



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MASTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
(MII)

“Análisis económico de la gestión de los
residuos nucleares en España: ATI o
ATC”

Ernesto Cortés Torres

Autor

Laura Rodríguez Penalonga
B. Yolanda Moratilla Soria

Directores

Madrid
Agosto 2017

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. Ernesto Cortés Torres

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: Análisis económico de la gestión de los residuos nucleares en España: ATC o ATI, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducir en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.

- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.
- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6°. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a ...28..... deAgosto..... de ...2017.....

ACEPTA

Fdo.....


Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título *Análisis económico de la gestión de los residuos nucleares en España: ATI o ATC* en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2017 es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Ernesto Cortés Torres

Fecha: 28/08/2017

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

LAURA RODRÍGUEZ REVALONGA

Fdo.: (Nombre del Director)

Fecha: 15/9/2017

YOLANDA MORATILLA.



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MASTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
(MII)

“Análisis económico de la gestión de los
residuos nucleares en España: ATI o
ATC”

Ernesto Cortés Torres

Autor

Laura Rodríguez Penalonga
B. Yolanda Moratilla Soria

Directores

Madrid
Agosto 2017

RESÚMEN:

España se encuentra sumida en una profunda indecisión y falta de iniciativa a la hora de gestionar sus residuos nucleares. Con el proyecto del ATC paralizado y las piscinas de almacenamiento, ubicadas en las centrales nucleares, próximas a su saturación, en España se sigue sin aplicar una solución a la problemática de la gestión de residuos.

Este es el principal aliciente para la elección de este proyecto, en el cual se trata de analizar cuál de los dos tipos de almacenamientos temporales existentes es conveniente de instalar en España. Mejor dicho, se analizará, cual es la opción más económicamente viable para almacenar los residuos que se encuentran en las piscinas, de donde es imprescindible sacarlo para poder llevar a cabo el desmantelamiento. Se estudiarán las opciones reales y existentes, así como, se aportarán algunas propuestas de almacenamiento.

Un ATC, que son las siglas de almacenamiento temporal centralizado, es, como su propio nombre indica, un repositorio de combustible nuclear gastado. Dicho repositorio o almacén tiene la principal característica o función, de unificar los residuos almacenados en las piscinas que están repartidas por toda la geografía. De esta manera, se encuentra todo este almacenado en un mismo lugar, con sus consiguientes beneficios en materia económica y de control de la seguridad.

Un ATI, o almacenamiento temporal individualizado, es también un repositorio de combustible nuclear gastado, pero, este se encuentra próximo a la central. El ATI, tiene la ventaja de un ahorro en transporte de residuos, ya que permite que las piscinas puedan ser descargadas para proceder al desmantelamiento de la central. Esto, al contrario que en el ATC, tiene el inconveniente de tener que monitorizar cada una de las instalaciones, con su correspondiente aumento en el coste y en la dificultad para controlar la seguridad de los mismos.

Previo a este análisis se plasma, como se realizaría un análisis económico acerca de las distintas estrategias de gestión de residuos, sin llegar a profundizar en él. Aun así, se observa un patrón en todos los estudios que realizan este análisis, y es que la diferencia entre la estrategia de ciclo cerrado y ciclo abierto siempre ronda el 10% en costes, siendo mayor el coste del ciclo cerrado. Esto, añadido al hecho de que se están desarrollando e investigando nuevos métodos de reciclado, así como reactores de generación IV, que reducen de manera considerable el volumen de residuos que se almacenan, además de aprovechar de sobremanera el combustible que permanece en los residuos, hacen que la estrategia de reciclado a pesar de ser más cara, haya que ser tenida en cuenta. La diferencia del 10% viene a decir que no se debe elegir una estrategia u otra en función exclusivamente de materia económica.

Los objetivos del análisis eran estimar la fecha necesaria para la operatividad del ATC, así como determinar el coste de la solución planteada. Para ello entraban a jugar distintas variables, tales como: el diseño y tamaño del ATI y ATC, el tipo de barriles, el tipo de reactor, la cantidad de combustible almacenada en cada uno de los ATIs ya construidos y en las piscinas de los reactores, la tasa de extracción del combustible gastado de las piscinas... Debido al número tan grande de variables, se llevan a cabo ciertas suposiciones, bastante lógicas, por lo que se pueden asemejar al caso más real.

Los estudios realizados son los siguientes:

- Caso 1: Se parte del caso base, es decir, no se construye ningún ATI nuevo, tan solo los que ya están construidos en España (Trillo, Ascó y José Cabrera) y se construye el ATC completo.
- Caso 2: Se construyen los ATIs que están proyectados (Garoña y Almaraz), así como se mantienen los existentes. Se construye el ATC completo.
- Caso 3: Se añade un ATI más al caso anterior, el de Cofrentes, que está planeada su construcción. Se construye el ATC completo.
- Propuesta 1: Se modifica el tamaño de los ATIs, doblando el tamaño de Garoña, Asco y Almaraz. Se construye un ATC de la mitad de tamaño que el diseñado.
- Propuesta 2: No se construye el ATC, todos los residuos serán almacenados en ATIs.

La solución encontrada fue la siguiente:

	CASO 1	CASO 2	CASO 3	PROPUESTA 1	PROPUESTA 2
TOTAL	4376,5	4645,1	4735,0	4122,0	2163,5
FECHA	2020	2022	2023	2025	

La principal conclusión que se puede extraer del análisis realizado es que urge un liderazgo en la toma de decisiones acerca del tipo de almacenamiento a usar en España. Las centrales nucleares están tomando decisiones sin tener en cuenta al organismo central. Esto se debe a la incertidumbre acerca del ATC. De todas las opciones analizadas la mejor en términos económicos es una propuesta en la cual se dobla la capacidad de varios de los ATIs construidos y por construir. Por tanto, se debería realizar un análisis más profundo, de forma que se dé con la solución óptima.

ABSTRACT:

Spain is in deep indecision and lack of initiative when it comes to managing its nuclear waste. With the ATC project paralyzed and the storage pools, located in the nuclear power plants, close to their saturation, in Spain a solution to the problem of waste management is still not applied.

This is the main incentive for the choice of this project, in which it is a question of analyzing which of the two types of temporary storage is convenient to install in Spain. Rather, it will be analyzed, which is the most economically viable option to store the waste that is in the pools, where it is essential to remove it to be able to carry out the dismantling. Actual and existing options will be studied, as will some storage proposals. An ATC, which stands for centralized temporary storage, is, as its name implies, a repository of spent nuclear fuel. This repository or warehouse has the main feature or function of unifying the waste stored in the pools that are spread throughout the geography. In this way, everything is stored in one place, with its consequent economic benefits and security control.

An ATI, or individualized temporary storage, is also a repository of spent nuclear fuel, but this is close to the central one. The ATI, has the advantage of a saving in waste transport, as it allows the pools to be discharged to proceed to the decommissioning of the plant. This, unlike in the ATC, has the disadvantage of having to monitor each of the installations, with their corresponding increase in the cost and in the difficulty to control the safety of the same.

Prior to this analysis, an economic analysis of different waste management strategies was carried out, without going deeper into it. Even so, a pattern is observed in all the studies that perform this analysis, and is that the difference between the closed cycle and open cycle strategy is always around 10% in costs, with the cost of the closed cycle being higher. This, added to the fact that new recycling methods are being developed and investigated, as well as generation IV reactors, that considerably reduce the volume of waste that is stored, besides taking advantage of the fuel that remains in the waste, make the recycling strategy, despite being more expensive, have to be taken into account. The difference of 10% comes to say that one should not choose a strategy or another based solely on economic matter.

The objectives of the analysis were to estimate the date necessary for the operation of the ATC, as well as to determine the cost of the proposed solution. For this, different variables were involved, such as: the design and size of the ATI and ATC, the type of barrels, the type of reactor, the amount of fuel stored in each of the ATIs already built and in the reactor pools, the rate of extraction of spent fuel from swimming pools ... Due to the large number of variables, certain assumptions are made, quite logical, so that they can resemble the more real case.

The studies carried out are as follows:

- Case 1: It starts from the base case, that is, no new ATIs are built, only those already built in Spain (Trillo, Ascó and José Cabrera) and the complete ATC is built.
- Case 2: The ATIs that are projected (Garoña and Almaraz) are constructed, as well as existing ones. Complete ATC is built.
- Case 3: A further ATI is added to the previous case, that of Cofrentes, which is planned to be built. Complete ATC is built.
- Proposal 1: The size of the ATIs is modified, doubling the size of Garoña, Asco and Almaraz. A half-size ATC is constructed.
- Proposition 2: The ATC is not built, all waste will be stored in ATIs.

The solution found was as follows:

	CASE 1	CASE 2	CASE 3	PROPOSAL 1	PROPOSAL 2
TOTAL	4376,5	4645,1	4735,0	4122,0	2163,5
DATE	2020	2022	2023	2025	

The main conclusion that can be drawn from the analysis carried out is that there is a need for leadership in the decision making about the type of storage to be used in Spain. Nuclear power plants are making decisions without taking into account the central body. This is due to uncertainty about ATC. Of all the options analyzed the best in economic terms is a proposal in which doubles the capacity of several of the ITAs constructed and to be constructed. Therefore, a more in-depth analysis should be carried out, so that the optimal solution is achieved.

Contenido

RESÚMEN:.....	4
ABSTRACT:	6
PARTE I: MEMORIA	0
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Historia de la energía nuclear	1
1.2. Situación global	2
1.3. Caso español.....	4
1.4. Motivación	9
1.5. Objetivos	10
2. ESTADO DEL ARTE	11
2.1. El ciclo de combustible nuclear.....	11
3. ¿Qué son los residuos nucleares?	37
4. Explicación de términos importantes	40
5. ANÁLISIS ECONÓMICO DE LOS DIFERENTES MÉTODOS DE GESTIÓN DE RESIDUOS:	44
5.1. Análisis comparativo de ambos sistemas de gestión, partiendo de un caso general: ...	44
5.2. Aplicación del LCOE al caso español	50
5.2.1. Caso español.....	50
5.2.2.1. Actividad nuclear en España	51
5.2.3. Caso del ciclo cerrado	52
5.2.4. Resultados del estudio.....	55
6. ATI o ATC comparación económica	56
6.1. Introducción	56
6.2. Caso 1: No se construye ningún otro ATI.....	62
6.3. Caso 3: Se construyen los ATIs de Almaraz, Garoña y Cofrentes:	64
6.4. Propuesta 1	65
6.5. Propuesta 2:.....	67
6.6. Distribución de costes	67
6.6.1. ATC	67
6.6.2. ATI.....	68
6.6.3. Análisis de costes para los casos analizados.....	70
7. AGP europeo. Posibilidad de un Almacenamiento central de residuos nucleares compartido por los estados miembros.	72

8.	CONCLUSIONES	75
9.1.	Ciclo abierto o ciclo cerrado	75
	Economic Assessment of Used Nuclear Fuel Management in the United States	76
	Advanced Nuclear Fuel Cycle and Radioactive Waste Management (2006).....	76
	An Economic Analysis of Select Fuel Cycle Using the Steady-State Analysis Model for Advanced Fuel Cycles Scemes (2010).....	76
	The Economics of the Nuclear Fuel Cycle (1994).....	76
9.2.	ATI o ATC	76
9.3.1.	Conclusiones sobre el análisis realizado:	77
9.3.	AGP comunitario europeo	78
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	0
10.	ANEXOS	2

PARTE I: MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Historia de la energía nuclear

La energía nos proporciona calidad de vida, comodidad y una infinidad de recursos que hacen crecer la esperanza de vida, así como las oportunidades de futuro.

La Agencia Internacional de la Energía (AIE), declaró en 2008, que el sistema actual de energía era insostenible y que por tanto ninguna tecnología conocida puede dar con la solución a este desafío energético global. La demanda crece a un ritmo descontrolado provocando que ni tan siquiera una expansión directa de la producción de energía sobre el mix energético actual es capaz de cubrir este aumento de demanda sin que se dejen de cumplir los requisitos de emisiones contaminantes, tales como las de efecto invernadero y que son causantes del cambio climático.

La lucha contra el cambio climático parece que por fin es una realidad y que las personas con mayor influencia en este mundo están concienciadas del daño irreparable que conlleva el cambio climático:

- *"Hay una ruptura en la relación con el medio ambiente y esa ruptura es pecado". "El mundo podría ver la destrucción de ecosistemas enteros en este siglo sin una acción urgente sobre el cambio climático".* Papa Francisco
- *"El cambio climático es la mayor amenaza para nuestro futuro".* Barack Obama
- *"A todos aquellos que consideran importante el futuro de nuestro planeta les digo: continuemos juntos en el camino para tener éxito, por nuestra madre tierra".* Ángela Merkel

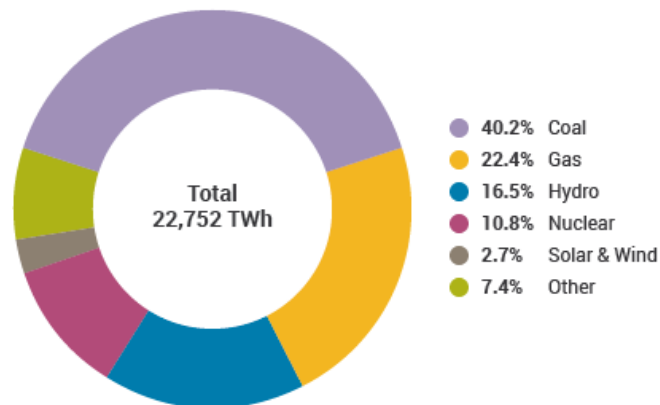
Es fundamental que la lucha contra el cambio climático sea objetivo prioritario para todos los estados, ya que hablando en términos económicos, un calentamiento global sin frenos cambiaría por completo la configuración actual de la economía: se reducirían los ingresos globales medios en un 23% y se crearían mayores desigualdades económicas para el año 2100 si se comparan dos escenarios, uno con cambio climático y otro sin él [1].

Históricamente, la fuente de energía predominante en el mundo han sido los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural). Sin embargo, estos cuentan con un problema que hace que sea necesario buscarles sustituto. Los combustibles fósiles cuentan con un suministro finito y eventual.

No se puede decir, ni mucho menos que exista un tipo de energía “mejor” que otro, pues el objetivo final no es otro que un sistema sostenible y para ello, unos métodos de generación de energía se complementan con otros en función de las ventajas e inconvenientes de cada uno.

La energía nuclear es uno de los pilares de éste sistema anteriormente mencionado, con una potencia instalada de 390.858MWe. Además produce anualmente cerca de 2400 TWh de electricidad, lo que supone el 11% del total de la energía eléctrica mundial (el mayor porcentaje de las fuentes sin emisiones de CO2 tras la energía hidráulica) [2] [3].

World Electricity Production 2012



Source: IEA Electricity Information 2014

Ilustración 2: Producción de energía eléctrica en 2012. Fuente: [15]

1.2. Situación global

Se espera que la población mundial pase de 6,7 mil millones de personas a más de 9 mil millones de personas para el año 2050, todos luchando por una mejor calidad de vida.

A medida que crece la población de la tierra, crece a su vez la demanda de energía y los beneficios que ello trae: mejores niveles de vida, mejor salud y expectativa de vida más larga, así como alfabetización y oportunidades mejoradas [4] [5]...

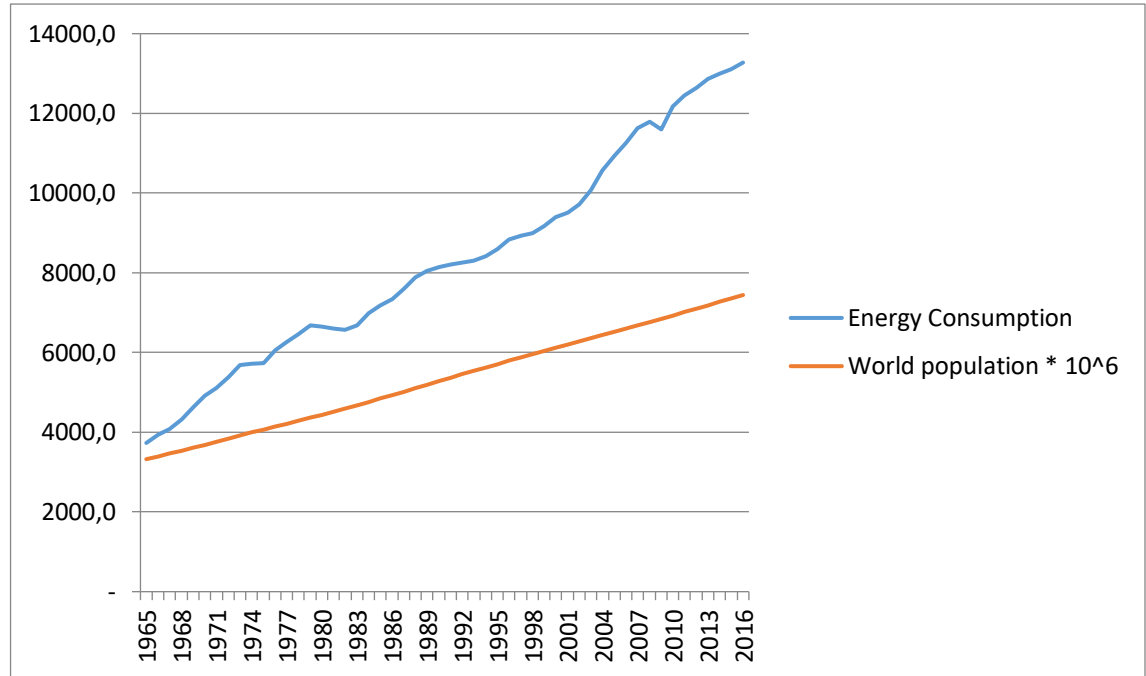


Ilustración 3: Correlación entre el consumo de energía mundial y el crecimiento de la población mundial
(Elaboración propia)

Este aumento de demanda provoca que los combustibles fósiles (al ser finitos), se encarezcan, añadiendo que expandiendo directamente la producción de energía sobre el mix existente actualmente, no satisface ese aumento de demanda del que se habla sin violar los requerimientos de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Para que la tierra apoye a su población y se garantice la sostenibilidad del desarrollo de la humanidad, debemos aumentar el uso de suministros de energía limpia, segura, rentable y que pueda servir tanto para la producción básica de electricidad como para otras necesidades cualquiera de energía primaria.

La generación de energía nuclear emite cantidades relativamente bajas de dióxido de carbono (CO₂). Por lo tanto, las emisiones de gases de efecto invernadero y, por lo tanto, las contribuciones de las centrales nucleares al calentamiento global son relativamente escasas.

El aumento de la demanda de energía global y el problema del cambio climático son compatibles siempre y cuando se utilicen energías limpias. Aquí es donde entra la energía nuclear a jugar un papel importante en la sociedad.

Ya se ha comentado la poca emisión de gases de efecto invernadero que trae consigo la energía nuclear, así como que es una tecnología desarrollada y eficiente, capaz de producir grandes cantidades de energía. Además, la energía nuclear en aspectos económicos, es una energía con costes operativos muy bajos y costes de inversión altos, al contrario que las energías renovables.

Sin embargo, uno de los desafíos de la energía nuclear, es que el problema de los residuos radioactivos es aún objeto de debate para las diferentes autoridades de los países con energía nuclear instalada. Esto es debido a que la vida media de los residuos radiactivos es muy larga (de más de miles de años), por tanto, el período de tiempo durante el cual es necesaria su vigilancia y gestión es también muy largo. Los residuos de la energía nuclear son peligrosos debido a la radiación que estos emiten, por lo que almacenarlos durante varios miles de años. Se han propuesto cantidad de soluciones temporales, las cuales han demostrado ser viables técnica y económicamente, sin embargo, acerca de la solución final de los residuos radiactivos aún no hay consenso sobre cuál es la mejor de las soluciones. Aun así, existen soluciones, las cuales han sido probadas en diferentes países y funcionan. Es por ello que la gestión del combustible nuclear usado uno de los mayores problemas que tiene actualmente la energía nuclear.

1.3. Caso español

España cuenta actualmente con cinco centrales nucleares operativas que engloban a siete reactores nucleares. Estos reactores producen el 22% de la energía eléctrica en España. Esto es la primera posición en el mix energético y por sexto año consecutivo la principal fuente de energía en España [6].

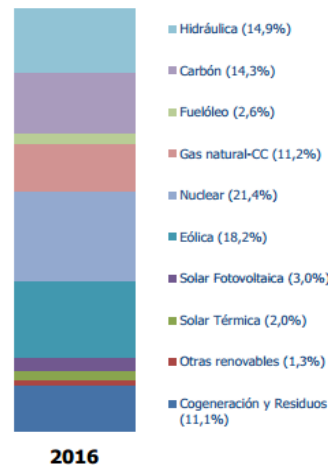


Ilustración 4: Situación del mix energético español en 2016. Fuente: UNESA

Las centrales nucleares españolas operativas son las siguientes:

- Almaraz. Central nuclear situada en Cuenca, esta cuenta con dos reactores PWR, Almaraz I y Almaraz II
- Ascó. Esta central se encuentra en Tarragona y también cuenta con dos reactores PWR, Ascó I y Ascó II.
- Vandellós II. Central nuclear tarraconense, con un reactor PWR.
- Cofrentes; Central nuclear ubicada en Valencia, con reactor nuclear BWR. José Cabrera, también conocida como Zorita, su reactor es del tipo PWR.

Los tipos de reactores se explicarán más adelante.

En la tabla 1 se muestran dichas centrales, incluyendo la de Santa María de Garoña que se encuentra actualmente parada, además en la Ilustración 5 se puede ver la ubicación de estas centrales sobre el mapa geográfico español.

Central	Localización	Potencia eléctrica inicial (MW) (*)	Potencia eléctrica actual (MW)	Tipo de reactor (suministrador)	Estado actual	Titular
Santa María de Garoña	Santa María de Garoña (Burgos)	460	466,0	BWR (General Electric)	(**)	Nucleon(***) 100%
Almaraz I	Almaraz (Cáceres)	930	1.049,4	PWR (Westinghouse)	En explotación comercial desde septiembre de 1983	Iberdrola 53% Endesa 36% Gas Natural Fenosa 11%
Almaraz II	Almaraz (Cáceres)	930	1.044,5	PWR (Westinghouse)	En explotación comercial desde julio de 1984	Iberdrola 53% Endesa 36% Gas Natural Fenosa 11%
Ascó I	Ascó (Tarragona)	930	1.032,5	PWR (Westinghouse)	En explotación comercial desde diciembre de 1984	Endesa 100%
Ascó II	Ascó (Tarragona)	930	1.027,2	PWR (Westinghouse)	En explotación comercial desde marzo de 1986	Endesa 85% Iberdrola 15%
Cofrentes	Cofrentes (Valencia)	975	1.092,0	BWR (General Electric)	En explotación comercial desde marzo de 1985	Iberdrola 100%
Vandellós II	Vandellós (Tarragona)	982	1.087,1	PWR (Westinghouse)	En explotación comercial desde marzo de 1988	Endesa 72% Iberdrola 28%
Trillo I	Trillo (Guadalajara)	1.000	1.066,0	PWR (Siemens-KWU)	En explotación comercial desde agosto de 1988	Iberdrola 48% Gas Natural Fenosa 34,5% EDP 15,5% Nucleon(***) 2%

Ilustración 5: Listado de las centrales nucleares españolas y sus características técnicas principales. Fuente: Foro Nuclear

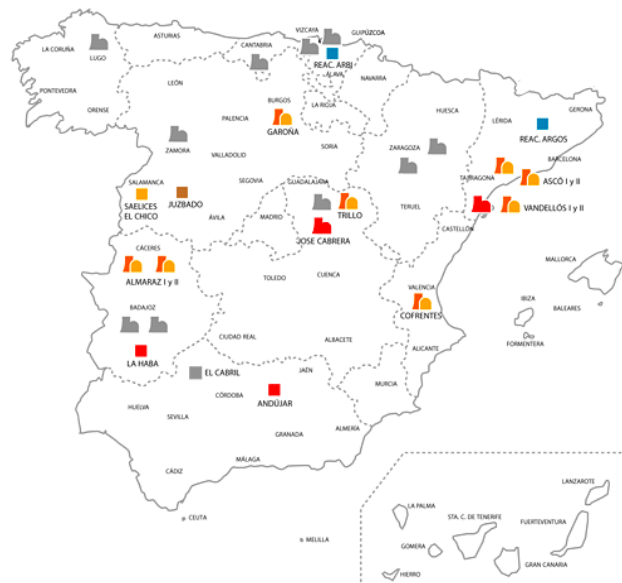


Ilustración 5: Distribución de los reactores nucleares a lo largo de la geografía española. Fuente: Economía Digital

En términos de potencia, la potencia total instalada del parque de generación eléctrica en España, fue de 105599 MW, de los cuales un 7,45% del total, es decir 7864,7 MW, correspondían a la potencia del parque nuclear. En cuanto a la producción de electricidad proveniente de combustibles nucleares, esta supuso el 35,18% de la electricidad sin emisiones contaminantes [7].

En cuanto a términos de energía, la energía eléctrica total neta que produjo el parque nuclear español fue de 56100 GWh, lo que supone un 21,4% del total de la energía eléctrica producida en España (262321 GWh), convirtiéndose esta en la mayor fuente de energía eléctrica.

Las centrales nucleares pertenecientes al parque nuclear español, iniciaron con una vida útil de 40 años. La fecha de fin de estos 40 años está alcanzando su fin, sin embargo, si se cuenta con las licencias necesarias y se pasan los controles de seguridad apropiados, la vida útil de estas puede prolongarse en un plazo de diez años. En la siguiente tabla se muestran dichas fechas, además de las fechas de inicio de construcción y puesta en marcha de las centrales.

Central	Permiso de construcción	Inicio de la operación comercial	Autorización de explotación actual	Plazo de validez
Santa María de Garoña	2 de mayo de 1966	11 de mayo de 1971	(*)	---
Almaraz I	2 de julio de 1973	1 de septiembre de 1983	8 de junio de 2010	10 años
Almaraz II	2 de julio de 1973	1 de julio de 1984	8 de junio de 2010	10 años
Ascó I	16 de mayo de 1974	10 de diciembre de 1984	22 de septiembre de 2011	10 años
Ascó II	7 de marzo de 1975	31 de marzo de 1986	22 de septiembre de 2011	10 años
Cofrentes	9 de septiembre de 1975	11 de marzo de 1985	20 de marzo de 2011	10 años
Trillo I	17 de agosto de 1979	6 de agosto de 1988	17 de noviembre de 2014	10 años
Vandellós II	29 de diciembre de 1980	8 de marzo de 1988	26 de julio de 2010	10 años

Tabla 1: Acontecimientos temporales remarcables en la vida de las centrales nucleares. Fuente: Foro Nuclear

De las seis centrales nucleares mencionadas en la tabla 1, Santa María de Garoña se encuentra parada. Inicialmente era una parada programada para la descarga completa de los elementos combustibles que estaban contenidos en la vasija del reactor y pasar a ser colocados en la piscina de la central. Pero días después a la finalización de esta operación, el Consejo de Administración de Nuclenor ratificó la decisión del cese de la actividad de esta central nuclear. Las razones son exclusivamente económicas según Nuclenor. En febrero de este año (2017), el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) emitió un informe en el cual se garantizaban las buenas condiciones de la central nuclear de Santa María de Garoña para continuar con la explotación de la misma y renovar así la autorización para continuar con su operatividad normal. Queda en manos del Gobierno de España, en concreto del Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital, la decisión de conceder o no dicha autorización.

Además de las mencionadas, en España existieron dos reactores nucleares más, Vandellós I y José Cabrera, también conocida como Zorita. La primera de ellas, sufrió un incendio en la zona de turbinas, que se declaró como incidente de nivel 3 en la escala INES (Escala Internacional de Eventos Nucleares), lo cual se clasifica como “incidente importante”. El importante coste que suponía la corrección de los daños e irregularidades de la central hizo que la empresa que la explotaba decidiera llevar a cabo su cierre definitivo. El desmantelamiento de la misma comenzó en 1991 con el Nivel 1, y terminó en 2003 con la segunda fase del nivel 2 [8].

En cuanto a la central de Zorita, su cese definitivo de explotación se produjo en 2006 a través de una Orden Ministerial. Actualmente esta central se en período de desmantelamiento.

En lo que se refiere a las centrales operativas, el plazo de explotación de las mismas comprende un rango que varía de 2020 a 2024, tal y como se puede observar en la tabla 2, a partir de esa fecha, deberían comenzar con el desmantelamiento de la misma. Existe la posibilidad, comentada anteriormente, de que se les conceda un permiso de renovación de la autorización de explotación de la misma. La central nuclear de Santa María de Garoña, solicitó este permiso y actualmente se encuentra en proceso de estudio. El desmantelamiento de una central consiste en un proceso mediante el cual una central queda libre de protección ante radiaciones. Es decir, desproveerla de todo material propenso a emitir radiación que pueda ser peligrosa para la salud humana y del medio ambiente.

Uno de estos materiales emisores de radiación son los residuos nucleares, es decir, en el caso español, el combustible nuclear gastado. Estos están almacenados temporalmente en piscinas ubicadas en el interior de las centrales, de forma que se enfríen para posteriormente ser trasladados a otras instalaciones de almacenamiento. Todo este proceso entra a formar parte de la gestión de residuos nucleares. La gestión de estos residuos es un tema polémico, incierto y sujeto a muchos cambios. En España, cuando llegue el momento del desmantelamiento de las centrales, que es al término de la vida útil de estas, habrá que gestionar el almacenamiento y la reubicación de 6674 toneladas de combustible usado [9]. Toda esta cantidad de residuos no caben en las piscinas de las centrales que además necesitan ir renovándose para ir dando cabida a los nuevos residuos provenientes de la creación de energía eléctrica en los reactores. Es por ello que urge la búsqueda de una solución para este problema. Además, cuando las primeras centrales nucleares ubicadas en territorio español comenzaron a producir residuos se optó por que este sería reprocesado. Dicho combustible provenía de las centrales nucleares de Vandellós I, José Cabrera y Santa María de Garoña. Como en España no existían los métodos de reprocesado, este hubo de ser enviado a Francia y a Reino Unido. Los contratos establecidos con estos países, exigían el retorno de ciertos residuos de alta y media actividad radiológica. En caso de incumplimiento en las fechas de devolución de dichos residuos, se aplicarían fuertes sanciones económicas.

La fecha fijada para el retorno de estos residuos era diciembre de 2010 y las sanciones en caso de sobrepasar la fecha son de 64.900 € diarios [10]. Lo cual, haciendo un cálculo rápido, han supuesto para España una sanción económica de cerca de 160 millones de €.

Como principio de solución, se aprueba en el 6º Plan General de Residuos Radiactivos (6º PGRR), un proyecto de construcción de un Almacén Temporal Centralizado, que se explicará más adelante.

Este proyecto quedó paralizado en febrero de 2015 por el Gobierno español. Esta decisión se debió a la necesidad de contar con los informes positivos del Consejo de Seguridad Nuclear. Existían dudas sobre el terreno donde se iba a construir dicho almacén. Los permisos que faltaban eran cuatro y con carácter vinculante: Declaración del Impacto Ambiental, viabilidad del emplazamiento por parte del CSN, licencia de construcción del CSN y un nuevo plan de ordenación municipal (POM). Además de las licencias, el gobierno de Castilla La Mancha, tomó una medida en perjuicio de la construcción del ATC: la ampliación de un espacio natural, de forma que esto bloqueaba el proyecto, [11]

En enero de 2017 el Tribunal Supremo anula esta ampliación del espacio natural por lo que ENRESA ha decidido retomar la activación del proyecto, el cual está a la espera de varios informes que son responsabilidad del gobierno de la comunidad castellana. Destacar que el cambio de gobierno que se produjo en dicha comunidad, tuvo un papel importante en esta decisión de retrasar lo máximo posible la obra. El gobierno liderado por Emiliano García-Page, no ha encontrado consenso para llevar a cabo el proyecto y está poniendo muchas dificultades para continuar con el mismo.

1.4. Motivación

España se encuentra con un problema grave en cuanto a la gestión de residuos se refiere. Se está llegando al final de la vida útil de las centrales nucleares, lo que implica que más pronto que tarde van a iniciar su desmantelamiento. Sus piscinas, donde almacenar residuos, están próximas a la saturación, lo que complica el desmantelamiento y el traslado de los residuos que llevan más tiempo en las piscinas a un almacén alternativo. La multa por el combustible reprocesado que se encuentra en Francia e Inglaterra cada vez son mayores, pagando una cantidad significativa diariamente. Todo esto se suma al hecho de que los dirigentes políticos no ayudan en la solución de dicho problema, interponiendo obstáculos a los intentos de solución por parte de los organismos reguladores de la energía nuclear. El ATC, que era la mejor solución posible a este problema se encuentra paralizado y no se sabe aún la fecha de reactivación de este proceso.

Es por ello que se plantea este proyecto, cuya finalidad no es otra que la de analizar las diferentes alternativas existentes en la actualidad y tratar de esclarecer cual es la mejor de todas ellas. De este modo, se plantean soluciones alternativas a la construcción del ATC, como por ejemplo la construcción de ATIs en las propias centrales.

1.5. Objetivos

Los objetivos de este proyecto son varios, todos relativos a la gestión de los residuos nucleares.

En primer lugar, analizar los diferentes sistemas de gestión de residuos actualmente existentes, así como aquellos que están en proceso de desarrollo e investigación. Se analizarán los costes asociados a ambos y las tendencias de los mismos de forma que se pueda valorar la viabilidad económica de cada uno de ellos.

En segundo y último lugar, se realizará un análisis de sensibilidad acerca de las posibilidades que tiene actualmente España a la hora de almacenar sus residuos. Es decir, debido a la paralización del proyecto del ATC, y a la urgencia por realojar los residuos almacenados en las piscinas, las centrales se plantean la tesitura de construir un almacén de menor tamaño en su interior (ATI). ¿Cómo varían los costes en función del tamaño? ¿Cuántos ATIs son realmente necesarios? ¿Cómo influyen estos ATIs en el tamaño del ATC? Son algunas de las preguntas que se tratarán de responder con dicho análisis.

Todo esto se encuentra resumido de la siguiente manera:

Los objetivos marcados de este trabajo son los siguientes:

1. Analizar la diferencia de los costes para 40 años de vida útil de las centrales nucleares entre CA y CC.
2. Evaluar la diferencia de costes entre ampliación de los ATIs existentes y la construcción de un nuevo ATC.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. El ciclo de combustible nuclear

El ciclo del combustible nuclear engloba todas aquellas fases por las que todo combustible nuclear debe pasar para poder ser utilizado en los reactores nucleares, así como aquellas que hacen posible el correcto manejo del combustible irradiado y los residuos producidos, de manera que se elimine o se reduzca a niveles mínimos cualquier interacción con el ambiente y sus miembros.

Es posible distinguir fácilmente las dos etapas que sigue el ciclo de combustible nuclear:

- Primera fase, también denominada "Front-End", la cual engloba todas las actividades comprendidas entre la extracción del uranio natural (minería) hasta la inclusión del elemento combustible en el reactor, pasando por las etapas de conversión, enriquecimiento y fabricación del combustible nuclear a partir del uranio extraído.
- Después de que el uranio haya pasado por el reactor para producir electricidad, el combustible usado es sometido a una serie de pasos adicionales, incluyendo el almacenamiento temporal, el reprocesamiento y el reciclaje antes de que se eliminen los desechos. En conjunto, estos pasos se conocen como el "Back-End" del ciclo del combustible nuclear.

2.1.1. Prospección y minería

El uranio es un metal ligeramente radiactivo que se produce a lo largo de la corteza terrestre. Está presente en la mayoría de las rocas y suelos, así como en muchos ríos y en el agua de mar. Se encuentra, por ejemplo, en concentraciones de alrededor de cuatro partes por millón (ppm) de granito, que constituye el 60% de la corteza terrestre. En los fertilizantes, la concentración de uranio puede ser tan alta como 400 ppm (0.04%), y algunos depósitos de carbón contienen uranio en concentraciones superiores a 100 ppm (0.01%). La mayor parte de la radioactividad asociada con el uranio en la naturaleza se debe en realidad a otros minerales derivados de él por procesos de desintegración radiactiva, y que se dejan en la minería y la molienda.

Hay una serie de áreas en todo el mundo donde la concentración de uranio en el suelo es lo suficientemente alto para que la extracción para usarlo como combustible nuclear sea económicamente viable. Tales concentraciones se denominan minas.

2.1.2. Concentrado de uranio.

La molienda, que generalmente se realiza cerca de una mina de uranio, y consiste en extraer el uranio del mineral (o lixiviado ISL). La mayoría de las instalaciones mineras incluyen un molino, aunque en aquellos lugares donde las minas están cercanas, un solo molino puede procesar el mineral de varias minas. La molienda produce un polvo seco concentrado de óxido de uranio al que se denomina coloquialmente 'torta amarilla' o 'yellowcake' (aunque generalmente es de color caqui) el cual suele contener más del 80% de uranio. El mineral original puede contener tan poco como 0,1% de uranio, o incluso menos.

2.1.3. Enriquecimiento del uranio y su importancia

El producto de óxido de uranio que se ha obtenido de un molino de uranio no es directamente utilizable como combustible en un reactor nuclear y por tanto es necesario proceso adicional. Esto se debe a que sólo el 0,7% del uranio natural es "fisible", o capaz de sufrir fisión, y como se ha visto con anterioridad, es necesaria la fisión de un núcleo atómico para la producción de energía en un reactor nuclear. La forma, o isótopo, del uranio que es fisible es el isótopo uranio-235 (U-235), el resto es U-238 (es fisiónable en reactores de neutrones rápidos, que probablemente estarán en amplio uso a mediados de siglo).

Para la mayoría de los reactores existentes en la actualidad, la concentración del isótopo fisible de U-235 necesita ser aumentada - típicamente entre un 3% y un 5% U-235. Por razones puramente físicas, al incrementar el número de átomos de U-235 en un reactor, la energía que se obtiene por tonelada de uranio es mayor que cuando se utiliza el uranio natural.

Reactor de grafito-gas (GCR)	Uranio natural
Reactor avanzado de gas (AGR)	Uranio enriquecido (2%)
Reactor de agua pesada (HWR)	Uranio natural
Reactor de agua a presión (PWR)	Uranio enriquecido (3.3%)
Reactor de agua en ebullición (BWR)	Uranio enriquecido (2.6%)
Reactor rápido (FBR)	Uranio empobrecido (U-238)

Tabla 3: Tipo de reactor y combustible que usa en función de los niveles de enriquecimiento

2.1.4. Fabricación de elementos combustibles

En función del tipo de reactor que vaya a utilizarse, el método de fabricación de combustible varía. Se muestra a continuación una tabla con las características del combustible en función del tipo de reactor.

El proceso de fabricación se resume en el cuadro que acompaña al texto:

Tipo de reactor	Tipo de combustible	Material fisiónable y fértil	Material de la vaina del combustible	Moderador	Refrigerante
Refrigerado por gas o GCR (Vandellós 1)	Uranio-metal o aleación	Uranio natural	Aleación de magnesio	Grafito	Anhídrido carbónico (CO ₂)
Agua pesada o PHWR	Óxido de uranio (UO ₂)	Uranio natural	Zircaloy	Agua pesada (D ₂ O)	Agua pesada (D ₂ O)
Agua a presión o PWR (Almaraz)	Óxido de uranio (UO ₂)	Uranio enriquecido (3.3%)	Zircaloy	Agua ligera (H ₂ O)	Agua ligera (H ₂ O)
Agua en ebullición o BWR (Cofrentes)	Óxido de uranio (UO ₂)	Uranio enriquecido (2.6%)	Zircaloy	Agua ligera (H ₂ O)	Agua ligera (H ₂ O)
Generador rápido o FBR	Óxidos mixtos de uranio (80%) y plutonio (20%)	Uranio empobrecido o (U-238) y plutonio	Acero inoxidable	Ninguno	Sodio fundido

Tabla 4: Características del combustible de distintos tipos de reactores [10]

A continuación, se explica el cuadro que antecede este texto:

- Proceso químico: Se pasa de hexafluoruro de uranio sólido a óxido de uranio en polvo
- Durante el proceso cerámico el polvo de UO_2 se prensa hasta convertirlo en pastillas cerámicas de densidad alta
- Proceso mecánico: se cargan las vainas de Zircaloy con las pastillas fabricadas, se construyen los cabezales, las rejillas y los tapones. Una vez todos los elementos están listos se procede con el montaje final.

2.1.5. Productos de fisión

Los productos de fisión nuclear son los fragmentos atómicos que quedan después de que un gran núcleo atómico sufra una fisión nuclear. Por lo general, un núcleo grande como el del uranio, cuando es sometido a un proceso de fisión nuclear, este se divide en dos núcleos más pequeños, varios neutrones, la liberación de energía térmica (energía cinética de los núcleos) y radiación gamma. Los dos núcleos más pequeños son los productos de fisión.

Los propios productos de fisión suelen ser inestables y por lo tanto radiactivos. Esto se debe al alto contenido en neutrones en comparación con su número atómico. Debido a esto rápidamente sufren una desintegración beta lo cual libera energía adicional en forma de partículas beta, antineutrinos y rayos gamma. Por lo tanto, los eventos de fisión normalmente dan lugar a la radiación beta y gamma, aunque esta radiación no se produce directamente por el evento de fisión en sí.

Los radionúclidos producidos tienen vidas medias variables y, por lo tanto, varían en radiactividad. Por ejemplo, el estroncio-89 y el estroncio-90 se producen en cantidades similares en la fisión, y cada núcleo decae por la emisión beta. Pero ^{90}Sr tiene una vida media de 30 años, y el ^{89}Sr una semivida de 50,5 días. Así, en los 50,5 días, la mitad de los átomos de ^{89}Sr se descomponen, menos del 0,4% de los átomos de ^{90}Sr se han desintegrado, emitiendo sólo el 0,4% de la radiación beta. La tasa de emisión radiactiva es más alta para los radionúclidos de vida más corta, aunque también son los más rápidos en desintegrarse. Además, los productos de fisión menos estables son menos propensos a descomponerse en nucleídos estables, desintegrándose en otros radionúclidos, que sufren una descomposición mayor y a su vez emiten mayor cantidad de radiación.

Son estos productos de fisión de corta duración los que suponen el peligro inmediato del combustible gastado. La producción de energía de la radiación también genera un calor significativo que debe ser considerado a la hora de almacenar el combustible gastado. Como hay cientos de radionúclidos diferentes, el nivel de radiactividad inicial se desvanece rápidamente a medida que los radionúclidos de corta duración se desintegran, pero nunca cesa completamente, ya que los radionúclidos de vida más larga forman cada vez más átomos inestables [12].

2.1.6. Gestión del combustible usado

2.1.6.1. Estrategias de gestión

Con la fabricación de los elementos combustibles finaliza la primera parte del ciclo del combustible nuclear, la conocida como Front-End. Tras esta, comienzan las etapas que engloba el Back-End. Esta parte del ciclo nuclear depende del tipo de gestión de los residuos. Es decir, hay diversos procesos de Back-End, los cuales se explicarán a continuación.

Existen dos estrategias de gestión del combustible nuclear en uso actualmente. Estas dos opciones son viables económica y técnicamente, además están en continuo desarrollo y mejora de sus procesos. Estas estrategias son: Ciclo Abierto, también llamado ciclo de almacenamiento definitivo y Ciclo Cerrado o ciclo de reprocesado.

Existe otra estrategia a la hora de gestionar dicho combustible usado, la cual se encuentra en proceso de investigación y desarrollo, pero que de demostrarse su viabilidad técnica y económica supondría un gran avance en la gestión de los residuos radiactivos: Ciclo cerrado avanzado.

El uso de cada uno de ellos es variable y acorde a la complejidad tecnológica y a las necesidades de las instalaciones. En el caso de España, tal y como aparece en el 6º Plan General de Residuos Radiactivos, se instauró el ciclo abierto como método de gestión de los residuos:

- Ciclo Abierto

Esta estrategia de gestión, también llamada, estrategia de almacenamiento definitivo, parte del principio por el cual los restos de combustibles que quedan tras haber sido utilizados por el reactor para la

producción de electricidad, son considerados residuos radiactivos. Es decir, no se tiene previsto el uso del combustible gastado en procesos posteriores y se trata como deshecho.

Uno de los principales problemas de este deshecho o residuo son sus altos niveles de radiactividad. Debido a la peligrosidad de este hecho, los residuos han de ser tratados de manera especial y con fuertes niveles de seguridad. Para reducir estos niveles de radiactividad, primeramente, son almacenados en piscinas ubicadas próximas al reactor, donde son enfriados previo paso a su almacenamiento en almacenes temporales en seco.

El paso de los residuos radiactivos por almacenes temporales es necesario y fundamental. Los residuos pasan unos años en estos almacenes donde pierden niveles de radiactividad. Posteriormente a este paso, los residuos son almacenados de manera definitiva en almacenes enterrados a gran profundidad bajo tierra, en lo que se denomina un almacenamiento geológico profundo.

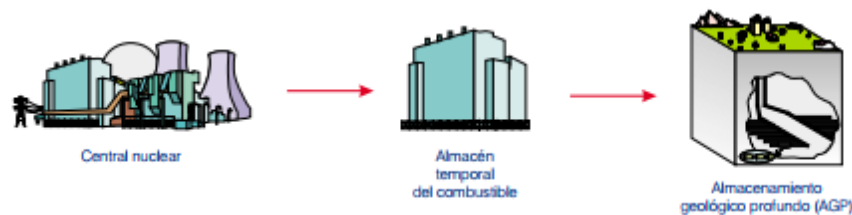
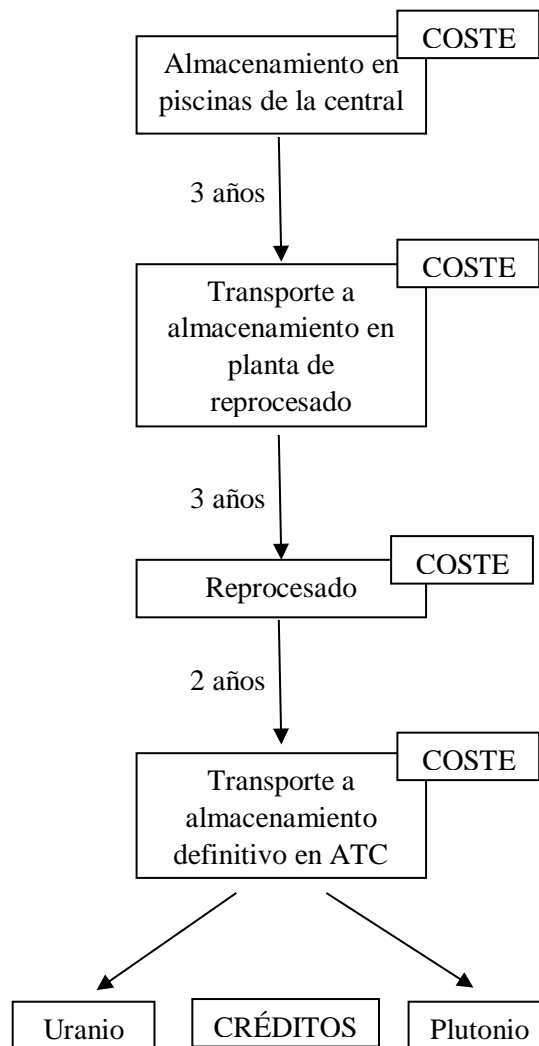


Ilustración 6: Ciclo abierto. Fuente: Enresa

- Ciclo cerrado:

La estrategia del ciclo cerrado, o de reprocesado, a diferencia del ciclo abierto, no considera el combustible restante de la operación para la obtención de energía eléctrica en el reactor como residuo. Esta estrategia, considera que el combustible usado es potencialmente reutilizable. En este caso los altos niveles de radiactividad del combustible gastado se enfocan desde otro punto de vista. Esta alta radiactividad es vista como una oportunidad de reutilización. A esto se le llama reprocesado.



El reprocesado se trata de un proceso físico-químico mediante el cual se consigue separar del combustible usado, los radionúclidos que tienen propiedades fisiles, el Uranio (90%) y el Plutonio (1,5%). Estos radionúclidos serán tratados para que puedan volver a ser usados como combustible en los reactores nucleares.

Este combustible estaría formado por óxido de uranio y óxido de plutonio y es lo que se denomina MOX.

Esta separación deja, a parte del MOX, restos que sí son considerados residuos. A diferencia del ciclo abierto, las cantidades o volúmenes de residuos generados son mucho menores, aproximadamente un 20 % menos. Estos restos están formados por productos de fisión o actínidos minoritarios, y serán vitrificados y posteriormente almacenados de forma temporal a la espera de ser gestionados finalmente en un almacén geológico profundo. De esta forma se consigue reutilizar parte del combustible irradiado además de reducir la cantidad y el volumen de los residuos a almacenar.

Las instalaciones necesarias para este modelo de gestión son: almacén temporal, planta industrial de reproceso, planta industrial de fabricación de MOX y almacén geológico profundo. (Ver Ilustración 7)

- Ciclo cerrado avanzado:

Esta estrategia de gestión persigue la transformación (transmutación) de algunos de los componentes del combustible usado, para así disminuir el inventario radio tóxico de los residuos radiactivos de alta actividad previamente al su almacenamiento definitivo.

Los componentes que forman un elemento de combustible gastado son, los conocidos productos de fisión, los actínidos y productos de activación. De todos ellos, los de mayor nivel de radiactividad son los productos de fisión de vida larga y los actínidos, que son los que determinan el riesgo radiológico.

Existen varios planes internacionales de investigación y desarrollo para llevar a cabo este proceso de transmutación sobre el combustible gastado. La transmutación es un proceso que comienza con la llamada

'separación'; una serie de complejas operaciones químicas mediante la cual se diferencian y clasifican los diferentes tipos de radionúclidos de vida larga.

La transmutación propiamente dicha se puede realizar mediante fisión o por captura neutrónica, comprobándose que es necesario un flujo elevado de neutrones de alta energía, por lo que los proyectos están encaminados a los reactores rápidos y a los sistemas accionados por aceleradores de partículas (Accelerator Driven System, ADS). Estos protones inciden sobre núcleos de un metal pesado y, mediante el proceso de espalación, se generan neutrones de alta energía. Estos neutrones inciden sobre núcleos de actínido, produciendo su transmutación por fisión y nuevos neutrones, algunos de los cuales inciden sobre núcleos de vida larga, produciendo su transmutación por captura neutrónica y convirtiéndose en isótopos estables.

Este proceso aún está en fase de investigación, por lo que la viabilidad técnica y económica no está aún garantizada y requiere de grandes inversiones difíciles de justificar por un solo país.

Las instalaciones que este proceso necesita serían: almacén temporal, instalaciones industriales de reproceso avanzado, instalaciones de fabricación de combustibles blancos de transmutación, plantas de reproceso de combustibles procedentes de la transmutación, reactores nucleares transmutadores y almacén geológico profundo.

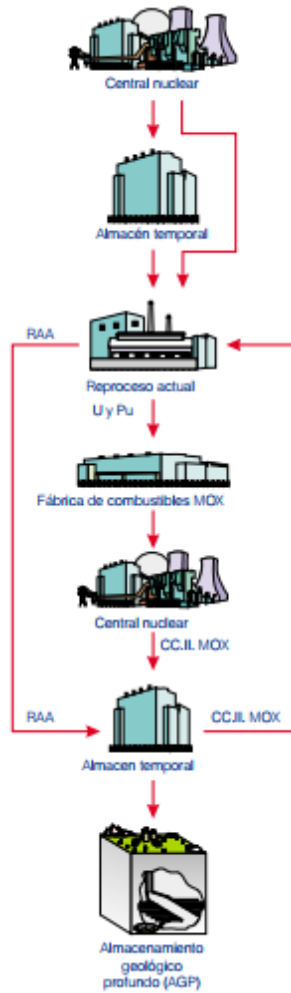


Ilustración 2: Ciclo Cerrado Convencional. Fuente: Enresa

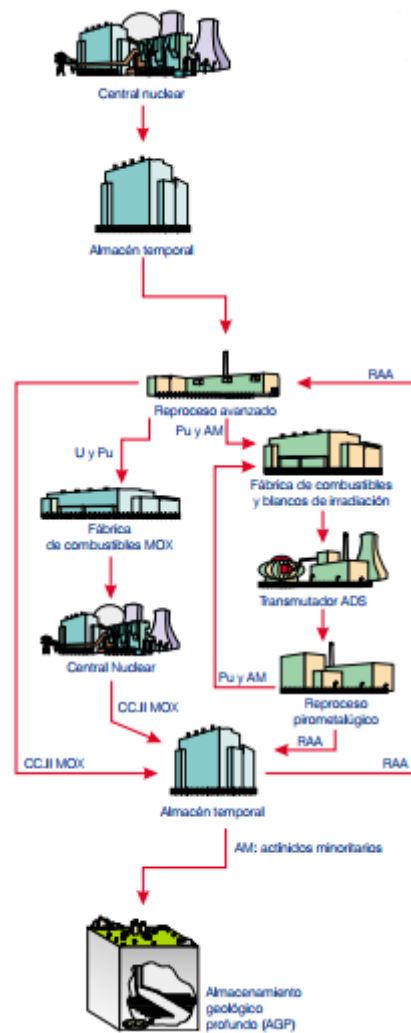


Ilustración 3: Ciclo cerrado avanzado. Fuente: Enresa

2.1.6.2. Situación internacional respecto a las estrategias de gestión de combustible

- Estados Unidos:

La estrategia de gestión de residuos nucleares elegida por el país americano fue la del ciclo abierto. A pesar de esto, Estados Unidos fue pionero a la hora de desarrollar el reprocesado del combustible usado. Sin embargo, se decidió cesar con las actividades de reprocesado debido al uso del Plutonio en armamento nuclear.

Además, Estados Unidos dispone de un proyecto de construcción de un Almacenamiento Geológico Profundo (que se explicará más adelante), aunque es un proyecto que se encuentra paralizado por problemas técnicos.

Los residuos nucleares están almacenados en repositorios temporales, denominados ATC.

El gobierno de Barack Obama, creó un programa de I+D llamado “The Blue Ribbon Comission” cuyo objetivo es examinar las opciones futuras para los desechos nucleares existentes y los futuros, tras el incompleto final de los trabajos sobre el Yucca Mountain Repository. El 26 de enero de 2012, la Comisión presentó su informe final al Secretario de Energía Steven Chu. La Comisión formuló siete recomendaciones para el desarrollo de una estrategia global a seguir. Una recomendación importante fue que "Estados Unidos debería emprender un programa integrado de gestión de desechos nucleares que conduzca al desarrollo oportuno de una o más instalaciones geológicas profundas permanentes para la eliminación segura del combustible gastado y de los desechos nucleares de alto nivel" [13].

- Francia:

Francia eligió una estrategia de ciclo cerrado y reprocesado de combustible desde el comienzo de su vida nuclear.

El combustible irradiado procedente de estos diferentes tipos de reactores ha sido reprocesado en los últimos 40 años en 3 plantas de

reprocesamiento: UP1, UP2 y UP3. La experiencia adquirida por la industria francesa ha beneficiado a otros países. A finales de 2006, se habían reprocesado más de 18.000 tHM de combustible GCR y aproximadamente 22.700 tHM de combustible LWR procedentes de Francia y otros países [22].

- UP1: Marcoule

La planta de reprocesamiento UP1 (proceso PUREX), situada en Marcoule (Valle del Ródano), inició operaciones civiles en 1965 con el reprocesamiento de combustible nuclear proveniente de los reactores refrigerados por gas (GCR) franceses y extranjeros.

A finales de 1997, el reprocesamiento de GCR había terminado en UP1 y la planta fue cerrada en 1998. La fase de cierre, incluida la eliminación de materiales nucleares, se completó en 2002 y el desmantelamiento total se está llevando a cabo actualmente [22].

- UP2 y UP3: La Hague

En 1966, una segunda planta de reprocesamiento llamada UP2-400 fue encargada en Francia, ubicada en La Hague (Normandía). Con una capacidad inicial de 400 tHM / año, esta planta fue operada para reprocesar el combustible de reactores refrigerados por gas. En 1976 se agregó un nuevo cabezal, UP2 para reprocesar el combustible de reactores de agua ligera (LWR). En 1994, UP2-400 fue mejorada para satisfacer las necesidades de reprocesamiento y fue renombrada UP2 800. En 1989, una planta adicional llamada UP3 fue encargada de reprocesar combustible de origen extranjero.

Las dos fábricas actualmente en funcionamiento en La Hague se basan en el proceso PUREX [14].

- Alemania:

Alemania cuenta con almacenes temporales de residuos, optando por una estrategia de ciclo abierto, a pesar de sus investigaciones en el reprocesado de combustible debido a su fuerte interés en la obtención de plutonio para uso armamentístico.

Además, Alemania anunció en 2011 que cesaría progresivamente toda su actividad nuclear de forma que para 2022 se hayan cerrado todas las centrales nucleares alemanas.

Para acoger todos los residuos nucleares procedentes del desmantelamiento de las centrales nucleares, existe un proyecto de construcción de un almacenamiento geológico profundo con una capacidad de 300.000 m³. Este se encuentra en una antigua mina de hierro en Konrad. La inversión se estima en unos 3.400 millones de € [15].

- Japón:

La política de gestión de combustible gastado de Japón es reprocesar, es decir, ciclo cerrado. Al principio, esto se hizo mediante el envío de combustible gastado a plantas de reprocesamiento en Francia y el Reino Unido, con los residuos de alto nivel y el plutonio separado retornando a Japón.

Japón también construyó una planta piloto nacional de reprocesamiento en Tokai-mura y, a continuación, una gran planta comercial de reprocesamiento en Rokkasho-mura que actualmente se espera que comience la operación comercial en septiembre de 2018 tras varios retrasos.

Japón inició la construcción de la planta de reprocesamiento con una capacidad de 800 tU / año en abril de 1993. La construcción de la instalación de recepción y almacenamiento de combustible se completó en 1999. La instalación es capaz de almacenar 3.000 tU de combustible gastado.

En junio de 2010, el Consejo de Ministros de Japón aprobó el Plan Básico de Energía presentado por el Ministerio de Economía, Comercio e Industria (METI) para agregar al menos 14 reactores nucleares comerciales a los actuales 54 (48,8 GWe) en 2030. El plan preveía que Japón tuviera al menos 67 reactores de potencia (68.1 GWe) en 2030. Este ambicioso plan fue criticado por poco realista antes del terremoto del 11 de marzo de 2011. Después del desastre, la Compañía de Energía Eléctrica de Tokio (TEPCO) decidió desmantelar las Unidades 1-4 de Fukushima Daiichi y cancelar los

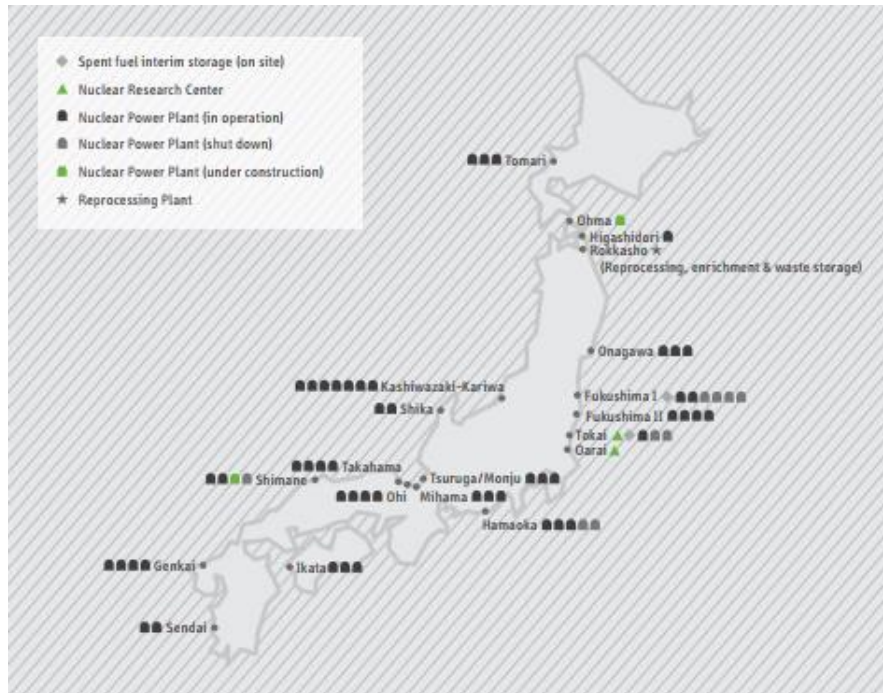


Ilustración 7: Situación de las centrales nucleares en Japón. Fuente: [24]

planes para las Unidades 7 y 8. El Primer Ministro Kan declaró que "es necesario revisar el Plan Básico de Energía [16].

- Canadá:

Todo el combustible gastado se mantiene actualmente en almacenamientos provisionales en húmedo o en seco en las centrales donde se produce. El combustible gastado descargado de los reactores CANDU se coloca en piscinas de almacenamiento especial durante varios años, con periodos de tiempo que varían de un lugar a otro y finalmente se transfiere a una instalación provisional de almacenamiento en seco en el mismo sitio.

En Canadá se utilizan tres diseños de contenedores de almacenamiento en seco: silos AECL, contenedores de almacenamiento en seco AECL MACSTOR y OPG.

La intención de los dirigentes canadienses en materia nuclear es la de apostar por el ciclo abierto mediante la construcción de un repositorio geológico. Sin embargo, Canadá ha introducido un nuevo concepto denominado “recuperabilidad” mediante el cual el combustible almacenado es monitorizado y puede ser recuperado en caso de ser

necesario. Esto se debe a que las autoridades canadienses son conscientes de las posibilidades de mejora que existen en términos de gestión final de combustible esto hace que, en caso de poder reutilizar el combustible almacenado, este pueda ser retirado del AGP para su reproceso.

Es por eso que el concepto de recuperabilidad mantenga abierta la opción al reprocesado. Los dirigentes canadienses se mostraron inicialmente preocupados acerca de las reservas de uranio, esto fue previo al posterior descubrimiento de canteras de uranio, lo cual desvió las miras del reprocesado.

2.1.6.3. Tipos de almacenamiento

El combustible usado una vez haya sido reprocesado o directamente concebido como residuo, pasa a ser almacenado. Para ello existen una serie de instalaciones encargadas de esta función. Se han ido mencionando a lo largo del documento debido a su importancia y pasarán a ser explicadas a continuación. Cabe destacar que existen dos tipos de almacenamiento claramente diferenciado, el almacenamiento temporal y el almacenamiento definitivo, ambos esenciales en el ciclo del combustible nuclear.

- Almacenamiento en húmedo:

En 1998, aproximadamente el 86% del combustible gastado almacenado en los almacenes que se encontraban fuera de la instalación donde se ubicaba el reactor, alrededor de todo el mundo, se almacenaba bajo el agua. Las piscinas o estanques de almacenamiento de combustible han existido desde los años sesenta. Sin embargo, estos estanques de almacenamiento han operado con algunos incidentes importantes en la mayoría de los programas de energía nuclear de todo el mundo.

La mayor parte del combustible gastado del mundo proviene de reactores LWR o HWR que utilizan como refrigerante agua que está sometida a altas temperaturas y altas presiones. No se esperaba que, al almacenar este combustible en agua a temperaturas y presiones más bajas, este diera problemas, lo cual la experiencia operativa ha terminado por confirmar.

El combustible usado contiene material fisible, aunque a concentraciones menores que el combustible fresco. Un peligro principal del almacenaje en húmedo es que se aumenta la posibilidad de un accidente de criticidad o también llamado excursión de potencia, ya que el agua es un moderador excelente. Un accidente de criticidad es un incremento accidental de las reacciones nucleares en cadena en un material fisible, lo cual libera una oleada de radiación por neutrones causando un peligro grave a la vida humana.

Otro peligro principal es que, si hubiera un accidente grave en el estanque de un reactor, podría ser difícil, si no imposible, dar servicio a las piscinas del reactor para asegurar que los combustibles gastados quedasen cubiertos con agua. La exposición de barras de combustible PWR gastadas podría conducir a los combustibles a un calentamiento de más de 800 °C, en cuyo punto el revestimiento de zirconio de combustible PWR no garantiza la seguridad total.

Los depósitos húmedos requieren un funcionamiento continuo de sistemas de refrigeración, filtración, limpieza y muestreo, que dependen de componentes mecánicos tales como bombas, válvulas y filtros. El control químico y de temperatura del agua de refrigeración requiere un monitoreo continuo y un muestreo. Estas operaciones producen cantidades apreciables de desechos radiactivos de bajo nivel. Tales necesidades operacionales aumentan con la cantidad de combustible en el estanque y son particularmente altas cuando las piscinas están cerca de la capacidad total. Los sistemas de estanques y los componentes mecánicos también requieren grandes insumos de mantenimiento, haciéndolos menos fiables que los sistemas pasivos de almacenamiento en seco. Estos factores generan costos operativos relativamente altos para las piscinas. Estos altos costos dieron lugar a que muchas empresas de servicios públicos y agencias nucleares nacionales llevaran a cabo estudios de I + D y viabilidad en instalaciones de almacenamiento en seco que tienden a no sufrir los inconvenientes anteriores.

Sin embargo, a día de hoy se sigue utilizando el almacenamiento en húmedo como almacén temporal. Este se refiere a las piscinas ubicadas en la propia central cerca del reactor, que son el primer receptor del combustible usado. Ahí este es enfriado previo paso a ser almacenado en seco [17].

- Almacenamiento en seco

La característica distintiva de los sistemas de almacenamiento en seco es su enfriamiento pasivo por radiación y convección del aire. A diferencia del almacenamiento húmedo, las instalaciones en las que se almacena en seco no requieren virtualmente ningún insumo eléctrico, de agua o para mantenimiento, aparte de lo requerido para el monitoreo y la vigilancia.

Esto da como resultado una fiabilidad mejorada y un funcionamiento operativo seguro durante largos períodos. La vida nominal del antiguo almacén en seco, Scottish Nuclear, era de 100 años, incluyendo un período de carga de 35 años, un período de almacenamiento de 50 años y un período de 15 años para la descarga y encapsulación del combustible antes de su eliminación. Se espera que los almacenes en seco puedan funcionar durante períodos de más de 100 años.

Una segunda característica importante de los sistemas de almacenamiento en seco es su fuerte protección contra la radiación. El combustible gastado, incluso después de 10 años de enfriamiento preliminar, sigue siendo altamente radiactivo. Los almacenes secos son por lo tanto retos ingenieriles en los que implica el blindaje masivo, comúnmente 60 a 100 cm de hormigón denso, hierro dúctil, acero o combinaciones del acero o del plomo. Esto reduce las tasas de dosis superficiales de barriles blindados de manera considerable.

Las instalaciones en seco han estado funcionando desde 1970 con relativamente pocos informes de accidentes o fallas. En 1990, una fuga de una azotea plana en el almacén seco de Wylfa permitió el ingreso de la lluvia sobre un período largo. Aunque este fallo requirió el secado prolongado y la renovación de los tubos de combustible almacenados durante varios años, el error no tuvo efecto sobre el combustible o sobre elementos esenciales del almacenamiento en seco.

Como se ha comentado anteriormente, para la mayoría de los tipos de combustibles de alta combustión, es necesario almacenar el combustible descargado en los estanques de refrigeración para permitir la desintegración de nucleótidos antes de que el combustible pueda transferirse al almacenamiento en seco. La duración requerida del período inicial de enfriamiento depende de la combustión del combustible y de la capacidad de tratamiento térmico del almacén. Para el combustible LWR de alta combustión, se requiere un enfriamiento de aproximadamente 3 años antes de que pueda colocarse en una bóveda, y 10 años de enfriamiento antes de que

pueda ser colocado en un barril. En todos los casos, los conjuntos de combustibles gastados se secan primero. Particularmente, otros son desmontados y reconfigurados, posteriormente se sellan dentro de recipientes de acero inoxidable y se colocan en el barril o bóveda exterior. Los barriles o módulos se colocan sobre losas de hormigón al aire libre o dentro de edificios tipo hangar con los lados abiertos [17].

Actualmente se utilizan tres tipos principales de almacenamiento en seco:

- Bóvedas o silos, que son grandes edificios ventilados, que contienen entre 600 a 2.000 toneladas:

Según los planes iniciales de la Scottish Nuclear para el almacenamiento en seco, la carga máxima de calor en cada bóveda de 60 toneladas era de 1 MW, con 20 bóvedas previstas. Esta es una salida de calor extremadamente grande, e indica que las bóvedas tienen una mayor capacidad de manejo de altas temperaturas, que la que tienen los barriles. El enfriamiento en las bóvedas se produce mediante la convección de aire natural, con diferencias de temperatura de aproximadamente 15 ° C entre el aire de entrada y el de salida.

Las pantallas de hormigón de 60-100 cm proporcionan blindaje ante radiaciones gamma y ante la emisión de neutrones. La tasa máxima de dosis pública en la zona perimetral, la cual consiste en un radio de 100 metros alrededor de la bóveda, se estimó en 0,8 nSv / hora, o 2,1 mSv /año [17].

- Barriles metálicos, que son cilindros metálicos sin ventilación que contienen entre 10 y 17 toneladas.

Las cargas de calor máximas en barriles de metal varían entre 17 y 27 kW, dependiendo del modelo. El enfriamiento en barriles de metal se da únicamente gracias a la radiación y convección que se realiza desde superficies exteriores con aletas: los núcleos internos en barriles de metal no son ventilados. Las temperaturas de la superficie del barril van de 10 a 20 °C por encima de la temperatura ambiente. El blindaje gamma es proporcionado por los diversos metales utilizados, incluyendo acero, hierro y plomo. Los insertos de polietileno ricos en hidrógeno en el blindaje externo proporcionan blindaje de neutrones.

La principal diferencia operativa entre los dos tipos de barriles es que los barriles de acero no tienen refrigeración por convección y son más calientes al tacto. La irradiación de insectos y bacterias y virus aéreos que entran en los conductos de ventilación de los barriles de hormigón es un aspecto de salud que rara vez se considera pero que rige las actitudes alemanas contra los barriles ventilados como se mencionó anteriormente [17].

- Barriles o módulos de hormigón ventilado de 5 a 15 toneladas.

Las cargas máximas de calor en barriles de concreto son de 22 a 24 kW cuando están completamente cargada. Las temperaturas máximas del combustible varían entre 340 °C y 360 °C, dependiendo del tipo de combustible y de la combustión. El enfriamiento en barriles de hormigón ocurre principalmente por la ventilación del aire entre el contenedor interno y el escudo exterior de hormigón. El volumen máximo de aire que fluye a través de un barril (depende del tipo) es 0,38 metros cúbicos por segundo o 825 pies cúbicos por minuto. Este aire se calienta de 20 ° a 32 ° C por encima de la temperatura ambiente, dependiendo de la temperatura ambiente. Un cierto enfriamiento también es proporcionado por la radiación y la convección del aire de la superficie exterior del barril. Las temperaturas de las superficies del barril están a unos pocos grados °C por encima de la temperatura ambiente.

El blindaje de la radiación gamma y la emisión de neutrones se efectúa por el hormigón borado, ya que el hidrógeno y los átomos de boro en el hormigón neutralizan los neutrones [17].

- Almacén Temporal Individualizado (ATI): Dicho almacén se encuentra en las propias centrales, donde se refrigeran y almacenan temporalmente los residuos provenientes del núcleo del reactor. Es un almacenamiento temporal, a la espera de ser almacenado definitivamente en otro tipo de almacén que se estudiará a continuación.

- Almacén Temporal Centralizado (ATC): Ubicado en una zona geológicamente adaptada y que cumpla con las condiciones de seguridad exigidas por la normativa. Este almacén es de mayor tamaño que los ATI's y resuelve el mayor de los problemas que estos tienen, que vienen de la mano del desmantelamiento de la central nuclear, ya que este espacio no podría ser reutilizado hasta que se les dé salida a los residuos almacenados en las piscinas.
 - Almacén Geológico Profundo (AGP): Corresponde con la parte final de la vida de los residuos, se trata de un almacén ubicado a gran profundidad en el interior de formaciones geológicas estables. Es la solución más segura y viable en la actualidad para la disposición final de los residuos de alta radiactividad.
- Diferencias entre ATI y ATC:

La diferencia más importante y deducible en un primer instante es que un ATC consiste de una única planta, ubicada fuera de las centrales nucleares, y generalmente en una ubicación céntrica al conjunto de centrales nucleares, que tiene la función de albergar todos los residuos generados en cada uno de los reactores pertenecientes a las centrales nucleares. El ATI, a su vez, es una instalación ubicada dentro del terreno propiedad de la central, y que tiene la función o el objetivo de abarcar todos los residuos generados por el reactor o los reactores pertenecientes a la central en la que se ubica.

Parece evidente, que económicamente es menos costoso la construcción de un único almacenamiento de residuos radiactivos que la construcción de varios almacenes (más pequeños y probablemente menos costosos individualmente) ubicados en diferentes puntos a lo largo de todo el país.

A parte de los costes de construcción, entran en juego los costes de mantenimiento y operación de estos almacenes. De nuevo, parece claro que es menos costoso y que abarata el coste final, el disponer de un solo almacén que mantener y operar, que varios repartidos por todo el territorio español.

Además de los costes, el riesgo nuclear se incrementa cuando se tienen varios focos de almacenamiento de residuos radiactivos. Por tanto, en temas de seguridad es mejor llevar a cabo una vigilancia selectiva y potente a un solo emplazamiento de residuos nucleares, en lugar de controlar diferentes puntos, lo cual podría ser más problemático.

“Desde un punto de vista económico, un ATC supondría una reducción del coste del sistema global de gestión temporal de los RAA y RMA, frente a la opción de almacenamiento en cada central y demás almacenes temporales necesarios.” [10]

Así como, la liberación de los emplazamientos de las centrales nucleares una vez estas se clausuren y se lleve a cabo su correspondiente desmantelamiento, para otros usos, sin restricciones. [10]

Hasta ahora, todo parecen ventajas, sin embargo, el punto más polémico y preocupante acerca de la construcción de un ATC, es sin duda el desplazamiento de todos los residuos nucleares desde las centrales en donde se producen hasta el emplazamiento situado, en principio, en un punto central a todas ellas.

Esto supone un riesgo importante que se tiene que asumir si se quiere llevar a cabo este sistema de almacenamiento de residuos. Según el VI Plan de Gestión de Residuos Radiactivos, se realizarían del orden de 2 a 3 expediciones mensuales. Esto a parte de peligroso, supone una fuente de alimento para todas aquellas asociaciones contrarias a la energía nuclear, debido a que tener circulando por las carreteras españolas, residuos radiactivos de alta actividad, no es algo que cuente con el apoyo generalizado de la población.

La solución a este problema, es la construcción o el aprovechamiento de la red ferroviaria española y realizar el transporte de estos residuos vía ferroviaria. Lo cual, mitigaría esta corriente de críticas y la presencia de residuos radiactivos en las carreteras estatales.

Los residuos, una vez extraídos del reactor, ya sea tras haber sufrido un ciclo con reprocesamiento o sin él, pasan a ser almacenados de forma temporal en las piscinas de la propia central, de esta forma los residuos se enfrían y pueden ser más manejables en el futuro. Este proceso se encuentra bajo las condiciones más altas de seguridad, tanto activas como pasivas, así como bajo la supervisión de los operarios más cualificados, por lo que se reduce al mínimo el riesgo de emisión de radiaciones radiactivas.

Una vez dichas piscinas se encuentran saturadas, deben ser renovadas, almacenando los residuos contenidos en ellas en almacenes temporales individualizado, los cuales como se ha comentado anteriormente, suelen estar situados en el mismo recinto que las centrales, haciendo fácil su transporte. Este almacenamiento puede ser en seco o en húmedo y por norma general no debe prolongarse en el tiempo más de XXXX años, es por ello que deben pasar a otro almacén previamente a la gestión final de estos residuos. Este almacén intermedio se le denomina Almacén Temporal Centralizado y tiene unas dimensiones

mayores al ATI y su duración en el tiempo es más longeva. En el caso de España, aunque se estudiará con más detenimiento más adelante, hay un proyecto de construcción de un ATC, aunque actualmente se encuentra paralizado por las autoridades gubernamentales.

En cuanto a la gestión final de los residuos, esta se realiza en lo que se llama un Almacén Geológico Profundo, un almacén bajo tierra con la máxima seguridad para almacenar los residuos hasta que mueran, que suele ser un período de aproximadamente XXXX años.

Sobre la gestión de los residuos de alta actividad radiológica, habría que destacar también una alternativa actualmente prohibida por la normativa que no es otra que la posible unificación a través de soluciones compartidas, esto sería, la construcción de repositorios multinacionales, internacionales o regionales, esto es bastante interesante sobre todo para aquellos países o territorios que no cuentan con el tamaño o las condiciones necesarias para la construcción de ATC o AGP y que se verían obligados a llegar a acuerdos con países los cuales si tienen dicha capacidad, siendo un perjuicio económico para ellos y un peligro para la sociedad ya que muchas veces el transporte de estos residuos suele ser el punto más débil de toda la cadena nuclear.

2.1.6.4. Almacenamiento Geológico Profundo (AGP)

Este tipo de almacenamiento, es la apuesta internacional como la solución definitiva de los residuos de alta radiactividad. Está reconocida como la alternativa más viable tanto técnicamente como en nivel de seguridad. La gran característica de este tipo de almacenamiento, tal y como indica su nombre, es la profundidad. Los residuos radiactivos se confinan bajo tierra en formaciones geológicas, donde permanecen aislados hasta el final de sus vidas útiles. El almacenamiento geológico profundo (AGP), cuenta con una serie de características relativas a la estabilidad, así como un espesor y unas propiedades que garanticen la ausencia de vías de escape de radiación, así como una gran capacidad de retención. Esta capacidad de confinamiento y aislamiento está complementada con una obra de ingeniería pionera, mediante la cual se colocan un sistema de barreras en torno a los residuos de alta actividad. A este se le llama: sistema multi-barrera.

Para que esta fuera adoptada como la solución más viable, hubo que valorar las demás opciones. Para ello, experimentos de la más alta complejidad fueron

planteados a cabo por científicos e ingenieros. Uno de estos experimentos fue la posibilidad de enviar al espacio los residuos radiactivos, sin embargo, el mayor inconveniente se encontraba en el lanzamiento de estos al espacio. La sola idea de que uno de estos pudiera fallar hizo que finalmente se descartara dicha opción.

Otra de las variantes propuestas fue la de ubicar los residuos en el fondo de las fosas oceánicas, próximas a zonas de subducción de la corteza marina. El inconveniente encontrado fue la complejidad del transporte de los residuos hasta la zona (se trataba de un proceso extremadamente lento) y la incapacidad de mantener un control y de monitorizar los residuos. Además, resultaba imposible garantizar que los organismos que habitan la zona no sufrieran las radiaciones de dichos residuos, dio por descartada esta otra opción. Confirmando este descarte el Tratado de Londres por el que se prohibía cualquier vertido residual al mar.

También se descartaron otras opciones como inyectar los residuos en sondeos profundos (costoso y dificultad de analizar el futuro impacto ambiental), colocación de los residuos en casquetes polares, donde por efecto del calentamiento solar estos irían progresivamente hundiéndose. En definitiva, tras el análisis de distintas opciones de almacenamiento de residuos, la más viable era el almacenamiento geológico profundo.

El gran número de yacimiento minerales existentes, así como las minas de explotación subterráneas, en las cuales los elementos eran confinados sin contacto ninguno con la atmósfera, hacen de la geosfera (corteza, manto y núcleo) un lugar ideal para almacenar residuos peligrosos. No obstante, es importante que el lugar disponga de una serie de características que garanticen la seguridad, así como las posibles emisiones de radiaciones [18].

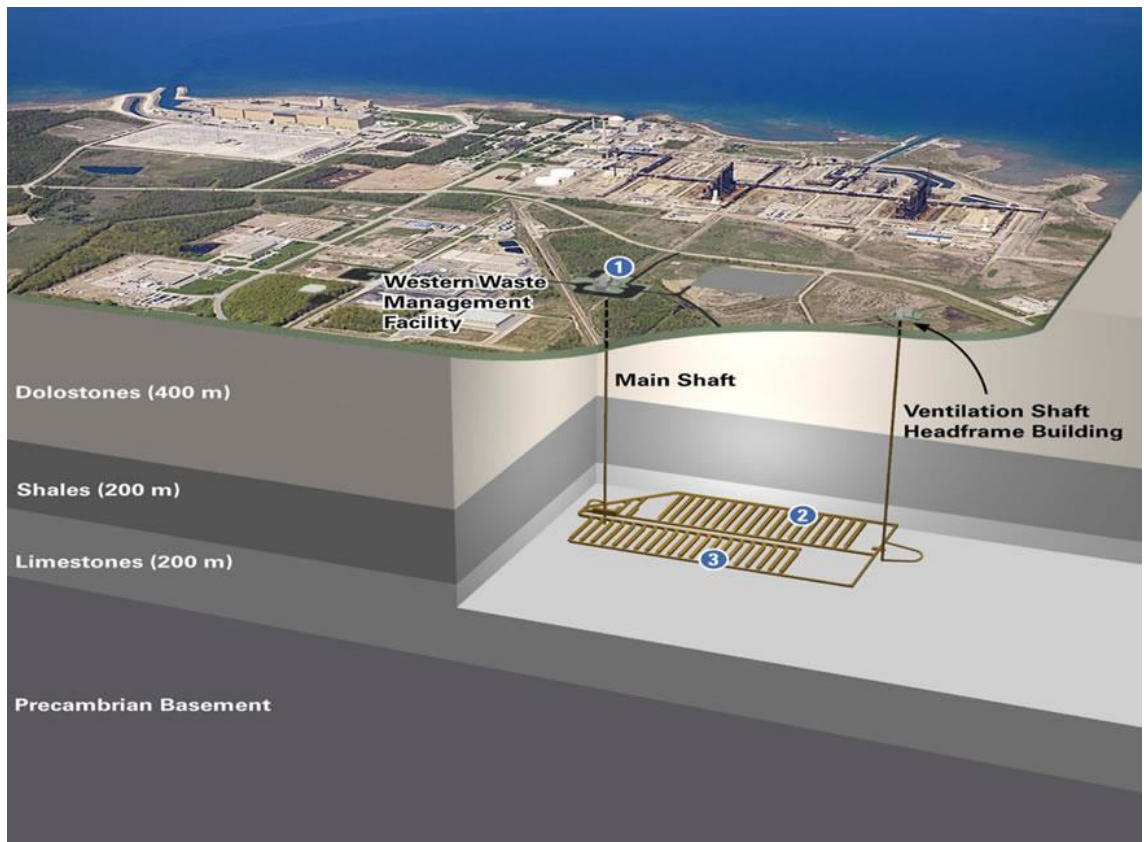


Ilustración 8: Ubicación y profundidad de un AGP canadiense.

Los depósitos para la eliminación de desechos radiactivos generalmente se basan en un sistema de barreras múltiples (multi-barrera) para aislar los residuos de la biosfera. Este sistema de barrera múltiple está comprendido por la barrera geológica natural proporcionada por la roca hospedadora del repositorio y un sistema de barrera modificado por ingeniería (EBS, por sus siglas en inglés) construido dentro del repositorio. Este principio de barrera múltiple crea una robustez global del sistema que aumenta la confianza de que los residuos serán contenidos exitosamente.

Un EBS puede comprender por sí mismo una variedad de componentes, tales como la propia forma del desecho: botes de desecho, relleno, sellos y tapones. El propósito general de un EBS es prevenir y/o retrasar la liberación de radionúclidos de los desechos a la roca hospedadora del repositorio, al menos durante los primeros cientos de años después del cierre del repositorio cuando el contenido de producto de fisión es alto. En muchos conceptos de disposición, el EBS, que opera

bajo condiciones estables y favorables de geosfera, está diseñado para contener la mayoría de los radionúclidos durante periodos muy largos.

Para que sea eficaz, un EBS debe adaptarse al entorno específico en el que debe funcionar. Se deben considerar factores tales como: el calor que se producirá por los residuos, el pH y las reacciones redox que se esperan, el flujo esperado de agua subterránea, la química local de las aguas subterráneas, las posibles interacciones entre diferentes materiales de los residuos y el EBS, el comportamiento mecánico de la roca huésped después del cierre del repositorio y la evolución de las condiciones a lo largo del tiempo. Para asegurar el correcto funcionamiento del EBS, es necesario llevar a cabo una integración, a menudo iterativa, de los datos de caracterización de los lugares donde se van a ubicar, además de datos sobre las propiedades de residuos a almacenar y datos sobre propiedades de ingeniería de materiales de barrera potenciales. Todo esto es posteriormente probado in situ y en laboratorio así como mediante el uso de modelos [19].

2.1.6.5. Transporte

La última edición del Reglamento para el transporte seguro de materiales radiactivos se publicó en 2012. Los reglamentos del OIEA han sido ampliamente adoptados en las políticas nacionales, así como por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), la Organización Marítima Internacional (OMI) Y las organizaciones regionales de transporte.

El objetivo de la normativa es proteger a las personas y al medio ambiente de los efectos de la radiación durante el transporte de materiales radiactivos, tanto rutinariamente como cuando ocurren accidentes de transporte. El principio fundamental es que la protección proviene del diseño del envase, independientemente de cómo se transporte el material. Más específicamente, la protección se logra mediante:

- Contención de contenidos radiactivos.
- Control de los niveles de radiación externa.
- Prevención de la criticidad.
- Prevención de daños causados por el calor.

Aproximadamente 20 millones de envíos de material radiactivo se realizan cada año en todo el mundo. Desde 1961, cuando se publicaron por primera vez los

reglamentos de seguridad del transporte del OIEA, es probable que más de 1.000 millones de envíos hayan sido completados con seguridad.

Los riesgos convencionales y los impactos ambientales asociados con el transporte de combustible se reducen considerablemente con la energía nuclear. Sin embargo, aunque los volúmenes de combustible requeridos son modestos, el combustible usado emite niveles muy altos de calor y radiactividad. Por lo tanto, los envíos se transportan en barricas robustas de tipo "B" de 125 toneladas, cada una de las cuales contiene hasta 24 toneladas de combustible usado.

La Comisión de Regulación Nuclear señala: "En los últimos 40 años, miles de envíos de combustible nuclear gastado comercialmente se han hecho a través de los Estados Unidos sin causar ninguna liberación radiológica al medio ambiente o daño al público". La mayoría de estos envíos se realizan entre diferentes plantas de energía propiedad de la misma empresa, con el fin de compartir espacio de almacenamiento de combustible gastado.

El transporte es una parte integral del ciclo del combustible nuclear. Hay 447 reactores de energía nuclear operables en 31 países, pero la minería de uranio se produce en sólo 30, con la mayoría de la producción en países sin energía nuclear.

Además, en el transcurso de más de 60 años de la industria de energía nuclear, se han desarrollado varias instalaciones centralizadas en varios lugares del mundo para proporcionar servicios de ciclo de combustible. La mayoría de los materiales utilizados en el combustible nuclear se transporta varias veces durante su progreso a través del ciclo del combustible.

El transporte es frecuentemente internacional y a menudo a grandes distancias, pero es un costo muy pequeño en el ciclo general del combustible.

Sin embargo, el combustible nuclear fresco, que es ligeramente radiactivo, y algunos desechos que son significativamente más, son el foco de atención significativa. Cualquier cantidad sustancial de material radiactivo es generalmente transportada por empresas especializadas.

El término "transporte" se utiliza en este documento para referirse sólo al movimiento de material entre instalaciones (es decir, a través de áreas fuera de los límites de dichas instalaciones). La mayoría de los envíos de material de combustible nuclear ocurren entre las diferentes etapas del ciclo, pero ocasionalmente el material puede ser transportado entre instalaciones similares.

Cuando las etapas están directamente vinculadas (como la extracción y la molienda), las instalaciones para las diferentes etapas suelen estar en el mismo sitio y no se requiere ningún transporte. Con muy pocas excepciones, los materiales del ciclo del combustible nuclear se transportan en forma sólida.

3. ¿Qué son los residuos nucleares?

3.1. Residuos radiactivos

Se define residuo radiactivo como: *“Cualquier material o producto de desecho, para el cual no está previsto ningún uso, que contiene o está contaminado por radio nucleídos en concentraciones o niveles de actividad superiores a los establecidos por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (MITYC), previo informe del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN).”*

La legislación que se aplica a este tipo de residuos es la siguiente:

- Ley 25/1964 sobre Energía Nuclear
- Ley 15/1980 de creación del CSN (Consejo de Seguridad Nuclear)
- Real Decreto 1522/1984, del 14 de julio, sobre la constitución de ENRESA
- Real Decreto 1899/1984, del 1 de agosto, por el que se establece la ordenación de las actividades dentro del ciclo del combustible
- Real Decreto 404/1996, del 1 de marzo, mediante el que se actualiza y modifica el Real Decreto 1522/1984 de constitución de ENRESA
- Decreto 1836/1999: Reglamento de instalaciones nucleares y radiactivas
- Ley 24/2005, sobre la creación de la entidad pública empresarial ENRESA y en el que se fija las tasas para la gestión de los residuos
- En vigor: 6º Plan General de Residuos Radiactivos, que fue aprobado en 2006

Clasificación de residuos

- Estado físico: Según el estado físico, estos se clasifican en sólidos, líquidos o gaseosos. Los residuos reciben un tratamiento o acondicionamiento diferente en función del estado físico en el que se encuentren.
- Radiación emitida: Los residuos radiactivos contienen una serie de radionúclidos los cuales se desintegran de forma diferente, lo que desemboca en la emisión de diversas partículas. En función del tipo de radiación que emita el residuo estos se clasificarán en residuos α , β , o γ . Estos tres tipos de radiaciones interactúan de forma diferente con la materia lo que condiciona las barreras de protección o el manejo de los residuos.
- Período de semidesintegración: La radiactividad va disminuyendo con el paso del tiempo de forma regular. Se define como período de semidesintegración *al tiempo necesario al cabo del cual la radiactividad se reduce a la mitad*.
Según este criterio, los residuos se pueden clasificar de la siguiente manera:
 - Residuos de vida corta: Aquellos cuyo período de semidesintegración es inferior a 30 años. Estos residuos también son conocidos como Residuos de Baja y Media actividad (RBMA).
 - Residuos de vida larga: Aquellos que, a diferencia de los anteriores, su período de semidesintegración es mayor de 30 años. También se les conoce como residuos de alta actividad (RAA).
 - Actividad específica: Definida como *actividad por unidad de masa o volumen de material radiactivo*. El criterio recientemente definido es el que determina el método de protección, manejo y transporte de los residuos radiactivos.
 - Radio toxicidad: Define lo peligroso que es el residuo desde el punto de vista biológico. La Comisión Internacional de Protección Radiológica (CIPR), el Organismo Internacional de la Energía Atómica (OIEA) y el Organismo de Energía Atómica de las Comunidades Europeas (EURATOM) recomiendan

clasificar los radionúclidos en cuatro grupos atendiendo a esta propiedad:

- Grupo A: Radionúclidos de mayor toxicidad (ej. Plutonio-239)
- Grupo B: Radionúclidos de toxicidad alta-media (ej. Estroncio-90)
- Grupo C: Radionúclidos de toxicidad media-baja (ej. Fósforo-32)
- Grupo D: Radionúclidos de baja toxicidad (ej. Tritio o también el Uranio natural)

Base a partir de la cual se fijan los criterios de seguridad y protección que las centrales e instalaciones están obligados a cumplir.

Origen de los residuos radiactivos: A continuación, se muestra una tabla con el contenido resumido:

Fuente origen	Descripción	Actividad
Reactores Nucleares	Emisiones de radiación γ , Plutonio...	Alta, media y baja
Industrias militares y de reprocesamiento	Tritio, fuentes encapsuladas...	Alta y media actividad
Instalaciones Industriales	Ropas y herramientas contaminadas, sólidos...	Baja Actividad
Aplicaciones de radioisótopos en medicina o investigación	Radionúclidos emisores de radiaciones β y γ . Frascos, materiales y equipos contaminados...	Baja actividad

Tabla 5: Origen de los residuos radiactivos

4. Explicación de términos importantes

4.1.Reprocesado

El reprocesamiento se refiere a la separación química del uranio fisionable y del plutonio del combustible nuclear irradiado. Históricamente, todo comienza con el Proyecto Manhattan de la Segunda Guerra Mundial, mediante el cual se desarrolló la tecnología de reprocesamiento. El objetivo de este proyecto era la investigación para construir la primera bomba atómica.

Con el desarrollo de la energía nuclear comercial después de la guerra, el reprocesamiento se consideró necesario debido a una supuesta escasez de uranio más adelante se encontraron nuevas minas de uranio.

Una característica clave, casi única, de la energía nuclear es que el combustible usado puede ser reprocesado para recuperar materiales fisionables y fértiles con el fin de proporcionar combustible fresco para las centrales nucleares existentes y futuras. Varios países europeos, Rusia, China y Japón tienen políticas para reprocesar el combustible nuclear usado, aunque las políticas gubernamentales en muchos otros países aún no han llegado a ver el combustible usado como un recurso en lugar de un desperdicio.

Gracias al reprocesado del combustible usado puede recuperarse plutonio no utilizado, además de uranio de los elementos combustibles gastados y por lo tanto se consigue cerrar el ciclo del combustible, obteniendo de un 25% a un 30% más de energía que la que se obtendría del uranio original sin que este sea reprocesado. Una razón también a tener en cuenta, es que el reprocesado de combustible usado consigue reducir el volumen de material a ser eliminado como desecho de alto nivel. Esta reducción es de aproximadamente un quinto de los residuos que se obtendría en un ciclo abierto, es decir, sin reprocesado. Además, el nivel de radiactividad en los residuos procedentes del reprocesado es mucho menor y después de unos 100 años cae mucho más rápidamente que en el combustible utilizado en sí.

Todas estas consideraciones se basan en los reactores de potencia actuales, pero los reactores de cuarta generación, reactores de neutrones rápidos, serán una realidad en el corto plazo. Este hecho, hace que la situación cambie radicalmente, de forma que ya no solo es que se pueda reprocesar el combustible usado proveniente de los reactores nucleares, sino que también se podrán aprovechar las grandes reservas de uranio empobrecido (de plantas de enriquecimiento,

alrededor de 1,5 millones de toneladas en 2015). La minería de uranio será mucho menos significativa.

Otro cambio importante se relaciona con los desechos. En la última década, el interés en la recuperación de los actínidos de larga vida ha aumentado, es decir, con plutonio, para reciclarlos en reactores rápidos para que así terminen como productos de fisión de vida corta. Esta política se basa en dos factores: reducir la radiactividad a largo plazo en los desechos de alto nivel y reducir la posibilidad de que el plutonio se desvíe del uso civil, lo que aumenta la resistencia a la proliferación del ciclo del combustible. Si el combustible usado no se reprocesa, entonces en un siglo o dos la protección radiológica incorporada habrá disminuido, permitiendo que el plutonio sea recuperado para uso ilícito (aunque no es adecuado para armas debido a los isótopos no fisionables presentes).

El reprocesado de combustible usado para recuperar uranio y plutonio evita el desperdicio de un valioso recurso. La mayor parte del producto recuperado está compuesto por aproximadamente el 96% de uranio, de los cuales menos del 1% es el U-235 fisible (a menudo 0.4-0.8%) y alrededor del 1% es plutonio. Ambos se pueden reciclar como combustible fresco, ahorrando un 30% del uranio natural requerido de otro modo. El RepU (uranio reprocesado) es principalmente valioso por su potencial fértil, siendo transformado en Pu-239 que puede ser quemado en el reactor donde se forma [20].

El principal proceso histórico y el usado actualmente es Purex, un proceso hidrometalúrgico. Con él, todos los aniones de actínido (especialmente Uranio y Plutonio) se recuperan juntos. El combustible usado contiene una amplia gama de nucleídos en estados de valencia variables.

La composición del uranio reprocesado (RepU) depende del enriquecimiento inicial y del tiempo que el combustible ha estado en el reactor, pero es en su mayoría de ^{238}U . Normalmente tendrá menos de 1% de ^{235}U y también cantidades menores de ^{232}U y ^{236}U creadas en el reactor, como productos fisiles, los cuales se consideran residuos.

El ^{232}U , aunque sólo en trazas, tiene nódulos secundarios que son fuertes emisores de radiación gamma, lo que hace que el material sea difícil de manejar. Sin embargo, una vez en el reactor, ^{232}U no es un problema (captura un neutrón y se convierte en el isótopo fisible ^{233}U).

El isótopo ^{236}U es un absorbente de neutrones presente en cantidades mucho mayores, típicamente 0,4% a 0,6%. Lo que significa que si el uranio reprocesado se utiliza para combustible fresco en un reactor convencional, debe enriquecerse

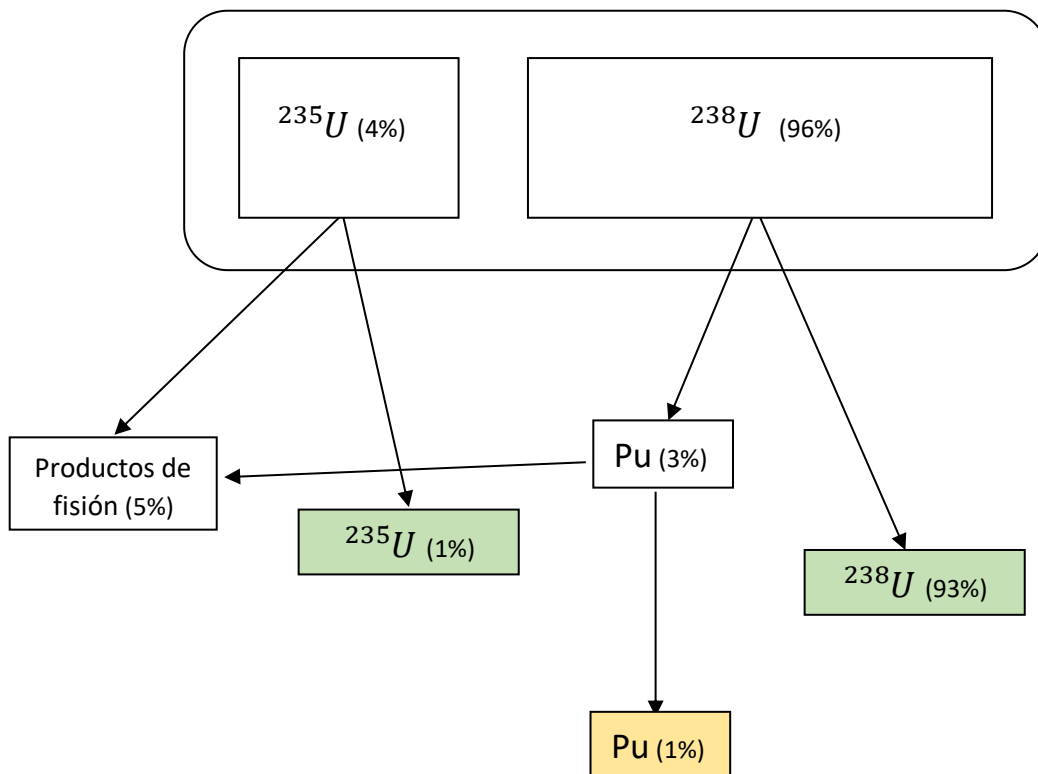
más de lo que se requiere para el uranio natural. Por lo tanto, el RepU como combustible de baja combustión es más probable que sea adecuado para re-enriquecimiento, mientras que de combustible de alta combustión se utiliza mejor para la fabricación de combustibles de mezcla o MOX.

Los otros isótopos de uranio menor son ^{233}U (fisible), ^{234}U (del mineral original, enriquecido con ^{235}U , fértil) y ^{237}U (emisor de radiación). Ninguno de estos afecta al uso del manejo del uranio reprocessado significativamente.

En el futuro, las técnicas de enriquecimiento con láser pueden ser capaces de eliminar estos isótopos.

El plutonio resultante del reprocessamiento tendrá una concentración isotópica determinada por el nivel de combustión del combustible. Cuanto más alto sean los niveles de combustión, menos valor de concentración de plutonio, debido a la proporción creciente de isótopos no fisibles de plutonio y por tanto al agotamiento de sus isótopos fisibles.

La mayor parte del plutonio separado se usa casi inmediatamente en combustible de óxido mixto (MOX).



- : 65% de Plutonio fisible para combustible MOX
- : Uranio reprocesado listo para ser reciclado

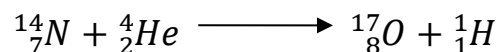
Fuente: [21].

4.2. Transmutación

La transmutación nuclear es un método artificial de transformación de un elemento/isótopo en otro elemento/isótopo, sin el cual el campo de la radioquímica se limita a sólo la radioactividad natural.

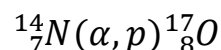
Los átomos estables pueden ser transformados en átomos radiactivos por bombardeo con partículas de alta velocidad. En los primeros estudios experimentales, se utilizaron partículas alfa de alta velocidad de ^{214}Bi (conocidas como radio C).

En 1919, Lord Rutherford y sus colaboradores del laboratorio de Cavendish en Cambridge llevaron a cabo la primera reacción nuclear entre las partículas alfa y el nitrógeno que es dada por:



En esta reacción, un núcleo de nitrógeno reacciona con un núcleo de helio de alta velocidad para formar dos nuevos núcleos de ^{17}O y un protón. Esta reacción demostró la posibilidad de convertir un elemento en otro, un largo sueño de alquimistas.

La desintegración radiactiva natural y la transmutación nuclear producen nuevos átomos, pero con una diferencia, la segunda implica bombardear los núcleos en cuestión con una partícula de alta velocidad. La reacción anterior se puede abreviar como:



El núcleo reactivo se escribe primero y luego el paréntesis seguido por el núcleo resultante. El paréntesis contiene la partícula que reacciona y la partícula expulsora, con la primera partícula reaccionante seguida por la coma y luego la partícula expulsora.

5. ANÁLISIS ECONÓMICO DE LOS DIFERENTES MÉTODOS DE GESTIÓN DE RESIDUOS:

5.1. Análisis comparativo de ambos sistemas de gestión, partiendo de un caso general:

Este estudio se realizará a partir de los datos y del modelo que se explica en el documento *The economics of the Back-End of the Nuclear fuel cycle* de la OECD. Los resultados mostrados posteriormente pertenecen al estudio realizado y explicado en el artículo *Spent Nuclear Fuel Management: Levelized Cost of Electricity Generation and Analysis of Various Production Scenarios*.

El actual escenario energético mundial es el resultado de diversas tendencias socioeconómicas que conducen a una creciente demanda de recursos y consumo de energía per cápita.

Debido a esto, es necesario desarrollar una reestructuración global de la energía que cambie significativamente los patrones actuales de generación y consumo de energía, fomentando el desarrollo sostenible.

Desde comienzos de siglo, se ha discutido el actual modelo del mix energético, el cual está basado en combustibles fósiles, como el petróleo, el carbón y el gas natural. Hoy en día, las limitaciones de este modelo son incuestionables desde el punto de vista económico ya que estas tienen un alto precio energético, social al provocar desigualdad y pobreza energética, así como limitaciones ambientales teniendo estas implicaciones adversas para el medio ambiente.

Para garantizar la sostenibilidad futura en el mundo energético es importante solventar las limitaciones anteriormente comentadas, para ello existen soluciones alternativas a los combustibles fósiles, tales como las famosas energías renovables. Pero hay otro tipo de energía a tener en cuenta, como es la energía nuclear. Esta es fundamental para garantizar que se satisface el reciente aumento de la demanda de electricidad y, al mismo tiempo, reducir las emisiones de dióxido de carbono en el ambiente.

En lo que respecta a la energía nuclear, es necesario tener en cuenta otros aspectos, como la tecnología y la proliferación nuclear, y evaluar todas las opciones del ciclo del combustible nuclear para desarrollar una estrategia nacional económicamente, ambientalmente y socialmente sostenible. La gestión de residuos siempre ha sido el punto clave en todas las discusiones sobre la energía nuclear. Por lo tanto, es absolutamente esencial hacer un plan adecuado a largo plazo sobre cómo manejar el combustible usado. En la actualidad existen dos opciones posibles: el ciclo abierto, que consiste en disponer directamente los conjuntos de combustible nuclear usados en un depósito geológico profundo (AGP) y el ciclo cerrado, en el que el combustible nuclear gastado es reprocesado para recuperar materiales fisionables y fértiles los cuales se reciclan con el fin de reducir el consumo de combustible nuevo y reutilizar el antiguo.

Ambas opciones implican que, antes de la gestión final del producto de desecho ya sea en almacenamiento definitivo para ciclo abierto, o el reprocesado para ciclo cerrado, los conjuntos de combustible usados necesitan ser tratados y almacenados en una instalación de almacenamiento provisional y además ambos requieren de un almacenamiento geológico profundo (AGP).

Aunque actualmente las únicas tecnologías técnicamente y económicamente viables son las dos comentadas, se está investigando una posibilidad futura: el ciclo cerrado avanzado, en el que se introducen reactores rápidos, mientras que, al mismo tiempo, se mejora el reprocesamiento. Esto también permite el multi-reciclado de materiales fisionables y fértiles y el cierre completo del ciclo del combustible. Sin embargo, aun así, se necesita también un AGP para administrar y eliminar los actínidos y productos de fisión residuales.

Todas las estrategias de back-end requieren un AGP en la etapa final del ciclo del combustible. Sin embargo, existen diferencias significativas en los costes asociados a cada estrategia, derivados de dos influencias principales: la reducción del volumen necesario y la densidad energética.

Para el ciclo cerrado, el volumen requerido para el AGP es aproximadamente 1/5 del volumen de AGP de ciclo abierto, pero teniendo en cuenta la densidad de energía, los costes de AGP para el ciclo cerrado representan aproximadamente el 25% de los costes de AGP para el ciclo abierto [22].

Se sabe que uno de los costes con más peso dentro del sistema de ciclo cerrado es el que está relacionado con el reprocesamiento. Mientras que, para el caso del ciclo abierto, el coste que más influye es el de la construcción del AGP.

Tras haber analizado varios estudios, [23] [24] [22], la conclusión de todos ellos es aproximadamente la misma, y es que la variación de los costes entre ambos ciclos, abierto y cerrado es de casi el 10%.

La variabilidad de estos costes con el tiempo hace que sea fundamental para tomar una decisión que se sostenga en el largo plazo sobre qué sistema utilizar, realizar un análisis de la tendencia de los costes involucrados. Según algunos estudios internacionales, se estima que el costo de la creación de una AGP para el ciclo abierto está aumentando. Esto se debe principalmente a los requisitos recién identificados sobre la AGP, mayores niveles de seguridad, requerimientos de diseño...

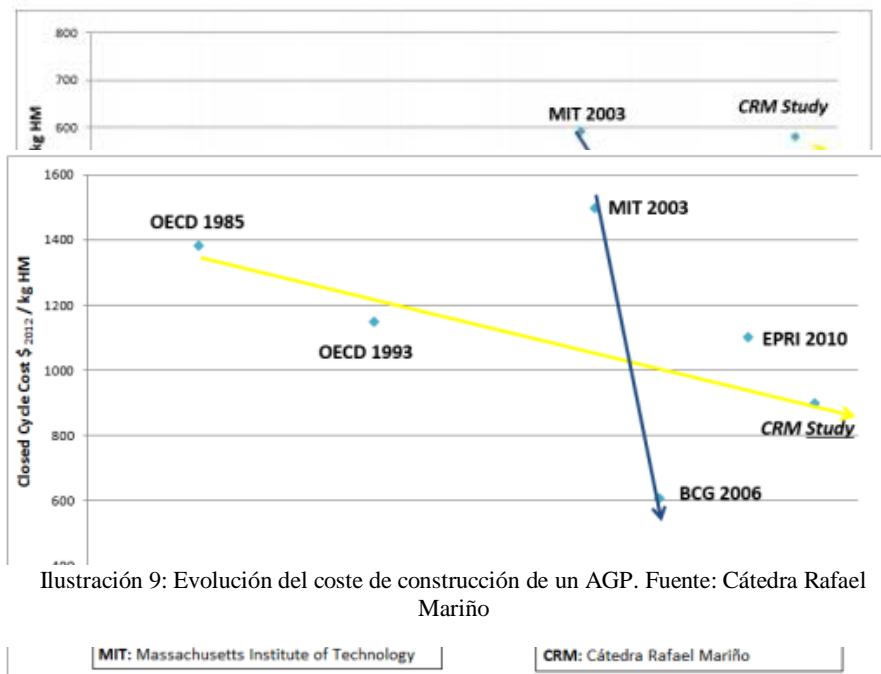


Ilustración 10: Evolución del coste de implantar el Ciclo Cerrado. Fuente: Cátedra Rafael Mariño

Por otra parte, los costes asociados al ciclo cerrado parecen estar decreciendo. Esto se debe al desarrollo y mejora de los procesos. Además, el coste del uranio tiene una tendencia alcista, favoreciendo el uso del ciclo cerrado ya que consume menos cantidad de uranio al reutilizar el usado.

A pesar de la insistencia desde las autoridades europeas en la elección por parte de los países miembros sobre qué sistema de gestión van a utilizar, aún quedan países que no se han aclarado sobre el tema en cuestión. España es uno de estos países. Es por ello que, para tomar una decisión de tal calibre, es importante realizar un estudio

detallado sobre las dos alternativas. Actualmente, la herramienta más usada para comparar diferentes tecnologías o procesos es el comúnmente denominado LCOE (Levelized Cost Of Electricity), el cual, si se adapta, puede utilizarse para comparar ambos sistemas de gestión de residuos radiactivos.

Como se vio anteriormente, existen dos partes diferenciadas en el ciclo del combustible nuclear: *front-end* y *back-end*. Al estar analizando la gestión de combustible usado, toda la parte de *front-end* es irrelevante e igual para ambos sistemas. Solo la tendremos en cuenta en el coste del reprocesado para el cálculo del coste del ciclo cerrado, ya que al reprocesar se utiliza menos cantidad de uranio natural, afectando esto al coste.

Para entender un poco mejor los costes asociados a cada sistema de gestión, se procederá a explicar en detalle cuales son las partes diferenciadas de cada uno para así poder asignar los costes.

- Ciclo abierto: Una vez el combustible se saca del reactor, donde ha sido utilizado para generar calor y así obtener energía eléctrica (mediante previo calentamiento de agua y posterior paso por turbina), este pasa a ser almacenado en las piscinas de la propia central nuclear, donde son enfriados y tratados antes de ser almacenados de forma definitiva en un AGP. Debido a que no hay proyectada ninguna construcción de un AGP en España, este debería de ser almacenado en un ATC o en ATIs hasta la construcción del repositorio de residuos bajo tierra que sirve como parte final del proceso. Por tanto y a modo de resumen, los pasos son los siguientes: Del reactor a la piscina, de la piscina a un ATC o ATI y de estos al AGP.
- Ciclo cerrado: el combustible irradiado se almacena en las piscinas de la central, tal y como en el ciclo abierto, una vez este es enfriado se procede a ser reprocesado. En el caso español, al no existir centrales de reprocesamiento de residuos radiactivos, estos deberían ser enviados a reprocesar al extranjero. Una vez este es reprocesado se obtendría por un lado residuos en forma de vidrios (mucho más compactos) y por otro lado el uranio reprocesado y plutonio, los cuales se usan para producir MOX. Resumen: Del reactor a la piscina, de la piscina a la central de reprocesado y de aquí, parte va a un AGP, ATC o ATI y parte va de nuevo al reactor para ser reutilizado.

Por tanto, los costes que se utilizan en LCOE para calcular el coste del *back-end* son:

- Coste de Inversión: Coste de la inversión inicial en cada una de los activos necesarios para el correcto funcionamiento del sistema. Se mide en €.

- Coste de Desmantelamiento: Coste de desmantelar el activo una vez haya llegado el fin de su vida útil. Se mide en €.
- Coste de Operación y Mantenimiento: Los costes relacionados con el normal funcionamiento de la central, así como del mantenimiento de esta durante sus años de vida útil. Al depender del número de años que los activos pueden funcionar, este se mide en €/año.
- Coste de Transporte: Coste de transportar los residuos nucleares de un activo a otro, también se mide en €/año.

Para calcular el coste del *back-end* existen tres factores a tener en cuenta, los cuales luego pueden personalizarse y ajustarse al tipo de análisis que se esté realizando, esto se verá más adelante cuando se personalice el cálculo del LCOE para el caso español:

1. Factor de recuperación de capital (f_{CRF}): Este factor se utiliza para convertir cada costo en una corriente de pagos iguales durante la vida operativa de la planta nuclear, ya que es el período de tiempo en que se producen los beneficios. La fórmula del f_{CRF} se presenta en la ecuación (1). Donde i es la tasa de descuento y N es la vida útil de la central nuclear.

$$f_{CRF} = \frac{i(i+1)^N}{(i+1)^N - 1} \quad (1)$$

2. Factor de descuento (f_d): Es el factor por el que los costes de inversión y de cierre se deben multiplicar para obtener el valor actual. El f_d se puede obtener como se muestra en la ecuación (2). Donde t_0 es la variación de tiempo que va desde que la planta nuclear comienza a funcionar hasta que los activos encargados del *back-end* comiencen a operar.

$$f_d = \frac{1}{(1+i)^{t_0}} \quad (2)$$

3. Factor de conversión (f_ϵ): Este factor se aplica a los costes que, en lugar de ser un gasto único, dependen del tiempo de funcionamiento de la instalación. Calcula los costos totales de O & M y transporte durante la vida operativa de la instalación. Donde i es la tasa de descuento y N la vida útil de la instalación:

$$f_\epsilon = \frac{(1+i)^N - 1}{i(1+i)^N} \quad (3)$$

El LCOE para el *back end* se puede calcular como la suma de los costes parciales aplicando los factores anteriormente expuestos, tal y como se muestra en la ecuación (4):

$$LCOE_{backend} = \sum_k (Inversión_k + Desmantelamiento_k) f_{CRF} f_d + (O\&M_k + Transport_k) f_{CRF} f_{\Sigma k}$$

- Conclusiones:

Como se ve en el análisis de los resultados, la capacidad tiene una gran influencia en los costos de las diferentes estrategias de back-end.

- Según los resultados del LCOE para las estrategias analizadas, se puede obtener la primera conclusión sobre la capacidad de producción de energía nuclear en diferentes países. La variación del LCOE entre el primer y segundo puntos analizados (25 y 75 TWh al año) implica que se experimenta una mayor disminución de costos en países con una pequeña producción de energía nuclear en comparación con los que tienen una producción más alta, cuyos costos experimentan una caída mucho menos pronunciada, a medida que aumenta la producción eléctrica.
- Hoy en día, España tiene una producción de 57 TWh al año, lo que implica que los costes se sitúan en una pendiente muy decreciente. Debido a esto, un aumento en la producción de energía nuclear debería conducir a un ahorro de costes considerable.
- En la actualidad, el escenario más realista es considerar una tasa de descuento del 0%. A partir de los diferentes cálculos realizados para diversas vidas operativas de la planta nuclear (40, 60 y 80 años), se puede concluir que la disminución en el coste para las centrales nucleares con vida operativa de 40 a 60 años es más significativa que las que tienen una vida útil de 60 a 80 años.
- En el caso español, las diferencias entre el ciclo abierto y los costes de ciclo cerrado son inferiores al 8% (más adelante se explicará y se entrará en más detalle) lo cual no es lo suficientemente relevante como para tomar una decisión basada sólo en los aspectos económicos. El front-end (obtención de combustible nuclear fresco) y el back-end (gestión del combustible nuclear usado), representan una pequeña fracción

del costo de generación de electricidad nuclear (entre 10% y 16%), siendo el back-end el menos significativo 5%)

5.2. Aplicación del LCOE al caso español

Para aplicar el LCOE al caso español, se utilizará y analizará el documento *Gestión del combustible nuclear gastado. Análisis del caso español*.

5.2.1. Caso español

Desde que se descubrió la fisión nuclear en 1938 hasta la actualidad, los avances en esta materia han sido asombrosos, quizás a veces demasiado rápidos y sin la concienciación necesaria, lo que se tradujo en accidentes que pudieron ser evitados.

Debido a ello, y con el fin de mejorar la seguridad y concienciación de la sociedad acerca de la energía nuclear y su uso como combustible se han llevado a cabo numerosos avances en materia de seguridad y tecnología, así como en estrategias a la hora de la gestión de residuos, la cual se podría considerar como la parte más crítica del mundo nuclear.

Las centrales operativas en el país español destinan su combustible gastado a ser almacenado en las piscinas temporales integradas dentro de las propias centrales nucleares. Esta solución tiene fecha de caducidad, la cual se acerca a la actualidad con una velocidad endiablada, esto se debe a que las piscinas se están saturando y no hay espacio para más combustible gastado, a pesar de que recientemente se acometió la sustitución de los bastidores antiguos por otros más compactos aumentando la capacidad de estos. Además, ante esta situación de saturación, la central nuclear de Trillo, decidió construir unos contenedores metálicos alojados en un almacén en seco, de donde serán transportados más adelante.

De aquí en adelante, las necesidades de espacio vienen marcadas por el desmantelamiento de la central nuclear de José Cabrera y su correspondiente descarga de combustible y por lo ya comentado de la saturación de las piscinas de almacenamiento temporal existentes en el panorama nacional.

En cuanto a la gestión final de los residuos, se lleva investigando desde 1985 la posibilidad de construir un almacenamiento definitivo en profundidad. Para ello se han llegado a las siguientes conclusiones:

- Análisis de las posibles ubicaciones del almacén geológico.
- Realización de diversos diseños conceptuales.
- Desarrollo de ejercicios de Evaluación de la Seguridad de los diseños conceptuales.
- Adaptación de los planes de I+D.

Además, en España se ha llevado a cabo en los últimos años, grandes avances en la investigación de la gestión de residuos mediante el método de separación y transmutación, sin embargo, existen numerosos inconvenientes en la actualidad (inconvenientes físicos con fácil solución), que hacen que España no pueda crecer en este ámbito sin la ayuda internacional.

La línea de estrategia marcada en España se centra en el almacenamiento temporal, ya que es el punto crítico debido a la ya mencionada saturación del almacenamiento actual. Por tanto, la solución encontrada se centra en dicho almacenamiento temporal con la construcción de un ATC. Solución que solventaría los problemas de espacio actuales y otorgaría tiempo para la investigación y el desarrollo de la solución para el almacenamiento final. Es decir, como ya dijo alguien, “vayamos por partes”. El objetivo principal es dar cabida temporal a todos los residuos que generamos y que nos llegan del reprocesado encargado a otros países, una vez solucionado este problema, España se encuentra con el tiempo necesario para elaborar la mejor solución a largo plazo para los residuos de alta radiactividad.

5.2.2.1. Actividad nuclear en España

En España existen a día de hoy seis centrales nucleares en activo, dos de ellas cuentan con dos reactores nucleares en lugar de uno, haciendo un total de ocho reactores nucleares, con una potencia instalada total de 7850,6 MWe.

Para realizar una estimación de la cantidad de combustible nuclear total que es necesario gestionar, es imprescindible conocer el valor de ciertos datos, que son:

- Cantidad de combustible nuclear almacenado actualmente en las piscinas de las centrales nucleares

- Las previsiones de consumo de las centrales nucleares españolas desde la fecha hasta su cierre previsto

Existen además una cantidad de residuo que por diversos motivos ya explicados hubo que mandarlos a reprocessar al extranjero, concretamente a Inglaterra y a Francia, pero estas cantidades son muy pequeñas en comparación con el resto además están ya reprocessadas, por lo que solo afectarían al almacenamiento final, por lo que su influencia en el coste final es ínfima y se descarta en el análisis.

5.2.3. Caso del ciclo cerrado

En el análisis que se realizó, se tienen en cuenta diversos costes. Estos costes son los relacionados con el transporte, el reprocessado de residuos y el almacenamiento de vitrificados. En el caso del ciclo cerrado, este trae consigo el aprovechamiento de parte de los residuos generados por los reactores nucleares. Este aprovechamiento se traduce en un beneficio económico, en el análisis, el autor los denomina *créditos del uranio* y *créditos del plutonio*. Se explicarán cómo se han calculado algunos de estos costes, tal y como el coste de transporte y el de reprocessado, para después explicar las conclusiones a las que se llegaron en el estudio del que se habla.

- Transporte:

Aunque el transporte de residuos radiactivos tiene un excelente historial de seguridad, constituye un tema de preocupación para las comunidades, así como para el público en general, convirtiéndose a menudo en un asunto discordante para la opinión pública.

Hay tres modos de transportar los residuos radiactivos: carretera, ferrocarril y por mar, que pueden ser combinados y que, individualmente, presentan diferentes sensibilidades a las comunidades de acogida y de ruta.

El transporte de materiales radiactivos está altamente regulado, con normas estrictas de seguridad establecidas por el OIEA, o basadas en reglamento existentes tales como, los códigos de la Organización Marítima Internacional.

El principio fundamental para la seguridad del transporte se basa en el uso de contenedores de transporte, que para residuos radiactivos son barricas muy robustas que proporcionan integridad mecánica y el blindaje requerido para evitar fugas de radiación gamma, incluso en condiciones extremas de accidentes. Muchos de estos barriles también se pueden utilizar como barriles de

almacenamiento. Cada barril puede tomar una cuarta parte de la descarga anual de un reactor típico de 1 000 MW y puede pesar más de 100 toneladas, con un costo de más de 1,5 millones de dólares estadounidenses para los más grandes.

Un ciclo de combustible basado en el reprocesamiento y la reutilización de estos materiales fisionables separados requiere instalaciones suplementarias y, por lo tanto, potencialmente, medios de transporte adicionales.

A medida que las instalaciones nacionales de reprocesamiento comercial se construyen para hacer frente a todo el combustible gastado de un país, o al menos una gran parte de él, tienden a tener considerables capacidades integradas de almacenamiento intermedio. En estos casos, la necesidad de capacidad de almacenamiento centralizada se reduce y la instalación de reprocesamiento actúa como el único centro de transporte de combustible gastado de las centrales nucleares.

También para los países que utilizan las instalaciones de reprocesamiento existentes en el extranjero (caso del análisis que se está llevando a cabo), se alivia la necesidad de un almacenamiento provisional de combustible gastado a largo plazo, pero, al contrario, se necesitarían mayor cantidad de medios de transporte que desplacen el combustible gastado de las centrales hasta la planta de reprocesado.

De igual manera, los residuos altamente radiactivos producidos, de menor volumen debido a que se vitrifican, se almacenan de forma intermedia en la planta de reprocesamiento. De este modo, en sistemas de ciclo cerrado el número de patas de transporte es comparable al requerido en un ciclo de combustible abierto con una instalación de almacenamiento intermedio centralizado. El número real de envíos a un depósito final será menor, debido al menor volumen de los residuos vitrificados en comparación con el volumen del combustible gastado que ha sido reprocesado.

Sin embargo, además de HLW, la planta de reprocesamiento genera diferentes materiales que necesitan diferentes requisitos de transporte: los residuos intermedios de las partes estructurales de los elementos de combustible reprocesados que necesitan ser transportados a instalaciones de almacenamiento, el plutonio y el uranio extraído por separado que serán enviados a la planta de fabricación de combustible y el MOX fresco que será enviado a los reactores.

Los costes de transporte asociados al transporte de los residuos radiactivos a la planta de almacenamiento, reprocesamiento, planta de encapsulación o eliminación final se expresan en dólares/tHM. Los valores específicos derivados de los datos suministrados por los países miembros se dan en la siguiente figura [29].

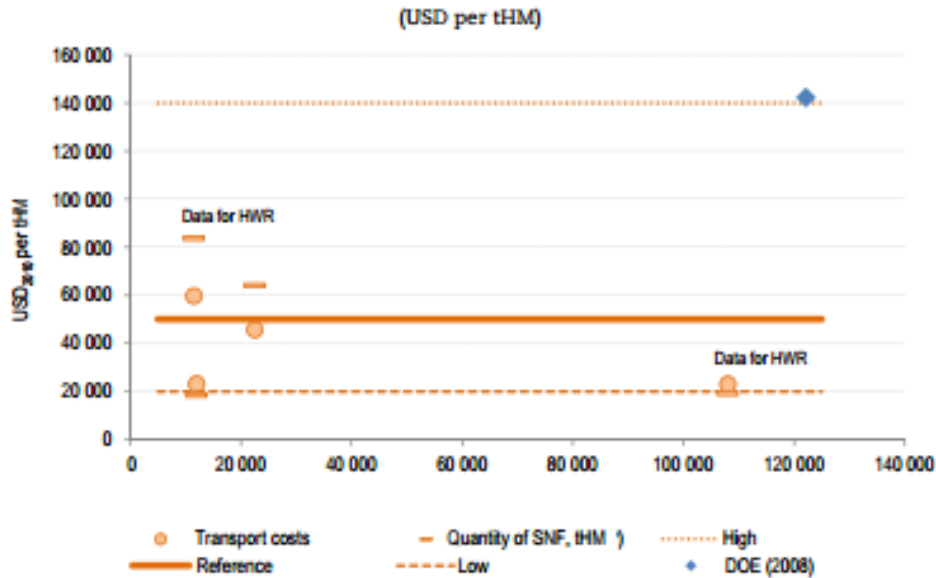


Ilustración 11: Costes de transporte de residuos nucleares. Fuente: NEA

Para el coste del transporte de los residuos vitrificados desde la planta de reprocesado al almacén temporal centralizado se utiliza el valor de \$20/kg de combustible utilizado para reprocesar [30].

- Reprocesado

Para calcular el coste de reprocesamiento, el autor del documento *Gestión del combustible nuclear gastado. Análisis del caso español* realiza una investigación acerca del precio de reprocesar en Europa según diferentes estudios los cuales fluctúan en los años en los que fueron elaborados. A partir de aquí, extrapola los datos para poder calcular el valor que tendría el coste para la fecha que se ha tomado de inicio de reprocesado, 2018. Se presenta los resultados:

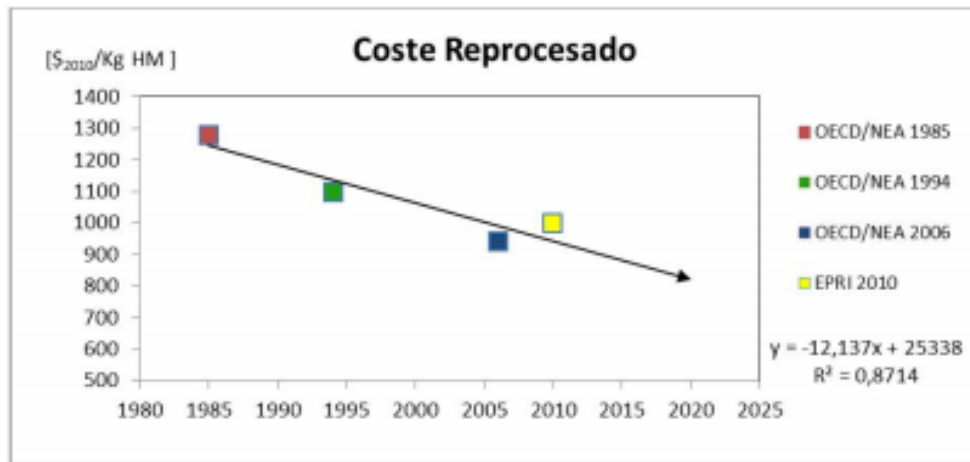


Ilustración 12: Coste de reprocesado según diferentes estudios. Fuente: [20]

Según esta gráfica, el coste de reprocesado para el año 2018 es de: 845,5 \$/kgHM.

5.2.4. Resultados del estudio

Se ha explicado y desgranado el modelo que se utilizó en el análisis llevado a cabo en el documento *Gestión del combustible nuclear gastado. Análisis del caso español* para calcular cada uno de los costes asociados a los dos sistemas de gestión de residuos: ciclo abierto con almacenamiento definitivo y ciclo cerrado con reprocesamiento del combustible nuclear gastado. Los resultados que se obtuvieron en ese estudio fueron los siguientes:

Para el ciclo cerrado, es decir, el sistema de gestión en el cual se reprocesa el combustible nuclear gastado, obteniendo beneficios debido al ahorro en uranio

natural, el coste obtenido es de 582 \$ por cada Kg de metal pesado extraído del reactor tras su irradiación.

Mientras que, para el ciclo abierto, es decir, el sistema de gestión mediante el cual el combustible nuclear gastado se trata directamente como residuo nuclear y pasa al almacenamiento definitivo, el coste obtenido en este proyecto es de 533 \$ por cada Kg de metal pesado extraído del reactor tras su irradiación.

Es decir, el coste del ciclo cerrado es un 9,2 % mayor que en el caso de la gestión mediante un ciclo abierto.

6. ATI o ATC comparación económica

6.1. Introducción

Es un hecho, como ya se ha comentado anteriormente, la situación problemática que atraviesa España en cuanto a la gestión de residuos nucleares. Las piscinas de almacenamiento temporal que existen en cada una de las centrales están próximas a saturarse, y la vida útil de las centrales cada vez está más cerca de su fin y por tanto a su desmantelamiento.

Para estimar cual es la fecha de saturación de las piscinas de almacenamiento de combustible, se parte de la cantidad de combustible irradiado por los reactores nucleares operativos en España [34].

	SITUACION a 31/12/2016		PREVISION TOTAL		Tipo Reactor
	ELEMENTOS	tU	ELEMENTOS	tU	
J. CABRERA	377	100	377	100	PWR
GAROÑA	2.505	440	2.505	440	BWR
ALMARAZ I	1.456	672	1.861	834	PWR
ALMARAZ II	1.440	664	1.845	858	PWR
ASCO I	1.356	617	1.833	840	PWR
ASCO II	1.328	607	1.869	858	PWR
COFRENTES	4.232	768	5.864	1.063	BWR
VANDELLÓS II	1.212	547	1.817	831	PWR
TRILLO	1.176	557	1.793	847	PWR
TOTAL	15.082	4.972	19.764	6.672	

Tabla 6: Cantidad de combustible irradiado y previsión total. Fuente: [34]

En la tabla 13, se datan tanto el número de elementos como sus correspondientes toneladas de Uranio que se han producido como combustible usado y que por tanto están almacenados en las piscinas de las centrales o en sus ATIs correspondientes.

La previsión de la cantidad de combustible gastado que se va a generar no es útil para el análisis que se pretende realizar, para este, es necesario la cantidad de combustible gastado anual que cada reactor de cada central produce, a este dato se le llama Requerimiento y se calcula de la siguiente manera:

$$Requerimiento_{anual} = \frac{P * 365 * C}{\varepsilon * BU}$$

Donde:

P : Potencia eléctrica (MWe)

C : Factor de capacidad (%)

ε : Eficiencia (%)

BU : Grado de quemado (MWD/MTHM)

	Trillo	Ascó I	Asco II	Almaraz I	Almaraz II	Cofrentes	Vandellós II
Potencia eléctrica (Mwe)	1066	1032,5	1027,2	1049,4	1044,5	1092	1087,1
Eficiencia	35,34	34,9	34,7	35,1	35,4	33,7	36,9
Factor de capacidad	91,34	97	88,03	84,43	87,17	99,46	83,41
Tasas de quemado	45000	45000	45000	45000	45000	45000	45000

Tabla 7: Parámetros de los reactores activos en España

Los parámetros se encuentran en la tabla 14 con los valores asignados a cada uno de los 7 reactores nucleares operativos en España:

Fuente: [34], [23].

Una vez se tienen los parámetros con sus valores, los resultados son los siguientes:

Trillo	22.35
Ascó I	23.28
Ascó II	21.14
Almaraz I	20.47
Almaraz II	20.86
Cofrentes	26.14
Vandellós II	19.93

Tabla 8: Requerimiento anual de cada uno de los reactores activos.

Todos los resultados están en toneladas de metal pesado (Uranio) al año (tHM/año).

También resulta de gran interés conocer la capacidad de las piscinas, así como la cantidad de combustible que tienen almacenado, de esta forma, implícitamente se conoce el grado de ocupación de las mismas. Este dato se puede encontrar también en el libro Energía 2017, que proporciona anualmente el Foro Nuclear.

	Capacidad total	Reserva núcleo	Capacidad efectiva	Capacidad ocupada	Capacidad libre	Grado de Ocupación %
Piscina (P)						
Almacén temporal indiv. (ATI)						
En número de elementos combustibles irradiados						
ATI José Cabrera	377	NA	NA	377	0	100%
Santa María de Garoña (p)	2.609	NA ^(p)	NA ^(p)	2.505 ^(p)	104	96,01 ^(p)
Almaraz I (p)	1.804	157	1.647	1.456	191	88,40 ^(p)
Almaraz II (p)	1.804	157	1.647	1.440	207	87,43 ^(p)
Ascó I (p)	1.421	157	1.264	1.164	100	92,09 ^(p)
Ascó II (p)	1.421	157	1.264	1.168	96	92,41 ^(p)
ATI de Ascó (c)	1.024	NA	1.024	352	672	34,38
Cofrentes (p)	5.404	624	4.780	4.232	548	88,54 ^(p)
Vandellós II (p)	1.594	157	1.437	1212	225	84,34 ^(p)
Trillo (p)	805	177	628	504	124	80,25
ATI de Trillo (c)	1.680	NA	1.680	672	1.008	40
Total (P)	16.862		12.667	13.681	15.951	88,68
Total ATI(c)	3.081		3.081	1.401	1.680	37,19

(p) Piscina (c) Contenedores

Tabla 9: Datos relevantes de las piscinas de almacenamiento de combustible y los ATIs de las centrales nucleares españolas. Fuente: Foro Nuclear.

Con todos los datos, se puede realizar una proyección temporal de cuanto combustible gastado se ha gastado. Es decir, se realiza una previsión de la cantidad que habrá de combustible gastado en los años venideros basada en los datos históricos. Una vez conocida la cantidad de combustible gastado que existe cada año, con la capacidad de las piscinas y de los ATIs es posible obtener la fecha de saturación de ambos. Esta tabla se muestra en los anexos. A continuación, se muestran las fechas de saturación de las piscinas de las diferentes centrales:

Centrales Nucleares	Grado de saturación	Año de saturación
Trillo	102,80%	2024
Ascó	102,30%	2020
Almaraz	101,50%	2022
Cofrentes	100,60%	2021
Vandellós II	102,80%	2023
ATI Ascó	100%	2026
ATI Trillo	-	-

Tabla 10: Grado y fecha de saturación de las piscinas y los ATIs existentes en España.

Previamente, al tener el dato del requerimiento en toneladas de metal pesado anuales, había que pasar los datos de la tabla 16 de elementos de combustible irradiado a toneladas de uranio. Este factor de conversión no es fácil de encontrar, ya que depende de varios parámetros. Pero usando la tabla 13, se buscó algún tipo de relación, hallando lo siguiente:

Central	Tipo Reactor	tU/elemento
J. CABRERA	PWR	0,265251989
GAROÑA	BWR	0,175648703
ALMARAZ I	PWR	0,461538462
ALMARAZ II	PWR	0,461111111
ASCO I	PWR	0,455014749
ASCO II	PWR	0,457078313
COFRENTES	BWR	0,18147448
VANDELLÓS II	PWR	0,451320132
TRILLO	PWR	0,473639456

Tabla 11: Relación entre elementos y toneladas de uranio según el tipo de reactor.

Se observa que existe cierta relación entre el tipo de reactor (PWR o BWR) y la cantidad de Uranio por combustible. Solo existe una incoherencia, José Cabrera. La central de Zorita es la más antigua y cuenta con el reactor más antiguo, lo cual puede ser el motivo de esta incoherencia. Además, al estar ya desmantelada, no altera nuestros cálculos y nos invita a excluirla del análisis. La media queda así:

PWR	0,45995037
BWR	0,17856159

Tabla 12: Media de los resultados obtenidos en la tabla 18

Estos son los datos que utilizamos para pasar de elementos a toneladas de uranio en función el tipo de reactor.

Ya se ha hablado acerca de la situación actual en España en cuanto a la gestión del combustible usado. España eligió, como así afirma el VI Plan de Gestión de Residuos Radiactivos, publicado en 2006, un sistema de gestión de residuos de ciclo abierto. Para que este sistema fuese viable era necesario construir un ATC. Se proyectó la obra, se pidieron permisos pero esta se paralizó debido a desavenencias entre el gobierno central y el autonómico. Debido a esta paralización, con el problema de falta de espacio para ubicar los residuos además de que la vida útil de las centrales nucleares está próxima a su fin, hacen que urja una solución.

Varias centrales nucleares ya han manifestado su deseo de construir un ATI dentro de su recinto, para así poder dar cabida a los residuos procedentes de sus piscinas, los cuales serán extraídos cuando comience el desmantelamiento de estas. De hecho, la central nuclear de Garoña y Almaraz ya han comenzado los trámites para la construcción de un ATI.

Esto abre un debate interesante. Antes el plan era claro, se construye un ATC donde irían a parar todos los residuos que las centrales albergaran para proceder con el desmantelamiento de estas, y posteriormente irían a parar a un AGP que en principio estaría situado cerca del ATC. Pero ahora la situación es bien distinta, el ATC está paralizado y las centrales están construyendo ATIs: Cabrera, Trillo y Ascó ya lo tienen, Almaraz y Garoña están en camino. Entonces, ¿cómo es de necesario construir un ATC? ¿En el caso de serlo, es necesario que tenga las mismas dimensiones? ¿Se podrían conservar los residuos en el ATI hasta la construcción de un AGP? Estas son varias de las preguntas que se tratan de resolver mediante el siguiente análisis.

En primer lugar se analizarán las soluciones más reales y posibles, es decir, las soluciones que tienen viso de llegar a llevarse a cabo. Para ellas se tienen en cuenta las instalaciones ya construidas y las instalaciones que se van a construir con las dimensiones previstas. En segundo lugar, se parte de ciertas propuestas, cambiando ciertos aspectos de las instalaciones construidas y variando parcialmente o en su totalidad las instalaciones que se van a construir, prescindiendo de ellas o variando capacidades o diseños.

Para el desmantelamiento de las piscinas se asumen ciertas hipótesis. En este caso, como las cantidades de combustible final que queda almacenado en las piscinas es variable según cada central nuclear, cada una de ellas se desmantelará en un tiempo variable con los años. Para decidir en qué número de años se desmantelaba cada una de las piscinas, se toma como base un rango comprendido entre las 100 y las 150 toneladas de uranio al año. Para cumplir con ello son necesarios los años que se muestran en la siguiente tabla:

	tU/año	Años para la extracción
Tasas anual de extracción de combustible Trillo	101,9	7
Tasas anual de extracción de combustible Ascó	140,2	10
Tasas anual de extracción de combustible Almaraz	146,0	10
Tasas anual de extracción de combustible Cofrentes	109,1	8
Tasas anual de extracción de combustible Vandellós II	101,1	6
Tasas anual de extracción de combustible Garoña	111,8	4

Tabla 13: Número de años necesarios para la extracción de todo el combustible de las piscinas.

6.2. Caso 1: No se construye ningún otro ATI.

Para este caso se asumen las siguientes hipótesis:

- El ATC se construirá, no se sabe la fecha (forma parte del análisis).
- No se construirán más ATIs de los ya existentes:
 - José Cabrera
 - Ascó
 - Trillo

Este es el caso inicial o caso base, las fechas de saturación de las piscinas son las mismas que se mostraron anteriormente. Para este caso se asume que la capacidad de almacenamiento de Trillo y Ascó es la de las piscinas más la de sus respectivos ATIs.

Por tanto, las fechas de saturación son las siguientes:

Centrales Nucleares	Grado de saturación	Año de saturación
Trillo	100,30%	2031
Ascó	102,10%	2028
Almaraz	101,50%	2022
Cofrentes	100,60%	2021
Vandellós II	102,80%	2023

Tabla 14: Fecha y grado de saturación de las centrales nucleares españolas.

Se probó en el análisis, debido a la gran capacidad que tienen los almacenes de Trillo y de Ascó para almacenar residuos, transportar los residuos de Vandellós y Almaraz a dichos ATIs y de esta forma dar un poco de margen para la construcción del ATC, pero dicha solución no era viable ya que los residuos solo podían ser almacenados de manera parcial, debido a esto se descarta esa posibilidad. Por tanto, para 2020 debido a que en ese año finaliza la vida útil de las centrales de Almaraz y Vandellós, por lo que es necesario reubicar los residuos que existen en las piscinas de estos (a pesar de que sus piscinas no saturan hasta 2022 y 2023) para proceder con el desmantelamiento de las centrales. Los residuos no podrían permanecer en las piscinas mediante el desmantelamiento ya que no existe la garantía de seguridad necesaria.

6.2. Caso 2: Se construyen los ATIs de Almaraz y Garoña:

Hipótesis asumidas:

- Se construirá un ATC, cuya fecha de operatividad también forma parte del análisis.
- Se cuenta con los ATIs existentes y su tamaño inicial.
- Se construyen ATIs en:
 - Garoña
 - Almaraz

Se comienza a modificar el caso base, en este caso con la introducción de dos almacenes temporales nuevos. El objetivo de esto es tratar de alargar el tiempo de construcción del ATC. Las previsiones no son muy optimistas en cuanto a la prontitud de esta obra, debido a los problemas políticos y sociales existentes, por lo que se necesitan almacenar los elementos almacenados en las piscinas.

La elección de estos ATIs está basada en que son los que están ya en proceso de construcción, con todas las licencias obtenidas y los terrenos comprados. Por ello, se opta por analizar qué pasaría en caso de poder contar con ellos.

	Trillo	Ascó	Almaraz	Cofrentes	Vandellós II	Garoña
Fecha establecida de desmantelamiento	2024	2021	2020	2021	2020	2018
Fecha de saturación de las piscinas	2024	2021	2020	2021	2020	2018
Fecha de saturación de los ATIs	2025	2022	2024	-	-	2021

Tabla 15: Fechas relevantes para el Caso 2.

En este caso se han realizado trasposos de residuos de algunas centrales a otros ATIs. Es el caso de Vandellós II, cuyos residuos generados iban a parar al almacén de Trillo, ya que este tenía capacidad disponible en su piscina. Misma situación para Almaraz, que a pesar de tener su propio ATI, descarga residuos inicialmente en el almacén de Ascó, por el mismo motivo que Trillo (tiene espacio disponible en las piscinas), y posteriormente ya se encarga de completar su almacén, que es más pequeño que los otros dos.

Para este caso el ATC debería estar listo en 2022.

6.3.Caso 3: Se construyen los ATIs de Almaraz, Garoña y Cofrentes:

Se añade un ATI más respecto a los casos anteriores, el motivo sigue siendo el mismo, tratar de disponer de más tiempo para la construcción y operatividad del ATI.

	Trillo	Ascó	Almaraz	Cofrentes	Vandellós II	Garoña
Fecha establecida de desmantelamiento	2024	2021	2020	2021	2020	2018
Fecha de saturación de las piscinas	2024	2021	2020	2021	2020	2018
Fecha de saturación de los ATIs	2025	2022	2024	2022	-	2021

Tabla 16: Fechas relevantes para el Caso 3.

Se consigue prolongar un año con esta posibilidad, el ATC debería estar listo para 2023.

En este caso ocurre lo mismo que en el Caso 2, los residuos generados por los reactores de Vandellós y Almaraz, que van a parar a los almacenes de Trillo y Ascó.

Se analizará más adelante, pero parece que esta solución no tiene mucho sentido.

6.4. Propuesta 1

Tras analizar varios casos posibles, basados en soluciones reales y planteadas actualmente por los organismos competentes, se procede a realizar dos propuestas de mejora. Para ello se modifican características de las instalaciones ya construidas y se planifican las construcciones de instalaciones no proyectadas.

En la propuesta 1, se opta por aumentar el tamaño de ciertos ATIs elegidos estratégicamente por su ubicación y por su actual tamaño, además de la construcción de uno en Almaraz con unas dimensiones mayores a las planteadas por esta central nuclear, con la intención de disminuir las dimensiones del ATC. De esta manera, muchos de los residuos quedarían almacenados en los ATIs, y se construiría un ATC de la mitad de tamaño del proyectado, con su correspondiente reducción de coste, a la espera de un AGP que sea la solución final del problema de los residuos. Las centrales pueden almacenarse a pesar de tener un ATI completo en su propiedad.

Características de los ATIs:

	Trillo	Ascó	Zorita	Garoña	Almaraz	Cofrentes	Vandellós
Contenedores	NAC-STC y ENUN 32P	HI-STORM	HI-STORM	ENUN 52b	ENUN 32p		
	80	64	12	64	40	24	
Elementos/Contenedor	21	32	32	52	32	32	
Elementos	1680	2048	384	3328	1280	768	
tU	772,7	942,0	176,6	594,3	588,7	137,1	

Tabla 17: Características de los ATIs para la Propuesta 1

En este caso se han doblado el número de contenedores en los ATIs de Ascó, Almaraz y Garoña. Se mantienen los tipos de contenedores de cada uno de los ATIs, y se llega a la siguiente conclusión:

	Trillo	Ascó	Almaraz	Cofrentes	Vandellós II	Garoña
Fecha establecida de desmantelamiento	2024	2021	2020	2021	2020	2018
Fecha de saturación de las piscinas	2024	2021	2020	2021	2020	2018
Fecha de saturación de los ATIs	2024	2024	2024	2024	-	2024

Tabla 18: Fechas relevantes para la Propuesta 1.

Es decir, se necesitaría un ATC para 2023. Este ATC, debería poder acoger todos los residuos generados hasta esa fecha, que son 3320 toneladas de Uranio, es decir, se necesitaría un ATC de la mitad de tamaño.

6.5. Propuesta 2:

En este caso se opta por construir todos los ATIs posibles y del tamaño posible para dar cabida a todos los residuos nucleares generados por los reactores nucleares hasta el final de su vida operativa. Para ello se aumenta la capacidad del ATI (tU) en lo siguiente:

	Trillo	Zorita	Ascó I	Garroña	Almaraz I	Cofrentes	Vandellós II
Cantidad de combustible almacenado en ATI	309,1	100,0	161,9	0,0	0,0	0,0	0,0
Capacidad del ATI	772,7	100,0	1450,0	450,0	1500,0	900,0	650,0

Tabla 19: Características de los ATIs para la Propuesta 2

Con esto se consigue dar cabida a todos los residuos sin necesidad de construir un ATI.

En este caso no habría problema de fechas debido al hecho de que el ATI se construye en el terreno de la central nuclear.

6.6. Distribución de costes

6.6.1. ATC

El costo total del proyecto será gestionado por ENRESA. La única información pública sobre este presupuesto es su estimación global: 700 a 1000 M € [31]. Para detallar este presupuesto se dividen los costos en tres partes claramente diferenciadas: el terreno, la construcción y la explotación.

- Terreno

Como se calculó anteriormente, la superficie necesaria sería de aproximadamente 10 000 m² para el área de almacenamiento. Si se agrega además todas las instalaciones complementarias: la celda caliente, la zona de descarga, el centro de investigación, unas pocas oficinas y el estacionamiento, la cifra se dobla. Para ello se estiman de 200 €/ m², lo que significaría alrededor de 4M € [36].

- Construcción

La construcción es siempre la parte más costosa en ese tipo de proyecto. Por su tamaño y por la alta calidad del material y su proceso de fabricación, el ATC es bastante costoso. En la sección de construcción se incluyen todos los estudios técnicos, el proceso de concesión de licencias, y la construcción en sí mismo. Hay costos humanos y materiales.

“Los costes previstos para el desarrollo del proyecto y la construcción completa de la instalación (tres etapas) son de unos 540 M€ de los que un 25% se invertirán en obra civil, un 50%, en componentes mecánicos (cápsulas de almacenamiento, grúas, etc.) y el 25% restante en equipamientos de otros sistemas, ingeniería, supervisión y puesta en marcha. La inversión correspondiente a la fase inicial del proyecto alcanzará los 255 M€.” [37].

Tasas y licencias	2
Estudios de caracterización	9
Propiedad, dirección y control	12
Ingeniería y estudios técnicos de apoyo	110
Actuaciones generales de emplazamiento	20
Equipamiento/Sistemas de confinamiento	549
Construcción	270
Montaje y pruebas	28
Total	1000

Tabla 20: Desglose del coste del ATC

6.6.2. ATI

Para tener una idea del coste de un ATI, se tomará como base un estudio realizado por El Confidencial acerca del ATI que se va a construir en la central nuclear de Santa María de Garoña. La cual estaba en proceso de desmantelamiento, y sufrió de primera mano las consecuencias de la paralización del ATC.

Según este informe el coste del ATI es de unos 100 M € y presenta el abanico de las diferentes alternativas que la gestión de la central podía haber tomado:

Los costes estimados de las diversas alternativas se muestran en la tabla siguiente

Coste total	Espera a ATC más allá de		ATI parcial	ATI total Contenedores metálicos	ATI total contenedores de hormigón y acero	reproceso	
	2017	EAMU					
fecha ATC funcionando, en la hay costes adicionales	M€	67	85-98	90-135	220	96-150	512
año		2018	2018	2018	2022	2022/2027	
Costes adicionales por año a partir de dicha fecha	M€/año	15	15	15	5	5	
Observaciones							
Nota (1)				Notas (1) (2)	Nota (1)	Notas (1) (2)	Nota (3)
Nota (2)				ATI en espera de ATC (sin elementos de intervención tipo celda caliente)			
Nota (3)				Depende del tamaño máximo admisible de contenedor			
				No incluida gestión residuos radiactivos de alta actividad resultantes			

Ilustración 13: Alternativas de la central nuclear de Santa María de Garoña y sus costes.

“Descripción sintética: El ATI de la CN de Santa María de Garoña será una instalación temporal de almacenamiento a la intemperie, para la disposición en seco del combustible gastado de la CN, y su protección física, de modo seguro y estable, hasta su traslado al ATC, como siguiente etapa de su gestión. El tiempo de permanencia de los contenedores en el ATI está previsto que sea inferior a 10 años, siempre y cuando la disponibilidad del ATC sea la indicada en la planificación.

El ATI contempla la construcción de dos losas de categoría sísmica (I), de hormigón armado, de unos 60 cm de espesor y dimensiones 40 x 20 metros (800 m2 cada una). Estas losas de almacenamiento estarán situadas a la cota mínima aproximada de 520,50 msnm, y se asentarán sobre un sustrato resistente, en torno a la cota de 518,80 msnm. Las losas estarán rodeadas por un muro perimetral de 3,5 metros de altura (5 m sobre la plataforma del ATI), con una berma de 3 m de anchura. Sobre las losas se depositarán, en posición vertical, cuatro filas de 8 módulos por fila, a razón de 16 módulos por losa, lo que hace una capacidad total de 32 contenedores. La zona circundante al almacenamiento se pavimentará con hormigón. Esta zona está prevista para el movimiento de vehículos y las maniobras de carga de los contenedores. La zona total pavimentada tendrá unas dimensiones de 93 x 77,5 metros (7.207,5 m2). Además, se prevé la instalación de un triple vallado: un vallado externo para la delimitación del recinto, un vallado interno de protección física, y un tercer vallado de protección radiológica. El recinto del ATI estará dotado de instalación eléctrica, alumbrado y un sistema de drenaje. El funcionamiento del ATI no precisa de los sistemas de la CN para su operación.” [38].

6.6.3. Análisis de costes para los casos analizados

Es conocido que el coste del ATC es de 1000 millones de € tal y como está desglosado en la tabla 21. Pero no se sabe nada de cuanto costarán los ATIs. Debido a que se realizan hipótesis acerca del tamaño de los ATIs se ha decidido realizar una estimación del coste del ATI por cada elemento de combustible almacenado en él. Para ello, la estimación se basa en la información que ofrece Enresa:

Una solución basada en ATI's para dar las mismas prestaciones teniendo en cuenta, diseño, licenciamiento, construcción, contenedores e instalaciones de proceso en cada una de ellas costaría el doble del cote del ATC.

Es decir, para albergar todos los residuos en ATIs el coste de esto es de 2000 millones de €, lo que viene a dar el coste de la Propuesta 2.

Para tratar de calcular el coste en €/elemento de combustible almacenado en el ATI, en primer lugar, es necesario saber qué cantidad de combustible generará cada uno de los reactores nucleares hasta su fecha de fin de operatividad:

ATI	Número de Elementos
Trillo	1680
Zorita	217,4147613
Ascó I	3152,514039
Garoña	2520,13883
Almaraz I	3261,221419
Cofrentes	5040,27766
Vandellós II	1413,195948
	17284,76266

Tabla 21: Número de elementos que cada uno de las centrales generarán hasta el final de sus vidas operativas

El total de combustible usado que generarán dichos reactores es de 17285 elementos. El coste total de 2000 M€ se divide por el número total de elementos para obtener el coste de cada elemento, que posteriormente se multiplicará por el

número de elementos que produce cada central nuclear y de este modo se obtiene el coste por ATI.

ATI	Coste por ATI
Trillo	194,4
Zorita	25,2
Ascó I	364,8
Garaña	291,6
Almaraz I	377,4
Cofrentes	583,2
Vandellós II	163,5

Tabla 22: Coste de cada uno de los ATIs en función del número de elementos que generan

El número de elementos por ATI es el utilizado en el caso base, con las propuestas ya existentes de ATIs, pero esto se modificará según el caso. Por tanto, el coste de cada uno de los casos analizados es el siguiente:

	CASO 1	CASO 2	CASO 3	PROPUESTA 1	PROPUESTA 2
Trillo	194,4	194,4	194,4	194,4	194,4
Zorita	43,6	43,6	43,6	43,6	25,2
Ascó I	118,5	118,5	118,5	237,0	364,8
Garaña	-	192,5	192,5	385,1	291,6
Almaraz I	-	74,1	74,1	148,1	377,4
Cofrentes	-	-	88,9	88,9	583,2
Vandellós II	-	-	-	-	163,5
ATC	1000,0	1000,0	1000,0	500,0	
TOTAL	1356,5	1623,1	1712,0	1597,0	2000,0
FECHA	2020	2022	2023	2025	-

Tabla 23: Tabla final de costes para cada uno de los casos y propuestas analizados

7. AGP europeo. Posibilidad de un Almacenamiento central de residuos nucleares compartido por los estados miembros.

Si como se ha comentado en el capítulo anterior, resulta económicamente más viable la construcción de un ATC que la de varios ATIs distribuido por toda la geografía peninsular, parece evidente pensar que la construcción de uno o varios AGP compartido en el territorio europeo, resulta también más interesante económicamente que la construcción de un AGP por país.

Esta diferencia es más palpable para países con una producción de residuos nucleares no muy elevada como puede ser el caso español. Si hablamos de países con escasa producción de energía nuclear, y por tanto de residuos nucleares, parece absurdo la creación de un AGP en su territorio.

Por tanto, es una idea positiva económicamente y además favorecería e impulsaría el uso de energía nuclear, sobre todo en aquellos países donde no se produce por no tener donde almacenar sus residuos.

Actualmente resulta bastante lejana esta idea, pero poco a poco se van realizando acercamientos. Recientemente (en 2009) se creó una plataforma europea cuya intención era crear un espacio donde poner en común todo el conocimiento, mejoras e investigaciones realizadas al respecto del AGP. Para así promover un clima de seguridad común e impulsar a aquellos países con ciertas dudas a construir el necesario almacenamiento geológico profundo.

La iniciativa europea de crear una plataforma para la construcción de un Almacenamiento Geológico Profundo (AGP) fue lanzada en noviembre de 2009 con una visión: que para el año 2025 estén operando las primeras instalaciones de almacenamiento geológico profundo de combustible gastado, residuos de alto nivel y otros residuos radiactivos de larga vida radiactiva.

A parte de las organizaciones europeas de gestión de residuos (OMT), la plataforma en cuestión cuenta con 124 miembros que cubren la mayor parte de los agentes de investigación, desarrollo y demostración en el ámbito del almacenamiento geológico en Europa.

Los principales objetivos del AGP:

- Iniciar y llevar a cabo acciones de colaboración en Europa para facilitar la implementación escalonada de la disposición segura y geológica profunda del combustible gastado, residuos de alto nivel y otros residuos radiactivos de larga vida resolviendo el problema de la gestión final de los residuos radiactivos, así como los desafíos tecnológicos y sociales y, por ende, apoyar los programas de gestión de residuos en los Estados miembros.
- La plataforma pretende reforzar la confianza en la implementación segura de un AGP.
- Reducir el trabajo superpuesto, producir ahorros en los costes totales de I+D y aprovechar mejor las competencias e infraestructuras de investigación existentes.

La plataforma para la construcción de un AGP, llamada Plataforma Tecnológica para el Almacenamiento Definitivo Geológico de Residuos Radiactivos IGD-TP, desarrolló una Agenda de Investigación Estratégica para lograr alcanzar la visión común. Este trabajo, cuyas directrices derivaron de la visión inicial y de las necesidades de concesión de licencias de las organizaciones de ejecución, fue dirigido por estas últimas.

Fue impulsado por la idea de que los temas clave identificados en el plan estratégico se centrarían en actividades que son de interés común y que todos los países miembros se beneficiarían de la implementación conjunta.

A medida que se desarrollaron estos documentos de fundación, las partes interesadas empezaron a desplegar el plan estratégico con el objetivo de facilitar la implementación escalonada de la eliminación segura de residuos en un almacenamiento geológico profundo para combustible gastado y residuos de alto nivel en Europa. El plan de acción para la implementación del SRA se describe en un Plan de Despliegue.

Hasta la fecha, se han lanzado nueve proyectos europeos que están coordinados por tres grupos de trabajo técnicos y científicos adicionales.

El proyecto SecIGD2 (Secretariat of the Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste - Technology Platform – Phase 2) es una acción de coordinación y apoyo cofinanciada por una subvención comunitaria del Séptimo Programa de Euratom. El objetivo del proyecto SecIGD2 es apoyar la labor de la Secretaría para mejorar, integrar y coordinar las actividades de los miembros de IGD-TP.

El SecIGD2, además, ayuda a establecer redes, estructurar y desarrollar las competencias de investigación y desarrollo en países con programas de desecho geológico menos avanzados. Esta acción se ha creado específicamente para ayudar al I+D en estos países y a cumplir con los requisitos de la Directiva Europea sobre Residuos (Comisión Europea, 2011).

Otro paquete de trabajo SecIGD2 apoya el desarrollo y la coordinación de las competencias requeridas para cumplir con la Visión 2025 (que para 2025 Europa almacene con seguridad sus residuos radiactivos) como parte del grupo de trabajo CMET (Competence Maintenance, Education and Training) de la plataforma.

Dentro de la comunidad geológica europea, la plataforma del AGP, a través de su Secretaría SecIGD2, continuará creando oportunidades para llevar a cabo investigaciones y desarrollo de soluciones seguras en la disposición geológica de desechos radiactivos. Por lo tanto, se espera que el SecIGD2 fomente la competencia y difunda conocimientos entre las partes interesadas en la gestión de desechos radiactivos y en la eliminación geológica en particular.

El trabajo en este documento ha informado sobre dos paquetes de trabajo específicos en el SecIGD2 para facilitar la transferencia eficiente de conocimiento entre países en diferentes etapas de sus programas de gestión de residuos.

El primero en red, estructura y desarrollo de programas y competencias de investigación y desarrollo (I+D) en países con programas de desecho geológico menos avanzado y cómo sus necesidades pueden ser integradas en el Programa de Investigación Estratégica IGD-TP y actividades futuras.

El segundo apoya al grupo de Mantenimiento de Competencias, Educación y Formación (CMET), cuyo objetivo es establecer un marco coherente de programas de formación para abordar la escasez de ingenieros e investigadores en el campo de la disposición geológica que pueda producirse en el futuro.

8. CONCLUSIONES

Queda fuera de duda y de posible debate la importancia de la energía nuclear en España, debido a su importantísimo papel en el mix energético. Además de ser una buena herramienta contra el cambio climático gracias a ser una energía limpia en cuanto a emisiones de CO₂.

Sin embargo, son muchos los países que siguen dudando acerca de la seguridad de esta energía, ya que el riesgo radiológico es alto. Gran parte de culpa la tiene la incertidumbre aún existente acerca de qué hacer o cómo tratar los residuos nucleares generados a raíz de la obtención de energía eléctrica. Es por esto que la gestión de los residuos se convierte en fundamental para que esta energía siga utilizándose a nivel mundial.

9.1. Ciclo abierto o ciclo cerrado

En el primer análisis realizado en este proyecto, se han puesto en juego dos sistemas de gestión de residuos, ciclo cerrado o reprocesado de combustible nuclear gastado y el ciclo abierto o de almacenamiento definitivo, y se ha realizado un análisis económico de ambos. El resultado muestra que la diferencia económica entre ambos sistemas de gestión es de un 9%, siendo el sistema del ciclo cerrado más costoso en principio que el del ciclo abierto.

Este resultado va en la línea de los resultados obtenidos en otros análisis realizados con anterioridad y con otro tipo de metodología:

	METODO	CA	CC	%
Economic Assessment of Used Nuclear Fuel Management in the United States	Greenfield	500 \$/kg	520 \$/kg	4%
Advanced Nuclear Fuel Cycle and Radioactive Waste Management (2006)	SMAFS	//	//	20%
PFC (2010)	LCOE	533 \$/kg	582 \$/kg	9%
An Economic Analysis of Select Fuel Cycle Using the Steady-State Analysis Model for Advanced Fuel Cycles Scemes (2010)	SMAFS	53,33 M/kWh	54,06 M/kWh	1%
The Economics of the Nuclear Fuel Cycle (1994)	LCOE	5,3 M/kWh	6,12 M/kWh	10%

Tabla 24: Resultados obtenidos en los diferentes estudios analizados.

Esto, lleva a concluir que el aspecto económico no debe tener un peso significativo a la hora de elegir entre uno de estos dos sistemas de gestión.

Ahora bien, a pesar de que el sistema de ciclo cerrado es en principio más costoso que el del ciclo abierto, las tendencias y las mejoras en dicho proceso hablan por sí solas (véase figura 11). El coste del reprocesado va disminuyendo, así como el coste del ciclo abierto aumentará debido a la gran influencia del precio del uranio en el coste final.

Por último, todos los residuos, reprocesados o no, deberán ser almacenados de forma definitiva en un almacén. El tamaño de dicho almacén tendrá una influencia importante (cantidad de materiales, terreno, trabajadores, mantenimiento...) en el coste del mismo, por tanto, debido a que con el ciclo cerrado los residuos disminuyen considerablemente su tamaño al ser vitrificados, parece ser que esta opción es mejor en el largo plazo.

9.2. ATI o ATC

En el segundo análisis realizado se reabre un debate muy presente en la actualidad española tras la paralización de la construcción del ATC de Villar de Cañas.

En el estudio se concluye en la gran cantidad de ventajas que tiene el ATC con respecto al ATI:

- Menos costoso construir, mantener y operar un ATC que varios ATIs distribuidos a lo largo del territorio español.
- Reducción de riesgos al tener solo un almacén que vigilar y asegurar.
- Mayor margen temporal al poder permanecer los residuos cerca de 70 años almacenados en el ATC a diferencia de los 10 que podrían estar en el ATI.

El mayor inconveniente del ATC es el transporte de los residuos desde las centrales hasta dicha instalación ajena a ellas. Aunque tras analizar el transporte de residuos en otros países tales como en Estados Unidos o Finlandia, se observa la gran seguridad de estos.

Se propone también la construcción o aprovechamiento del sistema ferroviario como medio de transporte de estos residuos hasta el almacenamiento central.

La paralización del ATC y la urgencia por reubicar los residuos almacenados en las piscinas de las centrales, ha hecho que la tendencia española sea la de construir un ATI por central nuclear. A pesar de esto, la construcción de los ATIs no pretenden ser una alternativa al ATC, simplemente son soluciones complementarias a la capacidad de almacenamiento que existe en las piscinas.

9.3.1. Conclusiones sobre el análisis realizado:

Observando la tabla 24, comprobamos que en tema de costes la mejor solución es la primera, es decir, el escenario base. Sin embargo, esta solución se antoja poco probable ya que el ATC debería estar construido y operativo para 2020. Es por ello que se descarta.

En cuanto al resto de posibilidades, la siguiente mejor en tema costes es la Propuesta 1, la cual además permite que el ATC esté listo y operativo para 2025, otorgando un colchón de tiempo importante para la construcción del ATC. Los demás casos analizados en tema costes son viables, excepto la opción de construir solo ATIs como almacenamiento temporal, pero la fecha de operatividad sigue siendo bastante pronta.

En conclusión, la mejor solución es la opción de aumentar el tamaño de los ATIs existentes, así como construir un ATI de dimensiones mayores a las propuestas en las centrales de Cofrentes y Almaraz, de forma que el tamaño del ATC se reduzca a la mitad.

9.3. AGP comunitario europeo

Entra dentro de la lógica, pensar que, si es menos costoso construir un ATC en lugar de varios ATIs, tiene sentido que sea menos costoso repartirse los residuos de los países miembros en los AGPs necesarios que cada uno en su propio AGP, realizando una obra importante y costosa para almacenar pocos residuos (en el caso de los países que generan poco).

Sin embargo, esta iniciativa no es viable actualmente y son muchas las aristas que perfilar para llegar a un acuerdo. Para ello se empieza con buen pie al crear la plataforma europea IGD-TP, en la que, con una visión común, los estados miembros comparten sus estudios e investigaciones acerca de la gestión de los residuos, en particular del almacenamiento geológico profundo.

Pero el tema del AGP puede crear controversia. Los pasos que se están dando en el mundo de la energía nuclear, hacen indicar que establecer almacenamientos definitivos puede ser un error, debido a la gran cantidad de energía remanente que contienen los residuos nucleares. Esto hace que la tendencia actual sea la de tomar decisiones capaces de ser reversibles, es decir, una gestión de residuos que solucione el problema de la radiación de los residuos y que aporte seguridad en cuanto al establecimiento donde descansarán estos, pero que puedan ser reutilizados en el caso de dar con una solución mejor, como es el caso del ATC.

Uno de estos avances son los reactores nucleares de IV generación, los cuales permiten el aprovechamiento de gran parte de los residuos que se encuentran actualmente almacenados para producir energía eléctrica.

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Burke, S. M. Hsiang, and E. Miguel, “Global non-linear effect of temperature on economic production,” *Nature*, vol. 527, no. 7577, pp. 235–239, Oct. 2015.
- [2] I. N. Kessides, “Nuclear power and sustainable energy policy : promises and perils,” *World Bank Res. Obs.*, vol. 25, no. 2 (August 2010), pp. 323–362, Aug. 2010.
- [3] “IEA - Electricity Information.” [Online]. Available: <https://www.iea.org/statistics/relateddatabases/electricityinformation/>. [Accessed: 28-Aug-2017].
- [4] “Población, total | Data.” [Online]. Available: <http://datos.bancomundial.org/indicador/SP.POP.TOTL>. [Accessed: 01-Aug-2017].
- [5] “Downloads | Statistical Review of World Energy | Energy economics | BP Global,” *bp.com*. [Online]. Available: <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/downloads.html>.
- [6] “Red Eléctrica de España | Red Eléctrica publica el ‘Informe del sistema eléctrico español 2016.’” [Online]. Available: <http://www.ree.es/es/sala-de-prensa/notas-de-prensa/2017/06/red-electrica-publica-el-informe-del-sistema-electrico-espanol-2016>. [Accessed: 30-Aug-2017].
- [7] “Resultados_nucleares_de_2016_y_perspectivas_de_futuro.pdf.” .
- [8] “El desmantelamiento en un click,” *Streamio*. [Online]. Available: http://streamio.com/api/v1/videos/570bced96f8d8da677000005/public_show?player_id=4c9b6854b35ea807b5000001&wmode=transparent.
- [9] E. Consejo de ministros, “Sexto Plan General de Residuos Radiactivos.” 23-Jun-2006.
- [10] E. F. E. Economía, “Los residuos de Vandellós I volverán a España antes de octubre de 2015,” *EL PAÍS*, 26-Oct-2012. [Online]. Available: https://economia.elpais.com/economia/2012/10/26/agencias/1351260339_919293.html.
- [11] eldiarioclm.es, “El Gobierno paraliza la adjudicación del ‘cementerio nuclear,’” *eldiario.es*. [Online]. Available: http://www.eldiario.es/clm/paraliza-adjudicacion-cementerio-nuclear_0_355914596.html.
- [12] “Chart of the Nuclides, Thirteenth Edition by Electric, General: General Electric Soft cover - WHITNEY’S BOOKSHELF.” [Online]. Available: <https://www.abebooks.com/Chart-Nuclides-Thirteenth-Edition-Electric-General/13482500042/bd>.
- [13] “brc_finalreport_jan2012.pdf.” .
- [14] “te_1587_web.pdf.” .
- [15] L. Ojea, “Una mina de hierro en Alemania se prepara para recibir 300.000 contenedores de residuos nucleares | El Periodico de la Energía.” .
- [16] “rr10.pdf.” .
- [17] Dr. Ian Fairlie, “Dry Storage of Spent Nuclear Fuel: The Safer Alternative to Reprocessing.” .
- [18] ENRESA, “El almacenamiento geológico profundo de los residuos radiactivos de alta actividad. Principios básicos y tecnología.” .

- [19] O. NEA, “Engineered Barrier Systems and the Safety of Deep Geological Repositories.” .
- [20] “Processing of Used Nuclear Fuel - World Nuclear Association.” [Online]. Available: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/processing-of-used-nuclear-fuel.aspx>. [Accessed: 03-Sep-2017].
- [21] “Plutonium - World Nuclear Association.” [Online]. Available: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/plutonium.aspx>. [Accessed: 18-Aug-2017].
- [22] G. De Roo and J. E. Parsons, “A methodology for calculating the levelized cost of electricity in nuclear power systems with fuel recycling,” *Energy Econ.*, vol. 33, no. 5, pp. 826–839, Sep. 2011.
- [23] David Echevarría López, “Gestión del combustible nuclear gastado. Análisis del caso español.” .
- [24] Laura Rodríguez Penalonga, “Spent Nuclear Fuel Management: Levelized Cost of Electricity Generation and Analysis of Various Production Scenarios.” .
- [25] B. Yolanda Moratilla, *Combustible nuclear. Seminario permanente en tecnologías nucleares.* .
- [26] “Central nuclear de Cofrentes - Centro de documentación - CSN.” [Online]. Available: https://www.csn.es/centro-de-documentacion?p_p_id=20&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&_20_struts_action=%2Fdocument_library%2Fview&_20_folderId=893666&_20_viewEntries=1&_20_viewFolders=false&_20_entryStart=0&_20_entryEnd=50&_20_folderStart=0&_20_folderEnd=100. [Accessed: 15-Aug-2017].
- [27] “Centrales Nucleares en España - Energía nuclear - Energía - Mº de Energía, Turismo y Agenda Digital.” [Online]. Available: <http://www.minetad.gob.es/energia/nuclear/Centrales/Espana/Paginas/CentralesEspana.aspx>. [Accessed: 15-Aug-2017].
- [28] UNESA, “Las centrales nucleares españolas en 2016.” .
- [29] Nuclear Energy Agency, “The economics of the Back End of the Nuclear Fuel Cycle.” .
- [30] The Boston Consulting Group, “Economic Assesment of Used Nuclear Fuel Management in the United States.” .
- [31] Mario Fernández Izquierdo, “La problemática de los Residuos de Alta Actividad: El Almacén Temporal Centralizado (ATC). Una posible solución.” .
- [32] OCDE, “Plutonium fuel. An assesment.” .
- [33] “EFC-complete.pdf.” .
- [34] Foro Nuclear, “Energía 2017.” .
- [35] “BOE.es - Documento BOE-A-2015-10909.” [Online]. Available: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2015-10909. [Accessed: 28-Aug-2017].
- [36] I. de L. Benjamin Bouchot Francia, “Anteproyecto de un Almacen Temporal Centralizado de residuos radiactivos de alta actividad y de combustible irradiado en España.” .
- [37] “Plataforma_LogisticaATC.pdf.” .
- [38] “BOE-A-2015-10909.pdf.” .

10. ANEXOS

- Tablas de datos iniciales con las que se comienza a realizar el análisis

	SITUACION a 31/12/2016		PREVISION TOTAL		Tipo Reactor	tU/elemento
	ELEMENTOS	tU	ELEMENTOS	tU		
J. CABRERA	377	100	377	100	PWR	0,265251989
GAROÑA	2.505	440	2.505	440	BWR	0,175648703
ALMARAZ I	1.456	672	1.861	834	PWR	0,461538462
ALMARAZ II	1.440	664	1.845	858	PWR	0,461111111
ASCO I	1.356	617	1.833	840	PWR	0,455014749
ASCO II	1.328	607	1.869	858	PWR	0,457078313
COFRENTES	4.232	768	5.864	1.063	BWR	0,18147448
VANDELLÓS II	1.212	547	1.817	831	PWR	0,451320132
TRILLO	1.176	557	1.793	847	PWR	0,473639456
TOTAL	15.082	4.972	19.764	6.672		

PWR	0,45995037
BWR	0,17856159

Central	Tipo Reactor	tU/elemento
J. CABRERA	PWR	0,265251989
GAROÑA	BWR	0,175648703
ALMARAZ I	PWR	0,461538462
ALMARAZ II	PWR	0,461111111
ASCO I	PWR	0,455014749
ASCO II	PWR	0,457078313
COFRENTES	BWR	0,18147448
VANDELLÓS II	PWR	0,451320132
TRILLO	PWR	0,473639456

		Trillo	Zorita	Ascó I	Asco II	Garoña	Almaraz I	Almaraz II	Cofrentes	Vandellós II
Cantidad de combustible almacenado en ATI		672	377	352	-	0	0	-	0	
Capacidad del ATI		1680	377	1024	-	1664	640	-	768	
Capacidad libre en ATI		1008	0	672	-	1664	640	-	768	0
Grado de ocupación del ATI		40,00%	100,00%	34,38%	-	0,00%	0,00%	-	0,00%	#¡DIV/0!
Coste del ATI			4,5	13		100	25	-	34,34	
Cantidad de combustible almacenado en piscinas		504	-	1164	1168	2505	1456	1440	4232	1212
Capacidad de piscinas		628	-	1264	1264	2609	1647	1647	4780	1437
Capacidad libre en piscinas		124	-	100	96	104	191	207	548	225
Grado de ocupación de piscinas		80,25%	-	92,09%	92,41%	96,01%	88,40%	87,43%	88,54%	84,34%
Cantidad de combustible generado anualmente		22,35	-	23,28	21,14	-	20,47	20,86	26,14	19,93

		Trillo	Ascó I	Asco II	Almaraz I	Almaraz II	Cofrentes	Vandellós II
Potencia eléctrica (Mwe)		1066	1032,5	1027,2	1049,4	1044,5	1092	1087,1
Eficiencia		35,34	34,9	34,7	35,1	35,4	33,7	36,9
Factor de capacidad		91,34	97	88,03	84,43	87,17	99,46	83,41
Tasas de quemado		45000	45000	45000	45000	45000	45000	45000

	Posible fecha de operatividad ATC	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Combustible generado hasta la fecha	Trillo	557,0	579,35	601,70	624,04	646,39	668,74	691,09	713,43	735,78	758,13	780,48	802,82	825,17	847,52	869,87
	Ascó	1224,0	1268,41	1312,83	1357,24	1401,65	1446,07	1490,48	1534,89	1579,30	1623,72	1668,13	1712,54	1756,96	1801,37	1845,78
	Almaraz	1336,0	1377,3	1418,7	1460,0	1501,3	1542,7	1584,0	1625,4	1666,7	1708,0	1749,4	1790,7	1832,0	1873,4	1914,7
	Cofrentes	768,0	794,1	820,3	846,4	872,6	898,7	924,8	951,0	977,1	1003,3	1029,4	1055,6	1081,7	1107,8	1134,0
	Vandellós II	547,0	566,9	586,9	606,8	626,7	646,7	666,6	686,5	706,5	726,4	746,3	766,2	786,2	806,1	826,0
Grado ocupación piscinas+ATI construido	Trillo	80%	83,5%	86,7%	89,9%	93,1%	96,3%	99,6%	102,8%	106,0%	109,2%	112,4%	115,7%	118,9%	122,1%	125,3%
	Ascó	92,2%	95,6%	98,9%	102,3%	105,6%	109,0%	112,3%	115,6%	119,0%	122,3%	125,7%	129,0%	132,4%	135,7%	139,1%
	Almaraz	87,9%	90,6%	93,3%	96,1%	98,8%	101,5%	104,2%	106,9%	109,7%	112,4%	115,1%	117,8%	120,5%	123,3%	126,0%
	Cofrentes	88,5%	91,5%	94,6%	97,6%	100,6%	103,6%	106,6%	109,6%	112,6%	115,7%	118,7%	121,7%	124,7%	127,7%	130,7%
	Vandellós II	84,3%	87,4%	90,5%	93,6%	96,6%	99,7%	102,8%	105,9%	108,9%	112,0%	115,1%	118,1%	121,2%	124,3%	127,4%
Grado ocupación ATIs	ATI Ascó	34%	34%	34%	44%	53%	63%	72%	82%	91%	100%					
	ATI Trillo	40%	40%	40%	40%	40%	40%	40%	43%	46%	49%	52%	54%	57%	60%	63%

		Trillo	Zorita	Ascó I	Asco II	Garoña	Almaraz I	Almaraz II	Cofrentes	Vandellós II
	Cantidad de combustible almacenado en ATI	309,1	100,0	161,9	-	0,0	0,0	-	0,0	0,0
	Capacidad del ATI	772,7	100,0	471,0	-	297,1	294,4	-	137,1	
	Capacidad libre en ATI	463,6	0,0	309,1	-	297,1	294,4	-	137,1	0,0
	Grado de ocupación del ATI	40,0%	100,0%	34,4%		0,0%	0,0%		0,0%	#¡DIV/0!
	Coste del ATI		4,5	13		100	25	-	34,34	
	Cantidad de combustible almacenado en piscinas	231,8	-	535,4	537,2	447,3	669,7	662,3	755,7	557,5
	Capacidad de piscinas	288,8	-	581,4	581,4	465,9	757,5	757,5	853,5	660,9
	Capacidad libre en piscinas	57,0	-	46,0	44,2	18,6	87,9	95,2	97,9	103,5
	Grado de ocupación de piscinas	80,3%	-	92,1%	92,4%	96,0%	88,4%	87,4%	88,5%	84,3%
	Cantidad de combustible generado anualmente	22,3	-	23,3	21,1	-	20,5	20,9	26,1	19,9

	elementos/año	tU/año
Tasas anual de extracción de combustible usado de las piscinas para el desmantelamiento de las centrales	125,7	33,3

Centrales Nucleares	Grado de saturación	Año de saturación
Trillo	102,80%	2024
Ascó	102,30%	2020
Almaraz	101,50%	2022
Cofrentes	100,60%	2021
Vandellós II	102,80%	2023
ATI Ascó	100%	2026
ATI Trillo	-	-

	Trillo	Ascó	Zorita	Garoña	Almaraz	Cofrentes	Vandellós
Contenedores	NAC-STC	HI-STORM	HI-STORM	ENUN 52b	ENUN 32p		
	80	32	12	32	20	24	
Elementos/Contenedor	21	32	32	52	32	32	
Elementos	1680	1024	384	1664	640	768	
tU	772,7	471,0	176,6	297,1	294,4	137,1	

- CASO 1

	Posible fecha de operatividad ATC	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Combustible generado hasta la fecha	Trillo	557,0	579,35	601,70	624,04	646,39	668,74	691,09	713,43	475,6	237,8	0,0
	Ascó	1224,0	1268,41	1312,83	1357,24	1401,65	934,4	467,2	0,0			
	Almaraz	1336,0	1377,3	1418,7	1460,0	973,3	486,7	0,0				
	Cofrentes	768,0	794,1	820,3	846,4	872,6	581,7	290,9	0,0			
	Vandellós II	547,0	566,9	586,9	606,8	404,5	202,3	0,0				
	Garoña	447,3	298,2	149,1	0,0							
Grado ocupación piscinas+ATI construido	Trillo	64%	66,8%	69,4%	72,0%	74,6%	77,1%	79,7%	82,3%			
	Ascó	73,0%	75,6%	78,3%	80,9%	83,5%						
	Almaraz	87,9%	90,6%	93,3%	96,1%							
	Cofrentes	88,5%	91,5%	94,6%	97,6%	100,6%						
	Vandellós II	84,3%	87,4%	90,5%	93,6%							
	Garoña	96%										

	Posible fecha de operatividad ATC	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Combustible generado hasta la fecha	Trillo	557,0	579,35	601,70	624,04	848,66	668,74	691,09	713,43	475,6	237,8	0,0
	Ascó	1224,0	1268,41	1312,83	1357,24	1888,32	1421,1	953,9	486,7			
	Almaraz	1336,0	1377,3	1418,7	1460,0	973,3	486,7	0,0				
	Cofrentes	768,0	794,1	820,3	846,4	872,6	581,7	290,9	0,0			
	Vandellós II	547,0	566,9	586,9	606,8	404,5	202,3	0,0				
	Garoña	447,3	298,2	149,1	0,0							
Grado ocupación piscinas+ATI construido	Trillo	64%	66,8%	69,4%	72,0%	97,9%	77,1%	79,7%	82,3%			
	Ascó	73,0%	75,6%	78,3%	80,9%	112,6%						
	Almaraz	87,9%	90,6%	93,3%	96,1%							
	Cofrentes	88,5%	91,5%	94,6%	97,6%	100,6%						
	Vandellós II	84,3%	87,4%	90,5%	93,6%							
	Garoña	96%										

Centrales Nucleares	Grado de saturación	Año de saturación
Trillo	100,30%	2031
Ascó	102,10%	2028
Almaraz	101,50%	2022
Cofrentes	100,60%	2021
Vandellós II	102,80%	2023

- CASO 2

	Posible fecha de operatividad ATC	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Combustible generado hasta la fecha	Trillo	557,0	579,35	601,70	624,04	646,39	668,74	691,09	713,43	611,5	509,6
	Ascó	1224,0	1268,41	1312,83	1357,24	1401,65	1261,5	1121,3	981,2	841,0	700,8
	Almaraz	1336,0	1377,3	1418,7	1460,0	1314,0	1168,0	1022,0	876,0	730,0	584,0
	Cofrentes	768,0	794,1	820,3	846,4	872,6	763,5	654,4	545,4	436,3	327,2
	Vandellós II	547,0	566,9	586,9	606,8	505,7	404,5	303,4	202,3	101,1	0,0
	Garóña	447,3	447,3	335,5	223,7	111,8	0,0				
Grado ocupación piscinas	Trillo	80%	83,5%	86,7%	89,9%	93,1%	96,3%	99,6%	99,6%		
	Ascó	92,3%	95,6%	98,9%	98,9%	98,9%					
	Almaraz	87,9%	90,6%	93,3%	96,1%						
	Cofrentes	88,5%	91,5%	94,6%	97,6%	100,6%					
	Vandellós II	84,3%	87,4%	90,5%	93,6%						
	Garóña	96%									
Grado ocupación ATIs	ATI Almaraz	0%	0%	0%	0%	0%	0%	50%	99%		
	ATI Trillo	40%	40%	40%	40%	53%	66%	79%	92%	105%	
	ATI Ascó	34%	34%	34%	34%	65%	96%				
	ATI Garóña	0%	0%	38%	75%	113%					

	tU/año	Años para la extracción
Tasas anual de extracción de combustible Trillo	101,9	7
Tasas anual de extracción de combustible Ascó	140,2	10
Tasas anual de extracción de combustible Almaraz	146,0	10
Tasas anual de extracción de combustible Cofrentes	109,1	8
Tasas anual de extracción de combustible Vandellós II	101,1	6
Tasas anual de extracción de combustible Garoña	111,8	4

• CASO 3

	Posible fecha de operatividad ATC	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Combustible generado hasta la fecha	Trillo	557,0	579,35	601,70	624,04	646,39	668,74	691,09	713,43	611,5
	Ascó	1224,0	1268,41	1312,83	1357,24	1401,65	1261,5	1121,3	981,2	841,0
	Almaraz	1336,0	1377,3	1418,7	1460,0	1314,0	1168,0	1022,0	876,0	730,0
	Cofrentes	768,0	794,1	820,3	846,4	872,6	763,5	654,4	545,4	436,3
	Vandellós II	547,0	566,9	586,9	606,8	505,7	404,5	303,4	202,3	101,1
	Garoña	447,3	447,3	335,5	223,7	111,8	0,0			
Grado ocupación piscinas	Trillo	80%	83,5%	86,7%	89,9%	93,1%	96,3%	99,6%	99,6%	
	Ascó	92,3%	95,6%	98,9%	98,9%	98,9%				
	Almaraz	87,9%	90,6%	93,3%	96,1%					
	Cofrentes	88,5%	91,5%	94,6%	97,6%	100,6%				
	Vandellós II	84,3%	87,4%	90,5%	93,6%			102,8%		
	Garoña	96%								
Grado ocupación ATIs	ATI Almaraz	0%	0%	0%	0%	0%	0%	50%	99%	
	ATI Trillo	40%	40%	40%	40%	53%	66%	79%	92%	105%
	ATI Ascó	34%	34%	34%	34%	65%	96%			
	ATI Garoña	0%	0%	38%	75%	113%				
	ATI Cofrentes	0%	0%	0%	0%	0%	80%			

- PROPUESTA 1

	Trillo	Zorita	Ascó I	Asco II	Garoña	Almaraz I	Almaraz II	Cofrentes	Vandellós II
Cantidad de combustible almacenado en ATI	309,1	100,0	161,9	-	0,0	0,0	-	0,0	0,0
Capacidad del ATI	772,7	100,0	942,0	-	297,1	588,7	-	137,1	
Capacidad libre en ATI	463,6	0,0	780,1	-	297,1	588,7	-	137,1	0,0
Grado de ocupación del ATI	40,0%	100,0%	17,2%		0,0%	0,0%		0,0%	#¡DIV/0!
Coste del ATI		4,5	13		100	25	-	34,34	
Cantidad de combustible almacenado en piscinas	231,8	-	535,4	537,2	447,3	669,7	662,3	755,7	557,5
Capacidad de piscinas	288,8	-	581,4	581,4	465,9	757,5	757,5	853,5	660,9
Capacidad libre en piscinas	57,0	-	46,0	44,2	18,6	87,9	95,2	97,9	103,5
Grado de ocupación de piscinas	80,3%	-	92,1%	92,4%	96,0%	88,4%	87,4%	88,5%	84,3%
Cantidad de combustible generado anualmente	22,3	-	23,3	21,1	-	20,5	20,9	26,1	19,9

	Trillo	Ascó	Zorita	Garoña	Almaraz	Cofrentes	Vandellós
Contenedores	NAC-STC y ENUN 32P	HI-STORM	HI-STORM	ENUN 52b	ENUN 32p		
	80	64	12	64	40	24	
Elementos/Contenedor	21	32	32	52	32	32	
Elementos	1680	2048	384	3328	1280	768	
tU	772,7	942,0	176,6	594,3	588,7	137,1	

	Trillo	Zorita	Ascó I	Asco II	Garoña	Almaraz I	Almaraz II	Cofrentes	Vandellós II
Cantidad de combustible almacenado en ATI	309,1	100,0	161,9	-	0,0	0,0	-	0,0	0,0
Capacidad del ATI	772,7	100,0	1450,0	-	450,0	1500,0	-	900,0	650,0
Capacidad libre en ATI	463,6	0,0	1288,1	-	297,1	1500,0	-	137,1	650,0
Grado de ocupación del ATI	40,0%	100,0%	11,2%		0,0%	0,0%		0,0%	0,0%
Coste del ATI		4,5	13		100	25	-	34,34	
Cantidad de combustible almacenado en piscinas	231,8	-	535,4	537,2	447,3	669,7	662,3	755,7	557,5
Capacidad de piscinas	288,8	-	581,4	581,4	465,9	757,5	757,5	853,5	660,9
Capacidad libre en piscinas	57,0	-	46,0	44,2	18,6	87,9	95,2	97,9	103,5
Grado de ocupación de piscinas	80,3%	-	92,1%	92,4%	96,0%	88,4%	87,4%	88,5%	84,3%
Cantidad de combustible generado anualmente	22,3	-	23,3	21,1	-	20,5	20,9	26,1	19,9

• PROPUESTA 3

	Posible fecha de operatividad ATC	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Combustible generado hasta la fecha	Trillo	557,0	579,35	601,70	624,04	646,39	668,74	691,09	713,43	475,6	237,8	0,0
	Ascó	1224,0	1268,4	1312,8	1357,2	1401,6	934,4	467,2	0,0			
	Almaraz	1336,0	1377,3	1418,7	1460,0	973,3	486,7	0,0				
	Cofrentes	768,0	794,1	820,3	846,4	872,6	581,7	290,9	0,0			
	Vandellós II	547,0	566,9	586,9	606,8	404,5	202,3	0,0				
	Garoña	447,3	447,3	298,2	149,1	0,0						
Grado ocupación piscinas	Trillo	80%	83,5%	86,7%	89,9%	93,1%	96,3%	99,6%	99,6%			
	Ascó	92,3%	95,6%	98,9%	98,9%	98,9%						
	Almaraz	87,9%	90,6%	93,3%	96,1%							
	Cofrentes	88,5%	91,5%	94,6%	97,6%	100,6%						
	Vandellós II	84,3%	87,4%	90,5%	93,6%							
	Garoña	96%										
Grado ocupación ATIs	ATI Almaraz	0%	0%	0%	0%	32%	65%	97%				
	ATI Trillo	40%	40%	40%	40%	40%	40%	40%	40%	58%	77%	95%
	ATI Ascó	11%	13%	13%	13%	13%	41%	69%	97%			
	ATI Garoña	0%	0%	33%	66%	99%						
	ATI Cofrentes	0%	0%	0%	0%	0%	32%	65%	97%			
	ATI Vandellós	0	0	0	0	31%	62%	93%				

- COSTES FINALES

ATI	Número de Elementos	Coste por ATI	CASO 1	CASO 2	CASO 3	PROPUESTA 1	PROPUESTA 2
Trillo	1680	194,39	194,3908671	194,3908671	194,3908671	194,3908671	194,3908671
Zorita	217,4147613	25,16	43,62223624	43,62223624	43,62223624	43,62223624	25,15681188
Ascó I	3152,514039	364,77	118,4858618	118,4858618	118,4858618	236,9717237	364,7737722
Garroña	2520,13883	291,60	0	192,5395255	192,5395255	385,0790509	291,6023645
Almaraz I	3261,221419	377,35	0	74,05366364	74,05366364	148,1073273	377,3521782
Cofrentes	5040,27766	583,20	0	0	88,86439637	88,86439637	583,2047289
Vandellós II	1413,195948	0,115708849	0	0	0	0	163,5192772
	17284,76266		356,4989651	623,0921542	711,9565506	1097,035602	2000