado de las centrales nucleares

Autor: Estefanía García Espejo

Institución: Universidad de Murcia

Otros autores: Asunción M^a Hidalgo Montesinos (Universidad de Murcia); María Gómez Gómez (Universidad de Murcia); M^a Dolores Murcia Almagro (Universidad de Murcia)

Resumen

La energía nuclear es ampliamente utilizada en la producción de electricidad. Esta actividad genera residuos radiactivos que constituyen hoy en día un problema ambiental de gran preocupación para la sociedad, tanto por la cantidad producida como por la toxicidad de los radionucleidos. De modo que, estos residuos deben ser correctamente gestionados para proteger a los seres humanos y al medio ambiente.

Aunque se generan diversos tipos de residuos, este estudio se va a centrar principalmente en el combustible nuclear gastado y en su gestión. El combustible irradiado es uno de los materiales con más alta actividad y toxicidad que existen, ya que contienen isótopos radiactivos con un periodo de vida de decenas de miles de años. Las tecnologías que se utilizan actualmente para prevenir la propagación de este peligro para el medio ambiente aseguran su acondicionamiento y almacenamiento de forma segura pero sólo temporalmente, puesto que aún no se ha llevado a cabo la eliminación o almacenamiento definitivo de dichos materiales.

En la presente revisión se describen las técnicas más importantes en el tratamiento de los residuos de combustible nuclear gastado, así como las nuevas tecnologías que se están desarrollando para su reutilización o reciclaje, o para dar una gestión definitiva y adecuada al mismo, sin que suponga un peligro para la salud humana ni para el medio que nos rodea.

Palabras clave: combustible usado, residuos radiactivos, gestión

1. Introducción y objetivos

La producción de energía eléctrica a partir de reacciones de fisión nuclear es cada vez mayor a nivel mundial, ya que cada vez más países apuestan por este modelo energético. Aproximadamente un 12% de la electricidad consumida en el mundo es de origen nuclear y a nivel nacional un 20%.

El marco normativo y reglamentario del sector nuclear en España es extenso y muy completo, y ha sido desarrollado en parte gracias al marco legislativo de la Unión Europea, a través de Euratom.

Existen diferentes modelos de reactores nucleares aunque los más utilizados son los Reactores de Agua Ligera (LWR) y dentro de este grupo, los Reactores de Agua a Presión (PWR), concretamente en España la mayoría son de este tipo. El uranio enriquecido que utilizan como combustible, genera unos residuos radiactivos de difícil gestión. Este es uno de los principales inconvenientes que presenta la energía nuclear, a pesar de que es un sistema aparentemente rentable en términos energéticos.

En nuestro país, estos residuos son gestionados por Enresa. Los residuos de baja y media actividad (RBMA) son almacenados en el Centro de El Cabril (Córdoba). Y los residuos de alta actividad (RAA) y del combustible nuclear tienen como destino un almacén temporal que será construido en Villar de Cañas (Cuenca), mientras tanto, se almacenan en las piscinas de las propias centrales nucleares. Éstos suponen un 5% del total de los residuos radiactivos generados en el territorio español, y aunque no constituyen una gran cantidad, son altamente peligrosos debido a su composición en isótopos radiactivos de vida larga.

El objetivo global de este trabajo es evaluar la situación de los residuos procedentes de las centrales nucleares, estudiando su gestión y alternativas de tratamiento y eliminación. Para ello se han establecido los siguientes objetivos parciales:

- a) Exponer las características de la energía nuclear, su situación actual y los beneficios e inconvenientes que presenta.
- b) Estudiar el funcionamiento de una central nuclear, prestando especial atención a las instalaciones españolas.
- c) Estudiar los residuos radiactivos procedentes de las centrales nucleares en España.
- d) Revisar las tecnologías empleadas para la adecuada gestión de los residuos de combustible nuclear gastado.
- e) Estudiar los recientes avances en el tratamiento de los residuos de combustible gastado de las centrales nucleares, a nivel nacional e internacional.
- f) Determinar si existen nuevos estudios para la reutilización o reciclaje del combustible irradiado.

2. Antecedentes

2.1. Energía nuclear

2.1.1. Definición

La energía nuclear es aquella que se libera en las reacciones nucleares, ya sea de forma espontánea o artificial. Puede obtenerse de dos maneras, mediante el proceso de fisión o fusión de átomos. En estas reacciones nucleares se liberan grandes cantidades de energía, que suelen aprovecharse para generar electricidad en las centrales nucleares, aunque también puede utilizarse en otras aplicaciones.

Según el Foro Nuclear Español, un tercio de la energía generada en Europa tiene origen nuclear.

Supone la fuente de energía que más horas funciona al año (24 horas y los 365 días al año), además de ser una de las más rentables, ya que 32,3 kilos de uranio tienen la energía equivalente de 100.000 toneladas de carbón [1, 2].

La producción de electricidad a partir de combustible nuclear ha ido aumentando a nivel mundial como se puede observar en la Figura 1.

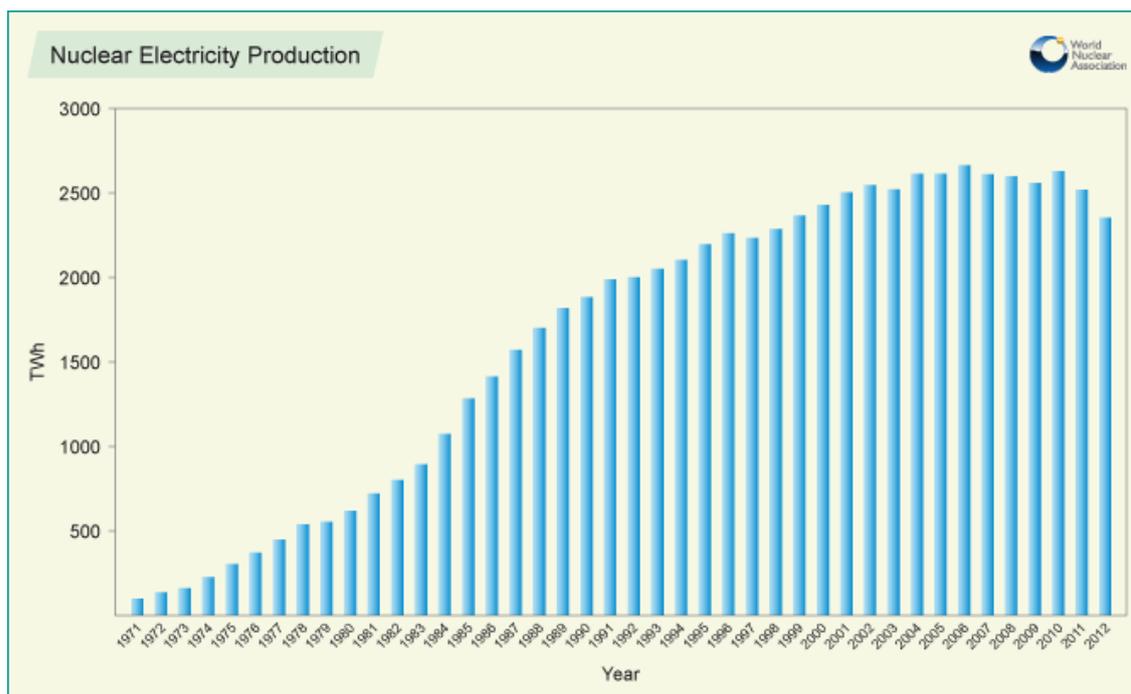


Figura 1. Evolución anual de la producción mundial de electricidad a partir de la energía nuclear en las últimas décadas. [Fuente: WNA (World Nuclear Association)]

Según datos proporcionados por el WNA (World Nuclear Association) la producción de energía eléctrica de origen nuclear a nivel mundial en el año 2011 supuso un 11,6%. Actualmente 31 países acogen más de 430 reactores nucleares con una capacidad total instalada de más de 370.000 MWe. Cada vez son más los países que apuestan por la energía nuclear, ya que está prevista la construcción de unos 70 nuevos reactores nucleares [3].

➤ Fisión nuclear

El proceso de fisión nuclear consiste en la división del núcleo de un átomo pesado en dos núcleos más ligeros, al ser bombardeado con neutrones, protones o partículas α . Como resultado se obtienen productos radiactivos, se libera energía y se emiten neutrones, que a su vez, pueden producir más fisiones en núcleos vecinos fisiónables, lo cual produce la emisión de nuevos neutrones y así sucesivamente.

Este proceso se conoce con el nombre de reacción en cadena, en la que se libera una gran cantidad de energía, que si se produce de forma controlada puede ser utilizada para proporcionar electricidad a la sociedad. En la Figura 2 se muestra un esquema de este proceso.

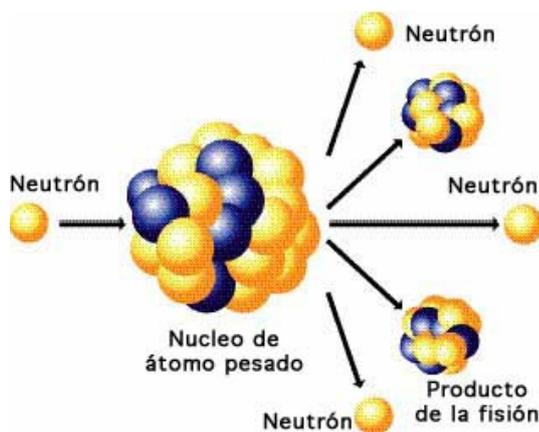


Figura 2. Fisión Nuclear. [Fuente: Atmosferis.com]

➤ Fusión nuclear

La fusión nuclear consiste en la unión de núcleos atómicos livianos, para dar lugar a núcleos más pesados, liberando o absorbiendo gran cantidad de energía. Si la fusión tiene lugar entre dos núcleos de menor masa que el hierro, se libera energía, si se produce la unión de núcleos más pesados que el hierro, se absorbe energía. Pero los elementos atómicos empleados normalmente en las reacciones de fusión nuclear son el hidrógeno y sus isótopos (deuterio y tritio), que constituyen núcleos muy ligeros.

La fusión nuclear posee numerosas ventajas de seguridad y medioambientales, como fuente de energía. Al no ser reacciones en cadena, en el momento en el que se cierra el suministro de combustible se puede parar la reacción, de modo que así nunca se pierde el control del proceso. Sin embargo, los científicos siguen estudiando cómo controlar la cantidad descomunal de energía que una reacción de fusión crearía [4, 5].

2.2. Central nuclear

Una central nuclear es una instalación industrial utilizada para generar energía eléctrica a partir de energía nuclear. Al igual que las centrales termoeléctricas, aprovechan el calor liberado por el combustible para producir la electricidad. Este combustible nuclear está

compuesto por el material fisionable, que libera una gran cantidad de energía calorífica, utilizada para calentar las tuberías de agua que están alrededor de la caldera, permitiendo su evaporación. Ese vapor de agua es empleado para hacer girar unas turbinas, que a su vez, hacen girar un generador eléctrico, transformando el trabajo mecánico en energía eléctrica. Posteriormente esa energía pasa por un transformador para ser introducida en la red eléctrica.

En la Figura 3 se muestra un dibujo del funcionamiento de una central nuclear.

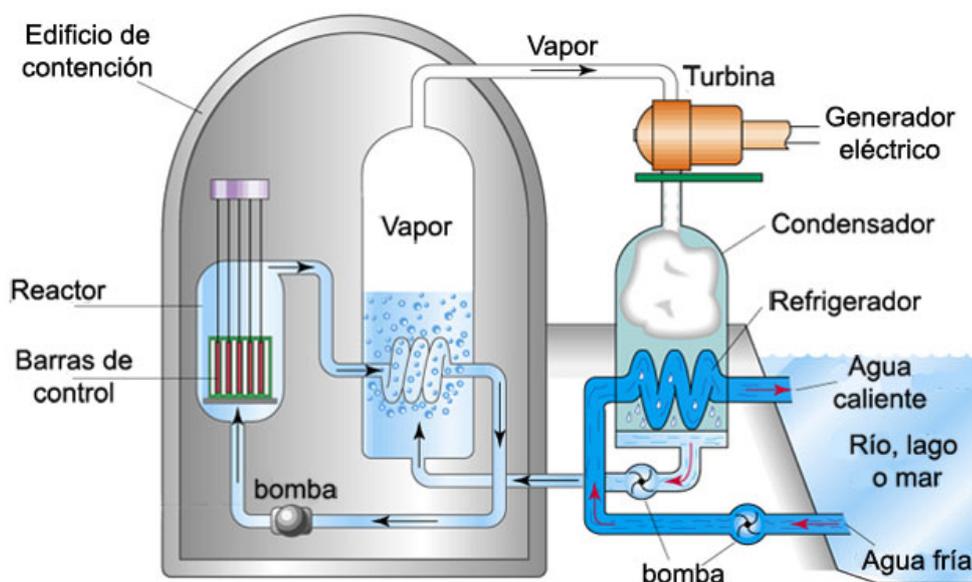


Figura 3. Esquema de funcionamiento del reactor nuclear. [Fuente: energía nuclear.net]

A continuación se describen brevemente cada una de las partes de una central nuclear [6, 7].

2.2.1. Reactor nuclear

El reactor nuclear es la instalación encargada de iniciar, controlar y mantener las reacciones en cadena de fisión que se produzcan en el núcleo de esta instalación [8].

Un reactor nuclear de fisión consta de las siguientes partes:

- A. **Combustible:** es todo aquel material que tiene capacidad de fisionarse lo suficiente como para mantener una reacción nuclear en cadena. Es la fuente de generación de calor. En las centrales nucleares el combustible se encuentra en forma de pequeñas pastillas cilíndricas agrupadas en unos tubos que forman grupos de más de 200 unidades, los cuales constituyen las llamadas barras de combustible, que se encuentran en el núcleo

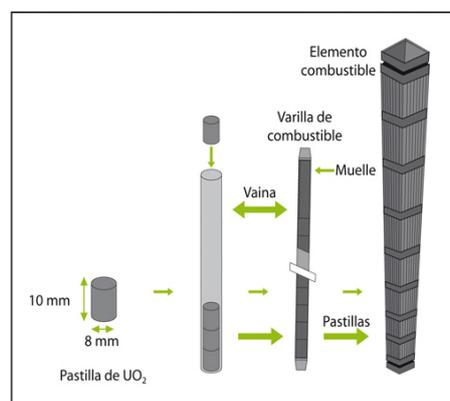


Figura 4. Partes de un elemento combustible. [Fuente: Enusa]

del reactor.

A su vez, las barras de combustible forman haces de entre 100 a 400 barras combustibles dependiendo de cada reactor.

En la Figura 4 se muestra la composición de un elemento combustible.

El núcleo de un reactor nuclear contiene cientos de haces de combustible [9].

El tipo de combustible varía dependiendo del reactor, pero generalmente se utiliza uranio ^{235}U , aunque también hay otros elementos fisionables, como el Plutonio ^{239}Pu que es un subproducto de la fisión del uranio. Ya que el uranio fisionable natural no es muy abundante, en la mayoría de los reactores se utiliza uranio enriquecido, es decir, combustible donde se aumenta la cantidad de ^{235}U . De este modo, los combustibles nucleares más comunes son el uranio natural (0.72% de ^{235}U), uranio enriquecido (más del 0.72% de ^{235}U) y el plutonio ^{239}Pu .

➤ Uranio natural

Cuando el mineral de uranio se extrae de la tierra hay que someterlo a diferentes tratamientos para purificarlo. El uranio natural está formado por una mezcla de ^{238}U y ^{235}U , estando este último en menos proporción (de todo el uranio natural, sólo el 0,72 % es ^{235}U , mientras que el 99,28% restante es ^{238}U) [10]. Ambos isótopos son radioactivos.

Sin embargo, sólo el ^{235}U es fisible, pero al encontrarse en tan baja proporción se necesitan abundantes cantidades de éste para poder utilizarlo como combustible.

Una vez que se ha extraído el mineral de la tierra se procede a una molienda que da lugar a un polvo seco de color amarillo que es óxido de uranio (U_3O_8), después hay que convertirlo en el tipo cerámico o dióxido de uranio (UO_2) que se compacta formando pastillas para construir las barras de combustible que se emplean en los reactores.

➤ Uranio enriquecido

El enriquecimiento de uranio consiste en aumentar el porcentaje de ^{235}U , ya que sólo éste posee las características necesarias para mantener una reacción en cadena.

Hay que partir del concentrado de uranio (U_3O_8) obtenido del proceso minero y convertirlo a hexafluoruro de uranio, (UF_6) que debe ser enriquecido en el isótopo fisionable para que se pueda utilizar como combustible nuclear.

Es necesario separar los isótopos del uranio, sin embargo, resulta bastante complicado puesto que los diferentes isótopos son difíciles de distinguir químicamente, por lo que se recurre a alguna propiedad física que permita diferenciarlos [11].

El enriquecimiento se consigue utilizando 2 métodos principalmente: difusión gaseosa o excitación con láser. La *difusión gaseosa o centrifugación* se basa en la diferencia de masas de los distintos isótopos del uranio. En este caso, el uranio que se encuentra en forma de UF_6 en estado gaseoso, es transformado en UO_2 que es el que se utiliza finalmente como combustible en los reactores nucleares. Otro método de enriquecimiento se basa en la separación de isótopos mediante

excitación láser, en el que se aprovechan las diferencias en los niveles energéticos. El enriquecimiento habitual suele alcanzar aproximadamente un 4% de ^{235}U para fabricar las barras de combustible que se introducen en el reactor y así comenzar la fisión nuclear.

➤ Plutonio

El plutonio no existe de forma natural en cantidad apreciable, sino que es producido artificialmente en los reactores nucleares a través de la absorción de neutrones del ^{238}U obteniéndose así su principal isótopo, el ^{239}Pu , que puede absorber neutrones a su vez y fisionarse junto con el ^{235}U en un reactor [1].

- B. Moderador:** los neutrones obtenidos de la fisión nuclear tienen velocidades muy altas (elevada energía cinética). Si esta velocidad sigue aumentando, las reacciones en cadena dejarán de producirse, por lo que es necesario reducir esas velocidades mediante choques con átomos de un material llamado moderador. Los moderadores que se suelen utilizar son agua ligera, agua pesada, grafito, helio y sodio metálico.
- C. Refrigerante:** es capaz de extraer el calor generado por el combustible en el núcleo del reactor, mediante fluidos en los cuales se sumerge el núcleo y conduce esa energía calorífica hasta un intercambiador de calor, o directamente a la turbina generadora de electricidad. Este componente impide que el calor que se genera en el núcleo del reactor llegue a fundirlo.
- D. Reflector:** es la sección que rodea el núcleo del reactor para evitar las pérdidas de neutrones. Está formado por un material que posee propiedades dispersantes para neutrones, de modo que los devuelve a la región de reacción aumentando la eficiencia del reactor.
- E. Blindaje:** para evitar que las radiaciones generadas en el reactor se escapen al exterior, se coloca un blindaje alrededor del reactor de hormigón, acero, plomo o agua.
- F. Sistema de control:** mediante un sistema de control se pueden detener las reacciones nucleares en cadena, controlando el nivel de neutrones y manteniendo estable el reactor.
- G. Sistemas de emergencia:** son necesarios en todas las centrales nucleares para evitar una liberación de radiactividad al exterior del reactor en caso de accidente [12, 13, 14].

2.2.2. Tipos de reactores nucleares

Los reactores nucleares de potencia, es decir, los que están destinados a la producción de energía eléctrica pueden clasificarse según el moderador, el tipo de combustible y el refrigerante utilizado [15]. En la Tabla 1 se muestra un cuadro resumen de los diferentes tipos de reactores más comunes en la actualidad.

Tabla 1. Cuadro resumen de los tipos de reactores más utilizados en la actualidad

Tipo de Reactor	LWR (Reactor de Agua Ligera)	HWR (Reactor de Agua Pesada)	Reactor de grafito-gas	FBR (Fast Breeder Reactor)
Moderador	Agua corriente	Agua pesada	Grafito	no necesita
Refrigerante	Agua corriente	Agua pesada	CO ₂ o Helio	Sodio liquido
Combustible	Uranio enriquecido	Uranio natural	Uranio enriquecido	Plutonio
Características	2 tipos : - BWR (reactores de agua en ebullición) - PWR (reactores de agua a presión)	También conocido como CANDU	Son reactores de 2º generación. 2 tipos: - AGR >> CO ₂ - HTGR >> helio	Utilizan neutrones rápidos en lugar de térmicos para la consecución de la fisión.

2.2.3. Centrales nucleares en España

En España se encuentran en funcionamiento 5 centrales nucleares y 7 reactores, ya que 2 de éstas disponen de 2 reactores cada una. Existen 3 centrales en fase de desmantelamiento (José Cabrera, Vandellós I y Santa María de Garoña), aunque se especula con la posibilidad de reapertura de esta última. En la Tabla 2 se recogen las diferentes centrales nucleares operativas en España y sus principales características.

Tabla 2. Centrales Nucleares Españolas

Central Nuclear	Localización	Tipo	Potencia eléctrica(MW)	Año Inauguración de
Almaraz I	Almaraz (Cáceres)	PWR	1035.30	1980
Almaraz II	Almaraz (Cáceres)	PWR	1045.00	1983
Ascó I	Ascó (Tarragona)	PWR	1032.50	1982
Ascó II	Ascó (Tarragona)	PWR	1027.21	1985
Cofrentes	Cofrentes (Valencia)	BWR	1092.02	1984
Trillo	Trillo (Guadalajara)	PWR	1066.00	1987
Vandellós II	Vandellós (Tarragona)	PWR	1087.14	1987

La producción de electricidad de origen nuclear en España se encuentra en torno al 20%, siendo la segunda fuente de generación de energía eléctrica del país, quedando únicamente por detrás del ciclo combinado, que representa casi el 30% de la producción total [1]. En la Tabla 3 se muestra la generación de electricidad en BkWh (billones de kilovatios hora) producidos por las centrales nucleares españolas desde el año 2007 hasta el 2012.

Tabla 3. Energía eléctrica generada por las centrales nucleares españolas (2007-2012). Fuente: EIA (Energy Information Administration)

Año	2007	2008	2009	2010	2011	2012
BkWh	52.348	56.024	50.123	58.891	54.767	58.725

Si se comparan estos datos con otros países, se observa que España no es uno de los mayores productores mundiales. Francia, por ejemplo, es el país europeo más partidario de esta fuente de energía, cuenta con 58 reactores y produjo 404.9 BkWh en 2012. Por su parte, Alemania posee 9 reactores y generó en ese mismo año 94.1 BkWh. USA con 100 reactores generó 769.3 BkWh, también en 2012, según el NEI (Nuclear Energy Institute) [19, 20].

➤ **Fabrica de combustible de Juzbado**

España cuenta con ENUSA (Empresa Nacional del Uranio) Industrias Avanzadas S.A., para la fabricación de elementos combustibles para las centrales nucleares españolas y extranjeras. Está instalada en la localidad salmantina de Juzbado.

Esta empresa fabrica combustible para los reactores PWR y BWR. En el año 2012 se fabricaron 918 elementos combustibles: 624 para los PWR y 294 para los BWR.

El 27% de la producción de combustible se corresponde con el mercado nacional y 73% restante se destina al mercado internacional [8].

➤ **Almacén de residuos de El Cabril**

El Cabril es el centro de almacenamiento de los residuos radiactivos de baja y media actividad que llegan de todas las centrales nucleares españolas, así como de los residuos que se generan por la medicina, la investigación o cualquier campo que utilice materiales radiactivos en sus procesos.

Se sitúa en el término municipal de Hornachuelos en Córdoba y está gestionado por ENRESA (Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, S.A.).

Desde el comienzo de su actividad en 1992 hasta 2012 la instalación ha recibido 36,613.326 m³ de residuos, lo que supone un 67.5% de su capacidad total. De las 28 celdas de almacenamiento que dispone, a finales de 2012, 18 estaban completas [21].

➤ **Almacén Temporal Centralizado**

Existe un proyecto de construcción de un Almacén Temporal Centralizado (ATC) para depositar los residuos de alta actividad y combustibles usados generados en las centrales nucleares españolas. Estará ubicado en Villar de Cañas (Cuenca) con un periodo de actividad de 60 años. Actualmente estos residuos nucleares se almacenan en las piscinas de las propias centrales.

Este centro pretende reducir el número de instalaciones nucleares, ya que no serían necesarios pequeños almacenamientos temporales de combustibles irradiados.

El hecho de que se agrupen los residuos en una sola superficie, supone centralizar la gestión y vigilancia, optimizando los recursos humanos y económicos, de modo que se reducen los costes. Además, esta instalación tendrá en cuenta los avances de la investigación nuclear, persiguiendo la minimización del impacto medioambiental global [22].

2.3. Polémica nuclear

La energía nuclear produce una gran cantidad de energía eléctrica. Una central como la de Ascó, de más de 1000 MW de potencia, consigue generar con 26 toneladas de uranio enriquecido la misma electricidad que la que obtiene una central térmica quemando 1,8 millones de toneladas de carbón. Pero aunque el combustible nuclear tiene una gran capacidad energética por unidad de masa, su principal inconveniente es la radioactividad de sus residuos y su dificultad para gestionarlos, como se verá en apartados posteriores. Además, está la preocupación por la seguridad pública, puesto que un fallo en estas centrales puede provocar graves explosiones nucleares, también hay que tener en cuenta que debido a esto, son objetivo potencial terrorista.

Las centrales nucleares no contribuyen al calentamiento global ya que no emiten gases de efecto invernadero a la atmósfera como son el CO₂ o NO_x, ni otros elementos derivados de la combustión, como las cenizas o el azufre, esto se debe a que no dependen de combustibles fósiles para su operación. Sin embargo, las emisiones derivadas de su propia construcción, de la fabricación del combustible y de la gestión de los residuos radiactivos no son despreciables.

Actualmente en España, la vida útil de las plantas nucleares es de 40 años (aunque se está debatiendo su ampliación a 50 o 60 años), por lo que en términos económicos se cuestiona su rentabilidad si se analizan los costes de la construcción y puesta en marcha [24, 25, 26].

4. Residuos radiactivos de centrales nucleares

4.1. Definición y clasificación

En España, la Ley 54/1997, de Regulación del Sector Eléctrico, define **residuo radiactivo** como “cualquier material o producto de desecho, para el cual no está previsto ningún uso, que contiene o está contaminado por radionucleidos en concentraciones o niveles de actividad superiores a los establecidos por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (MITYC), previo informe del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN)”.

La **radioactividad** es la propiedad que tienen ciertos elementos de modificar su estructura nuclear mediante la emisión de radiaciones, de modo que van perdiendo su actividad radiactiva hasta convertirse en elementos estables. Estos elementos capaces de emitir radiación son llamados radionucleidos [27].

Existen 3 tipos de radiaciones: alfa, beta y rayos gamma. Debido a que las radiaciones emitidas por los radionucleidos que contienen los residuos nucleares son ionizantes pueden suponer un riesgo para el ser humano y el medio ambiente. Una exposición continua a una radioactividad elevada en pequeñas dosis provoca cáncer, enfermedades y trastornos genéticos que repercuten en la descendencia del individuo expuesto.

Además, estos residuos pueden tardar cientos o miles de años (según el tipo de actividad) en perder su radiactividad y transformarse en elementos químicos estables. Por estos motivos, deben ser aislados en depósitos controlados y gestionados de manera segura, para limitar las exposiciones de los trabajadores y del público y evitar cualquier tipo de fuga radiactiva.

Los **residuos radiactivos se pueden clasificar** atendiendo a diversos criterios: su estado físico (gases, líquidos o sólidos), tipo de radiación que emite (alfa, beta o gamma), periodo de semidesintegración (vida corta, media o larga), sistema de tratamiento, radiotoxicidad, generación de calor, etc. [28]. Actualmente en España los residuos radiactivos se clasifican desde el punto de vista de su almacenamiento definitivo, de acuerdo con los criterios adoptados por la Comisión Europea, por lo que hay que tener en cuenta, el período de semidesintegración (tiempo en el que el número de átomos radiactivos de un nucleido se reduce a la mitad) y su actividad específica (actividad por unidad de masa o unidad de volumen). De este modo se distinguen los siguientes grupos [14, 21, 29]:

a) Residuos de baja y media actividad (RBMA): se generan principalmente por las actividades de limpieza de las centrales, desmantelamiento de las mismas, minería, fabricación del combustible nuclear, centros de investigación, servicios de medicina nuclear, etc. Presentan baja actividad específica por elemento radiactivo y no generan calor, ya que su concentración en radionucleidos es pequeña. A su vez se distinguen:

- *RBMA y de vida corta*: contienen radionucleidos emisores beta-gamma con un periodo de semidesintegración inferior o igual a 30 años, como son el cesio 137 y el estroncio 90, y un contenido bajo y limitado en radionucleidos emisores alfa (de vida larga), que debe ser inferior a 0,01 curios (Ci) por tonelada.
- *RBMA y de vida larga*: contienen radionucleidos y emisores alfa que poseen concentraciones superiores a los límites de los residuos de vida corta.

Son confinados a poca profundidad en las instalaciones del Centro de Almacenamiento de El Cbril, en Córdoba, para garantizar su aislamiento. En algunos cientos de años dejan de ser peligrosos para la salud. La mayoría de los residuos radiactivos que se generan en nuestro país son de BMA.

b) Residuos de alta actividad (RAA): son los generados por el combustible gastado de la propia central o por las actividades de reprocesamiento. Los RAA contienen elevadas concentraciones de radionucleidos de vida corta y media y radionucleidos emisores alfa, que reducen su actividad entre los 10.000 y 100.000 años. Desprenden calor debido a la desintegración radiactiva y tardarán miles de años en dejar de ser nocivos para la salud, por lo que necesitan instalaciones a más de 500 m de profundidad que garanticen un total aislamiento del medio y de los seres humanos durante miles de años. Un ejemplo de isótopo radiactivo del combustible gastado es el plutonio 239 o el carbono 14 presente en el grafito de algunas centrales.

Aunque los RBMA son menos peligrosos que los RAA, son mucho más voluminosos: mientras que una tonelada de combustible nuclear genera cerca de 100 m³ de RBMA, produce unos de 40 m³ de RAA.

Los residuos radiactivos en España tienen diversos orígenes, como son los derivados de la aplicación de los radioisótopos a la medicina, la industria e investigación, otros

procedentes del desmantelamiento de las centrales... pero este estudio se va a centrar en los residuos de combustible gastado de las centrales nucleares.

4.2. Residuos de combustible gastado

El óxido de uranio contenido en los elementos combustibles se va agotando a medida que se genera energía en el reactor (es utilizado de unos 3 a 4 años), por lo que es necesaria su sustitución por nuevo material fisionable, esta operación se llama recarga.

El combustible gastado, también llamado irradiado o quemado está formado fundamentalmente por uranio y plutonio reutilizables. También contiene otros elementos transuránicos en menor cantidad que suponen un riesgo radiológico potencial como el americio, el curio o el neptunio [33]. En la Tabla 4 se muestra la composición de una tonelada de uranio enriquecido irradiada en un reactor de agua a presión (PWR) tras 3 años de operación.

Tabla 4. Componentes de 1 t de combustible gastado a los 3 años de operación en un PWR. [Fuente: CNEA (Comisión Nacional de Energía Atómica)]

Elementos	Peso
Uranio	956 kg
Plutonio	9,7 kg
Actínidos ¹ minoritarios: neptunio, americio y curio	0,78 kg
Productos de fisión ²	34,3 kg
Productos de activación ³	0,180 g

¹ Actínidos se originan cuando el ^{238}U captura los neutrones producidos en la desintegración del ^{235}U .

² Productos de fisión se generan por la fisión del ^{235}U .

³ Productos de activación se producen por la irradiación de neutrones sobre las vainas que contienen el combustible.

En las centrales nucleares de España se generan anualmente cerca de 160 toneladas de combustible gastado, lo que supone un 5% del total de los residuos radiactivos.

A finales de 2011, exactamente 3.539,59 toneladas de uranio gastado estaban almacenadas temporalmente en las centrales nucleares [5].

4.2.1. Gestión del combustible gastado

La gestión de los residuos radiactivos incluye todas las actividades técnicas y administrativas que permiten tratar, acondicionar, transportar y almacenar, temporal y definitivamente los residuos, de forma que no causen impacto a las personas, ni al ambiente [30].

La gestión de los residuos radiactivos en España es competencia de la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, S.A. (Enresa), desde el año 1984, de acuerdo con el Plan General de Residuos Radiactivos aprobado por el Gobierno. Esta empresa se constituye como medio propio y servicio técnico de la Administración, es por lo tanto una entidad pública empresarial, a la que le corresponde la gestión del combustible gastado de las centrales nucleares.

El combustible irradiado, una vez se ha retirado del reactor suele albergar todavía una gran capacidad energética, ya que sólo se ha utilizado el 5% de la energía inicial.

La gestión del combustible gastado puede abordarse bajo dos perspectivas distintas: la del ciclo abierto o del ciclo cerrado.

➤ Ciclo abierto: el combustible nuclear una vez irradiado se saca del núcleo del reactor y se almacena en piscinas de agua de la misma central nuclear (almacenamiento en húmedo) para su enfriamiento, aislamiento y almacenamiento temporal. En la Figura 5 se muestra una piscina de combustible de la central de Santa María de Garoña.

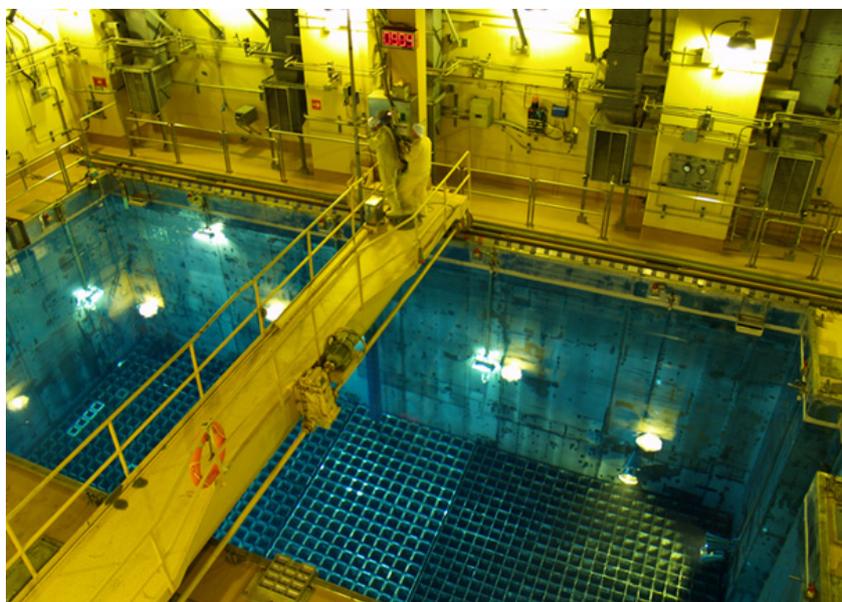


Figura 5. Almacenamiento temporal de combustible usado en piscina de la central de Santa María de Garoña. [Fuente: CSN]

Estas piscinas se componen de láminas de acero inoxidable, recubiertas de hormigón armado para evitar fugas. Los elementos combustibles se sitúan de forma vertical en bastidores metálicos dentro de las piscinas llenas de agua. Su vida operativa varía entre

unos 50 y 100 años. En España, se sustituyeron los bastidores originales por otros más compactos para aumentar la capacidad de estas instalaciones temporales específicas.

Algunas centrales, como la de Trillo o las de Ascó se han visto en la necesidad de construir almacenes temporales individualizados (ATI), para tener un almacenamiento adicional ante la inminente saturación de sus piscinas. De modo que su combustible gastado se deposita en contenedores metálicos blindados, alojados en un almacén de hormigón de la propia central y son enfriados por circulación forzada de aire o por convección natural (almacenamiento en seco) [14, 30].

Según el Foro de la Industria Nuclear Española, la cantidad de elementos combustibles irradiados que estaban almacenados en las piscinas de las centrales nucleares españolas a finales de diciembre de 2008 era de 17.872 unidades de elementos irradiados [5]. La Tabla 5 muestra el combustible almacenado en las piscinas de las centrales nucleares a final del año 2008, la capacidad a ocupar y la fecha prevista de saturación de las piscinas.

Tabla 5. Capacidad total, ocupación en el año 2008 y año previsto de saturación de las piscinas de las centrales nucleares españolas. [Fuente: Foro Nuclear]

Número de elementos combustibles irradiados			
Central Nuclear	Capacidad Total (Uds)*	Grado de ocupación (%)	Año de Saturación
José Cabrera (p)	548	68,80	parada definitiva
Santa María de Garoña (p)	2.609	84,20	2015
Almaraz I (p)	1.804	69,22	2021
Almaraz II (p)	1.804	64,85	2022
Ascó I (p)	1.421	81,96	2013
Ascó II (p)	1.421	80,38	2015
Cofrentes (p)	4.186	90,29	2009
Vandellós (p)	1.594	58,46	2020
Trillo (p)	805	81,50	2040
ATI de Trillo (c)	1.680	20,00	---
TOTAL	17.872	71,76	

(p) Piscina (c) Contenedores

*Unidades de elementos irradiados

El vigente Sexto Plan General de Residuos Radiactivos contempla la puesta en marcha de un Almacén Temporal Centralizado (ATC), para albergar el combustible gastado y demás RAA generados en nuestro país, optimizando la gestión.

El depósito definitivo de estos residuos será un Almacenamiento Geológico Profundo (AGP) basado en confinar el combustible gastado a una profundidad de entre los 500 y

1000 m, imponiendo así una serie de barreras naturales y artificiales para impedir la migración de radionucleidos a través del agua subterránea hacia la superficie. Las barreras artificiales se basan en inmovilizar el residuo en una matriz sólida, químicamente inerte e insoluble en agua, para ello se utiliza hormigón, después se envasan en contenedores metálicos anticorrosivos y con una buena conductividad calorífica que permita la evacuación del calor residual [21, 31].

Las barreras naturales más comunes son formaciones geológicas de granito, cal y arcillas (bentonita), que se caracterizan por su estabilidad e impermeabilidad. La Figura 6 muestra el esquema de un AGP de residuos nucleares de alta actividad.

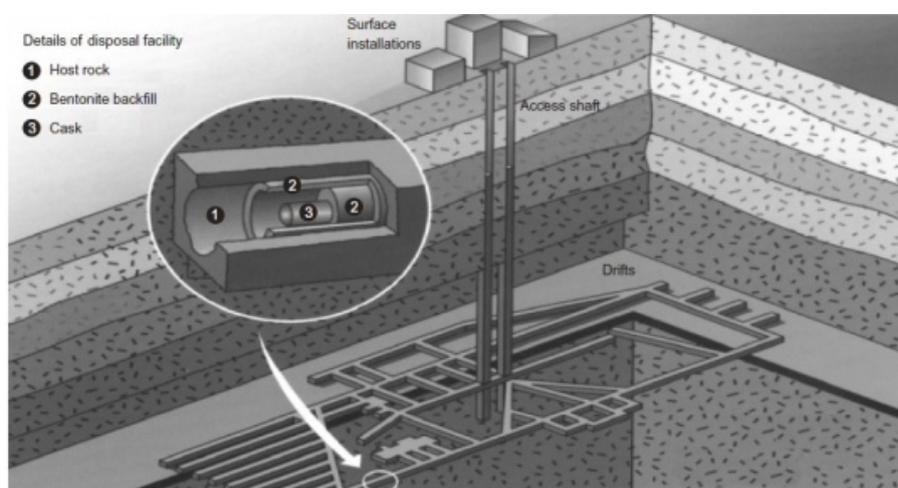


Figura 6. Esquema de un posible AGP [Fuente: Imperial College London]

En España no hay ningún AGP, pero se ha trabajado desde 1985 en la opción del almacenamiento definitivo en profundidad y según Enresa, existen varias formaciones geológicas que reúnen las condiciones para una instalación de este tipo.

Entre los países que siguen el ciclo abierto, además de España se encuentran EEUU, Canadá o Finlandia.

➤ Ciclo cerrado: el combustible irradiado es considerado de nuevo como combustible nuclear, de modo que es reutilizado parcialmente mediante el *reprocesado*, procedimiento que separa cualquier elemento que se pueda utilizar del combustible gastado en los reactores nucleares, principalmente el ^{235}U y el ^{239}Pu generado.

El método más utilizado en el reprocesamiento recibe el nombre de PUREX y consiste en cortar y diluir el combustible en solución ácida para poder separar los elementos de esta solución por extracción con un disolvente orgánico. El U y Pu extraídos se añaden en un nuevo combustible para su uso en reactores de agua ligera (LWR) principalmente. Este combustible reciclado, recibe el nombre de MOX (Mezcla de Óxidos) y está formado por una combinación de óxido de uranio natural, uranio reprocesado y óxido de plutonio.

A su vez, en la operación de reprocesado se generan otro tipo de residuos [32, 33]:

- Residuos sólidos de alta actividad: formados por productos de activación y de fisión y transuránicos. Pasan a ser almacenados temporalmente.
- Residuos líquidos de alta actividad: se forman en las primeras etapas del reprocesado y están constituidos por productos de fisión. Posteriormente son concentrados por evaporación y vitrificados en forma sólida, para después ser transportados a un almacén temporal.
- Residuos gaseosos: se originan en el troceado y disolución del combustible gastado. Están formados por óxidos de nitrógeno, vapor de agua, productos de fisión radiactivos, etc. Una vez enfriados en un condensador y filtrados, se descargan por la chimenea de la instalación.

Los países que llevan a cabo este ciclo cerrado son entre otros Francia, Reino Unido o Japón. Inicialmente, España sí reprocesaba el combustible gastado de algunas de sus centrales, sin embargo, esta práctica se interrumpió en 1982 debido, sobre todo, a motivos económicos, y desde entonces todo el combustible irradiado es considerado directamente como residuo radiactivo de alta actividad y por lo tanto, almacenado en las correspondientes piscinas [33].

La labor de reprocesado de algunos de los elementos irradiados de las centrales españolas se llevó a cabo en el Reino Unido y en Francia. El problema que se plantea ahora es que estos residuos tienen la obligación de ser devueltos al país de origen [1].

5. Investigación y desarrollo en la gestión del combustible gastado

Los proyectos de Investigación y Desarrollo (I+D) en materia de combustible nuclear gastado persiguen la creación y mejora de los conocimientos y las tecnologías para el desarrollo de la gestión de estos residuos, de forma segura y viable. El esfuerzo dedicado a los avances tecnológicos y científicos se centra, tanto a nivel nacional como internacional, en aquellas áreas y actividades a las que todavía no se les ha dado soluciones. Actualmente, los principales temas de investigación son los relacionados con el almacenamiento de residuos. Desde hace años, sobre todo a nivel internacional, también se viene trabajando en otras opciones para el tratamiento del combustible irradiado de las centrales nucleares, como son las tecnologías de separación y transmutación. A continuación se van a describir las principales líneas de I+D relacionadas con la gestión del combustible nuclear gastado [31, 34].

5.1. Almacenamiento geológico profundo

La mayoría de los programas de I+D europeos están enfocados al Almacenamiento Geológico Profundo (AGP) como solución definitiva, independientemente de que pudiera producirse una reutilización del combustible gastado, ya que supone la solución aceptada internacionalmente como más segura y factible para la disposición final de dichos residuos [31].

En primer lugar, a la hora de construir un AGP hay que seleccionar un emplazamiento uniendo criterios técnicos y de participación ciudadana. Para demostrar la viabilidad constructiva, operativa y de seguridad de este emplazamiento como solución final se utilizan laboratorios convencionales y radioquímicos, así como celdas calientes que

permiten obtener datos con muestras radiactivas y no radiactivas. De gran importancia son los *laboratorios subterráneos*, instalaciones ubicadas en la formación geológica que se encuentra en estudio para caracterizar con mayor detalle el emplazamiento del almacenamiento, investigando sobre el comportamiento de los distintos componentes y sus interacciones, obteniendo datos a escala real para demostrar la viabilidad del repositorio. En Europa hay varios laboratorios subterráneos, como el de Äspö (Suecia) de granito, Grimsel y Mt. Terri (Suiza) de granito y de arcillas compactadas, respectivamente o el de Hades (Bélgica) de arcilla. En Estados Unidos, Canadá y Japón también existen laboratorios subterráneos.

Los estudios que se han realizado en Europa sobre el comportamiento a largo plazo de combustible gastado y residuos vitrificados colocados en depósitos profundos revelan que este método de disposición final será efectivo durante millones de años. Uno de los estudios realizados evaluó la disolución de los vidrios en agua pura, con exitosos resultados. Otro de los estudios se basó en estimar de forma precisa la emisión de isótopos radiactivos procedentes de los residuos encapsulados durante distintos intervalos de tiempo, del cual se concluyó que las cápsulas comenzarían a deteriorarse a partir de centenares de miles de años. De este modo, se tiene la convicción de que el AGP es la mejor solución para los residuos de combustible gastado [14, 35].

Actualmente, sólo existe una instalación definitiva para el almacenamiento de los RAA en el mundo, y se encuentra en Nuevo México, la Waste Isolation Pilot Plant (WIPP), pero sólo se utiliza para almacenar los residuos nucleares de defensa del Departamento de Energía de los Estados Unidos.

El proyecto de AGP más prometedor fue el de Yucca Mountain, también en Estados Unidos, pero finalmente fue desestimado en 2010.

En Europa, los proyectos de Finlandia y Suecia son los que están más avanzados, tienen fijado su inicio de operación cerca de 2020. Les siguen los proyectos de Francia y Reino Unido que están previstos para 2025 y 2029, respectivamente [5, 14].

5.1.1. Almacenamiento multinacional

Algunos países han planteado la opción de repositorios a nivel multinacional ya que supone una clara ventaja económica y técnica frente a los nacionales, sobre todo para países que no generan gran cantidad de residuos, para los que no poseen formaciones geológicas apropiadas o para los que no disponen de espacio. Otro beneficio de estas instalaciones compartidas sería el referido a la seguridad, puesto que estaría reforzada por todos los países integrantes. Sin embargo, esta opción ha sido objeto de gran polémica por parte de la comunidad internacional, principalmente por las dificultades que supondría implantar instalaciones de esta naturaleza [21, 35].

5.1.2. Situación nacional

La I+D llevada a cabo en España, en cuanto al diseño de un AGP y la evaluación de seguridad se ha centrado en [31]:

- Plan de Búsqueda de Emplazamientos (PBE), que ha permitido asegurar que existen en el subsuelo de la geografía española abundantes formaciones graníticas, arcillosas y salinas, susceptibles de albergar una instalación de estas características.

- Realización de diseños conceptuales de una instalación de almacenamiento en cada una de las litologías indicadas.
- Desarrollo de los ejercicios de evaluación de la seguridad de los diseños conceptuales, en los que se pone de manifiesto que los almacenes geológicos permiten cumplir con los criterios de seguridad y calidad aplicables a este tipo de instalaciones.
- Planes de I+D que han permitido adquirir conocimientos técnicos y formar unos equipos de trabajo nacionales, participando en proyectos de investigación internacionales y en proyectos de demostración en laboratorios subterráneos extranjeros.

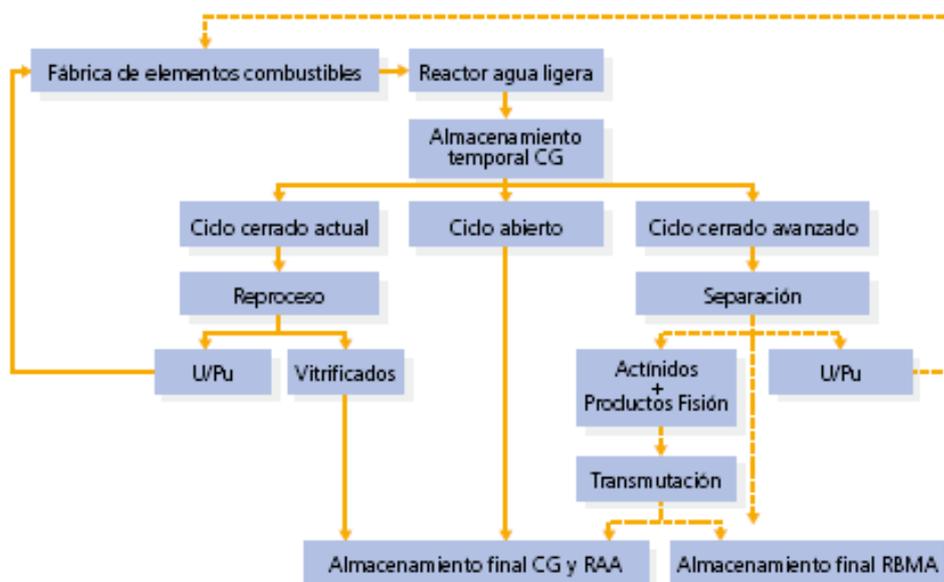
5.2. Separación y transmutación

Desde la pasada década de los 90 se despertó un interés por las técnicas de separación y transmutación de determinados radionucleidos de vida larga presentes en los elementos irradiados. Con estas técnicas se pretende transformar, a partir de reacciones nucleares, los residuos de periodo largo en sustancias menos activas, reduciendo así su toxicidad y por tanto el riesgo radiológico que su almacenamiento definitivo supone.

El interés por estas técnicas, se ha reactivado en los últimos años por iniciativa de países con capacidad de reprocesar combustible como Francia, Japón, Reino Unido o India.

Esta nueva forma de gestión del combustible irradiado es complementaria al reprocesado y se le llama *ciclo cerrado avanzado* (ciclo cerrado + separación y transmutación). En la Figura 7 se muestra un esquema comparativo de las opciones de gestión del combustible gastado. Todas tienen en común el almacenamiento temporal de los combustibles gastados y el posterior almacenamiento definitivo.

OPCIONES DE GESTIÓN DEL COMBUSTIBLE GASTADO



La diferencia con el ciclo cerrado convencional, es que en este proceso avanzado, el uranio y plutonio que han sido reprocesados se utilizan para fabricar combustibles para

reactores rápidos y tras su irradiación en ellos, se podría seguir reciclando ese combustible más veces. Actualmente se encuentra en fase de desarrollo [5, 21].

La **separación** tiene como etapa previa el reprocesamiento de los combustibles gastados. Es un proceso que consiste en un conjunto de operaciones químicas, que pueden ser llevadas a cabo en medio húmedo (hidrometalúrgicas) o en medio seco (pirometalúrgicas), para extraer principalmente el plutonio ya recuperado en el reproceso anterior; los actínidos minoritarios (neptunio, americio y curio) y algunos productos de fisión de vida larga como el tecnecio, yodo, cesio y circonio, para transformarlos a un estado que permita su transmutación o para su disposición final mediante una adecuada inmovilización.

Los actínidos transuránicos son los más peligrosos, ya que son altamente radiactivos y de gran duración (miles de años). Su parte positiva es que poseen un alto contenido energético, que podría ser utilizado para generar energía eléctrica [35, 36, 37].

Existen dos líneas de investigación para llevar a cabo la separación de los actínidos minoritarios [38]:

-Vía hidrometalúrgica: es el proceso más desarrollado. Tiene lugar en medio acuoso y se basa en la extracción con disolventes orgánicos de los actínidos minoritarios. Se suele apoyar en el proceso PUREX, pero existen otros métodos que también están siendo investigados.

-Vía pirometalúrgica: se realiza en seco mediante una técnica llamada electrorefinado, que consiste en calcinar los residuos líquidos de alta actividad; los óxidos que se obtienen se cloran y los cloruros formados se disuelven en sales alcalinas, para después hacer una separación electroquímica de los elementos de la mezcla utilizando varios cátodos. Tras la separación, pueden fabricarse combustibles en forma de óxidos para el reciclado del plutonio (MOX) o se pueden incorporar los actínidos minoritarios en matrices inertes.

La **transmutación** de los actínidos transuránicos se lleva a cabo a través de reacciones de fisión, mientras que la de los productos de fisión se realiza por reacciones de captura neutrónica. Inicialmente se pensó que los reactores de agua ligera podrían servir para esta finalidad, pero se ha demostrado que son necesarios neutrones de alta energía y con flujo elevado, por lo que los estudios se están centrando en el uso de *reactores rápidos* y en sistemas accionados por aceleradores de partículas de alta energía (*ADS*) [38, 39], ambos sistemas se describen a continuación.

>> Reactores rápidos de IV generación [5, 38]: son un conjunto de reactores nucleares más avanzados. Su principal ventaja es que podrían consumir los residuos nucleares (quemar de actínidos principalmente) para producir electricidad a la vez que se reducen los residuos y su grado de radiactividad. En general, supondría una mejora del rendimiento energético para la misma cantidad de combustible. Sin embargo, no se espera que estén disponibles para su uso industrial antes del año 2030. Los principales diseños de reactores que se están estudiando son:

- Reactor rápido refrigerado por gas (GFR): se caracteriza por tener un espectro de neutrones rápidos capaz de utilizar como combustible gran parte de los residuos actuales. Es refrigerado por helio y tiene un ciclo de combustible cerrado.
- Reactor rápido refrigerado por sodio (SFR): es el que se encuentra más avanzado tecnológicamente, ya que numerosos proyectos de los Programas Marco de Euratom (Comunidad Europea de la Energía Atómica) están dedicados a su investigación. Es un reactor de espectro rápido que puede consumir como combustible los residuos radiactivos, es refrigerado por sodio líquido y el ciclo de combustible es cerrado para la gestión eficiente de los actínidos y la conversión del uranio fértil.
- Reactor rápido enfriado por plomo (LFR): se caracteriza por usar un reactor de espectro rápido refrigerado por metal líquido de bismuto-plomo con ciclo de combustible cerrado para la conversión eficiente de uranio fértil (combustible) y la gestión de actínidos.

>> ADS, Accelerator Driven System (Sistema Asistido por Acelerador) [5, 38, 39]: es un sistema dedicado únicamente a la transmutación. Constituye otro procedimiento de gestión emergente que está basado en la emisión de un haz de protones de alta energía, que al incidir sobre un metal como el plomo producen por reacciones de espalación* una desintegración en varios fragmentos y la emisión de un elevado flujo de neutrones de alta energía, con capacidad para fisurar los radionucleidos de vida larga. Los radionucleidos que no hayan sido transmutados se separarán mediante procesos pirometalúrgicos. En la Figura 8 se muestra un esquema de la transmutación de actínidos transuránicos.

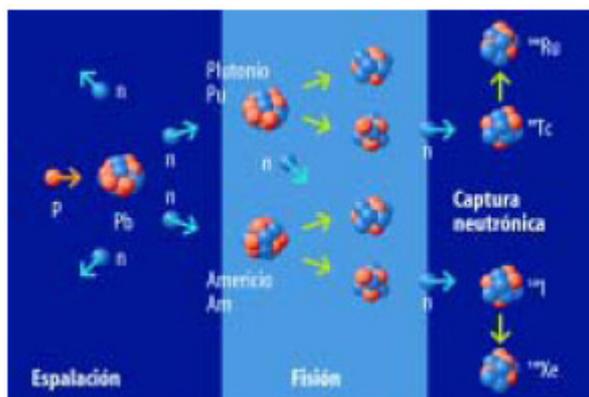


Figura 8. Esquema de transmutación [Fuente: Foro Nuclear]

**Espalación*: reacción que origina una partícula de alta energía, por ejemplo un protón de 1 GeV, en un núcleo pesado, como uranio o plomo. En la reacción se arrancan varios neutrones. Cada protón de 1 GeV puede provocar espalación en varios núcleos consecutivamente pudiendo aparecer 40 neutrones o más.

Este sistema está dentro del proyecto europeo Eurotrans y está probado a nivel de laboratorio. El objetivo es diseñar aceleradores de protones con una energía próxima a 1 GeV.

Este tipo de reactores podrían ser utilizados para producir energía eléctrica, sin embargo, en los proyectos que están en fase de investigación pretenden utilizarlos como sistemas transmutadores, únicamente.

Los residuos sobrantes de la S&T poseerán un riesgo potencial radiológico mucho menor, serán adecuadamente vitrificados, para posteriormente ser almacenados.

5.2.1. Ventajas y desventajas de la S&T

- La separación y transmutación de los radionucleidos presentes en los RAA tiene las siguientes ventajas [21, 35]:
 - Reducción de la radiotoxicidad y del tiempo en que ésta tiene altos valores.
 - Reducción del volumen de RAA y por lo tanto menor cantidad de residuos a ser almacenados en el AGP.
 - Mayor aprovechamiento del contenido energético del combustible irradiado, ya que al transmutar el plutonio y los actínidos minoritarios por fisión se genera energía que puede utilizarse en la generación de electricidad.
- Las desventajas de esta técnica son [21, 35]:
 - Requieren recursos económicos muy altos.
 - Incertidumbre sobre la viabilidad como alternativa tecnológica, puesto que aún están pendientes de evaluación.
 - Seguirá habiendo RAA a los que habrá que dar una solución final.
 - Gran complejidad, con dificultades técnicas que pueden suponer riesgos radiactivos.
 - Implementar un programa comercial de S&T requerirá largos períodos de tiempo para su desarrollo.
 - Supondría un cambio en la industria del reproceso, ya que sería necesaria una línea nueva de extracción de actínidos y fabricación de combustibles nucleares.

5.2.2. Situación nacional

En los últimos años se está realizando un esfuerzo importante en investigar la alternativa de la opción separación y transmutación en sus distintas versiones. La ausencia en España de instalaciones adecuadas para desarrollar los programas de investigación específicos necesarios, así como la envergadura de dichos programas, hace imprescindible la participación en el contexto internacional. La mayor parte de los trabajos realizados son de carácter preliminar, de obtención de datos básicos y de análisis de viabilidad, con un contenido predominantemente teórico [31].

5.3. Otros estudios

A continuación se van a describir otras investigaciones relevantes llevadas a cabo para mejorar la gestión del combustible nuclear gastado.

5.3.1. Aplicaciones potenciales de la sonoquímica al reprocesamiento del combustible nuclear

La sonoquímica es una rama de la química que estudia la capacidad de la energía transportada por las ondas sonoras para provocar y acelerar reacciones químicas.

Con el fin de minimizar el volumen del combustible nuclear gastado se utiliza irradiación ultrasónica para tratar el uranio, neptunio y plutonio en soluciones de ácido nítrico, de modo que se realiza una extracción líquido-líquido mediante ultrasonidos. A pesar de los altos costes de funcionamiento de los “sonoreactores” en comparación con los reactores convencionales, la sonoquímica tiene un gran potencial para varias aplicaciones en futuras tecnologías del ciclo del combustible avanzado debido a su gran seguridad y a que los ultrasonidos han demostrado ser una herramienta muy útil en la mejora de las velocidades de reacción. Sin embargo, todavía hay muchos problemas por resolver. Francia es el país que está más dedicado al estudio de la sonoquímica [40].

5.3.2. Separación con membrana en la gestión de los residuos radiactivos

Recientemente se han realizado diversos avances en el tratamiento de los residuos radiactivos, utilizando la tecnología de separación de membrana. Este proceso consiste en la separación selectiva y colectiva de diversos radionucleidos. Para su separación colectiva, los métodos incluyen ósmosis inversa, precipitación seguida por ultrafiltración o microfiltración y destilación por membrana. Para la separación selectiva de los elementos se ha utilizado la electrólisis, nanofiltración, etc. [41].

5.3.3. Alternativa a los óxidos mixtos

Científicos del Reino Unido han conseguido preparar un compuesto de nitruro de uranio terminal que podría constituir la alternativa más eficiente a los óxidos de uranio y plutonio que se usan en la actualidad en los reactores. El nitruro de uranio es una mezcla de nitrógeno o amoníaco con uranio que se consigue en condiciones de altas temperaturas y presiones.

Estos materiales son más densos, más estables y conducen el calor de mejor forma que los combustibles basados en los óxidos de plutonio y uranio. Además, el proceso empleado en su fabricación es más limpio y se desarrolla a menor temperatura. Esta alternativa puede suponer la producción de energía nuclear limpia.

El problema de este procedimiento es que las condiciones de reacción necesarias para su preparación generan impurezas que luego son difíciles de eliminar [42].

5.3.4. Nuevo material que facilitará el reprocesamiento del combustible nuclear

Un grupo de ingenieros y científicos de Estados Unidos han descubierto un nuevo material capaz de capturar y eliminar gases radiactivos presentes en el combustible nuclear irradiado, facilitando su reprocesamiento y disminuyendo en gran medida los residuos relacionados, altamente contaminantes y peligrosos. Este nuevo material se conoce con el nombre de MOF (metal-organic framework) o estructura organometálica. La idea es desarrollar una tecnología de pellets para almacenar y utilizar dicho material. El MOF tiene capacidad para capturar y retener yodo principalmente, ya que es uno de

los gases radiactivos más peligrosos y contaminantes que se encuentran presentes en el combustible nuclear gastado.

Esta investigación supone un importante paso hacia la producción de energía nuclear limpia y segura, permitiendo la reducción de los peligrosos residuos radiactivos [43].

5.3.5. Plan de Enresa en I+D (2014-2018)

Enresa ha presentado recientemente (junio de 2014) su 7º Plan de I+D para el período 2014-2018, donde expone un conjunto de programas y desarrollos científicos y técnicos para seguir trabajando en la gestión de los residuos radiactivos de las centrales nucleares españolas.

Entre los objetivos estratégicos para este Plan se encuentran los relacionados con la construcción del Almacén Temporal Centralizado (ATC) de Villar de Cañas y su Centro Tecnológico asociado. Están previstos programas para profundizar en la evolución del combustible nuclear gastado y para mejorar la fabricación, duración y optimización de las cápsulas de almacenamiento del ATC. Además, se desarrollarán estudios relacionados con las tecnologías de instrumentación de la instalación, especialmente centrados en la robotización de los procesos y en los sistemas de intervención [21, 44].

6. Conclusiones

Aunque en el pasado España si reprocesara parte de su combustible nuclear gastado, el hecho de que en la actualidad no se reutilicen estos elementos todavía útiles supone una pérdida de eficiencia energética.

Del estudio bibliográfico realizado para evaluar la situación de los residuos procedentes de las centrales nucleares, estudiando su gestión y alternativas de tratamiento y eliminación se extraen las siguientes conclusiones:

- 1) Se ha detectado que la mayor parte de la I+D llevada a cabo internacionalmente para gestionar el combustible gastado se centra en una única solución, que consiste en su almacenamiento en formaciones geológicas profundas, ya que la gran mayoría de las investigaciones realizadas garantizan su viabilidad. En el caso concreto de España, la empresa que gestiona los residuos radiactivos (Enresa) llevó a cabo un estudio para la selección del emplazamiento de un AGP en el futuro y se dispone de una serie de zonas que cuentan con buenas características para dicho fin.
- 2) Al estudiar las investigaciones que se están desarrollando como alternativas de tratamiento para el combustible nuclear usado de las centrales nucleares, se ha comprobado que otra línea importante de I+D es la separación y transmutación de radionucleidos, con un importante esfuerzo de investigación a nivel europeo. En la actualidad, se están desarrollando estudios relevantes relacionados con reactores avanzados que permitirán reducir la cantidad de residuos y la radiactividad de los mismos. Sin embargo, los residuos de las actividades de reprocesado y de la separación y transmutación que serían menos radiactivos, también deberían ir a parar a un almacenamiento en profundidad, por lo que la construcción de AGP es totalmente necesaria.

- 3) Al revisar la información que se encuentra disponible sobre nuevas formas de gestión, se ha detectado que todos estos avances en nuevas tecnologías para la gestión del combustible nuclear gastado requieren de grandes inversiones económicas para poder implantarlas en la industria.
- 4) Los casos de estudio seleccionados y que se encuentran en fase de investigación a escala de laboratorio, han puesto de manifiesto que existen técnicas con un futuro prometedor, pero todavía es necesario seguir avanzando en las técnicas de reciclado, hasta alcanzar aquellas que reduzcan lo máximo posible el peligro que estos residuos suponen.
- 5) Finalmente se ha comprobado que en nuestro país, no son muchos los estudios que se están llevando a cabo para dar una solución alternativa al ciclo abierto y que debería ser mayor el interés por reprocessar los elementos irradiados.

Agradecimientos

M.D. Murcia fue beneficiaria de la beca Juan de la Cierva de MICINN.

Bibliografía

- [1] Ministerio de Industria, Energía y Turismo. Secretaría de Estado de Energía. España. 2014. Disponible en <http://www.minetur.gob.es> (accedido el 31 de enero de 2014)
- [2] Foro Nuclear. Foro de la Industria Nuclear Española. 2014. Disponible en <http://www.rinconeducativo.org> (accedido el 31 de enero de 2014)
- [3] World Nuclear Association. 2014. Inglaterra. Disponible en <http://www.world-nuclear.org> (accedido el 6 de marzo de 2014)
- [4] Atmosferis.com. Información sobre la industria y el transporte marítimo. 2014. Fisión nuclear. Disponible en <http://www.atmosferis.com/> (accedido el 6 de febrero de 2014)
- [5] Foro Nuclear. Foro de la Industria Nuclear Española. 2013. Disponible en <http://www.foronuclear.org/> (accedido el 4 de febrero de 2014)
- [6] Yo soy nuclear. 2014. Central Nuclear. Disponible en <http://www.yosoy nuclear.org/> (accedido el 11 de febrero de 2014)
- [7] Endesa Educa. 2012. Central Nuclear. Endesa S.A. Disponible en <http://www.endesaeduca.com> (accedido el 11 de febrero de 2014)
- [8] Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA). 2014. Reactores Nucleares. Disponible en <http://www.cnea.gov.ar/> (accedido el 13 de febrero de 2014)
- [9] Enusa Industrias Avanzadas S.A. 2014. Disponible en <http://www.enusa.es/> (accedido el 31 de enero de 2014)
- [10] Climántica. Proyecto de Educación Ambiental: Cambio climático. 2013. Uranio. Disponible en <http://unidades.climantica.org/es/unidades/02/a-enerxia-nuclear> (accedido el 13 de febrero de 2014)
- [11] Centrales Nucleares del Norte, S. A. 2014. Uranio. Nuclenor, S.A. Disponible en <http://www.nuclenor.org> (accedido el 25 de febrero de 2014)
- [12] Energía Nuclear. 2014. Reactores Nucleares. Disponible en <http://energia-nuclear.net/> (accedido el 4 de febrero de 2014)
- [13] Universidad Autónoma de México (UNAM) - Facultad de Ingeniería. Reactores Nucleares. Disponible en <http://www.ptolomeo.unam.mx/> (accedido el 27 de febrero de 2014)
- [14] Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). Disponible en <http://www.csn.es> (accedido el 26 de marzo de 2014)
- [15] Glasstone, S. & Sesonske, A. 1990. *Ingeniería de reactores nucleares*. USA: Editorial Reverté, S.A.
- [16] Consejería de Educación y Ciencia de Andalucía, España. Proyecto Thales. 2013. Reactores nucleares. Disponible en <http://thales.cica.es> (accedido el 4 de marzo de 2014)
- [17] Ruiz, J. *Energía Nuclear*. Lección 10, 11, 12, 13. Departamento de Física. Facultad de Química. Universidad de Murcia.
- [18] United States Nuclear Regulatory Commission (U.S.NRC.), Estados Unidos. 2014. Tipos de reactores nucleares. Disponible en <http://www.nrc.gov> (accedido el 6 de marzo de 2014)

- [19] Nuclear Energy Institute (NEI), Estados Unidos. 2014. Producción de energía nuclear. Disponible en <http://www.nei.org> (accedido el 7 de marzo de 2014)
- [20] Energy Information Administration (EIA), Estados Unidos. 2014. Producción de energía nuclear. Disponible en <http://www.eia.gov/> (accedido el 7 de marzo de 2014)
- [21] Empresa Nacional de Residuos Radiactivos S.A. (Enresa). Disponible en <http://www.enresa.es/> (accedido el 31 de enero de 2014)
- [22] Ministerio de Industria Energía y Turismo, Gobierno de España. Disponible en www.emplazamientoatc.es (accedido el 26 de marzo de 2014)
- [23] Web oficial de la Unión Europea (Europa). Síntesis de la legislación de la UE. Disponible en http://europa.eu/legislation_summaries (accedido el 8 de mayo de 2014)
- [24] Energía Nuclear: que es, usos, peligros. España. Disponible en <http://www.nuclear.5dim.es/> (accedido el 4 de febrero de 2014)
- [25] Página perteneciente a Endesa. 2014. Ventajas y desventajas de la energía nuclear. Disponible en <http://twenergy.com> (accedido el 11 de febrero de 2014)
- [26] Cirera, A., Benach, J. & Rodríguez, E. 2007. *¿Átomos de fiar?: Impacto de la energía nuclear sobre la salud y el medio ambiente*. España. Editorial: Los Libros de la Catarata.
- [27] Colegio Oficial de Físicos de España (Cofis). 2014. Madrid. Disponible en <http://www.cofis.es> (accedido el 31 de enero de 2014)
- [28] fys. Portal del Colegio Oficial de Físicos, España. Madrid. Disponible en <http://www.fys.es> (accedido el 31 de enero de 2014)
- [29] Sociedad Nuclear Española (SNE). 2014. Disponible en <http://www.sne.es/es/energia-nuclear> (accedido el 31 de enero de 2014)
- [30] González, V. 2009. Capítulo X. Los residuos radiactivos. Generación, tratamiento y gestión. Documento de Planificación y Servicios de ENRESA.
- [31] *Sexto Plan General de Residuos Radiactivos* (6º PGRR) aprobado en el Consejo de Ministros celebrado el 23 de junio de 2006. España
- [32] *Gestión medioambiental: manipulación de residuos y productos químicos*. 2007. Málaga: Editorial Vértice.
- [33] *Origen y gestión de residuos radiactivos*. 2000. Ilustre Colegio Oficial de Físicos. 3ª Edición. España: Editorial Transedit.
- [34] Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT). Ministerio de Economía y Competitividad, España. Disponible en <http://www.ciemat.es/> (accedido el 4 de febrero de 2014)
- [35] H. de Pahissa, M. 2007. *Gestión final del combustible gastado y residuos de alta actividad: situación y tendencias en el mundo*. Publicación técnica del CNEA
- [36] Castells, X.E. 2012. Reciclaje y tratamiento de residuos diversos: Reciclaje de residuos industriales. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, S.A.
- [37] González Romero, E.M. *Perspectiva Europea de la I+D en Separación y Transmutación y ADS*. Publicación técnica del CIEMAT.
- [38] Moratilla Soria, B.Y. (coord.) 2013. *Combustible nuclear. Seminario permanente en tecnologías energéticas*. Publicaciones de la Universidad Pontificia Comillas (Madrid)

- [39] Revista DYNA Energía y Sostenibilidad. España. Disponible en <http://www.dyna-energja.com/> (accedido el 28 de mayo de 2014)
- [40] Nikitenko, S.I. et al. 2010. *Potential applications of sonochemistry in spent nuclear fuel reprocessing*. Francia. Ultrasonics Sonochemistry. Editorial: Elsevier B.V. 17: 1033–1040.
- [41] Ritu, D. Ambashta & Mika, E.T. Sillanpää. 2012. *Membrane purification in radioactive waste management: a short review*. Journal of Environmental Radioactivity. Editorial: Elsevier B.V. 105: 76-84.
- [42] CORDIS/T21. 2012. Crean una “molécula trofeo” para la producción de energía nuclear limpia. *Tendencias de la ingeniería. Tendencias21. Revista electrónica de Ciencia, Tecnología, Sociedad y Cultura. Instituto de la Ingeniería de España*. Disponible en <http://www.tendencias21.net/>
- [43] Piacente, P.P. 2012. Un nuevo material facilitará el reprocesamiento del combustible nuclear. *Tendencias de la ingeniería. Tendencias21. Revista electrónica de Ciencia, Tecnología, Sociedad y Cultura. Instituto de la Ingeniería de España*. Disponible en <http://www.tendencias21.net/>
- [44] Grupo Ecoticias.com: Ecología, Medio Ambiente y Energías renovables. Tarragona. 2014. Residuos nucleares. Disponible en <http://www.ecoticias.com/> (accedido el 17 de junio de 2014).