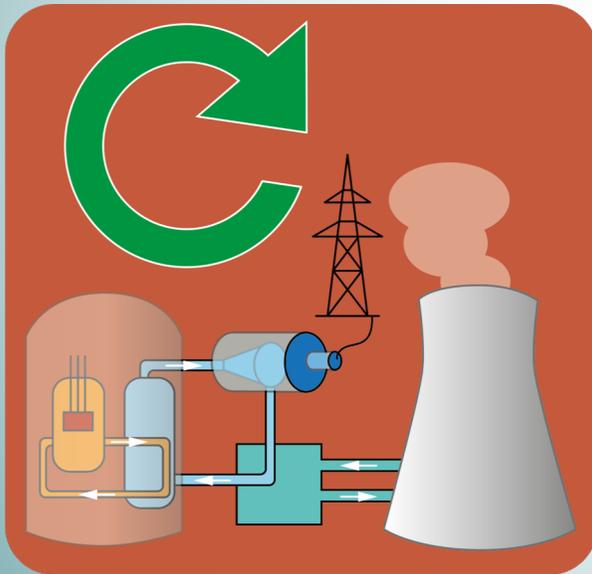


Ampliación de Ingeniería Nuclear y Ciclo de Combustible

Bloque II. El Combustible Nuclear



Fernando Delgado San Román

Cristina Fernández Diego

Manuel José Ibarra Arenado

DPTO. DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



1. El ciclo del combustible

-
- El uranio como fuente de energía
 - ¿Qué es el uranio?
 - Uso del uranio en reactores nucleares
 - ¿Cuánto uranio queda?
 - Importación de uranio en España

 - Ciclo del combustible nuclear
 - Primera parte
 - Segunda parte

El Uranio como fuente de energía



¿Qué es el Uranio?

- ❑ El **Uranio** es un **elemento químico metálico** de color gris de la serie de los actínidos.
- ❑ Su **nivel de actividad radiactiva es bajo**, muy inferior al de otros elementos, lo que **facilita su minería, transformación y fabricación como combustible nuclear**.
- ❑ Está compuesto por **tres isótopos: U238, U235 y el U234**.

Isótopos del Uranio	Símbolo químico	Z = número protones	Número electrones	Número neutrones	A = protones + neutrones	Abundancia
U-234	${}_{92}^{234}\text{U}$	92	92	142	234	0.0054%
U-235	${}_{92}^{235}\text{U}$	92	92	143	235	0.7204%
U-238	${}_{92}^{238}\text{U}$	92	92	146	238	99.2742%

- ❑ Para su **empleo en los reactores nucleares convencionales** actuales necesita ser **enriquecido en el isótopo U235**, que es el que se fisiona y, a través del proceso de fisión, genera la energía que se extrae del reactor.

Uso del uranio en reactores nucleares

- ❑ **Como uranio enriquecido:** la **mayoría de los reactores nucleares convencionales actuales** son **reactores de agua ligera** (PWR y BWR) que utilizan un **uranio enriquecido en el isótopo U235**.
- ❑ **Como combustible nuclear reelaborado:** del combustible nuclear gastado **se extrae los isótopos de Pu -principalmente, Pu239-** generados durante la operación convencional del reactor **a partir del U238**.
 - Este Pu se utiliza para la fabricación de combustible junto con combustible convencional de Uranio, obteniéndose los denominados **Óxidos Mixtos (MOX)**.
 - **Reactores Rápidos Reproductores:** reactores que **producen elevadas cantidades de Plutonio** durante su funcionamiento.

-
- ❑ **Mediante el Ciclo del Torio:** Mediante la **captura de neutrones por parte del isótopo del torio (Th232)**, se obtiene **U233**. Este último isótopo, que no existe de forma natural, **tiene una alta sección eficaz de fisión** y que, por lo tanto, **es útil como combustible nuclear**.
 - ❑ **Medidas alternativas para la optimización del uso del uranio:**
 - **Aumento de quemado del combustible.**
 - **Incremento de la potencia de las plantas nucleares.**
 - **Mejora de la estrategia a aplicar sobre la frecuencia de paradas para recarga.**

¿Cuánto uranio queda?

- ❑ Las **estimaciones de todas las reservas esperadas**, incluyendo aquellas no suficientemente cuantificadas o no económicas en este momento, suman del orden de 10 millones de toneladas, lo que representarían unos **200 años más de suministro al ritmo actual de consumo** (~ 67000 tU/año). **Como combustible nuclear reelaborado**: del combustible nuclear gastado **se extrae los isótopos de Pu - principalmente, Pu239-** generados durante la operación convencional del reactor **a partir del U238**.
- ❑ Por otro lado, la tecnología nuclear futura permitirá un mayor aprovechamiento de las reservas de uranio, ya que **los nuevos reactores** serán capaces de conseguir del combustible nuclear más de **50 veces la energía que aprovechan los actuales**.

Importación de uranio en España

- ❑ El **concentrado de mineral uranio** importado en España **procede de diversos países**.
- ❑ El **abastecimiento de combustible nuclear** en España **se considera de carácter nacional**.
- ❑ **Seguridad de suministro garantizada por:**
 - **Diversificación de suministradores** y **precio del uranio estable** en los mercados internacionales.
 - Los **contratos de suministro** se realizan **por cinco años**.
 - Por ley, el **combustible nuclear debe estar acopiado** en la central, al menos, **dos meses antes del inicio de la parada de recarga**.
 - Junto al stock regulado anterior, se dispone de un **stock estratégico** que posibilita el **funcionamiento durante un año de todo el parque nuclear español**.
 - El combustible nuclear tiene una **gran capacidad energética por unidad de masa**.

Ciclo del combustible nuclear



Introducción

- ❑ La generación eléctrica eficiente utilizando el uranio como combustible conlleva su procesado en un **ciclo cerrado o abierto**.
- ❑ Este ciclo se puede dividir en **dos partes**:
 - **Primera parte** (front-end, en inglés): comprende la preparación del combustible nuclear y el “periodo de servicio”, en el cual el combustible es utilizado en el reactor para generar electricidad.
 - **Segunda parte** (back-end, en inglés): comprende todas las fases posteriores a la utilización del combustible en un reactor, es decir las relativas a la gestión del combustible gastado.

Primera parte

Minería y producción de concentrados de Uranio (U_3O_8)

- ❑ Procedencia del **mineral de uranio**: **directamente de una mina de uranio**, o como un **subproducto de minas** donde se explotan otros productos, como el cobre, fosfato u oro.
- ❑ La **minería convencional** puede ser a **cielo abierto** o **subterránea**.
 - El mineral de uranio extraído **se tritura y se trata químicamente para separar el uranio**, por lo general mediante la adición de un ácido o álcali.
- ❑ En la **minería por lixiviación in situ**, una solución ácida o alcalina se hace discurrir directamente a través del mineral subterráneo a través de una serie de perforaciones o pozos y el uranio así extraído es llevado a la superficie en una **disolución que ha de ser purificada**.
- ❑ El **resultado final** es una "**torta amarilla**", una forma de **polvo de óxido de uranio (U_3O_8)** o compuestos similares.
- ❑ Tras su procesado, la **torta amarilla** concentrada **se envasa adecuadamente (barriles de acero especial)** para ser enviada a una instalación de conversión.

Ciclo del combustible nuclear



1ª conversión – de la torta amarilla (U_3O_8) a gas (UF_6)

- ❑ En general, la **conversión** es un proceso en el cual **el uranio se convierte a un forma adecuada ya sea para la fabricación de combustible o para su enriquecimiento**.
- ❑ Unas pocas centrales nucleares no requieren de uranio enriquecido.
 - Para este tipo de centrales la torta amarilla (U_3O_8) se convierte en dióxido de uranio (UO_2).
- ❑ La mayoría de las plantas de energía requieren **uranio enriquecido**.
 - Como el enriquecimiento -el siguiente paso del ciclo de combustible nuclear- requiere de que el material sea en forma gaseosa, **la torta amarilla se convierte en hexafluoruro de uranio (UF_6)**.
 - **El gas se inyecta en grandes cilindros donde solidifica**. Los cilindros se cargan en contenedores de metal resistentes que se envían a la planta de enriquecimiento.

Ciclo del combustible nuclear



Enriquecimiento

- ❑ El enriquecimiento **incrementa la proporción de isótopos fisibles -U235- en el combustible nuclear.**
 - La proporción del U235 pasa de 0,7% a 3-5%.
- ❑ El uranio es enriquecido en U235 mediante la **introducción del gas (UF_6) en cilindros rotativos rápidos (centrifugadoras)**, donde los isótopos más pesados (U238) son empujados hacia las paredes del cilindro.
 - Se obtiene así un **producto con mayor concentración en U235** de la que existe en la naturaleza y otro producto que, lógicamente, está empobrecido en U235 y que se denomina, consecuentemente, **uranio empobrecido**.

Ciclo del combustible nuclear



2ª conversión – del gas (UF_6) al polvo amarillo (UO_2)

- ❑ Después del enriquecimiento, **el UF_6 se convierte de nuevo en dióxido de uranio (UO_2) en forma de polvo**, apto para la fabricación de combustible.

Fabricación de elementos combustibles

- 1. Fabricación de pastillas*
- 2. Fabricación de barras*
- 3. Elemento combustible*

Ciclo del combustible nuclear



Generación eléctrica

- ❑ El combustible nuclear se **quema** habitualmente durante **un periodo de entre 3 a 6 años**.
- ❑ Aproximadamente **una vez al año, parte del combustible (entre el 25 y el 30%) se sustituye por combustible nuevo**. A esta operación se le denomina **recarga**.
 - **El combustible, a medida que se va fisionando, va perdiendo efectividad** a causa de la reducción del material fisionable y de la acumulación de productos de fisión.
 - En los **reactores nucleares españoles** se realizan paradas de recarga **cada 12, 18 o 24 meses**, periodo aprovechado para realizar otros trabajos (mantenimiento, mejoras...).

Segunda parte

Almacenamiento del combustible gastado

- ❑ Después de finalizar su vida útil (3-6 años), los elementos combustibles son extraídos del reactor y **almacenados bajo el agua** lo cual suministra refrigeración y protección contra la radiación.
 - Tanto **el calor como la radiactividad disminuyen con el tiempo**: después de 40 años almacenados, la radiactividad del combustible gastado será miles de veces menor que cuando éste fue extraído del reactor.
- ❑ Mas tarde, cuando se desea un **almacenamiento permanente**, el combustible gastado se puede transportar a otra piscina con agua (almacenamiento húmedo) o refrigerada por aire (almacenamiento seco), o en edificios protegidos, o en barriles para almacenamiento en seco.

Ciclo del combustible nuclear



Reprocesado del combustible gastado

- ❑ El combustible gastado contiene un **96% de uranio**, un **1% de plutonio** y un **3% de residuos de alta reactividad**. Además, conserva el **95% de su capacidad energética inicial**.
- ❑ En las actuales plantas de reprocesado **el combustible gastado se disuelve y se separa** químicamente en los tres componentes citados.
 - El uranio, con menos de un 1% de U235, y el plutonio pueden ser reutilizado.
- ❑ Al igual que el uranio recién extraído, el **uranio recuperado por reprocesamiento** se puede **convertir en UF₆ y reenriquecido**, volviendo al ciclo del combustible como **“Uranio recuperado”**.
- ❑ El **plutonio puede ser mezclado con el uranio** para fabricar un combustible reelaborado denominado **MOX (Mezcla de OXidos)**.

□ Libros y monografías:

- *El uranio como fuente de energía*. Foro Nuclear. Julio 2008
- *El uranio. Reservas y suministro a las centrales nucleares*. Foro Nuclear.
- *Getting to the Core of the Nuclear Fuel Cycle*. IAEA,

2. Tratamiento de los Residuos Radiactivos

-
- Residuos Radiactivos
 - Definición
 - Origen
 - Clasificación
 - Clasificación del residuo propuesta por la OIEA
 - Clasificación española del residuo desde el punto de vista de su gestión
 - Instalaciones generadoras de residuos nucleares en España
 - Previsión de Residuos Radiactivos generados

 - Gestión de los residuos

 - Gestión de RBMA en España
 - Producción de RBMA
 - Aspectos básicos de la gestión en ENRESA
 - Almacenamiento
 - Vigilancia
 - Tecnologías operantes en el mundo

 - Gestión del CG/RAA
 - Soluciones
 - Cantidades totales de CG/RAA a gestionar en España
 - Situación actual de este tipo de residuos
 - Tecnologías disponibles

Definición

Cualquier material o producto de desecho, para el cual no esta previsto ningún uso, que contiene o está contaminado con radionucleidos en concentraciones o niveles de actividad superiores a los establecidos por las autoridades competentes (MlyE y CSN).

Origen

- ✓ **Producción de energía eléctrica** de origen nuclear y etapas necesarias (Ciclo del Combustible Nuclear).
- ✓ **Aplicación de isótopos radiactivos** en múltiples actividades (medicina, industria, investigación, agricultura, etc)
- ✓ **Desmantelamiento de instalaciones nucleares y radiactivas.**

Clasificación

- ✓ **Estado físico** (gaseoso, líquido o sólido; que a su vez podrían clasificarse en compactables, incinerables, metálicos, etc)
- ✓ **Tipo de radiación emitida** (α, β, γ)
- ✓ **Periodo de semidesintegración** (vida larga, vida corta).
- ✓ **Actividad específica** (Actividad alta, media o baja).
- ✓ **Radiotoxicidad** (toxicidad alta, media-alta, media-baja, baja)
- ✓ En general por alguna **propiedad inherente** (e.g. periodo de semidesintegración) al producto o proceso.

La propuesta mas aceptada es la **del Organismo Internacional de la Energía Atómica (OIEA)**, que desde el punto de vista de la gestión, atiende a criterios de **actividad específica y periodo de semidesintegración**, ya que son los dos factores que mas condicionan el tipo de almacenamiento que debe acondicionarse para su aislamiento y control.

Clasificación del residuo propuesta por la OIEA

CATEGORÍA DEL RESIDUO	CARACTERÍSTICAS TÍPICAS	SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO
1. RESIDUOS EXENTOS O DESCLASIFICADOS (RE)	Niveles de actividad cuya liberación no implique una dosis anual a los miembros del público superior a $10 \mu\text{Sv}$	Sin restricciones radiológicas
2. RESIDUOS DE BAJA O MEDIA ACTIVIDAD (RBMA)	Niveles de actividad cuya liberación pueda implicar una dosis anual a los miembros del público superior a $10 \mu\text{Sv}$ y que tengan una potencia térmica inferior a 2 kW/m^3	
2.1 RESIDUOS DE BAJA O MEDIA ACTIVIDAD Y VIDA CORTA (RBMA-VC)	Concentración limitada de radionucleidos de vida larga (4000 Bq/g de emisores alfa de vida larga como máximo en lotes individuales, con un valor medio de 400 Bq/g en el conjunto)	Sistemas de almacenamiento en superficie o sistemas geológicos
2.2 RESIDUOS DE BAJA O MEDIA ACTIVIDAD Y VIDA LARGA (RBMA-VL)	Concentraciones de radionucleidos de vida larga superiores a las de los residuos de vida corta	Sistemas geológicos de almacenamiento
3. RESIDUOS DE ALTA ACTIVIDAD (RAA)	Potencia térmica superior a 2 kW/m^3 y concentraciones de radionucleidos de vida larga superiores a las de los residuos de vida corta	Sistemas geológicos de almacenamiento

<https://docplayer.es/19088521-Gestion-de-residuos-radiactivos.html>

Clasificación española del residuo desde el punto de vista de su gestión

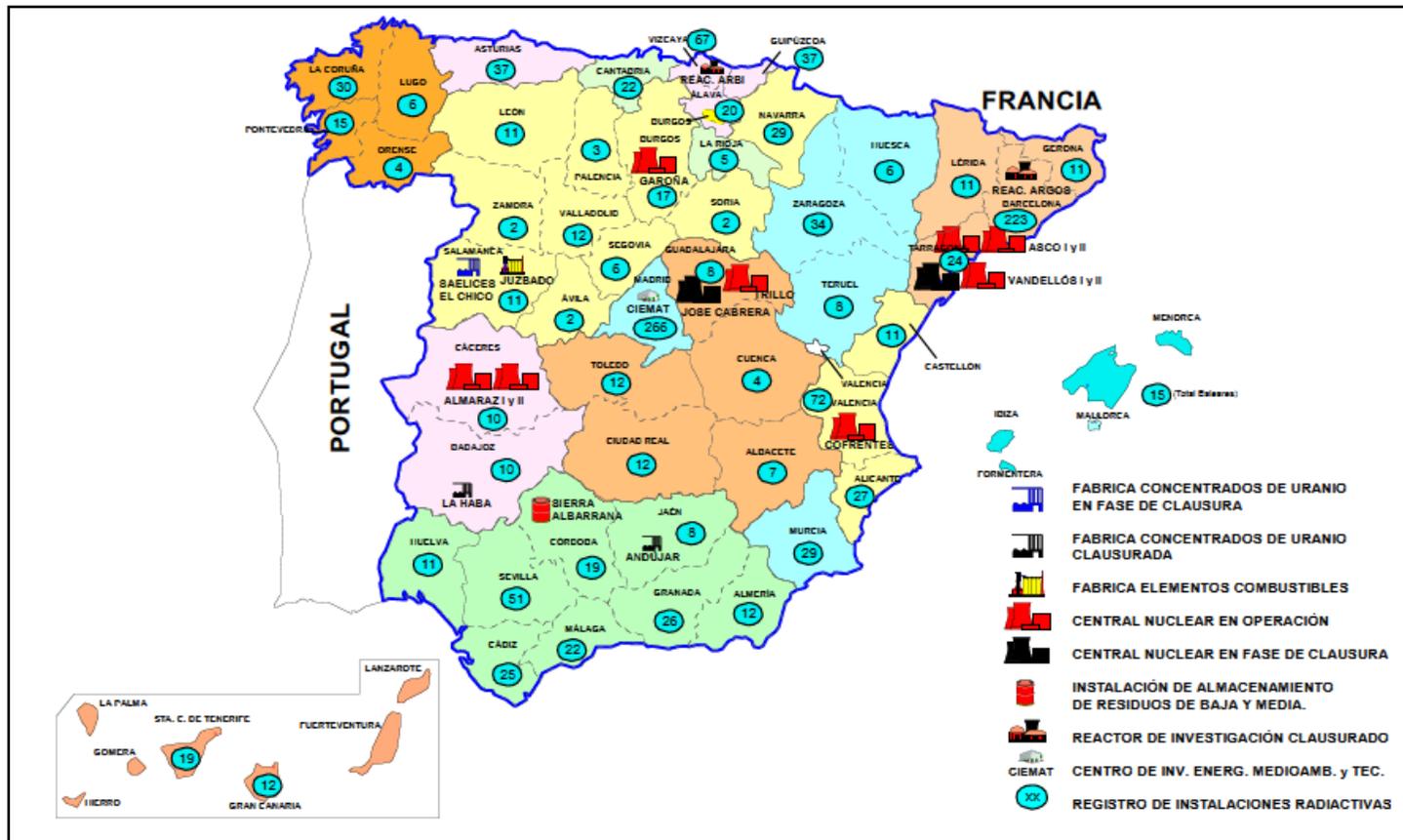
- ❑ **Residuos de Baja y Media Actividad (RBMA)**, cuyas **características principales** son:
 - ✓ **Actividad específica baja** por elemento radiactivo.
 - ✓ **No generan calor.**
 - ✓ **Contienen radionucleidos emisores β - γ con periodos de semidesintegración inferior a 30 años.**
 - ✓ **Su contenido en emisores α debe ser inferior a 0,37 Gbq/ton (0,01 Curios/t en promedio).**
- ❑ Pueden ser **herramientas, ropa de trabajo, instrumental médico y otros materiales** utilizados en algunas industrias, hospitales, laboratorios de investigación y centrales nucleares.

Clasificación española del residuo desde el punto de vista de su gestión

- ❑ **Residuos de Alta Actividad (RAA)**, cuyas **características principales** son:
 - ✓ **Contienen radio-nucleidos emisores β - γ con periodos de semidesintegración superior a 30 años.**
 - ✓ **Contienen radio-nucleidos emisores α de vida larga en concentraciones apreciables, por encima de 0,37 Gbq/ton (0,01 Ci/t).**
 - ✓ **Pueden desprender calor.**

- ❑ **Están constituidos básicamente por el combustible gastado en los reactores nucleares y por otros materiales con niveles elevados de radiactividad, normalmente con un contenido apreciable de radionucleidos de vida larga.**

Instalaciones generadoras de residuos radiactivos en España



<https://www.catedraenresauco.com/productores-de-residuos-radiactivos-en-espana/>

- ❑ Las **instalaciones radiactivas** se pueden clasificar en función de su actividad:
 - ✓ **Instalaciones de uso médico.** Se caracterizan por producir cantidades apreciables de residuos de forma periódica. Son aproximadamente el **30 % de las II.RR. del país** y generan cerca de un **80 % de los residuos que gestiona ENRESA.**
 - ✓ **Instalaciones de uso industrial.** Se caracterizan por producir cantidades reducidas de residuos de forma no periódica. Son aproximadamente el **60 % de las II.RR. del país.**
 - ✓ **Instalaciones de investigación y docencia.** Se caracterizan por producir cantidades reducidas de residuos de forma periódica. Representan aproximadamente el **10 % de las II.RR. del país.**
- ❑ La **inmensa mayoría de los residuos** procedentes de las II.RR. se pueden englobar dentro de los **RBMA.**

Previsión de RR generados

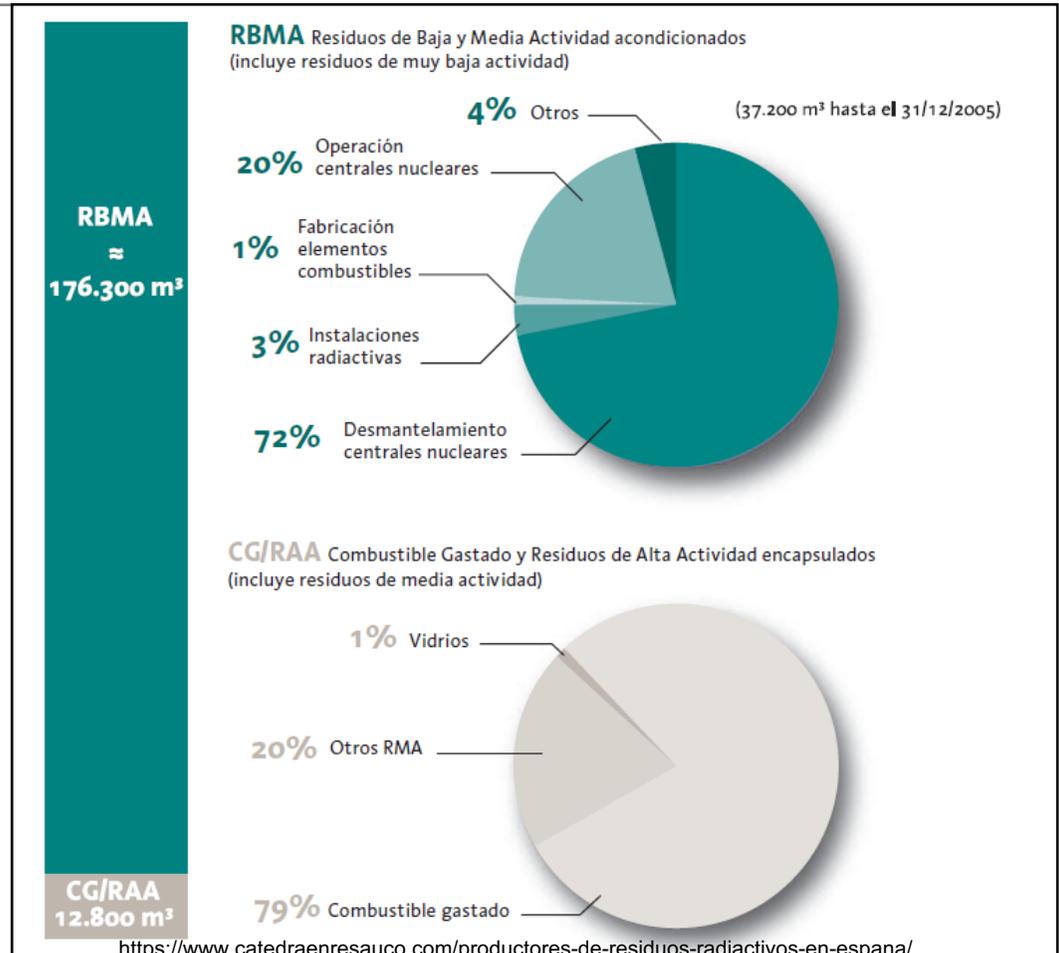
❑ Volumen total de RR

- ✓ 176.300 m³ de RBMA
- ✓ 12.800 m³ de CG/RAA

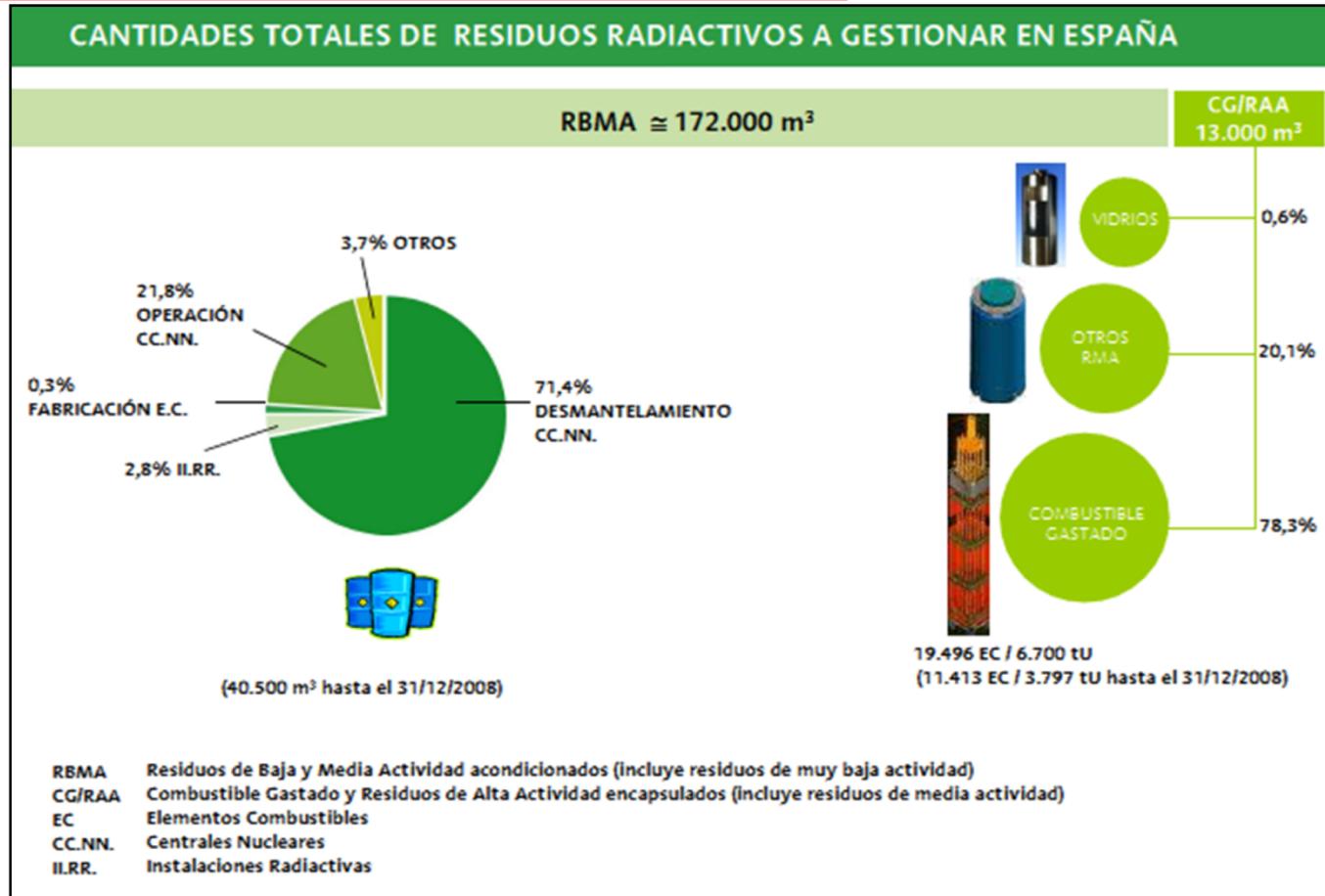
- ❑ **A finales de 2005** ya habían sido generados **una cuarta parte de los RBMA**, la mayoría ya almacenados de forma definitiva en El Cabril, y **la mitad del combustible gastado**, almacenado temporalmente en las piscinas de las propias CC.NN.



- ❑ **Necesidades de disponer de un almacenamiento de RAA.**



Sexto Plan General de Residuos Radiactivos (2010)



<https://docplayer.es/19088521-Gestion-de-residuos-radiactivos.html>

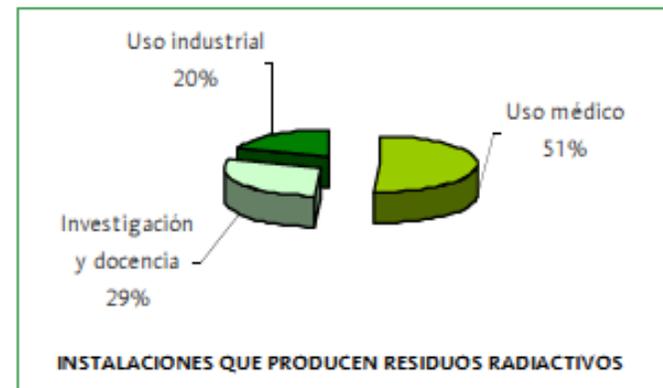
- ❑ La **gestión de RR** consiste en los **procesos y mecanismos a aplicar para evitar los daños que producen sus emisiones** en las personas y el medio ambiente.
 - **Estos procesos y mecanismos dependen del tipo de residuo** que se trate, según su clasificación.
- ❑ La **gestión de RR** se lleva a cabo de **dos maneras diferentes**:
 - **Tratamiento de los residuos**. Consiste en acondicionar los residuos para su posterior liberación o almacenamiento.
 1. Clasificación o segregación de los residuos.
 2. Reducción en volumen por compactación o incineración.
 3. Inmovilización de gases y líquidos para su posterior aislamiento.
 - **Aislamiento**: consiste en evitar que los radionucleidos lleguen al medioambiente hasta que su actividad haya decaído a niveles inocuos.
 - ✓ **Barrera físico-química**: Inmovilización del residuo y confinamiento en **contenedores** para evitar la dispersión.
 - ✓ **Barrera de ingeniería**: **instalación donde se colocan los residuos**. Blinda los residuos y limita el acceso de agua.
 - ✓ **Barrera geológica**: **el medio de la corteza terrestre en el que sitúan los residuos**.

-
- ❑ Los **RBMA**, después de ser inmovilizados, **se almacenan definitivamente en una barrera de ingeniería construida en el interior o sobre una formación geológica estable** que, a su vez, actuará como barrera en caso de fallar la artificial.
 - Este tipo de residuos es necesario confinarlos entre 250-300 años, aunque, según ENRESA, el 70% de los RBA alcanza la inocuidad en unos decenios.
 - ❑ Los **RAA** suelen tener un **emplazamiento temporal** para que decaiga su actividad y se enfríen: **piscinas de las propias centrales nucleares**. Deben terminar en **almacenamientos definitivos geológicamente estables**.
 - Tras el almacenamiento temporal se disponen en **contenedores especiales** y se llevan a su almacenamiento final.
 - Son los más difíciles de tratar y almacenar, ya que se mantienen activos durante miles de años.
 - ❑ El **CG** tiene **dos posibles destinos**:
 - **Almacenamiento como residuo.**
 - **Reprocesado.**

- ❑ **Reprocesado:** en las plantas de reciclado, el combustible se disuelve en ácido nítrico (HNO_3) y mediante procesos químicos **se separa el material fisionable y fértil (U y Pu), quedando productos de fisión y actínidos recuperados.**
 - El U, en forma de óxido, se convierte en UF_6 , y se lleva a la **fase de enriquecimiento**. En esta fase se vuelve a enriquecer el U para fabricar combustible, cerrando el ciclo nuclear.
 - El Pu se lleva directamente a la **fase de elaboración de combustible MOX**.
 - Los **desechos generados** (un 3% del combustible gastado) son **solidificados por vitrificación** (masa vítrea de borosilicato) para evitar su filtración y **encapsulados en cilindros de acero inoxidable**. Estos residuos, altamente radiactivos, son almacenados temporalmente en las plantas radioquímicas de reprocesamiento para **posteriormente depositarlos definitivamente en depósitos geológicamente estables**.
- ❑ **Países que llevan a cabo el reprocesado total o parcial del CG**, bien en sus propias instalaciones o contratando servicios externos: **Francia, Reino Unido, Japón, Rusia, Alemania, Bélgica, Holanda, China, India y Suiza.**
 - **Solamente Francia y Reino Unido ofrecen servicios de reproceso.**

Producción de RBMA

- ❑ En la actualidad, **7 reactores nucleares en operación**.
 - **Producción media anual de una central tipo** (1.000MW): **entre 50 m³ y 130 m³** de residuos acondicionados, según se trate de PWR o BWR.
 - **La mayor parte** de los residuos generados **son RBMA**.
- ❑ **Unas 1.300 II.RR autorizadas**, de las que unas **750 generan residuos radiactivos**.
 - **Cantidades generadas** muy pequeñas en comparación con otros orígenes; del **orden de 40 m³/año, con tendencia decreciente**.



<https://docplayer.es/19088521-Gestion-de-residuos-radiactivos.html>

Aspectos básicos de la gestión de ENRESA

Inventario

- Elaboración y control de las instalaciones donde se almacenan residuos radiactivos por parte de ENRESA, antes de su posterior retirada.

Segregación

- Los RBMA han de ser separados en origen. Es decir, por el productor¹.

Recogida

- Firma de un contrato de retirada entre la instalación productora y ENRESA².

Transporte

- Se ha de llevar a cabo de acuerdo a reglamentación³,

Caracterización

- Determinación de la actividad.
- Comprobación del cumplimiento de los criterios de aceptación.
- Ensayos de caracterización mecánica, de capacidad de confinamiento y de durabilidad.

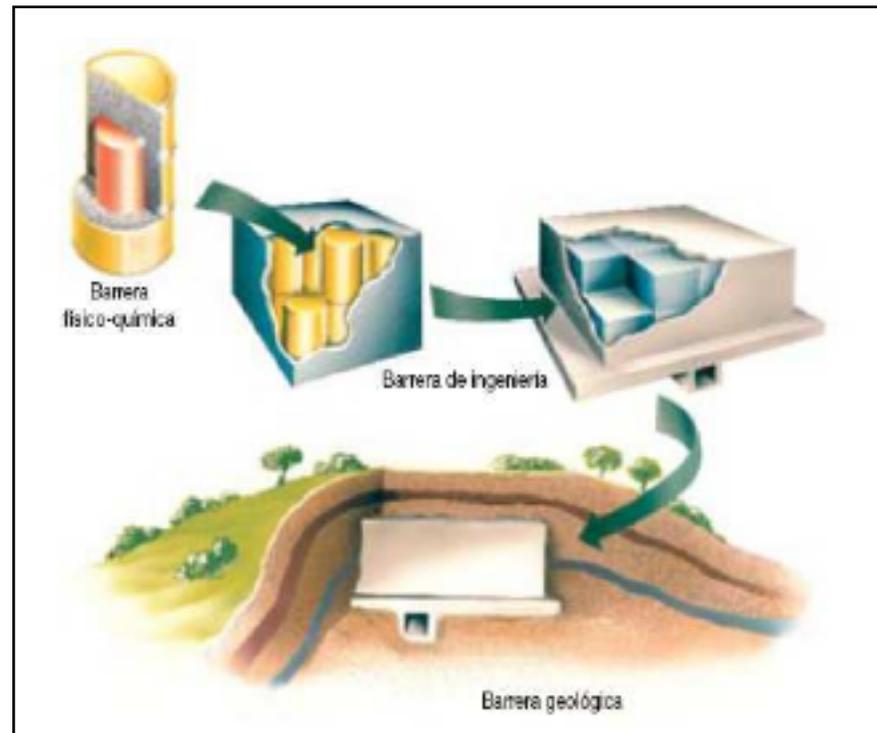
Acondicionamiento

- Los bultos solo contendrán residuos radiactivos en forma sólida, cuya estabilidad a largo plazo esté garantizada.
- Los bultos deben cumplir unos requisitos radiológicos en cuanto a isótopos contenidos y actividades máximas por bulto.
- Al final de la vida de la instalación no debe sobrepasarse un inventario de referencia en cuanto a isótopos y actividades totales almacenadas.

Almacenamiento

- ❑ **Objetivo:** Inmovilizar y aislar los residuos del medio ambiente.

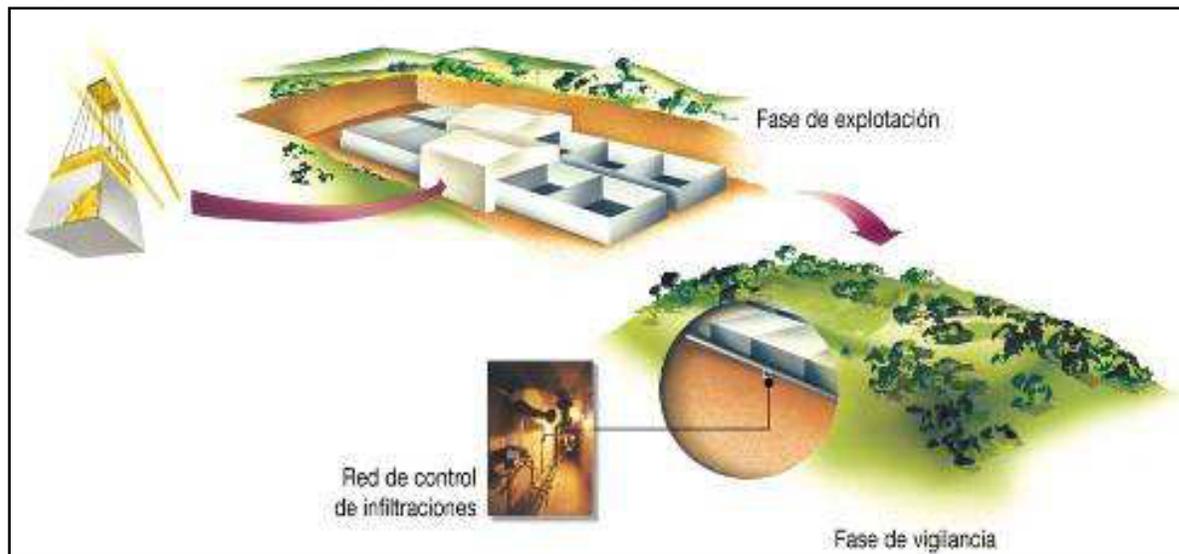
- ❑ **Barreras de confinamiento:**
 - ✓ 1º- **Barrera físico-química.**
 - ✓ 2º- **Barrera de ingeniería.**
 - ✓ 3º- **Barrera geológica.**



<https://docplayer.es/19088521-Gestion-de-residuos-radiactivos.html>

Vigilancia

- ❑ Durante 300 años, una vez cubierto el emplazamiento:
 - ✓ **Mantenimiento** necesario de la instalación.
 - ✓ **Acceso restringido**.
 - ✓ **Vigilancia** institucional.
- ❑ Tras los 300 años:
 - ✓ **Libre disposición del emplazamiento** para cualquier actividad.



<https://docplayer.es/19088521-Gestion-de-residuos-radiactivos.html>

Tecnologías operativas en el mundo

PAÍS	INSTALACIÓN	TECNOLOGÍA	AÑO INICIO OPERACIÓN	CAPACIDAD (m ³)
ALEMANIA	Morsleben	Subterráneo (sal – 500 m)	1981	54.500
	Konrad	Subterráneo (hierro – 1.000 m)		650.000
EE.UU.	Barnwell	Superficial	1971	700.000
	Richland	Superficial	1965	360.000
	Beatty	Superficial	1962	130.000
ESPAÑA	El Cabril	Superficial con barreras de ingeniería	1992	50.000
FINLANDIA	VLJ	Subterráneo (granito – 100 m)	1992	8.500
	Loviisa	Subterráneo (granito - 110 m)	1995	7.800
FRANCIA	La Manche (L'Aube)	Superficial	1969	517.425
		Superficial con barreras de ingeniería	1992	1.000.000
JAPÓN	Rokkasho-Mura	Superficial con barreras de ingeniería	1992	40.000
REINO UNIDO	Drigg	Trincheras	1959	800.000
		Superficial con barreras de ingeniería	1988	800.000
SUECIA	SFR	Subterráneo (granito – 50 m)	1988	60.000

<https://docplayer.es/19088521-Gestion-de-residuos-radiactivos.html>

Soluciones



Opción 1:

- **Considerar el combustible gastado como residuo** de Alta Actividad y proceder a su gestión como tal (Ciclo Abierto)



Opción 2:

- **Extraer el Uranio y el Plutonio remanentes** para utilizarlos en la fabricación de nuevos combustibles nucleares (Ciclo Cerrado)

Cantidades totales de CG/RAA a gestionar en España

	TIPOS	CANTIDAD	%
COMBUSTIBLE GASTADO	PWR 14x14 Westinghouse	377 elementos	79%
	PWR 17x17 Westinghouse	9.141 elementos	
	PWR 16x16 KWU	1.793 elementos	
	BWR 8x8 GE, SVEA	8.260 elementos	
	Total: 19.571 elementos (~ 6.700 tU equivalente)		
ALTA ACTIVIDAD (REPROCESO VANDELLÓS I)	Residuos vitrificados	84 cápsulas de 150 litros	1%
MEDIA ACTIVIDAD (REPROCESO VANDELLÓS I)	Residuos bituminizados	1.022 bidones de 210 litros	20%
	Residuos tecnológicos	126 contenedores de 1,2 m ³	
	Piezas de Magnesio y Grafito	1.320 bidones de 225 litros	
ACTIVIDADES DE DESMANTELAMIENTO	Diversos residuos acondicionados	1.905 m ³	

<https://docplayer.es/19088521-Gestion-de-residuos-radiactivos.html>

Situación actual de este tipo de residuos

- ✓ La **capacidad de las piscinas empieza a ser insuficiente** a partir de 2013.
- ✓ El **desmantelamiento de las centrales requiere de la retirada del CG** de sus piscinas.
- ✓ Los **residuos del reproceso de la central nuclear de Vandellós I** han comenzado a regresar desde el año 2011.



Necesidad de un almacenamiento temporal para el CG/RAA



SOLUCION PROPUESTA:
Almacén Temporal centralizado (ATC).

Tecnologías disponibles

- **VÍA HÚMEDA:**
 - ✓ Piscinas.

- **VÍA SECA:**
 - **Contenedores metálicos**
 - ✓ Almacenamiento
 - ✓ Almacenamiento y transporte
 - **Contenedores de hormigón**
 - ✓ Nichos o contenedores de hormigón
 - ✓ Bóvedas

❑ Libros, monografías e Informes:

- *Gestión de residuos radiactivos*. ENRESA, Curso “Fuentes energéticas y otras aplicaciones de la tecnología nuclear”, Madrid, 12 Abril de 2010.
- *La generación de residuos radiactivos*. Fernando Álvarez Mir, 2009.
- *Diccionario Inglés-Español sobre energía nuclear*. Agustín Tanarro Sanz, Agustín Tanarro Onrubia. Foro Nuclear

❑ Páginas Web:

- http://www.enresa.es/actividades_y_proyectos/rbma?j=el+cabril#bloque103
- http://www.enresa.es/publicaciones_y_audiovisuales/videos_e_interactivos/atc_procesos (2014)
- http://www.enresa.es/publicaciones_y_audiovisuales/videos_e_interactivos/ensayo_resistencia_contenedores (2014)

3. El Almacén Temporal Centralizado (ATC)

-
- Almacén Centralizado de RBMA
 - Almacén Temporal Centralizado (ATC)
 - ¿Qué es el ATC?
 - ¿Cómo es?
 - ¿Por qué se necesita?
 - Razones técnicas
 - Razones de seguridad
 - Razones económicas
 - Descripción del edificio y capacidad
 - Ubicación del CG y de los RAA
 - Transporte de CG/RAA
 - Futuro de los residuos
 - Funcionamiento
 - Tecnologías de transformación

El Cabril

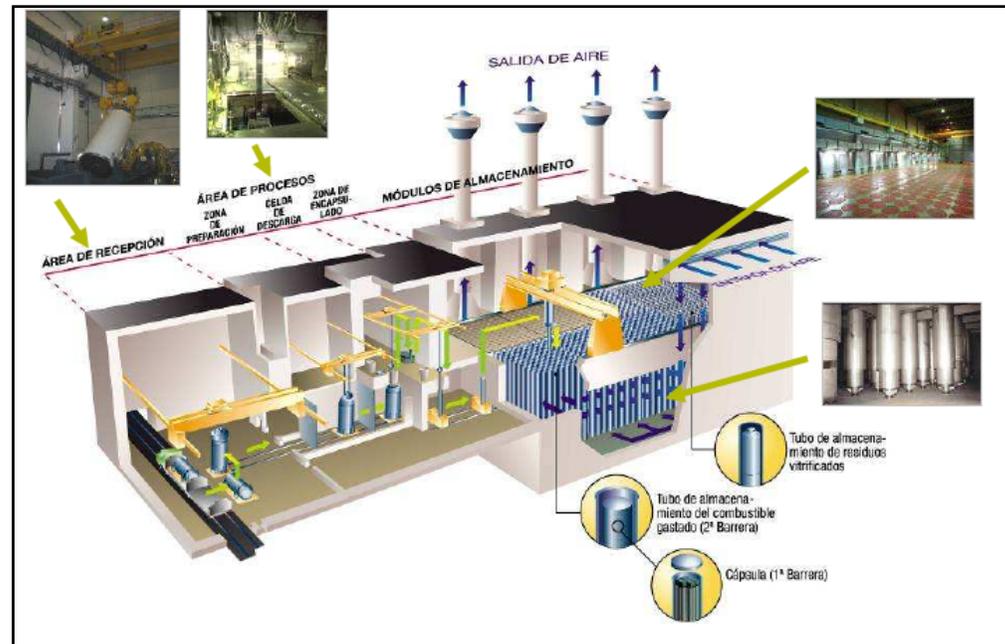
- Instalación de almacenamiento de residuos radiactivos de baja y media actividad de España.
 - ❑ Diseñada para cubrir las necesidades totales actuales de almacenamiento de este tipo de residuos.
- Ubicación: [Sierra de la Albarraña \(Cordoba\)](#).
- La instalación dispone de:
 - ✓ Dos laboratorios para verificación de la calidad de los residuos.
 - ✓ Sala de control e instalaciones auxiliares (administración, seguridad industrial...)
 - ✓ Instalaciones para llevar a cabo el tratamiento y acondicionamiento de residuos.
 - ❑ [Zona de almacenamiento](#)
 - ✓ 2 estructuras para el almacenamiento de RBMA.
 - 28 (16+12) celdas de almacenamiento con capacidad para 320 contenedores.
 - ✓ 1 estructura específica para el almacenamiento de los RMBA.

Almacén Temporal Centralizado (ATC)

¿Qué es el ATC?

- ✓ Es una instalación industrial, una nave blindada de casi dos metros de espesor diseñada para guardar en un único lugar, en cápsulas selladas, garantizando su aislamiento total, el combustible gastado y los residuos radiactivos de alta actividad que se producen en España.

¿Cómo es?



<https://docplayer.es/19088521-Gestion-de-residuos-radiactivos.html>

Almacén Temporal Centralizado (ATC)

¿Por qué se necesita?

Razones técnicas

- ✓ Saturación de las piscinas de las CC.NN.
- ✓ Necesidad de sacar el combustible para el desmantelamiento de las centrales nucleares que hayan terminado su vida útil.
- ✓ Los residuos de alta actividad de la central nuclear de Vandellós I, deberían haber retornado a España antes del 31 de diciembre de 2010. Se están pagando a Francia 65.000 euros diarios por el almacenamiento.
- ✓ Vida de diseño con numerosas referencias.
- ✓ Reversibilidad

Razones de seguridad

- ✓ La centralización en un único lugar es más seguro que la dispersión en varias ubicaciones ya que se optimiza la aplicación de las tecnologías y sistemas de seguridad pasivos y activos.

Razones Económicas

- ✓ La solución de la gestión centralizada de los residuos es significativamente menos costosa que la construcción de un almacén para cada central.

Almacén Temporal Centralizado (ATC)

Descripción del edificio - capacidad

- ❑ Edificio de **hormigón armado de gran espesor**.
- ❑ **Almacenaje segregado y apilado según características** de los residuos.

- ❑ **Capacidad** para:
 - ✓ 1.022 bidones de 210 litros (residuos bituminosos)
 - ✓ 126 contenedores de 1,2 m³ (residuos tecnológicos)
 - ✓ 1.320 bidones de 225 litros (piezas de magnesio y grafito)
 - ✓ 1.905 m³ de residuos de desmantelamiento.

Almacén Temporal Centralizado (ATC)

Ubicación del CG y de los RAA

	ELEMENTOS COMBUSTIBLES	VIDRIOS
1 MODULO DE ALMACENAMIENTO	2 bóvedas	1 bóveda
1 BÓVEDA DE HORMIGÓN	120 tubos	12 tubos
1 TUBO VERTICAL DE ACERO INOXIDABLE	2 cápsulas	7 cápsulas
1 CÁPSULA DE ACERO INOXIDABLE	Entre 5 y 15 (según el tipo)	Vienen encapsulados

TIPO		ELEM. COMB. / CÁPSULA
ZORITA	PWR 14x14	7
ASCO I y II ALMARAZ I y II VANDELLOS II	PWR 17x17	6
TRILLO	PWR 16x16	5
COFRENTES GAROÑA	BWR 8x8	15

Almacén Temporal Centralizado (ATC)

Transporte del CG/RAA

- ❑ Los contenedores de CG/RAA **se pueden transportar** hasta el ATC por dos vías:
 - ✓ **Carretera**
 - ✓ **Ferrocarril**

Ambas modalidades son viables, pudiendo coexistir.

Marco normativo

- ❑ La seguridad en el transporte de CG está garantizado por el embalaje y las condiciones de transporte. Reglamentación de la UE aplicable:
 - ✓ Acuerdo Europeo para el transporte de mercancías peligrosas por carretera.
 - ✓ Reglamento internacional sobre el Transporte de Mercancías Peligrosas por Ferrocarril (RID)
 - ✓ Normas de seguridad de la OIEA “Reglamento para el transporte seguro de materiales radiactivos” TS-R-1.

Transporte del CG/RAA

Embalaje de transporte

- ✓ Cilindro de acero con diferentes tipos de blindajes.
- ✓ Dispone de aletas metálicas para disipar el calor, de manera que la temperatura exterior del embalaje no supere los 50 °C.
- ✓ El transporte se realiza en posición horizontal.
- ✓ Los extremos están protegidos por amortiguadores que en caso de choque absorberían el impacto.

Ensayos requeridos

- ❑ De acuerdo con la OIEA, los embalajes tipo B de transporte de CG, deben cumplir con la normativa ISO en los siguientes ensayos:
 - ✓ Caída libre desde 9 metros sobre un blanco rígido (plancha de acero o losa de hormigón)
 - ✓ Caída libre desde 1 metro de altura sobre punzón de acero.
 - ✓ Ensayo de fuego donde el embalaje debe soportar 800 °C durante 30 minutos.
 - ✓ Ensayos de inmersión a 200 metros de profundidad durante 1 hora.

Almacén Temporal Centralizado (ATC)

Funcionamiento

- ✓ En esta instalación se gestionan de forma el CG y RAA
 - Se reciben, descargan, se inspeccionan y se introducen en cápsulas de acero inoxidable dentro de los tubos de almacenamiento donde permanecerán 60 años¹.
 - Todo el proceso está automatizado.

Futuro de los residuos

- ✓ **Almacenamiento geológico.**
- ✓ **Transmutación.**

Transmutación

Transformación de radionucleidos de vida larga en otros de vida corta o estables, utilizando un elevado flujo de neutrones de alta energía.

Procesos de transmutación

- ✓ Reacciones de fisión para **actínidos**.
- ✓ Reacciones de captura neutrónica para **productos de fisión**.

Sistemas de transmutación

- ✓ Reactores térmicos.
- ✓ Reactores rápidos.
- ✓ Reactores híbridos accionados por acelerador.

□ JAPÓN

- Programa OMEGA
 - Reprocesamiento
 - Uso de Pu en MOX
 - Transmutación en reactores rápidos o en ADS

□ **UNIÓN EUROPEA**

- Programa ITU
 - Estudios de los diversos componentes
 - Participación española en los programas europeos
- Laboratorio CERN
 - Estudios y experimentación a nivel de física nuclear

□ **FRANCIA**

- Programa SPIN
 - Reprocesamiento
 - Uso de Pu en MOX
 - Transmutación en reactores rápidos y en ADS

□ **EE.UU.**

- Programa ATW
 - Separación piroelectroquímica
 - Transmutación en ADS

❑ Libros, monografías e informes:

- *Diccionario Inglés-Español sobre energía nuclear*. Agustín Tanarro Sanz, Agustín Tanarro Onrubia. Foro Nuclear
- Dossier ENRESA: “*Gestión de residuos radiactivos*”, Madrid, 12 de Abril de 2010.

❑ Páginas Web:

- http://www.enresa.es/publicaciones_y_audiovisuales/videos_e_interactivos/atc_proc esos (2014)
- http://www.enresa.es/publicaciones_y_audiovisuales/videos_e_interactivos/ensayo_resistencia_contenedores (2014)