



Residuos Radiactivos

Autor: Jose Manuel García Torres

Institución: Consultoría de Técnicas Ambientales, S.L.

Otros autores: Carlos Alberto Romero Batallán (Consultoría de Técnicas Ambientales, S.L.)

Resumen

Se considera residuo radiactivo a cualquier material o producto de desecho, para el cual no está previsto ningún uso, que contiene o está contaminado con radionucleidos en concentraciones o niveles de actividad superiores a los establecidos por el Ministerio de Industria y Energía, previo informe favorable del Consejo de Seguridad Nuclear.

Palabras claves: residuos radiactivos; energía nuclear; residuos

1.- INTRODUCCIÓN

Se considera residuo radiactivo a cualquier material o producto de desecho, para el cual no está previsto ningún uso, que contiene o está contaminado con radionucleidos en concentraciones o niveles de actividad superiores a los establecidos por el Ministerio de Industria y Energía, previo informe favorable del Consejo de Seguridad Nuclear.

2.- CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS RADIATIVOS

Hay una amplia gama de residuos radiactivos. Algunos de los criterios más importantes que pueden servir de base para el establecimiento de clasificaciones de residuos son:

- el estado físico, el tipo de radiación emitida
- el período de semidesintegración
- la actividad específica
- la radiotoxicidad.

2.1.- ESTADO FÍSICO

Por su estado físico los residuos se clasifican en sólidos, líquidos y gaseosos.

Este criterio es importante por el distinto tratamiento o acondicionamiento que reciben los residuos radiactivos según sean sólidos, líquidos o gaseosos.

2.2.- TIPO DE RADIACIÓN EMITIDA

Los radionucleidos contenidos en los residuos radiactivos pueden desintegrarse de diferentes formas, dando lugar a la emisión de diversas partículas o rayos. Desde este punto de vista, los residuos radiactivos se clasifican en emisiones alfa, beta y gamma.

Debido a que cada tipo de radiación interacciona de distinta forma con la materia, presentando diferentes longitudes de penetración o lo que es lo mismo, alcances en el medio irradiado, este criterio condiciona las barreras de protección, el manejo de los residuos y en general la exposición a las radiaciones en el lugar de almacenamiento.

2.3.- PERÍODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN

Como es sabido, la radiactividad decrece regularmente con el tiempo. En función del período de semidesintegración de los radionucleidos contenidos en los residuos (o tiempo al cabo del cual la radiactividad se reduce a la mitad), se puede hacer la siguiente clasificación:

1. Residuos radiactivos de vida corta: estos residuos están contaminados básicamente con isótopos radiactivos cuyo período de semidesintegración es inferior a 30 años.

2. Residuos radiactivos de vida larga: estos residuos están contaminados con isótopos radiactivos cuyo período de semidesintegración es superior a 30 años.

Este criterio condiciona las soluciones a poner en práctica a largo plazo por cuestiones de riesgo potencial, ya que el período de semidesintegración da idea del tiempo necesario para que un radionucleido reduzca su actividad hasta niveles aceptables. Así, los residuos de vida corta reducen su actividad inicial a menos de la milésima parte en un plazo como máximo de 300 años (es decir, 10 períodos).

Sin embargo, los residuos de vida larga pueden conservar una actividad apreciable durante miles de años.

2.4.- ACTIVIDAD ESPECÍFICA

Otro de los parámetros más significativos para la clasificación de residuos es la actividad por unidad de masa o volumen de material radiactivo (actividad específica). Su unidad de medida en el SI es Bq/gr.

Una cierta porción del residuo, en general, contendrá distintos radionucleidos, cada uno de ellos con una determinada actividad específica. Para cada radionucleido hay definido un umbral por encima del cual se considera al residuo como de alta actividad y recíprocamente, por debajo, como de baja.

Este criterio determina los problemas de protección a corto plazo, ya que el nivel de actividad de los residuos condiciona el blindaje durante su manejo normal y transporte.

2.5.- RADIOTOXICIDAD

La radiotoxicidad es una propiedad de los residuos radiactivos que define su peligrosidad desde el punto de vista biológico.

La radiotoxicidad de un radionucleido engloba varios parámetros como el tipo de radiación, el período de semidesintegración, la mayor o menor rapidez con que es expulsado del organismo por los procesos orgánicos, y también depende de si tiende a fijarse selectivamente en determinados órganos o tejidos.

Tanto la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), como el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), y el Organismo de Energía Atómica de las Comunidades Europeas (EURATOM), han recomendado una clasificación en cuatro grupos de los radionucleidos, según su grado de radiotoxicidad por unidad de actividad.

- El primero de dichos grupos o *Grupo A* comprende los radionucleidos de más alta toxicidad, entre los que figuran como ejemplos representativos el ^{226}Ra , el ^{239}Pu y el ^{241}Am .
- El segundo grupo o *Grupo B* comprende los radionucleidos de toxicidad entre media y alta, como por ejemplo el ^{90}Sr y los yodos-125, 126 y 131.

- El tercer grupo o *Grupo C* comprende los radionucleidos de toxicidad entre media y baja y figuran en él como ejemplos típicos en ^{32}P , el ^{198}Au y el ^{99}Mn .
- Finalmente, el cuarto grupo o *Grupo D* comprende los radionucleidos de baja toxicidad entre los que se encuentran el ^3H , el ^{51}Cr y el ^{99}Tc . En este grupo se puede considerar también incluido el uranio natural.

Este criterio sirve de base para fijar los requisitos de protección y seguridad que han de cumplir las instalaciones en las que se manipulen sustancias radiactivas, a fin de reducir adecuadamente el riesgo de irradiación interna.

3.- CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS RADIATIVOS

La clasificación más aceptada internacionalmente es la propuesta por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) que divide a los residuos sólidos, líquidos y gaseosos en distintas categorías.

En España, desde el punto de vista de su gestión, los residuos radiactivos se clasifican generalmente en:

3.1.- RESIDUOS DE BAJA Y MEDIA ACTIVIDAD

Sus características principales son:

- Actividad específica por elemento radiactivo bajo.
- No generan calor.
- Contienen radionucleidos emisores beta-gamma con períodos de semidesintegración inferiores a 30 años, lo que quiere decir que reducen su actividad a menos de la milésima parte en un período máximo de 300 años.
- Su contenido en emisores alfa debe ser inferior a $0,37 \text{ Gbq/t}$. ($0,01 \text{ curios/tonelada}$ en promedio)

Algunos ejemplos de radionucleidos contenidos en los residuos de baja y media actividad son el ^{137}Cs , el ^{90}Sr y el ^{60}Co .

3.2.- RESIDUOS DE ALTA ACTIVIDAD

Sus características principales son:

- Contienen radionucleidos emisores alfa de vida larga en concentraciones apreciables por encima de $0,37 \text{ Gbq/t}$ ($0,01 \text{ Ci/t}$).
- Pueden desprender calor.

Los radionucleidos contenidos en residuos de alta actividad tienen un período de semidesintegración superior a 30 años, llegando algunos a alcanzar decenas de miles de años.

4.- ORIGEN DE LOS RESIDUOS RADIATIVOS

Los residuos radiactivos se generan en las siguientes actividades:

- 1) **Producción de energía eléctrica de origen nuclear.** Se incluyen los residuos generados en todas las etapas por las que pasa el combustible nuclear hasta ser usado en los reactores nucleares, los residuos de funcionamiento de las centrales nucleares y los residuos generados en la gestión del combustible gastado.
- 2) **Aplicaciones de los radisótopos en la medicina, industria e investigación.**
- 3) **Clausura de instalaciones nucleares y radiactivas.** De todas las actividades que producen residuos radiactivos, las que originan una mayor cantidad de residuos tanto en lo que respecta a su volumen, como a su actividad específica, son las relacionadas con la generación de energía eléctrica.

A continuación vamos a describir los residuos que se producen en cada una de estas actividades.

4.1.- RESIDUOS DEL CICLO DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Según su origen se pueden distinguir tres tipos:

- a) **Residuos de la primera fase del ciclo del combustible.** Comprende los residuos generados en las etapas de minería del uranio, fabricación de concentrados, conversión a hexafluoruro de uranio y enriquecimiento del uranio y fabricación de los elementos combustibles.
- b) **Residuos generados en el funcionamiento de las centrales nucleares**
- c) **Residuos de la segunda fase del ciclo del combustible**

Dependiendo de la estrategia de gestión del combustible gastado, tendremos residuos generados en el reproceso del combustible (ciclo cerrado), o bien en caso de ciclo abierto, el propio combustible gastado se considera como residuo (en España los ciclos de energía eléctrica son ciclos abiertos).

4.1.1.- RESIDUOS DE LA PRIMERA FASE DEL CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR

Estériles de minería de uranio

En los yacimientos de mineral de uranio (U_3O_8), los residuos sólidos están constituidos por partes de la roca extraída, con tan bajo contenido en uranio que no es económico su aprovechamiento. Para evitar riesgos biológicos, estos estériles se apilan en áreas de la propia mina de forma tal que su lixiviación y erosión por los agentes atmosféricos sea mínima.

Fabricación de concentrados

En la fabricación de concentrados las pulpas de los rechazos del mineral de las que se ha separado el máximo posible de uranio (estériles de planta), se apilan en diques, generalmente en las inmediaciones de la fábrica de concentrados.

Desde el punto de vista radiactivo estos estériles sólo contienen radionucleidos naturales, principalmente derivados del decaimiento del U-238, siendo los de vida superior a un año el ^{234}U , ^{230}Th , ^{226}Ra y ^{210}Pb .

El agua de infiltración a través de los diques conteniendo ^{226}Ra y ^{230}Th es recogida por una red de drenaje y, si es necesario, tratada antes de su vertido.

Las emisiones del gas radón (^{222}Rn) a la atmósfera, y la dispersión de pequeñas partículas por el viento se evitan cubriendo los diques de estériles con una capa de tierra o de asfalto.

Así pues, aunque los subproductos que se originan en la concentración del uranio son de muy baja actividad específica y de origen natural, han de ser tratados desde el punto de vista de protección radiológica, debido a que los isótopos contenidos han pasado de un medio geológico natural, que los ha retenido durante grandes períodos de tiempo, a un nuevo emplazamiento donde son almacenados y apilados en superficie.

Conversión a hexafluoruro y enriquecimiento del uranio

La conversión del concentrado de U_3O_8 en UF_6 (volátil), y su enriquecimiento, generan pequeñas cantidades de residuos, siendo los de mayor entidad las colas de uranio empobrecido en forma de UF_6 , que no suele ser tratado como residuo, pero que por su toxicidad química es aconsejable su reconversión final a óxido de uranio (UO_2) que es el paso siguiente en el proceso de fabricación del combustible.

En los procesos de descontaminación y operaciones auxiliares, también se generan algunos residuos líquidos. Éstos se descargan en unos estanques de retención, para su posterior tratamiento, con el fin de recuperar el uranio. Este tratamiento de los residuos líquidos da lugar a barros con pequeñas cantidades de metales precipitados, no necesitando almacenamiento.

Fabricación de elementos combustibles

Los residuos sólidos producidos durante la fabricación de elementos combustibles, incluyen papeles, plásticos, ropas, vidrios, metales, etc. así como los filtros de los sistemas de tratamiento de gases y los barros obtenidos en el tratamiento de los residuos líquidos.

Los residuos líquidos se originan en el sistema de tratamiento de gases en la conversión del UF₆ a polvo de UO₂. También se generan en la descontaminación de equipos y personal, laboratorios, etc.

Se estima que del total de UO₂ procesado en la fabricación desde la llegada del polvo a la fábrica de combustible, hasta que son introducidas las pastillas cerámicas en las vainas, alrededor del 0,1% en peso, se pierde en forma de residuos, que son finalmente almacenados en bidones metálicos, sin necesidad de blindaje adicional.

4.1.2.- RESIDUOS GENERADOS EN EL FUNCIONAMIENTO DE LAS CENTRALES NUCLEARES

La producción de residuos radiactivos en una central nuclear tiene su origen en el proceso de fisión del combustible que se produce en el reactor. En este proceso se originan productos de fisión que contienen isótopos radiactivos de diferentes elementos y neutrones libres.

La experiencia de funcionamiento de los reactores de agua ligera, ha mostrado que una pequeña fracción de los productos de fisión producidos pasa al agua del circuito de refrigeración, bien a través de defectos de las vainas de las barras de combustible o bien por difusión a través de las mismas.

También aparecen productos de activación radiactivos originados por bombardeo neutrónico de los materiales estructurales de los elementos combustibles y de las impurezas del refrigerante primario del reactor, así como transuránidos de vida larga por procesos de captura neutrónica.

Entre los residuos radiactivos de operación, se incluyen los equipos y dispositivos que son utilizados para la purificación y limpieza de los circuitos de refrigeración.

Los isótopos radiactivos quedan finalmente incorporados o acumulados en forma sólida en resinas de intercambio iónico, o en filtros, así como en forma de concentrados de evaporación, con el objeto de disminuir el volumen de los residuos líquidos que son acondicionados en matrices sólidas. Estos residuos son clasificados como de *baja y media actividad*.

Para una central de agua ligera, se estima que el volumen de residuos generado por Gw/año de operación, es de 150 m³, una vez acondicionados.

Otros residuos radiactivos incluyen herramientas, uniformes de trabajo, trapos, papeles, etc. que han sido contaminados durante los trabajos de reparación y mantenimiento de la central y son también de *baja y media actividad*.

4.1.3.- RESIDUOS DE LA SEGUNDA FASE DEL CICLO DEL COMBUSTIBLE

El combustible nuclear, una vez ha cubierto su etapa de producción de energía en el reactor, es almacenado en las piscinas de combustible gastado de la misma central nuclear, para evacuar el calor residual que produce. A partir de este momento aparecen dos líneas básicas de actuación:

- Una de las opciones es proceder, después de un período indefinido de almacenamiento temporal (bien en piscinas, bien en contenedores en seco), al acondicionamiento y encapsulado del combustible para seguidamente almacenarlo de forma definitiva en una formación geológica profunda. Esta opción se denomina *ciclo abierto*.
- Otra opción básica es proceder, después de un período de almacenamiento temporal, al reproceso del combustible gastado con objeto de separar el uranio y el plutonio del resto de componentes para su utilización posterior en un nuevo proceso de fisión nuclear. Esta opción se denomina *ciclo cerrado*.
- Otra tercera opción básica, en estudio, es la del ciclo cerrado avanzado que incluye la separación del uranio y el plutonio de los actínidos y productos de fisión. El uranio y el plutonio se reprocessan para su posterior utilización y los actínidos y productos de fisión se someten a un proceso de transmutación para disminuir su actividad.

La primera opción implica que todo el combustible gastado es considerado como residuo, mientras que en la segunda, una vez retirados el uranio y el plutonio, los residuos resultantes son acondicionados mediante vitrificación para su posterior manejo y almacenamiento. La tercera opción, en estudio, contempla la transmutación de los residuos resultantes para disminuir su actividad.

Ciclo abierto: el combustible gastado como residuo

Cuando se toma la decisión de planificar la energía nuclear en ciclo abierto, el combustible gastado debe gestionarse como un residuo sólido de alta actividad.

El combustible quemado en las centrales nucleares se traslada a las piscinas situadas en las propias centrales, donde se enfría. Dado que la capacidad de estas piscinas es limitada, es necesario el paso del combustible gastado por un almacenamiento intermedio, donde su radiactividad y, consecuentemente, su calor residual, decaiga hasta niveles aceptables para el almacenamiento definitivo.

Existen dos técnicas utilizadas para el almacenamiento intermedio del combustible gastado: el almacenamiento en piscinas y el almacenamiento en seco (bóvedas, contenedores metálicos o de hormigón, etc.).

En el almacenamiento en piscinas, el agua se contamina con productos de corrosión activados y productos de fisión escapados de elementos defectuosos. El mantenimiento de la calidad del agua da lugar a la aparición de residuos tales como filtros y cambiadores de iones. Otros residuos generados son los filtros de ventilación y los absorbentes de yodo.

Ciclo cerrado: reproceso del combustible gastado

En las plantas de reelaboración se generan residuos sólidos, líquidos y gaseosos con características radiactivas muy diferentes. Desde este punto de vista, cabe diferenciar las siguientes corrientes:

- *Residuos sólidos de alta actividad constituidos por los componentes estructurales de los elementos combustibles*, tales como cabezas, vainas, espaciadores, muelles, etc. Contienen principalmente productos de activación y una pequeña porción de productos de fisión y transuránidos. Después de un almacenamiento temporal para decaimiento, se compactan e inmovilizan en matrices sólidas.
- *Residuos líquidos de alta actividad procedentes del primer ciclo de extracción por disolución del uranio y plutonio*. Estos residuos contienen aproximadamente el 99,5% de los productos de fisión del combustible, casi la totalidad de los actínidos (transuránidos) y el uranio y el plutonio no recuperados. Después de concentrados por evaporación y de un tiempo de decaimiento en depósitos de diseño especial, estos residuos se inmovilizan en matrices de vidrio, confinándose en contenedores de acero inoxidable que se cierran por soldadura. Han de almacenarse unas decenas de años antes de enviarlos al almacenamiento definitivo.
- *Residuos sólidos de actividad baja e intermedia*, entre los que hay que distinguir los que contienen radionucleidos de larga vida (emisores alfa), por encima y por debajo de un determinado nivel. Proceden del tratamiento de corrientes líquidas y gaseosas contaminadas que aparecen en los procesos químicos a que se somete el combustible y en el mantenimiento de la instalación.

Están constituidos, principalmente, por concentrados de evaporación, resinas de intercambio iónico, filtros para gases, filtros de ventilación gastados, equipos contaminados, etc., que se inmovilizan mediante matrices sólidas o mediante conglomerados hidráulicos. Todos ellos se introducen en contenedores, con o sin blindaje.

- *Residuos gaseosos* constituidos fundamentalmente por los gases nobles de fisión, xenón y kriptón, que se desprenden junto con el tritio, yodo, carbono, etc. al cortar y disolver los elementos combustibles. En tratamientos sucesivos se absorben todos los gases, excepto los gases nobles citados, dando lugar a residuos sólidos de media y baja actividad. Por su parte, el xenón y el kriptón se retienen por procedimientos criogénicos o por absorbentes específicos, almacenándose posteriormente en recipientes metálicos a presión.

Ciclo cerrado avanzado: separación y transmutación de radionucleidos de vida larga

En la opción del ciclo cerrado, si de los residuos líquidos de alta actividad que aparecen en el proceso, se separan los actínidos minoritarios (Np, Am y Cu), se puede reducir notablemente el inventario radiotóxico de los mismos antes de su vitrificación. Además de los actínidos minoritarios, pueden separarse algunos productos de fisión de vida larga de alta radiotoxicidad. En este proceso de separación, además de los actínidos y los productos de fisión y del uranio y plutonio obtenidos, se generan residuos radiactivos de baja y media actividad.

Posteriormente los actínidos minoritarios y productos de fisión de vida larga separados deben ser transmutados en sistemas adecuados para su transformación en radionucleidos de vida corta o estables. La transmutación se puede realizar mediante fisión o por captura neutrónica, necesiéndose un flujo elevado de neutrones de espectro energético adecuado. Adicionalmente, la transmutación requiere la fabricación de combustible o “blancos”, a partir de las diversas corrientes separadas en los procesos anteriores y disponer de instalaciones nucleares específicas donde poder efectuar el proceso transmutador de forma óptima para los diversos blancos preparados. Los sistemas propuestos inicialmente para llevar a cabo la transmutación han sido los reactores nucleares, térmicos y rápidos, aunque en la actualidad están cobrando mucho interés los sistemas subcríticos accionados por aceleradores de partículas.

En este proceso de transmutación cabe esperar la producción de residuos, tanto de baja y media como de alta actividad, que deben ser almacenados.

En resumen, las operaciones conjuntas de separación y transmutación pueden reducir significativamente el inventario radiotóxico a largo plazo de los residuos de alta actividad.

4.2.- RESIDUOS GENERADOS EN LA MEDICINA, INDUSTRIA E INVESTIGACIÓN

Distinguimos tres grupos diferentes de instalaciones radiactivas en función del fin para el que los isótopos radiactivos son utilizados: instalaciones sanitarias, industriales y centros de investigación.

- En las **instalaciones médicas y hospitalarias**, el uso de isótopos radiactivos para el diagnóstico y tratamiento de enfermedades ha ido creciendo a lo largo de los últimos cincuenta años. Así, elementos radiactivos no encapsulados, normalmente en estado líquido, son utilizados para fines diferentes como son el diagnóstico mediante trazadores (99Tc, 201Tl, 67Ga, 131I, 125I) que permiten el estudio de órganos como el corazón, glándula tiroides, hígado y glándulas hormonales, o bien para el tratamiento de enfermedades del tiroides (131I) o de la sangre (32P), o para investigación (3H ó 14C).

Estas actividades generan residuos radiactivos sólidos: algodones, guantes de goma, jeringuillas, etc. así como residuos líquidos, fundamentalmente líquidos de centelleo.

En el tratamiento de tumores se emplean fuentes encapsuladas, siendo muy frecuente el uso del 60Co. Estas fuentes, frecuentemente de mucha actividad, han de ser cambiadas debido al decaimiento cuando su actividad

disminuya por debajo de un determinado nivel y por tanto, dejan de ser útiles para estos fines. Estas fuentes constituyen un residuo radiactivo que es necesario gestionar.

- En las aplicaciones de los isótopos radiactivos en los **procesos industriales**, está especialmente extendido el uso de fuentes encapsuladas. Mediante el uso de este tipo de fuentes –generalmente de baja actividad–, se suelen obtener medidas de nivel, humedad, densidad o espesor en procesos continuos o de difícil acceso.

También se utilizan fuentes encapsuladas de radiación gamma para ensayos no destructivos en construcciones metálicas (gammagrafía) y en esterilización industrial. En estos casos, se necesitan fuentes de una actividad mayor que en los anteriores.

Al igual que las fuentes encapsuladas utilizadas en medicina, cuando decae su nivel de actividad, deben ser retiradas considerándose residuos radiactivos a gestionar.

- En los centros de **investigación nuclear**, los residuos proceden de reactores de enseñanza e investigación, celdas calientes, metalúrgicas (instalaciones auxiliares de investigación donde se realizan ensayos, manipulaciones, pruebas, etc.) plantas piloto y servicios de descontaminación. Estos residuos son de naturaleza física, química y radiactiva muy variable debido a la gran diversidad de isótopos utilizados y la amplia gama de procesos en que son aplicados.

4.3.- CLAUSURA DE INSTALACIONES NUCLEARES Y RADIATIVAS

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

- En las instalaciones del ciclo del combustible previas al reactor, los residuos están contaminados con radionucleidos naturales (uranio y sus productos de decaimiento) siendo los estériles de minería y de fabricación de concentrados los de mayor volumen. Éstos se deben estabilizar para evitar riesgos radiológicos.
- Si después de la vida útil de una central, se opta por su desmantelamiento total (lo que implica la retirada, de todos los materiales, equipos y partes de la instalación que contengan radiactividad por encima de los niveles aceptables, dejando el emplazamiento en condiciones seguras para un futuro uso) se originan los siguientes tipos de residuos radiactivos:
 - Vasijas del reactor y componentes existentes en el interior del blindaje biológico. Son residuos de gran tamaño, altamente activados y contaminados, que requieren, para facilitar su manejo y transporte, reducción de tamaño en instalaciones blindadas de alta integridad con el consiguiente control ambiental.
 - Componentes externos al blindaje biológico (cambiadores de calor, bombas de circulación, tuberías, etc.). Aunque están menos contaminados que los anteriores, su gestión es semejante.
 - Hormigón activado y contaminado. Su demolición da lugar a la formación de aerosoles radiactivos a retener mediante filtros. La mayor parte de la radiactividad se encuentra en las capas del hormigón más próximas a las zonas radiactivas, por lo que, cuando es posible, se separan del resto de las zonas sustancialmente inactivas, que son estructuras de tipo convencional. Hay que tener en cuenta que una gran parte de una central nuclear (alrededor del 80%) no es radiactiva, y, tras exhaustivos controles de seguridad y medidas radiológicas, establecidos por los Organismos Nacionales y Supranacionales, se puede proceder a su derribo, reutilización o evacuación sin restricción alguna.
 - Sistemas auxiliares y estructuras de edificios. Son materiales ligeramente contaminados, susceptibles de descontaminación.
 - En todas las operaciones de desmantelamiento, se generan residuos secundarios (líquidos de descontaminación, filtros de gases, etc.) que requieren un tratamiento similar a los residuos del funcionamiento del reactor.

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

5.- PRODUCCIÓN DE RESIDUOS EN ESPAÑA

5.1.- SITUACIÓN ACTUAL

Los generadores de residuos radiactivos en España pueden clasificarse esquemáticamente en:

- Instalaciones nucleares
- Fábrica de elementos combustibles (Juzbado)
- Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT)
- Pequeños productores (hospitales, centros de investigación, industrias, etc.)

Los residuos de baja y media actividad producidos en las centrales nucleares, fábrica de elementos combustibles y el CIEMAT, son acondicionados en sus propias instalaciones, mientras que los de pequeños productores son acondicionados en las instalaciones de almacenamiento de Residuos de Baja y Media Actividad de “El Cabril” (Córdoba).

Los únicos generadores de residuos radiactivos de alta actividad son las centrales nucleares, al considerarse como tal el combustible gastado de sus reactores o los productos resultantes del reproceso de ese combustible. Los elementos combustibles gastados son almacenados temporalmente en las piscinas de que disponen a tal efecto en las propias centrales nucleares.

En la Tabla 1 se muestra cuál es el estado al 31 de diciembre de 1998, de los almacenes de residuos existentes en España.

Tabla 1 Residuos radiactivos y combustible gastado almacenados a 31/12/98

Instalación	Tipo de residuo					
	RBMA acondicionados		Combustible gastado			
	m ³	Grado de ocupación % (3)	TU	Grado de ocupación (4)	Fecha de saturación prevista (4)	
José Cabrera	1.865	64	55	43		
Garoña	1.221	79	229	58		
Centrales Nucleares LWR (1)	Almaraz 1	1.957	36	318	42	2.020
	Almaraz 2			314	41	2.022
	Ascó 1	1.002	52	297	51	2.013
	Ascó 2			258	44	2.016
	Cofrentes	2.148	49	364	50	2.014
	Vandellós 2	162	6	210	32	2.021
	Trillo	348	15	204	69	2.003
	Juzbado (ENUSA)	453	61			
Cabril (2)	16.279	28				
TOTAL	25.453		2.249			

RBMA = Residuos de Baja y Media Actividad

(1) No se considera la central de Vandellós I, de tipo grafito-gas, en fase de desmantelamiento. El combustible gastado se ha enviado a Francia para reprocesar y los RBMA de operación (2.000m³) se almacenan en El Cabril, excepto algunas corrientes (grafitos, estribos, etc.) que de momento se mantienen en la central.

(2) El volumen almacenado en El Cabril es la suma de los residuos existentes en los almacenestemporales (4.471m³) y los depositados en las celdas de almacenamiento definitivo(11.808 m³). Estos últimos corresponden a 2.478 contenedores de hormigón, cuyo volumen unitario es 11,14 m³, que suponen un grado de ocupación del 28% respecto a los 8.960 contenedores totales, que es la capacidad actual de almacenamiento en celdas de la Instalación.

(3) Grado de ocupación de los almacenes temporales de residuos que disponen estas instalaciones, hasta su retirada por ENRESA, considerando, en el caso de las CC.NN., las posibles pérdidas de disponibilidad de huecos en sus almacenes, por albergarse en ellos determinados materiales distintos de los bultos de RBMA.

(4) Grado de ocupación de las piscinas de las CC.NN. y fechas de saturación previstas, considerando una reserva de capacidad igual a un núcleo, así como el cambio de bastidores ya efectuado en todas ellas. La ausencia de fechas para José Cabrera y Santa María de Garoña, indica que sus piscinas no se saturarán durante la vida útil supuesta para las mismas (40 años).

5.2.- PREVISIONES DE GENERACIÓN

Para hacer una estimación de las cantidades de residuos que se van a generar en el futuro, además de los productores anteriormente citados, hay que considerar otras actividades o instalaciones no existentes en el momento actual (almacenamiento intermedio de combustible gastado, desmantelamiento de instalaciones, etc.)

Como utilizar en todos los casos, las hipótesis de cálculo disponibles que sean más fiables. Pero quizás, el factor más importante a tener en cuenta a la hora de estas estimaciones es el período de vida útil para el parque actual de instalaciones de generación nuclear.

En la Tabla 2 se resumen las cantidades totales de residuos ya producidos y a producir, tanto de baja y media actividad, como de combustible gastado, que será necesario gestionar en España.

Tabla 2 Cantidades totales estimadas de residuos radiactivos y combustible gastado a gestionar en España

Residuos de baja y media actividad acondicionados	(m ³)
Fabricación de Elementos Combustibles	1.400
Operación de Centrales Nucleares	43.800
Actividades Investigación y Aplicación Radisótopos	8.300
Desmantelamiento de Centrales Nucleares	135.100
Desmantelamiento de Otras Instalaciones (1)	1.100
Otros (2)	3.900
TOTAL (m³)	193.600
Combustible gastado y residuos de alta actividad (3)	(m ³)
Combustible gastado (tU)	6.750
Combustible gastado (nº elementos) (4)	19.680
Vitrificados Vandellós I (m ³)	80

(1) Incluye la fábrica de elementos combustibles, la futura planta de encapsulado y el desmantelamiento de instalaciones en el CIEMAT

(2) Incluye como más significativos la operación de las instalaciones de almacenamiento, así como una previsión de chatarras contaminadas y otros residuos derivados de incidentes de contaminación.

(3) El volumen total equivalente, en base al tipo de cápsula supuesto para su almacenamiento definitivo, sería de unos 10.000 m³. A dicha cantidad habría que añadir, en una aproximación conservadora, los residuos tecnológicos derivados del desmantelamiento de las centrales nucleares y otros que, por sus características, no serían susceptibles de almacenarse junto con los RBMA, como los de media actividad procedentes del reproceso de C.N. Vandellós I, algunas fuentes, etc. También habría que tener en cuenta las pequeñas cantidades de materiales fisionables recuperados en el proceso del combustible de C.N. Santa María de Garoña enviado al Reino Unido con anterioridad al año 1983. El volumen total estimado de estos otros residuos, a efectos de cálculo, se ha supuesto en unos 5.000m³.

(4) 59% elementos combustibles tipo PWR y 41% tipo BWR. En relación con los estériles de minería y fabricación de concentrados de uranio, la tabla 5.3 presenta los valores acumulados de los estériles producidos al 31/12/98, junto con una estimación de las cantidades anuales esperadas para las instalaciones de Saélices el Chico, cuya gestión está previsto que sea realizada por los actuales explotadores.

Tabla 3 Estériles de minería y de producción de concentrados de uranio (31/12/98)

Instalación	Estériles de minería	Estériles de planta			
		Procedente de eras	Procedente de lodos	Procedentes de clasificación	
Cantidad (10 ⁶ t)					
Situación actual (31-12-98)	Saélices P. Elefante (1)	47,8	7,2	0,31	—
	el Chico P. Quercus (2)	15,9	0,84	0,68	1,92
	La Haba P. Lobo-G (3)	6,3	—	0,28	—
	Andújar F.U.A. (4)	—	—	1,20	—
Producción prevista	Saélices Acumulado 1999-2000	6,11	0,25	0,18	0,73
	el Chico Año 2001 (5)	—	—	0,01	—

(1) Paralizadas las actividades productivas en junio-93. En fase de Parada Definitiva.

(2) En la fase de operación.

(3) En fase de Vigilancia y Control, tras finalizar las operaciones de Clausura en 1997.

(4) En fase de Vigilancia y Mantenimiento, tras la finalización en 1994 del proyecto de Clausura.

(5) Parada de las actividades extractivas y de tratamiento de minerales y comienzo de las operaciones de Clausura, previstas hasta el año 2008. Los lodos generados a partir del 2001 son debidos a la producción residual de concentrados (descontaminación de aguas) que se mantendrá durante el período de clausura.

6.- CONCLUSIONES

La generación de residuos radiactivos hoy por hoy es inevitable aunque sean perjudiciales para el medio ambiente, incluso para los seres vivos, pero tenemos que ser coherentes las centrales nucleares generan más del 55 % de electricidad útil de España, si estas centrales fueran cerradas en España y en casi todos los países donde hay de estas centrales se produciría una decaída notable del abastecimiento eléctrico, lo cual indica que no habrá electricidad suficiente para los ciudadanos de un país.

No obstante cabe destacar que tenemos varios tipos de residuos los de baja y media actividad y los de alta actividad. Los cuales tienen mayor o menor duración de vida, normalmente los residuos obtenidos no suelen ser de larga duración pero todo ello dependen de que industria provengan.

Hoy en día los residuos nucleares pueden proveer de las centrales nucleares, de la industria y de la investigación médica.

Una central nuclear obtiene su energía por la fisión del átomo de uranio, esto quiere decir que una central de este tipo no envía a la atmósfera óxidos de carbono, de azufre, de nitrógeno, ni otros productos de combustión tales como las cenizas.

La utilización de productos radiactivos está justificado, a pesar de que haya gente que se oponga a la utilización de este tipo de energía, convendría concienciar a la opinión pública que hay energías que aunque pueden generar residuos perjudiciales para el ser humano son muy beneficiosas no obstante, también habría que decirles que solo son perjudiciales si se está expuesto a ellos durante un período de tiempo largo y sin ninguna protección.

7.- LEGISLACIÓN

- Ley 15/1980, de 22 de abril. Creación del CSN
- Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del Sector Eléctrico
- Ley 34/1998 de 7 de octubre, del Sector de Hidrocarburos. Disposición Adicional 11ª
- Ley 14/1999 de 4 de mayo. Tasas y precios públicos CSN
- Real Decreto 1157/1982, de 30 de abril, por el que se aprueba el Estatuto Del Consejo de Seguridad Nuclear.
- Real Decreto 1339/1999, de 31 de julio, por el que se aprueba el reglamento de la Comisión Nacional de la Energía
- Real Decreto 3487/2000, de 29 de diciembre, por el que se modifica el Real Decreto 1339/1999, de 31 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Comisión Nacional de la Energía.
- Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes
- Real Decreto 413/1997, de 21 de marzo, sobre Protección Operacional de los trabajadores externos con riesgo de Exposición a las Radiaciones Ionizantes por intervención en Zona Controlada.
- Real Decreto 1464/1999, de 17 de septiembre, sobre actividades de la primera parte del ciclo del combustible nuclear
- Real Decreto 1349/2003, de 31 de octubre, sobre ordenación de las actividades de la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, S. A. (ENRESA), y su financiación.
- Real Decreto 2088/1994 de 20 de octubre, por el que se dictan las disposiciones de aplicación de la Directiva CCE 92/3/EUROTOM.
- Ley 24/2005, de 18 de noviembre, de Reformas para el impulso de la productividad. CREACIÓN ENTIDAD PÚBLICA EMPRESARIAL ENRESA
- Real Decreto 412/2001 de 20 de abril, por el que se regulan diversos aspectos relacionados con el transporte de mercancías peligrosas por ferrocarril.
- Real Decreto 1749/1984 de 1 de agosto. Transporte sin Riesgos de Mercancías Peligrosas por vía aérea y las instrucciones técnicas (actualizadas por O.M. MIFOM de 4 diciembre 2001)

- Real Decreto 469/2000 de 7 de abril. Modificación de la estructura orgánica básica del CSN.
- Real Decreto Ley 5/2005, de 11 de marzo. Nueva redacción Disposición Adicional Sexta de la Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del Sector Eléctrico: Fondo para la financiación de las actividades del Plan General de Residuos Radiactivos
- Orden de 5 de octubre de 2001, del Ministerio de Industria y Energía. Otorga a ENRESA autorización de explotación de la instalación nuclear de almacenamiento de RR de Sierra Albarrana
- Orden de 13 de julio de 1998, del Ministerio de Industria y Energía. Asignación fondos por instalación almacenamiento RR o centrales nucleares. Desarrolla el R.D. 1522/1984
- Orden de 13 de diciembre de 1985, del Ministerio de Industria y Energía. Transferencia a ENRESA de instalaciones y personal de la JEN
- INSTRUMENTO de Ratificación Convención Viena, 5/09/1997
- Decreto 2177/1967 de 22 de julio. Reglamento Cobertura Riesgos Nucleares
- Real Decreto 254/2006, de 3 de marzo. Estructura orgánica básica del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Adscripción EPE ENRESA
- Real Decreto 551/2006 de 5 de mayo. Transporte de mercancías peligrosas por carretera
- Ley 25/1964, de 29 de abril, sobre energía nuclear.
- Real Decreto 1204/2006, de 20 de octubre, por el que se modifica el Real Decreto 1339/1999, de 31 de julio por el que se aprueba el Reglamento de la Comisión Nacional de la Energía

8.- BIBLIOGRAFÍA

- Enciclopedia Larousse
- Enciclopedia Oxford
- Enciclopedia Microsoft Encarta 2004
- <http://europa.eu.int/scadplus/leg/es/lvb/l11020.htm>
- <http://europa.eu.int/scadplus/leg/es/lvb/l11022.htm>
- <http://europa.eu.int/scadplus/leg/es/s15002.htm>
- <http://europa.eu.int/scadplus/leg/es/lvb/l28097.htm>
- <http://www.csn.es>
- <http://www.ciemat.es/proyectos/pdfnresiduos.html>