

En las proximidades de las instalaciones de ENRESA en el Cabril, se sitúa la presa del río Bembézar

## Aspectos ambientales del uso de elementos radiactivos

El incidente radioactivo de Acerinox supuso además de una alarma, el despertar del interés sobre el tema de la radiactividad, entre la población andaluza. Respondiendo a este interés, se publica esta monografía, en la que necesariamente se dedica gran parte de su contenido a la explicación de nociones básicas sobre el tema. Además, se incluye la descripción y análisis del incidente producido.

### Conceptos básicos

La radiactividad se define como la propiedad que presentan los núcleos de algunas especies atómicas de desintegrarse espontáneamente con emisión de partículas y radiación electromagnética (radiaciones ionizantes).

La suma total de neutrones y protones en un átomo se llama *Número Másico* y el número de protones se llama *Número Atómico*. El número atómico coincide normalmente con el número de electrones del átomo, lo que hace que éste sea eléctricamente neutro.

La naturaleza química de un elemento, está caracterizada por su número atómico, es decir, el número de protones existentes en el núcleo. Esto se debe a que las propiedades químicas dependen de los electrones orbitales en torno del núcleo, y el número de éstos es necesariamente igual al de protones ya que el átomo es eléctricamente neutro. En consecuencia, átomos con el mismo número de

protones (número atómico), pero diferente número de neutrones (número másico diferente) son químicamente iguales, pero sus características nucleares son diferentes.

A estas especies atómicas con el mismo número atómico y diferente número másico se les denomina *isótopos*.

La descompensación entre el número de neutrones y protones y las fuerzas de atracción y repulsión de las partículas que forman el núcleo atómico hace que, en algunos isótopos de ciertos elementos, exista una inestabilidad que se traduce en un exceso de energía acumulada en el núcleo.

Estos nucleidos inestables reciben el nombre de *radio-nucleidos* debido a que eliminan su exceso de energía emitiendo radiaciones mediante un proceso que se denomina *radiactividad*.

### Velocidad de desintegración

Los nucleidos radiactivos se desintegran espontáneamente con una velocidad determinada y constante, que depende de la naturaleza del nucleido. El núcleo inestable emite una radiación característica, transformándose de este modo en un núcleo diferente, que también puede ser radiactivo.

A medida que se va produciendo la desintegración, los átomos de un determinado radioisótopo de una masa de sustancia radiactiva irán disminuyendo. Al periodo de tiempo que transcurre hasta que su número original se haya reducido a la mitad, se le llama *periodo de semidesintegración*.

Los periodos de semidesintegración para las distintas sustancias radiactivas varían desde la millonésima de segundo hasta millones de años. Algunos ejemplos se pueden ver en el cuadro siguiente:

Existentes en la Naturaleza		
Especie	Actividad	Periodo
Torio-232	Alfa	1,29x10 <sup>29</sup> años
Uranio-238	Alfa	4,51x10 <sup>8</sup> años
Uranio-235	Alfa	7,13x10 <sup>5</sup> años

Artificiales		
Especie	Actividad	Periodo
Torio-233	Beta	23,5 minutos
Protactinio-233	Beta	27,4 días
Uranio-233	Alfa	1,62x10 <sup>6</sup> años
Uranio-239	Beta	23,5 minutos
Neptunio-239	Beta	2,33 días
Plutonio-239	Alfa	2,44x10 <sup>4</sup> años

### Tipos de radiaciones

Las radiaciones se dividen, según sea el grado de inestabilidad del nucleido, en tres tipos diferentes: *Radiación Alfa* ( $\alpha$ ), *Radiación Beta* ( $\beta$ ) y *Radiación Gamma* ( $\gamma$ ).

#### Radiación Alfa ( $\alpha$ )

Este tipo de radiaciones se producen al desprenderse del núcleo dos protones y dos neutrones. Es una emisión de partículas cargadas positivamente, que son idénticas a los núcleos de helio.

Dado que las partículas tienen mucha masa, su capacidad de penetración en la materia es muy baja ya que solamente son capaces de atravesar unos centímetros de aire y se absorben por la piel o por una hoja de papel. Asimismo, por estar cargadas positivamente, en su interacción con otros átomos se desprenden gran número de electrones orbitales y por lo tanto, la pérdida de energía por unidad de longitud recorrida es grande.

#### Radiación Beta ( $\beta$ )

Se produce cuando el radionucleido emite un electrón tras convertirse un neutrón en protón.

Por lo tanto en una desintegración el núcleo resultante tiene un neutrón menos y un protón más que su progenitor, quedando pues inalterado su número másico.

La densidad de ionización producida por la radiación  $\beta$  es menor que la producida por la radiación  $\alpha$ , dado que la primera posee una menor masa y mayor velocidad en su recorrido. Por el contrario su penetración es mayor ya que son capaces de atravesar un metro de aire absorbiéndose en unos dos centímetros de agua o de tejidos biológicos.

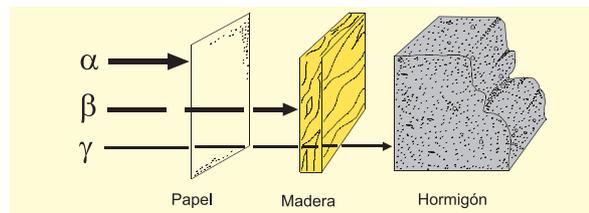
#### Radiación Gamma ( $\gamma$ )

Es una radiación de naturaleza electromagnética, es decir, de idéntica naturaleza que la luz visible, ultravioleta o los rayos X, y por lo tanto no posee carga.

Estas radiaciones se producen cuando un átomo en estado excitado se libera de energía para pasar a su estado

fundamental, mediante la emisión de fotones que constituyen las radiaciones.

Las radiaciones  $\gamma$ , a diferencia de las  $\alpha$  y  $\beta$ , producen ionización indirecta, liberando electrones de los átomos con los que interaccionan, ionizándolos. El poder de penetración de estas radiaciones es grande, ya que únicamente son desviadas o neutralizadas por impacto con los electrones orbitales. Tiene un poder penetrante de unos doscientos metros en el aire y cuarenta centímetros en el suelo.



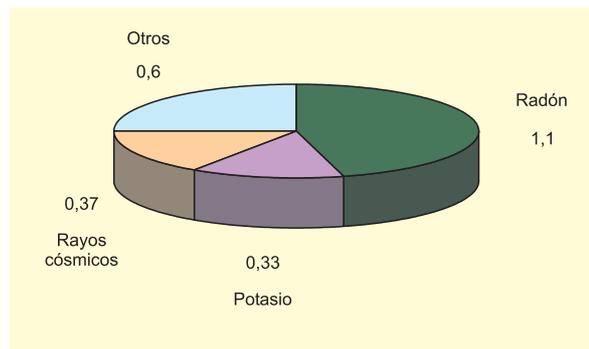
### La radiación natural

El hombre ha estado siempre expuesto a fuentes naturales de radiaciones ionizantes, rayos cósmicos, minerales y materiales radiactivos que se hallan en la corteza terrestre, en el aire, e incluso en alimentos. A estas radiaciones se les denomina *radiación de fondo* o *radiación natural*.

El Comité Científico de las Naciones Unidas para el estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR) estudia de forma regular las dosis debidas a las fuentes naturales, estimando un valor medio mundial para un habitante adulto de 2,4 mSv (\*). El origen de estas dosis se muestra en la figura adjunta.

La dosis debida a fuentes naturales es variable y depende de diversos factores como:

#### Dosis media anual por fuentes naturales



Fuente: UNSCEAR 1997

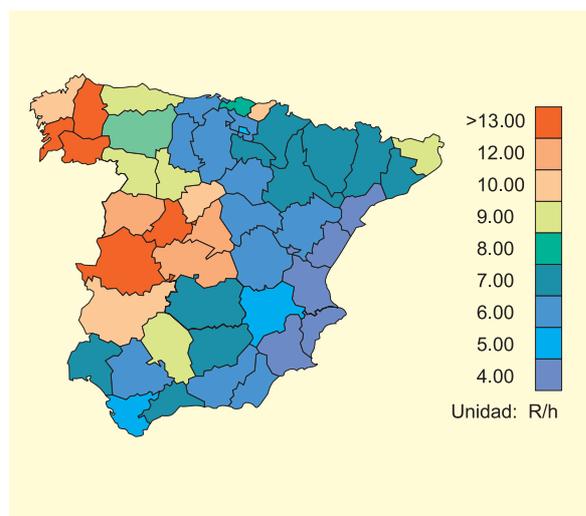
- La altura sobre el nivel del mar, ya que la radiación es retenida en parte por la atmósfera. Las personas que viven en grandes alturas reciben dosis más elevadas de radiación externa y en algunos casos puede ser de hasta un 50% superior a la media.
- Contenido de material radiactivo en el suelo. Existen zonas, por ejemplo graníticas, cuyo contenido en minerales radiactivos es más elevado que en otras áreas (con dominancia de rocas sedimentarias, por ejemplo) lo que conduce a que sus habitantes reciban dosis más elevadas.

(\*) La unidad de medida de la dosis efectiva que se emplea para representar el efecto de las radiaciones sobre el ser humano se denomina Sievert y tiene en cuenta tanto el tipo de radiación de que se trata como los órganos del cuerpo afectado. También se utiliza el Rem (1 Rem = 10 mSv).

- La evolución tecnológica también ha contribuido a modificar la exposición del hombre a las radiaciones. Por ejemplo, en la combustión del carbón se liberan a la atmósfera trazas de material radiactivo natural; también, el uso de fertilizantes fosfatados aumenta la dosis de radiación debido a los radionucleidos naturales que contienen.

En España recientemente ha sido realizado por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) y la Empresa Nacional del Uranio (ENUSA) el Mapa Radiométrico de la Península a escala 1:1.000.000 dentro del proyecto denominado "Proyecto MARNA". El resultado de los valores medios de tasas de exposición gamma natural correspondientes a cada una de las provincias de la España peninsular, se muestra en el gráfico adjunto, en el que se puede apreciar que los valores más altos corresponden a las provincias de Madrid, Cáceres, Lugo, Orense y Pontevedra, mientras que los más bajos corresponden a las provincias de Murcia, Castellón, Valencia, Alicante y Albacete.

### Mapa radiométrico de España



Fuente: Consejo de Seguridad Nuclear y ENURSA 1997

Los valores altos están ligados generalmente a formaciones de rocas graníticas, mientras que los más bajos lo están a formaciones sedimentarias de origen marino.

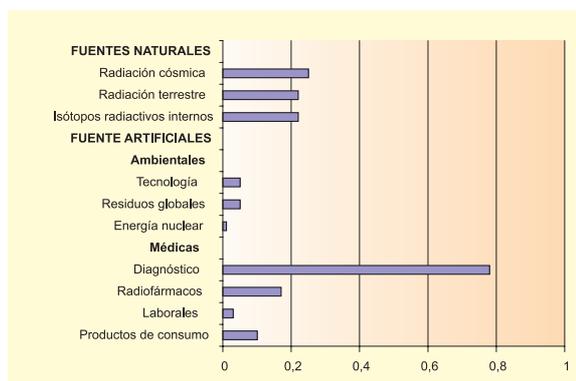
### La radiación artificial

Además de las radiaciones de origen natural el hombre está expuesto a fuentes de radiaciones que él mismo ha creado: aplicaciones de radioisótopos en medicina, industria e investigación, producción de energía eléctrica y todos los residuos que estas actividades comportan.

Las evaluaciones del UNSCEAR sobre las dosis individuales de cualquier origen muestran que la mayor proporción la representan las radiaciones naturales y la utilización de Rayos X en medicina.

La contribución debida a los efluentes evacuados y a los residuos radiactivos de baja y media actividad procedentes del ciclo de combustible nuclear, resulta despreciable en comparación con las dosis recibidas por las fuentes naturales o usos en medicina.

### Dosis media anual debido a todo tipo de fuentes



Fuente: UNSCEAR 1997

## Los elementos radiactivos y su utilización

Como ya se ha mencionado anteriormente, además de los elementos radiactivos presentes en la naturaleza, el hombre, por métodos artificiales, ha logrado producir radioisótopos artificiales que utiliza en un sinnúmero de aplicaciones industriales, médicas y de investigación.

Estos elementos radiactivos y parte de los materiales y equipos que intervienen en los procesos en los que son utilizados, dejarán de tener aplicación cuando alcanzan el final de su utilización en una actividad determinada. Llegado ese punto, estos materiales pasan a considerarse como residuos radiactivos, lo que debe conllevar una serie de actuaciones para conseguir el almacenamiento seguro de este tipo de residuos.

### Aplicaciones de los isótopos radiactivos

La primera utilización de los isótopos radiactivos con fines experimentales se realizó en Austria en 1913, justamente diez años después de la concesión del Premio Nobel a Henry Becquerel y Marie Curie por el descubrimiento de la Radiactividad. Fue concretamente el físico George Charles de Hevery quien utilizó un isótopo de plomo (Pb-210) para estudiar la solubilidad del sulfato y cromato de plomo.

Con el invento del ciclotrón a principios de la década de los treinta y el posterior desarrollo de los reactores nucleares en la década de los cincuenta comienza la fabricación industrial de isótopos radiactivos.

Los isótopos radiactivos se presentan en alguna de las cuatro formas siguientes:

- **Radioisótopos no encapsulados:** Comprende radioisótopos, bajo cualquier forma física, contenidos en recipientes cerrados pero no sellados.
- **Fuentes radiactivas encapsuladas:** El material radiactivo se encuentra dentro de cápsulas o recintos herméticamente cerrados y por lo tanto protegidos de todo contacto o fuga.
- **Generadores de radiaciones:** Aparatos que utilizando una fuente de energía eléctrica producen radiaciones ionizantes. (por ejemplo Rayos X).
- **Reactores nucleares:** Sistemas en los que tiene lugar una reacción en cadena, de forma controlada.

## INCIDENTE RADIOACTIVO EN ACERINOX

### El incidente de Algeciras y la ola radiactiva en Europa

Entre finales de mayo y primeros días de junio, se detectan en estaciones de Francia, Italia, Suiza y Alemania (zona de los Alpes), incrementos de cesio 137. Concretamente en Francia, cerca de Toulon, la cantidad de cesio 137 detectado fue de 2.400 microbequerelios por metro cúbico, según el comunicado oficial del OPRI (Office de Protection Contre les Rayons Ionisants). Este valor es anormal pero sin peligro para la población ni el medio ambiente.

El Consejo de Seguridad Nuclear español asegura que en las mismas fechas no se detectaron incrementos de cesio en la atmósfera en ninguna de las estaciones de seguimiento del país excepto en la estación de Palomares (Almería) que mostró incrementos de cesio aunque con valores sensiblemente inferiores a los detectados en Francia.

El día 2 de junio, en las instalaciones de Acerinox, un camión hace saltar los sensores de Acerinox, por lo que la empresa empieza a realizar las primeras pruebas, y unos días después (9 de junio), Acerinox comunica al CSN la detección de contaminación radiactiva por cesio 137 en el sistema de filtración de humos del horno 1. El CSN inicia una valoración técnica de la situación y da las primeras instrucciones a la empresa.

El Consejo de Seguridad Nuclear español (CSN) sospecha que el incremento de cesio 137 detectado en varias estaciones radiactivas europeas podría tener su foco emisor en un producto de chatarra quemado en los hornos que la acería Acerinox posee en Algeciras. La investigación abierta por el CSN trata de confirmar el origen de la nube tóxica que se extendió por el norte de los Alpes y no descarta que el escape radiactivo de Acerinox pueda ser el origen de los altos niveles de cesio 137 detectados en los países europeos. La valoración de estos datos por el CSN permite establecer la hipótesis de que el cesio detectado en los Alpes eludió el territorio peninsular gracias a las condiciones meteorológicas y los vientos dominantes desde el día del escape.

### Investigación del incidente

Para obtener una estimación más precisa del impacto, el CSN realiza numerosas investigaciones para dilucidar el origen de la fuente y su dispersión así como los posibles incumplimientos que hayan podido producirse con el fin de clarificar definitivamente si el incidente de Algeciras ha sido la única causa de las medidas registradas.

Las cenizas procedentes de la quema de chatarra de Acerinox se envían a la planta de inertización de Palos de la Frontera para su tratamiento, en total un volumen anual de 5.000 toneladas. Tras haber recibido 150 toneladas de cenizas de Acerinox, que podrían estar contaminadas, el CSN ordena la paralización de las actividades de la planta mientras investiga si se ha visto afectada.

El cierre de la planta de inertización, afectó a varias empresas como Tioxide, Carburos Metálicos, Ence y Fertiberia que envían cada año importantes cantidades de residuos a dicha planta y que se ven obligadas a almacenar los residuos en sus instalaciones.

Durante la inspección realizada en las instalaciones de la empresa Presur en Badajoz, que trata la escoria de Acerinox, se detectaron también indicios de radiactividad.

Las inspecciones realizadas por el CSN en las empresas de Egmasa y Presur determinan que ambas plantas están contaminadas y presentan una situación muy similar, con grados muy variables de contaminación. Las zonas más afectadas son las que se encuentran en el interior de la maquinaria de proceso y en los puntos de recepción de polvo. Los niveles de contaminación detectados, similares a los registrados en la acería de Algeciras (1.800 bequerelios), requieren el aislamiento y control de los accesos y un análisis de las balsas donde Egmasa deposita los materiales ya inertizados. También se ha encontrado contaminación significativa en la cisterna de uno de los camiones que trasladan las cenizas y que deberá ser descontaminado antes de su uso.

En el vertedero de El Cobre, donde se depositan las escorias, no se encontró contaminación alguna, mientras que si se detectó contaminación radioactiva en 30 toneladas de cenizas vertidas en las balsas del Polo Químico.

*La planta de Egmasa, fue objeto de trabajos de descontaminación, al igual que otras instalaciones*



En lo que se refiere al origen del incidente, según parece, el material radiactivo procedía de chatarra adquirida en mercados internacionales. El CSN admite que se pudo vender chatarra radiactiva sin garantías aunque duda que se pueda determinar su origen concreto. El CSN confirmó que el material contaminado no procedía de España sino de Rotterdam, donde hay almacenes que acumulan materiales de todo el mundo, por lo que nunca se podrá establecer su procedencia.

Aunque el Ministerio de Industria y Energía ha trabajado con la hipótesis de que la contaminación procedería de chatarra de instrumental sanitario, en concreto un equipo médico de rayos X, esta hipótesis no ha sido avalada por el CSN que ha comprobado el origen de partidas de chatarra procedentes de Alemania, Reino Unido, Holanda, Estados Unidos, Polonia y Portugal.

### Limpeza

Los trabajos de descontaminación del horno y los filtros se iniciaron almacenando el polvo en decenas de sacos en el dique de Acerinox a la espera de las indicaciones de CSN para su traslado y sellado.

En un principio el CSN estimó en 270 toneladas el volumen de residuos radiactivos generados por la contaminación de cesio 137 en la acería gaditana. Técnicos de Enresa trabajaron en un plan de evacuación y tratamiento de estos residuos de baja y media actividad, para su almacenamiento en El Cabril.

### Tratamiento y almacenamiento del material contaminado

Enresa es la empresa estatal encargada de retirar y almacenar los materiales contaminados, y dispone de las instalaciones de El Cabril para el almacenamiento de este tipo de residuos de media y baja actividad, por lo que en esta instalación se habilitaron 700 metros cúbicos donde albergar el material contaminado de las plantas de Egmasa y Presur y la acería de Acerinox.

A partir del 13 de julio Enresa empieza la retirada de las cenizas contaminadas y su traslado a El Cabril; el proceso de clasificación, embalado y traslado de los 800 metros cúbicos de residuos radiactivos tiene una duración de dos meses (en total 1400 toneladas de las que 560 proceden de Acerinox). Enresa se encarga, también, de la limpieza de los cuatro emplazamientos que se han visto afectados.

Enresa asegura que el transporte se realiza cumpliendo la normativa vigente de traslado de mercancías peligrosas por carretera, y asegura que el índice de radiactividad que podría originar el traslado de estos materiales es mínimo.

Después del periodo de descontaminación y una vez retiradas las cenizas, se reabrió la planta de Palos. El resto de las instalaciones afectadas por el vertido ya estaban abiertas.



*Planta de inertización de EGMASA en Palos de la Frontera, afectada por el incidente*

### Otras actuaciones

Diversos grupos parlamentarios han presentado una proposición no de ley instando al gobierno a regular legalmente el control de las partidas de chatarra destinadas a su fundición. El PSOE, por su parte, solicita una orden ministerial urgente dado el vacío legal existente. Además, la Comisión Europea ha presentado una propuesta que opta por una gestión y recolección de residuos en el conjunto de los puertos.

Ante estos hechos y después de conocerse dos casos más, en que se detectó material radiactivo procedente de Colombia y Francia con destino a Acerinox y a una acería de Vitoria respectivamente, el Ministerio de Industria y Energía y el CSN promueven una medida voluntaria para colocar pórticos detectores de emisiones radiactivas en acerías y parques de chatarra. Estas empresas, casi un centenar, aceptan además que su personal reciba cursos de formación y se comprometen a colocar medidores en hornos y chimeneas, para evitar problemas antes de fundir la chatarra.

Las distintas aplicaciones de los isótopos radiactivos se recogen a continuación:

**1. Radiosótopos no encapsulados**

**Industria**

- Medida de caudales
- Ensayos de pérdidas de tuberías y recipientes
- Inventario de material en procesos
- Prospecciones mineras
- Hidrología
- Control de contaminación del agua

**Medicina**

- Radiofármacos
- Estudios y análisis inmunológicos y citológicos
- Estudios funcionales

**Investigación**

- Bioquímica
- Biomedicina
- Entomología

**2. Fuentes radiactivas encapsuladas**

**Industria**

- Inspección de soldaduras y ensayos no destructivos (gammagrafía)
- Control de procesos (medida de nivel, espesor, humedad, etc.)
- Sondeos
- Esterilización de alimentos o material médico
- Paneles luminosos
- Detectores de humo
- Pararrayos

**Medicina**

- Tratamiento del cáncer
- Tratamiento de tumores
- Marcapasos

**Investigación**

- Ingeniería
- Análisis químico-físico

**OTROS USOS NO ENERGÉTICOS DE LOS ISÓTOPOS RADIATIVOS**

Los isótopos radioactivos son empleados en multitud de usos, desde el diagnóstico y terapia médica hasta la datación de muestras orgánicas prehistóricas. En los recuadros siguientes se muestran, a modo de ejemplo, los usos más frecuentes en medicina nuclear y en mediciones de precisión de espesores y densidades de diferentes materiales.

**Relación de isótopos más empleados en medicina nuclear**

Isótopo	Periodo semidesintegración	Radiación	Usos principales
Tecnecio-99	6 horas	$\gamma$	Gammagrafía tiroidea, estudios cerebrales, óseos, cardíacos, pulmonares, renales, de hígado y bazo
Talio-201	3 días	$\gamma$	Detección de angina e infarto de miocardio
Yodo-131	8 días	$\gamma$	Diagnóstico y tratamiento tiroideo, estudios renales, marcaje de anticuerpos
Yodo-125	59 días	$\beta$ - $\gamma$	Técnicas analíticas de radioinmunoanálisis
Indio-111	28 días	$\beta$ - $\gamma$	Marcaje de células sanguíneas. Detección de inflamaciones
Galio-67	3,3 días	$\gamma$	Detección de tumores y procesos inflamatorios crónicos
Cromo-51	28 días	$\gamma$	Marcaje de células sanguíneas, estudios hematológicos
Cobalto-57	270 días	$\gamma$	Estudios de absorción de vitamina B-12
Cobalto-58	71 días	$\gamma$	Estudios de absorción de vitamina B-12
Hierro-59	45 días	$\gamma$	Estudios de metabolismo del hierro
Itrio-90	2,7 días	$\beta$	Tratamiento de procesos articulares
Molibdeno-99	66 horas	$\beta$ - $\gamma$	Generador de Tecnecio
Fósforo-32	14 días	$\beta$	Tratamiento de procesos hematológicos

Fuente: ENRESA 1998

**Relación de isótopos más empleados en medición de espesores y densidades**

Isótopo	Periodo semidesintegración	Radiación	Usos principales
Carbono-14	5.739 años	$\beta$	Plásticos delgados
Níquel-63	100 años	$\beta$	Plásticos delgados
Kriptón-85	10,73 años	$\beta$	Papel y plásticos
Estroncio-90	29 años	$\beta$	Papel grueso, cintas y láminas de aluminio y cobre
Itrio-90	64 horas	$\beta$	Papel grueso y cintas
Bario-133	10,4 años	$\gamma$	Láminas de aluminio y cobre
Cobalto-60	5,3 años	$\beta$	Materiales densos
Cesio-137	30,1 años	$\beta$	Materiales densos

Fuente: ENRESA 1998

### 3. Generadores de radiaciones ionizantes

#### Industria

- Inspección de materiales (Radiografía con Rayos X)
- Espectrografi
- Inspección e investigación de materiales (Aceleradores de partículas)

#### Medicina

- Diagnóstico (Radiografía y Radioscopia)
- Tratamiento del Cáncer (Aceleradores de partículas)

### 4. Reactores nucleares

#### Industria

- Producción de energía eléctrica
- Producción de isótopos radiactivos
- Inspección de materiales (Neutrografía)

#### Investigación

- Estudios de distribución de flujo
- Estudios y medida de potencia
- Medida de secciones eficaces

### Fabricación de radioisótopos

Muchos de los radioisótopos que se utilizan en el campo industrial y médico, se producen en los reactores nucleares introduciendo en el núcleo del reactor una cantidad de material no radiactivo con cuyos átomos interaccionan los neutrones para formar los isótopos radiactivos del material irradiado.

En la actualidad en España no se produce de forma industrial ningún tipo de radioisótopo. En el pasado, hasta que fueron clausurados, funcionaron en España los siguientes reactores de investigación capaces de producir radioisótopos.

Nombre	Localidad	Fecha de Parada
JEN I	Madrid	1984
CORAL	Madrid	1987
ARGOS	Barcelona	1975
ARBI	Bilbao	1975

## LEGISLACIÓN SOBRE RADIATIVIDAD

Las disposiciones legales relativas al uso de la energía nuclear en España se inician en 1964 con la Ley 25/1964 (BOE de 4 de diciembre de 1964) relativa al uso de la energía nuclear. Desde entonces se han producido diversas disposiciones de diferente rango que se muestran de forma sinóptica en el cuadro adjunto, algunas de ellas derivadas de la normativa europea o de obligaciones de convenios internacionales.

Entre todas ellas, destacan las relativas a la creación del Consejo de Seguridad Nuclear (Ley 25/1980), la ley 54/1997 (BOE de 28 de noviembre de 1997), de regulación del sector eléctrico y, finalmente, el Real Decreto 1522/1984 (BOE de 22 de agosto de 1984) por el que se constituye la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (ENRESA).

### Resumen de disposiciones legales vigentes relativas a la energía nuclear

Rango	Aplicación	Referencia	Descripción
Ley	Global	Ley 25/1964. BOE 4-12-64	Energía nuclear
		Ley 25/1980. BOE 25-4-80	Creación del Consejo de Seguridad Nuclear (C.S.N.)
		Ley 54/1997. BOE 28-11-97	Sector eléctrico
Decreto/ Real Decreto	MINER	R.D. 1889/1996. BOE 6-12-96	Estructura orgánica básica del Ministerio de Industria
	Genéricas sobre energía nuclear	D. 2177/1967. BOE 18-9-67	Reglamento cobertura de riesgos naturales
		D. 2869/1972. BOE 24-10-72	Reglamento instalaciones nucleares y radioactivas
		R.D. 1157/1982. BOE 7-6-82	Estatuto del CSN
		R.D. 53/1992. BOE 12-2-92	Reg. protección sanitaria contra radiaciones ionizantes
		R.D. 413/1997. BOE 21-3-97	Protección trabajadores externos prof. expuestos
	Ciclo combustible 1ª parte	R.D. 2967/1979. BOE 14-1-80	Ordenación actividades en el CSN
		R.D. 1611/1984. BOE 11-9-1985	Modifica el R.D. anterior
		R.D. 813/1988. BOE 27-7-88	Modifica el R.D. anterior
	Ciclo combustible 2ª parte	R.D. 1522/1984. BOE 22-8-84	Constitución de ENRESA
		R.D. 1899/1984. BOE 27-10-84	Sistema de actuación de ENRESA
		R.D. 404/1996. BOE 22-3-96	Desarrolla Ley 40/1994 y modifica R.D. 1522/1984
	Transporte residuos	R.D. 1749/1984. BOE 31-12-84	Transporte por vía aérea
		R.D. 879/1989. BOE 18-7-89	Transporte por ferrocarril
		R.D. 2088/1994. BOE 26-11-94	Traslado residuos entre estados miembros EURATOM
		R.D. 2115/1998. BOE 16-10-98	Traslado mercancías peligrosas por carretera
		R.D. 2225/1998. BOE 2-11-98	Deroga el Anejo al R.D. 879/1989
Órdenes ministeriales	ENRESA	O. MIE 13-12-85	Transf. a ENRESA instalaciones y personal de la JEN
		O. MIE 31-10-89. BOE 2-11-89	Autoriza la ampliación de las instalaciones de El Cabril
		O. MIE 8-10-96. BOE 22-10-96	Prórroga permiso explotación provisional de El Cabril
		O. MIE 13-7-98. BOE 17-7-98	Asignación fondos por instalaciones nucleares

Fuente: ENRESA 1999

Además de los reactores nucleares, también se utilizan para producir radioisótopos los aceleradores de partículas, sobre todo en medicina, por presentar ventajas respecto a los producidos en reactores nucleares, ya que los producidos en aceleradores tienen un periodo de semidesintegración más corto y una menor energía de la radiación emitida, lo que implica un menor riesgo de radiación para el paciente y para el personal sanitario.

La aplicación de las radiaciones ionizantes en medicina ha dado lugar a especialidades médicas basadas en la tecnología y ha permitido un mejor conocimiento tanto de la anatomía y fisiología normal como de la patológica. La investigación en radiaciones ionizantes no sólo contempla mejorar la tarea cotidiana de interpretar imágenes, diagnosticar y tratar enfermedades, sino que también busca nuevos conocimientos en medicina del mismo modo que también lo hacen otras técnicas no radiológicas.

La aplicación de los radioisótopos y radiaciones en medicina se considera muy beneficiosa, aunque debe operarse siguiendo las normas establecidas al afecto, pues las dosis recibidas son a menudo innecesarias, pudiéndose reducir considerablemente sin pérdida de eficacia.

### Fabricación de combustible nuclear

Otro método de producción de radioisótopos consiste en el reprocesado de los elementos combustibles gastados de los reactores para separar los productos de fisión. En el caso de combustible utilizado en las centrales nucleares, estos procesos requieren grandes plantas industriales denominadas plantas de reproceso en los que se realiza la "purificación" del combustible separando los elementos no deseados mediante complicados procesos químicos. España no dispone de plantas de reproceso de combustible.

Los isótopos que se producen en mayor cantidad de forma industrial son los combustibles de las centrales nucleares.

La fabricación de combustible parte de los minerales radiactivos naturales del uranio de los que España ha sido uno de los países con mayores reservas y producción de Europa.

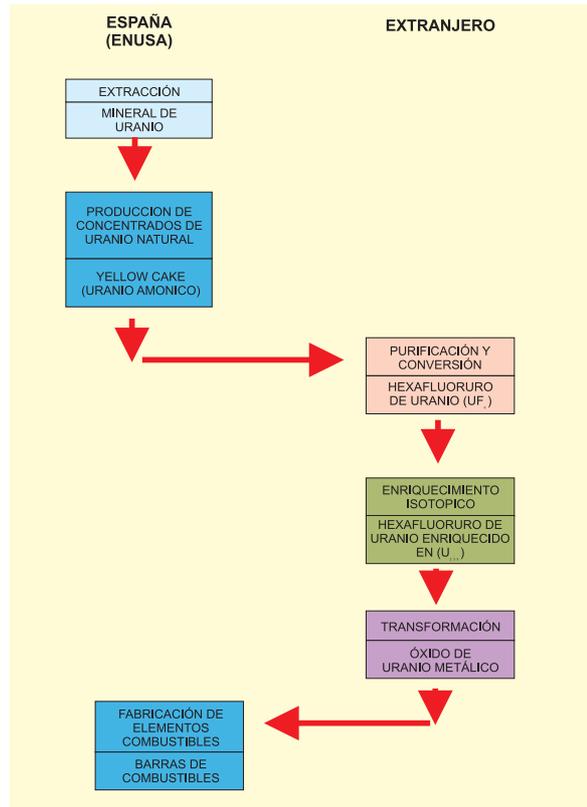
Las reservas de uranio, explotables económicamente, ascienden a unas 35.000 toneladas de  $U_3O_8$  encontrándose fundamentalmente en los yacimientos de la zona de Saelices el Chico en la provincia de Salamanca.

La única entidad que actualmente desarrolla actividades de minería y producción de concentrados de Uranio en España es la Empresa Nacional del Uranio (ENUSA).

El proceso de fabricación de combustible nuclear se puede dividir en varias etapas:

- a) Extracción del mineral radiactivo (uranio)
- b) Producción de concentrados de uranio
- c) Purificación y enriquecimiento isotópico
- d) Elaboración de elementos combustibles

En la figura adjunta se representan las distintas etapas y sus productos finales desde la extracción del mineral hasta la fabricación de las barras de combustible, indicando los procesos que se realizan en España.



## Las centrales nucleoelectricas

### La fisión nuclear

Si bombardeamos con neutrones los núcleos de átomos pesados, éstos pueden dividirse en varios fragmentos formados por núcleos de átomos más ligeros, apareciendo una emisión de neutrones y liberándose una gran cantidad de energía. A este proceso se le denomina *reacción de fisión*.

En el proceso de fisión, el núcleo excitado compuesto que se forma tras la absorción de un neutrón, se escinde en dos núcleos más ligeros que se desprenden a gran velocidad. Los neutrones que aparecen también lo hacen a una determinada velocidad. A todos estos productos que se presentan en una reacción nuclear se les denomina fragmentos de fisión y aparecen casi instantáneamente.

Los productos que aparecen en la fisión son radiactivos, emisores de partículas y dan lugar a unas series radiactivas formadas por varios nucleidos.

La fisión del átomo de  $U^{235}$  produce aproximadamente  $2,5 \times 10^6$  más energía que la combustión de un átomo de  $C^{12}$  (Carbono estable). La mayor parte de la energía de fisión (más del 80 %) aparece como energía cinética de los fragmentos de fisión, la cual se transforma en calor inmediatamente. En la figura adjunta se representa esquemáticamente el proceso de fisión de un átomo.

### Centrales nucleares

Cuando se dispone de una gran cantidad de átomos de uranio para fisionar los neutrones liberados en la fisión

## USOS ENERGÉTICOS

Los usos energéticos de la energía nuclear representan para algunos países su principal fuente de energía, como en los casos de Lituania (81,4%), Francia (78,2%) o Bélgica (60,05%).

Para otros países, incluso desarrollados, es inexistente o marginal. Por ejemplo, en Austria, Australia o Italia no existen centrales eléctricas nucleares y en Holanda, China o India, el uso de la energía nuclear representa porcentajes mínimos de sus necesidades energéticas (inferiores al 3%).

En el caso de España, la energía nuclear representa aproximadamente un tercio de la producción energética total, relación muy similar a la que existe en otros países de nuestro entorno, como Alemania y el Reino Unido.

En los cuadros se muestran los reactores y potencia instalada en el mundo y en España..

### Reactores en operación y construcción en el mundo

Países	Reactores en operación		Reactores en construcción	
	Nº de unidades	Total Mw	Nº de unidades	Total Mw
Alemania	20	22.282	-	-
Argentina	2	935	1	692
Armenia	1	376	-	-
Bélgica	7	5.712	-	-
Brasil	1	626	1	1.245
Bulgaria	6	3.538	-	-
Canadá	16	11.994	-	-
China	3	2.167	4	3.090
Eslovaquia	4	1.632	4	1.152
Eslovenia	1	632	-	-
España	9	7.320	-	-
Finlandia	4	2.455	-	-
Francia	59	62.853	1	1.450
Holanda	1	449	-	-
Hungría	4	1.729	-	-
India	10	1.695	4	808
Irán	-	-	2	2.111
Japón	54	43.850	1	796
Kazakstán	1	70	-	-
Lituania	2	2.370	-	-
México	2	1.308	-	-
Pakistán	1	125	1	300
Reino Unido	35	12.968	-	-
República Checa	4	1.648	2	1.824
República de Corea	12	9.970	6	5.120
Rumanía	1	650	1	650
Rusia	29	19.843	4	3.375
Suecia	12	10.040	-	-
Suiza	5	3.079	-	-
Suráfrica	2	1.842	-	-
Taiwan	6	4.884	-	-
Ucrania	16	13.765	4	3.800
USA	107	99.188	-	-
<b>Total</b>	<b>437</b>	<b>351.795</b>	<b>36</b>	<b>26.813</b>

Fuente: IAEA. Datos de fines de 1997

### Centrales nucleares en España

Central	Localización	Potencia bruta (Mw)	Potencia neta (Mw)	Tipo reactor	Estado actual
José Cabrera	Almonacid de Zorita (Guadalajara)	160	153	PWR	Explotación agosto 1969
Sta. Mª de Garoña	Santa María de Garoña (Burgos)	460	440	BWR	Explotación mayo 1971
Almaraz I	Almaraz (Cáceres)	973,5	943,5	PWR	Explotación septiembre 1983
Almaraz II	Almaraz (Cáceres)	982,6	952,6	PWR	Explotación julio 1984
Ascó I	Ascó (Tarragona)	973	943	PWR	Explotación diciembre 1984
Ascó II	Ascó (Tarragona)	966	936	PWR	Explotación marzo 1986
Cofrentes	Cofrentes (Valencia)	990	955	BWR	Explotación marzo 1985
Trillo I	Trillo (Guadalajara)	1.066	1.000	PWR	Explotación agosto 1988
Vandellós II	Vandellós (Tarragona)	1.009	966	PWR	Explotación marzo 1988

Fuente: UNESA. Datos a 31-12-1997

de cada núcleo se aprovechan para romper nuevos núcleos produciendo otros neutrones que a su vez vuelven a romper nuevos núcleos liberando nuevos neutrones y así sucesivamente produciéndose una gran liberación de energía. A este proceso se le denomina *reacción en cadena*.

En una central nuclear, como en una térmica, se transforma la energía calorífica de un determinado combustible en energía mecánica, y ésta en eléctrica. El calor producido calienta agua y la convierte en vapor que pasa por una turbina que acciona un alternador que produce la energía eléctrica. Posteriormente el vapor pasa a través de un condensador donde se convierte de nuevo en agua, que es bombeada de nuevo al interior del reactor.

Así como en una central térmica convencional el calor proviene de la combustión de carbón, petróleo o gas, en una central nuclear el calor proviene de la reacción en cadena que tiene lugar en el *reactor nuclear*.

La regulación del calor que se produce en la fisión nuclear se realiza mediante determinados elementos de control que sirven para variar la cantidad de neutrones. La forma más utilizada para variar la cantidad de neutrones es el sistema de las "barras de control" constituidas por materiales absorbentes de neutrones que se introducen en el núcleo del reactor.

Al introducir estas barras disminuye la potencia del reactor y al sacarlas aumenta, de esta forma se puede modificar la potencia del reactor según lo exija la demanda de producción de energía eléctrica.

El combustible utilizado en la mayoría de las centrales nucleares es el uranio en forma de dos isótopos el  $U^{238}$  y el  $U^{235}$  los cuales se encuentran en el uranio natural en proporciones del 99,3 % y del 0,7% respectivamente.

Los tipos de reactores nucleares pueden clasificarse atendiendo a varios criterios:

- Según la velocidad de los neutrones: Reactores rápidos o Reactores térmicos.
- Según el combustible utilizado: Reactores con uranio natural o enriquecido.
- Según el elemento moderador: Reactores de agua ligera, agua pesada o grafito.
- Según el refrigerante utilizado: Agua ligera o pesada, gas.

En España existen dos tipos de reactores en operación que son los siguientes:

### Reactores de agua a presión (PWR).

Es el sistema más utilizado en el mundo. Emplea como moderador y refrigerante el agua ligera. El circuito de refrigeración está sometido a presión para que el agua no se convierta en vapor. Este agua lleva el calor producido en el núcleo del reactor a un intercambiador de calor donde se genera el vapor que moverá la turbina. En este tipo de reactor existen dos tipos de circuitos, el primario (en contacto con el reactor) y el secundario, siendo ambos totalmente independientes.

En España existen siete centrales de este tipo: José Cabrera, Almaraz I y II, Ascó I y II, Trillo y Vandellós II

### Reactores de agua en ebullición. (BWR)

En este tipo de reactores, el elemento moderador y refrigerante también es el agua ligera aunque en este caso no se encuentra sometida a tanta presión como en los PWR y por lo tanto el agua se encuentra en estado de vapor. Este vapor llega directamente a la turbina sin que exista entre medias un intercambiador de calor.

Las centrales españolas pertenecientes a este grupo son Santa María de Garoña y Cofrentes.

## Instalaciones nucleares y radiactivas en España

Las instalaciones industriales, hospitalarias o de investigación que utilizan materiales radiactivos en sus procesos se dividen en dos grandes grupos, *Instalaciones nucleares* e *instalaciones radiactivas*.

### Instalaciones nucleares

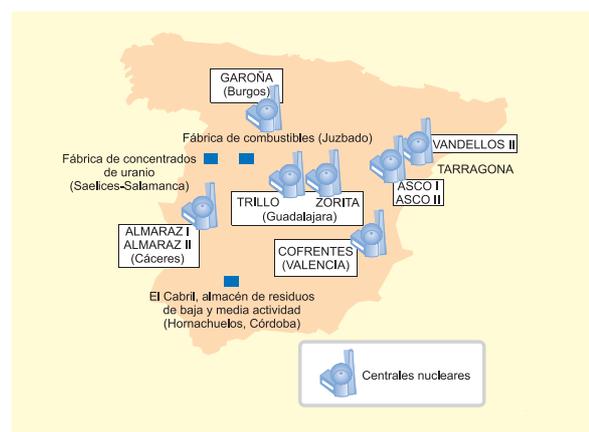
Se clasifican en cuatro categorías:

- Centrales Nucleares.
- Reactores Nucleares.
- Fábricas que utilicen combustible nuclear en sus procesos.
- Instalaciones de almacenamiento de residuos.

En la actualidad existen en España las siguientes centrales nucleares en operación:

- **Almaraz I y II.** Dos reactores de agua a presión de 930 Mw cada uno.
- **Ascó I y II.** Dos reactores de agua a presión de 930 Mw cada uno.
- **Cofrentes.** Un reactor de agua en ebullición de 990 Mw
- **José Cabrera.** Un reactor de agua a presión de 160 Mw.
- **Santa M<sup>a</sup> de Garoña.** Un reactor de agua en ebullición de 460 Mw.
- **Trillo.** Un reactor de agua a presión de 1.041 Mw.
- **Vandellós II.** Un reactor de agua a presión de 982 Mw.

### Mapa nuclear español



Fuente: UNESA y ENRESA 1997

La potencia eléctrica total instalada de origen nuclear es de 7.553 Mw lo que supone aproximadamente un 40% del total de la energía eléctrica en España.

### Instalaciones Radiactivas

Se dividen en tres categorías:

- a) Primera categoría:
  - Fábricas de producción de Uranio, Torio y sus compuestos.
  - Fábricas de producción de elementos combustibles
  - Instalaciones industriales de irradiación
- b) Segunda categoría:
  - Instalaciones donde se manipulen o almacenen radionucleidos.
  - Instalaciones de Rayos X
  - Aceleradores de partículas e instalaciones de fuentes de neutrones
- c) Tercera categoría:
  - Instalaciones donde se manipulen nucleidos radiactivos de una actividad total definida para cada nucleido (siempre con valores menores que las de segunda categoría).

En diciembre de 1992 existían en España un total de 1.147 instalaciones radiactivas autorizadas distribuidas de la siguiente forma:

Primera categoría . . . . .	1
Segunda categoría . . . . .	708
Tercera categoría . . . . .	438
<b>TOTAL . . . . .</b>	<b>1.147</b>

## Los residuos radiactivos

Uno de los mayores problemas con que se enfrenta el uso de la energía nuclear es el planteado por la gestión de los residuos radiactivos que se producen en el desarrollo del ciclo de combustible, principalmente en las centrales nucleares, debido a que por las características de este tipo de residuos es necesario proteger al hombre y al medio ambiente de las radiaciones emitidas por los residuos durante un periodo superior al de la duración de su actividad, que en algunos casos puede llegar a miles de años.

La gestión de los residuos radiactivos no había recibido hasta la década de los 70 la misma atención que se había dado a la generación de energía nuclear, la prospección de minerales de uranio o la fabricación de los elementos combustibles. Desde principios de los años 70, sin embargo, los problemas ambientales y sobre la salud de las personas generados por los residuos radioactivos condujeron a un planteamiento progresivamente más riguroso.

Es importante tener en cuenta que la gestión de los residuos nucleares debe realizarse con independencia de cual sea el futuro de la energía nuclear, porque el problema de la evacuación o almacenamiento de los residuos no desaparecería si se clausurasen todas las centrales nucleares, puesto que ya existen miles de toneladas almacenadas en las propias centrales.

### Clasificación de los residuos radiactivos

Residuo radiactivo es cualquier material que contiene o está contaminado con radionucleidos en concentraciones o niveles de actividad superiores a los establecidos por las leyes vigentes y para los cuales no está previsto ningún uso.

Clasificación de los residuos por parte de la OIEA, con vistas a su almacenamiento			
Clase de residuo	Características	Tipo y procedencia	Sistema de evacuación
I. ACTIVIDAD ALTA, PERIODO LARGO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Actividad beta/gamma alta</li> <li>• Actividad alfa significativa.</li> <li>• Radiotoxicidad elevada</li> <li>• Gran producción de calor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Residuos líquidos de alta actividad</li> <li>• Solidificados procedentes de la reelaboración del combustible irradiado (1)</li> <li>• Combustible irradiado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formaciones geológicas profundas</li> </ul>
II. ACTIVIDAD INTERMEDIA, PERIODO LARGO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Actividad beta/gamma intermedia</li> <li>• Actividad alfa significativa</li> <li>• Radiotoxicidad intermedia</li> <li>• Pequeña producción de calor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vainas del elemento combustible</li> <li>• Piezas metálicas</li> <li>• Residuos líquidos de actividad intermedia (1)</li> <li>• Residuos gaseosos (1)</li> <li>• Residuos de clausura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formaciones geológicas profundas</li> </ul>
III. ACTIVIDAD BAJA, PERIODO LARGO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Actividad beta/gamma baja</li> <li>• Actividad alfa insignificante</li> <li>• Radiotoxicidad baja/intermedia</li> <li>• Producción de calor insignificante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Residuos líquidos de baja actividad y sus productos de solidificación (1)</li> <li>• Residuos gaseosos (3)</li> <li>• Residuos contaminados con tritio</li> <li>• Residuos de clausura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Posible colocación en mina o cavidades.</li> <li>• Semejante a la Clase II. (Inyección en fracturas o en formaciones profundas)</li> </ul>
IV. ACTIVIDAD INTERMEDIA, PERIODO CORTO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Actividad beta/gamma intermedia</li> <li>• Actividad alfa insignificante</li> <li>• Radiotoxicidad intermedia</li> <li>• Pequeña producción de calor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Residuos líquidos de actividad intermedia y sus productos de solidificación (1)</li> <li>• Residuos gaseosos (3)</li> <li>• Residuos contaminados con tritio</li> <li>• Residuos de clausura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Colocación en minas o cavidades.</li> <li>• Trincheras superficiales (Inyección)</li> </ul>
V. ACTIVIDAD BAJA, PERIODO CORTO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Actividad beta/gamma baja</li> <li>• Actividad alfa insignificante</li> <li>• Producción de calor insignificante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Residuos líquidos de baja actividad y sus productos de solidificación</li> <li>• Residuos sólidos de baja actividad (3)</li> <li>• Residuos emisores alfa (4)</li> <li>• Residuos de clausura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Semejante Clase IV</li> </ul>

(1) Ciclo cerrado (reelaboración); (2) Ciclo abierto; (3) Centrales nucleares; (4) Fabricación de combustible.

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

Sin embargo la clasificación establecida por la OIEA para los residuos sólidos no considera las grandes diferencias en los periodos de semidesintegración de los distintos radionucleidos, de vital importancia a la hora de su almacenamiento o evacuación definitiva. Por esta razón, se tiende a segregar, cuando es posible, los emisores alfa que tienen periodos de semidesintegración muy largos, de los emisores beta - gamma, de periodos mucho más cortos.

Por tanto desde el punto de vista de su almacenamiento definitivo los residuos radiactivos se clasifican en:

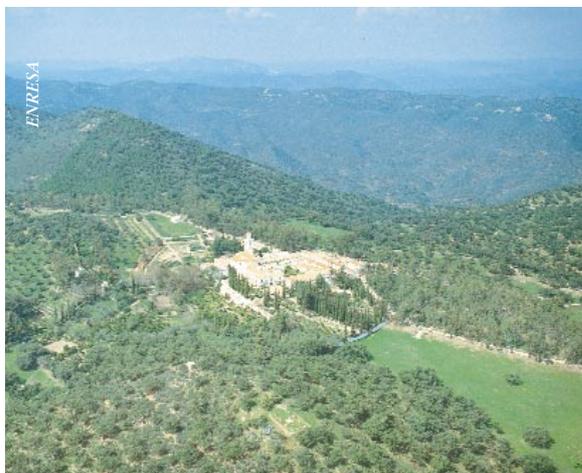
### a) Residuos de baja y media actividad

Sus características principales son:

- Actividad específica por elemento radiactivo baja
- No generan calor
- Contienen radionucleidos emisores beta-gamma
- Su contenido en emisores alfa debe ser inferior a 0.37 Gbq/t.

Estos residuos pueden almacenarse en estructuras de ingeniería superficiales o a muy poca profundidad.

Para estos residuos existen múltiples instalaciones en funcionamiento en todo el mundo destacando especialmente por su alta tecnología y seguridad la instalación española situada en El Cabril en la provincia de Córdoba.



Convento de San Calisto, en el Parque Natural de Hornachuelos, en las proximidades de las instalaciones de El Cabril

### b) Residuos de alta actividad

Sus características principales son:

- Contienen emisores de vida larga con actividad específica elevada.
- Su contenido en emisores alfa es mayor de 0.37 Gbeq/t.
- Desprenden calor.

Para este tipo de residuos no existe en el mundo ninguna instalación de almacenamiento definitivo de los residuos radiactivos generados en usos civiles de la energía nuclear, siendo la opción de almacenamiento geológico

profundo una de las posibles soluciones, aunque hoy en día se está considerando seriamente la opción de la transmutación de los residuos de larga vida, que convierte los isótopos radioactivos en otros elementos no radioactivos. De cualquier forma, la opción de la transmutación también necesitará una solución para la evacuación definitiva de aquellos radionucleidos de alta actividad que quedarán como residuos después del proceso de transmutación, ya que ésta no elimina el 100% de los residuos tratados.

En EE.UU. se ha puesto recientemente en funcionamiento una instalación sólo para residuos procedentes de aplicaciones militares denominada WIPP (Waste Isolation Pilot Plant), situada en Carlsbad (Nuevo México).

De cualquier forma es previsible que el avance de la ciencia llegue en el futuro a ofrecer otras alternativas que hoy quizá ni nos imaginamos y que pueda contribuir a resolver este importante problema para las generaciones futuras.

## Producción de residuos radiactivos en España

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

- Centrales Nucleares
- Fábrica de elementos combustibles
- CIEMAT
- Pequeños productores ( hospitales, industrias, investigación, etc.)

Los residuos de baja y media actividad producidos son debidamente acondicionados en las propias instalaciones donde se producen y se envían a las instalaciones de El Cabril (Córdoba) donde después de un control exhaustivo y de su reacondicionamiento son almacenados en la instalación allí existente.

Los residuos de alta actividad generados en las centrales nucleares son almacenados temporalmente en las propias centrales dentro de las piscinas que poseen al efecto las mismas. Con el paso del tiempo, al irse llenando las piscinas de las centrales, presumiblemente será necesario proceder a la construcción de almacenamientos temporales, bien en las propias centrales o bien un almacenamiento temporal centralizado en espera de la solución definitiva que se adopte.

## La gestión de los residuos radiactivos

Los Estados o Gobiernos con programas nucleares han creado entes públicos específicos para la gestión de los residuos radiactivos, o han responsabilizado de su creación al consorcio de empresas productoras de energía nucleoelectrónica, reservándose de alguna manera el seguimiento y control técnico y financiero.

En España, mediante el Real Decreto 1522/1984 se creó la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos S.A (ENRESA) empresa pública participada en el 80% por el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) y el 20% por la Sociedad Estatal de Participación Industrial (SEPI).

El objetivo final de la gestión de los residuos radiactivos consiste en su inmovilización y aislamiento del entorno humano, por un periodo de tiempo y en condiciones

tales que cualquier liberación de los radionucleidos contenidos en los mismos no suponga un riesgo radiológico inaceptable para las personas ni para el medio ambiente.

Desde el punto de vista de la gestión los dos grandes tipos de residuos radiactivos son completamente diferentes en su comportamiento a largo plazo y por tanto su tratamiento y evacuación final debe ser muy diferente.

### **Almacenamiento de residuos radiactivos de alta actividad**

Para mantener aislados los residuos de alta actividad del medio ambiente durante los largos periodos en que dura su peligrosidad potencial se han propuesto diversos métodos, siendo los más relevantes los siguientes:

- Almacenamiento geológico profundo
- Transformación por transmutación
- Lanzamiento al espacio exterior
- Evacuación en el subsuelo marino
- Evacuación en los hielos polares

De estas soluciones sólo las dos primeras parecen factibles en el estado actual del conocimiento sobre todo a partir de los trabajos de investigación del premio Nobel Dr. Carlo Rubia en el terreno de la transmutación que permitirá en el futuro reducir aunque no eliminar completamente el volumen de residuos de alta actividad.

Los otros métodos propuestos tienen importantes dificultades de índole científica, técnica y económica, además de otros inconvenientes de naturaleza jurídica, ética y de seguridad ante accidentes, o la apropiación por parte de los países productores de los residuos de patrimonios comunes a la humanidad, como los océanos o los casquetes polares.

Una opción intermedia es la construcción de almacenamientos temporales para los residuos de alta actividad. En estos quedarían almacenados los residuos durante el tiempo necesario hasta que se decida la forma de su evacuación definitiva.

Este tipo de almacenamiento está técnicamente probado a nivel industrial y se basa en dos grupos de técnicas, *almacenamiento en seco* o *almacenamiento en piscinas* ambos con la opción de hacerlo de forma centralizada, es decir: almacenar todos los residuos en un sólo emplazamiento, o en la propia central de donde proceden como se hace en la actualidad.

### **Almacenamiento de residuos radiactivos de baja y media actividad**

Así como el almacenamiento de los residuos de alta actividad tiene aún muchos interrogantes y ningún país ha decidido definitivamente cual será el sistema de evacuación, el almacenamiento de los residuos de baja actividad es un tema técnicamente resuelto en muchos países que cuentan con instalaciones en operación, con soluciones internacionalmente aceptadas.

Se definen los residuos de baja y media actividad por una serie de características relativas al estado físico, actividad específica, limitaciones en contenido de radionucleidos emisores alfa y periodo de semidesintegración. Es precisamente éste último parámetro el que tiene mayor peso

a la hora de evaluar las características del almacenamiento definitivo para éste tipo de residuos. Los residuos de baja y media actividad, considerados de vida corta, habrán reducido su actividad a menos de una milésima parte en un espacio de tiempo no superior a 300 años.

Por lo tanto se puede establecer en 300 años la duración mínima en que el almacenamiento en su conjunto deberá mantener las características de confinamiento y seguridad necesarios para que los productos radiactivos allí almacenados no ejerzan un efecto negativo sobre el hombre y el medio ambiente.

Los sistemas de almacenamiento que se han utilizado hasta ahora para almacenar los residuos de baja y media actividad han sido los siguientes:

- Vertido en fosas marinas
- Enterramiento en minas abandonadas
- Enterramiento superficial
- Enterramiento superficial con barreras de ingeniería
- Enterramiento subterráneo en nuevas instalaciones

#### **Vertido en fosas marinas**

La evacuación en el océano de residuos radiactivos acondicionados se desarrolló inicialmente por parte de los estados Unidos en el Océano Pacífico en 1946 y posteriormente en el Atlántico occidental desde 1951 hasta 1970. Paralelamente El Reino Unido, Bélgica, Holanda y Suiza utilizaron esta práctica en el Atlántico Nordeste vertiendo al mismo cerca de 100.000 bidones.

En 1972 se estableció el "Convenio sobre la prevención de la contaminación del mar por vertidos de desechos y otros materiales" al que se han adherido más de 50 países, entre los que figura España desde 1974. En este congreso celebrado en Londres se fijaron las normas para impedir la contaminación del mar por prácticas de inmersión de cualquier tipo de residuos. España desde su adhesión al Convenio de Londres se ha mostrado no partidaria del vertido de residuos radiactivos en el mar.

#### **Enterramiento en minas abandonadas**

Mediante este sistema se aprovechan explotaciones mineras abandonadas para almacenar en las galerías construidas durante la explotación de la mina los residuos radiactivos de baja y media actividad.

Concretamente, en Alemania, se han almacenado este tipo de residuos desde 1967 hasta 1978 en una antigua mina de sal, la mina Asse de 750 metros de profundidad situada en un domo salino que ha permanecido estable desde hace 100 millones de años.

Posteriormente en este mismo país entró en funcionamiento un almacenamiento situado en la mina Konrad en la que se prevé una capacidad de almacenamiento de 500.000 m<sup>3</sup>.

En España los primeros residuos radiactivos de media y baja actividad procedentes de actividades distintas a la energía nucleoelectrónica fueron almacenados por la Junta de Energía Nuclear desde el año 1961 en una antigua explotación minera, la mina Beta. Esta mina dejó de ser utilizada y más tarde cuando ya el centro de El Cabril era operado por ENRESA estos residuos se trasladaron a un

## LOS RESIDUOS RADIATIVOS. EXPERIENCIAS

Uno de los principales problemas que se derivan del uso de la energía nuclear es el que se plantea con la gestión de los residuos nucleares. En el texto de esta monografía se analizan los diferentes sistemas que se han empleado o se ha planteado usar para la elimina-

ción de estos residuos. En las tablas que siguen se muestran, de forma sinóptica, los sistemas existentes en la actualidad en los países que tienen una mayor experiencia..

### Estado de la gestión de los residuos radioactivos de baja y media actividad en distintos países

País	Instalación	Estado	Cantidad almacenada o prevista (m <sup>3</sup> )	Tipo
USA	Beatty	Operación (1962)	2.700	Enterramiento superficial
	Richland	Operación (1965)	19.000	Enterramiento superficial
	Barnwell	Operación (1971)	30.000	Enterramiento superficial
	Maxey Flats	Cerrada (1962)	-	Enterramiento superficial
	West Valley	Cerrada (1962)	-	Enterramiento superficial
	Sheffield	Cerrada (1962)	-	Enterramiento superficial
Francia	La Manche	Operación (1969)	475.000	Ent. superfic. con barreras artificiales
	Aube	Operación (1991)	1.000.000	Ent. superfic. con barreras artificiales
Alemania	Konrad	Operación (1992)	500.000	Ent. subterráneo en mina antigua
Reino Unido	Drigg	Operación (1971)	450.000	Enterramiento superficial
Suecia	SFR	Operación (1988)	500.000	Enterramiento subterráneo artificial

Fuente: ENRESA 1998

### Almacenamientos temporales de combustible gastado en distintos países

País	Instalación	Estado	Cantidad almacenada o prevista (Tm U)	Tipo
USA	Morris	Operación (1984)	750	Piscina AFR
	Surry	Operación (1986)	800	Contenedores metálicos AR
	Robinson	Operación (1986)	Inicial 10	Módulos hormigón AR
Alemania	Gorleben	Operación	1.500	Contenedores metálicos AFR
	Ahaus	En construcción	1.500	Contenedores metálicos AFR
Reino Unido	Wilfa	Operación (1979)	700	Cámara AR
Suecia	CLAB	Operación (1985)	3.000	Piscina AFR
Finlandia	TVO-KPA	Operación (1987)	1.200	Piscina AR

Fuente: ENRESA 1998

En el caso de España, las necesidades de tratamiento previstas, se resumen en el cuadro adjunto, con dos hipótesis diferentes: operación

de centrales nucleares durante 30 años (vida inicialmente prevista) o 40 años, si se prorroga su actividad.

### Cantidades totales estimadas de residuos radioactivos a gestionar en España

Residuos de baja y media actividad	Hipótesis de 30 años (m <sup>3</sup> )	Hipótesis de 40 años (m <sup>3</sup> )
Fabricación de elementos combustibles	1.400	1.800
Operación de centrales nucleares	43.100	53.800
Reproceso combustible gastado Vandellós	13.000	3.000
Instalaciones almacenamiento combustible gastado	400	500
Actividades investigación y aplicación radioisótopos (1)	6.400	7.000
Desmantelamiento instalaciones centrales nucleares	137.000	137.000
Desmantelamiento otras instalaciones (2)	400	500
<b>Total residuos baja y media actividad</b>	<b>191.700</b>	<b>203.600</b>
<b>Residuos de alta actividad</b>		
Combustible gastado LWR	8.850	11.700
Vitrificados Vandellós I	170	170
<b>Total residuos alta actividad</b>	<b>9.020</b>	<b>11.870</b>

(1) CIEMAT, pequeños productores y residuos diversos.

(2) Planta de encapsulado y fabricación de elementos combustibles

Fuente: ENRESA 1998

La situación actual de los residuos de baja y media actividad y combustible gastado en España se sintetiza en la tabla adjunta.

Instalación		RBMA acondicionados		Combustible gastado		
		M <sup>3</sup>	Grado de ocupación	Combustible gastado	Grado de ocupación (%)	Fecha saturación prevista (1)
Centrales nucleares	José Cabrera	1.865	64	55	43	
	Sta. M <sup>a</sup> de Garoña	1.221	79	229	58	
	Almaraz I	1.957	36	318	62	2020
	Almaraz II			314	41	2022
	Ascó I	1.002	52	297	51	2013
	Ascó II			258	44	2016
	Cofrentes	2.148	49	364	50	2014
	Vandellós II	162	6	210	32	2021
	Trillo	348	15	204	69	2003
<b>Juzbado (ENUSA)</b>		453	61			
<b>Cabril</b>		16.279	28			
<b>Total</b>		25.435		2.249		

RBMA: Residuos de baja y media actividad

(1): No aparecen fechas para las centrales de José Cabrera y Santa María de Garoña, puesto que sus piscinas no se saturarán durante la vida útil supuesta para las mismas.

Fuente ENRESA. Datos a 31-12-1998

almacenamiento temporal de módulos en superficie, que fue asimismo construido por la Junta de Energía Nuclear en los años ochenta.

### Enterramiento superficial

Este modelo de almacenamiento, se utilizó principalmente en los Estados Unidos a partir de los años 50 y consiste en la realización de simples zanjas donde se almacenan sin prácticamente protección alguna los contenedores o bidones con los residuos.

Este sistema ha sido muy cuestionado, incluso en los EE.UU., pero hay que tener en cuenta que la gran extensión territorial y grandes zonas semidesérticas existentes en el país permiten almacenar los residuos con menos cuidados que en otros países más pequeños y con zonas menos adecuadas.

### Enterramiento superficial con barreras de ingeniería

Es la solución más aceptada y generalizada para el almacenamiento definitivo de los residuos radiactivos de baja y media actividad, siendo Francia el país pionero en la adopción de esta solución. El conocido centro de La Manche en Normandía entró en operación en 1969 estando ya clausurado. En la actualidad opera en Francia una nueva instalación que está situada en la localidad de Aube y que tiene una capacidad aproximada de un millón de metros cúbicos.

Este tipo de almacenamiento terrestre superficial con barreras de ingeniería implica la realización de tres acciones en serie que separan los residuos radiactivos de la biosfera.

- El bidón de confinamiento.
- Las barreras u obras de ingeniería.
- El propio terreno que retarda la migración de los radionucleidos.

En la vida de una instalación de este tipo existen tres fases:

- Fase de explotación en la cual los residuos son almacenados.
- Fase de vigilancia que dura mientras los residuos presenten riesgo radiológico.
- Fase de banalización en la que el emplazamiento se emplea sin restricciones.

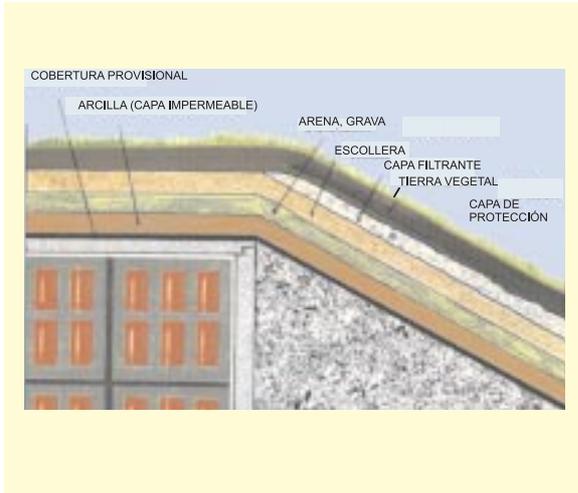
Durante las fases de explotación y vigilancia, el objetivo del emplazamiento es que en situación normal el impacto radiológico sea prácticamente nulo. Con tal fin se construyen unas barreras de ingeniería que pueden garantizar la contención del residuo durante más de 300 años. El fin primordial de las barreras de ingeniería es impedir que el agua, superficial o subterránea, entre en contacto con los bidones.

En el caso de una situación accidental, en la que haya degradación de las barreras durante la fase de explotación y vigilancia, las instalaciones deben estar construidas de forma que se produzca un impacto radiológico inferior al fondo radiactivo natural y por supuesto inferior a los límites de dosis impuestos por los reglamentos para situación normal.

Asimismo durante la fase de banalización, el objetivo es que el impacto radiológico al individuo más expuesto sea inferior al fondo natural, sea cual sea el uso del terreno.

Este sistema de almacenamiento para residuos radiactivos de baja y media actividad es el que ha sido adoptado por España y a tal fin se construyó el nuevo centro de almacenamiento de El Cabril que está hoy día en operación y a pleno rendimiento.

Esquema del modelo de recubrimiento de los residuos de baja y media actividad en El Cabril



### Enterramiento subterráneo en nuevas instalaciones

El almacenamiento en minas abandonadas es sustituido en algunos países como Suiza o Suecia por excavaciones artificiales especialmente construidas para este fin. Suecia dispone desde 1988 de una instalación de almacenamiento definitivo para residuos de baja y media actividad en cavernas rocosas excavadas bajo el nivel del mar Báltico.

En el caso de Suiza aún no se ha construido ninguna instalación, pero su diseño será similar al sueco aunque evidentemente no estará situado bajo el mar.

### Clausura de instalaciones nucleares y radiactivas

Se entiende por *cierre* de una instalación nuclear o radiactiva su parada definitiva al finalizar su vida útil ya sea por motivos técnicos o económicos.

Se entiende por *clausura* el conjunto de actividades desarrolladas al final de la vida operativa de una instalación nuclear o radiactiva para dejar el emplazamiento en un estado seguro para las personas y sin riesgo de daño para el medio ambiente.

Estas actividades incluyen las operaciones necesarias de descontaminación, desmantelamiento y manipulación del material radiactivo, incluyendo medidas para evitar riesgos a los trabajadores, la población en general y el medio ambiente.

Las instalaciones susceptibles de ser clausuradas pertenecen en su mayoría al ciclo nuclear, desde la extracción del mineral de uranio hasta la producción de energía eléctrica en las centrales nucleares.

Las principales instalaciones a dismantelar serían las siguientes:

- Minas de uranio
- Fábricas de concentrados de uranio
- Fábricas de combustible
- Centrales nucleares

En este aspecto, en España, ya se han producido algunas acciones de clausura como la de la antigua Fábrica de Uranio de Andújar (FUA), alguna mina de uranio abandonada y, sobre todo, el desmantelamiento de la Central Nuclear de Vandellós I, que está en sus primeras fases. Como actividad a largo plazo se prevé el desmantelamiento del resto de las centrales nucleares, conforme vayan cumpliendo su vida operativa.

### Consideraciones finales

No existe una única solución para la gestión de los residuos radiactivos. Las soluciones de almacenamiento de los citados residuos deben ser diversas y cada país deberá adoptar una solución acorde con sus propias características demográficas, geológicas, tecnológicas, políticas, etc. cumpliendo en todo caso con las seguridades necesarias para que su gestión no suponga un riesgo inaceptable para el hombre y el medio ambiente actual y futuro.

La solución técnica para el almacenamiento definitivo de los residuos radiactivos de baja y media actividad está resuelta a nivel industrial y existen ya varias instalaciones funcionando en todo el mundo.

Para los residuos de alta actividad aún no existe ninguna instalación para almacenamiento de los residuos radiactivos generados en usos civiles de la energía nuclear aunque el estudio de soluciones está siendo objeto de intensas investigaciones en todos los países desarrollados.

Como en el caso de los residuos de baja actividad, la solución no será única y lo más probable es que cada país se adapte a sus características y a la forma de sus residuos.

La solución del almacenamiento temporal parece una buena opción debido a que permitirá almacenar los residuos de forma controlada durante decenas de años lo que dará un margen suficiente para estudiar las tecnologías disponibles e incluso desarrollar otras nuevas que permitan en el futuro determinar cual será el sistema mejor para la eliminación o almacenamiento de los residuos radiactivos de alta actividad.