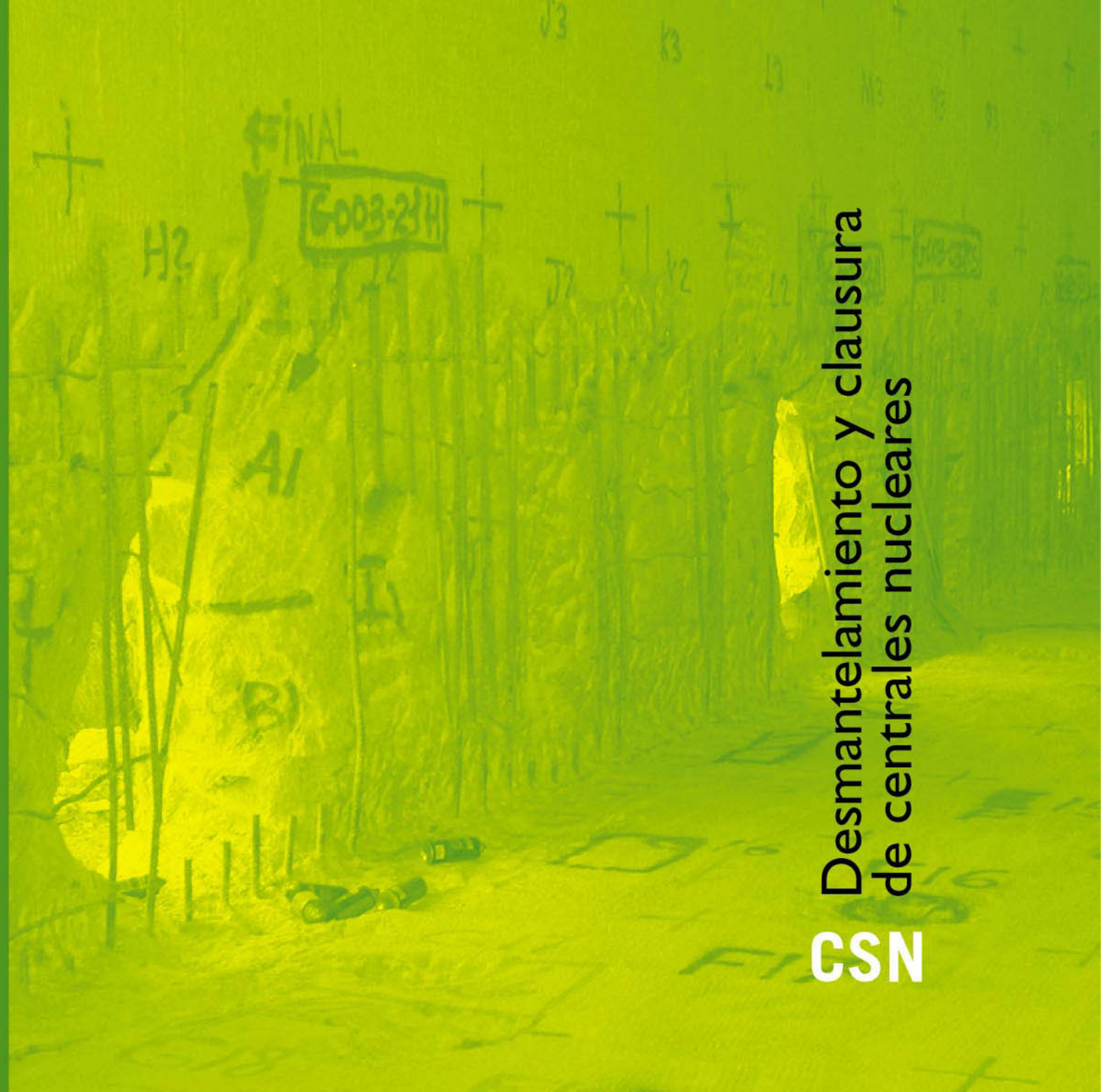
Desmantelamiento
y clausura
de centrales nucleares

CSN CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR

Pedro Justo Dorado Dellmans, 11
28040 Madrid
tel.: 91 346 01 00
Fax: 91 346 05 88
www.csn.es



Desmantelamiento y clausura de centrales nucleares

CSN

FINAL
6003-24H
H2
A1
B1
J3
K3
L3
J2
K2
L2
E15
F16
F17

Referencia SDB-01.05

© Consejo de Seguridad Nuclear, 2008

Edita y distribuye:
Consejo de Seguridad Nuclear
Pedro Justo Dorado Dellmans, 11
28040 Madrid
tel.: 91 346 01 00
Fax: 91 346 05 88
www.csn.es

Diseño de colección:
Juan Vidaurre

Imprime:

Depósito Legal:

Introducción	**5**
Estrategias y fases para el desmantelamiento y clausura	**10**
Aspectos más destacados	**16**
El desmantelamiento de la central nuclear Vandellós I	**25**
El desmantelamiento de la central nuclear José Cabrera	**30**
El Consejo de Seguridad Nuclear	**35**

Introducción

El fin de la vida útil de una central nuclear por haber cumplido su periodo operativo, o por haberse dado cualquier otra circunstancia que haga inviable técnica o económicamente continuar su operación, no significa el fin de las actividades que en ella se deban realizar, sino que marca el inicio de una nueva etapa denominada desmantelamiento.

El desmantelamiento de una central nuclear puede definirse como el conjunto de acciones y procesos, tanto de carácter técnico como administrativo que, tras su retirada definitiva del servicio, se encarga de eliminar progresivamente la radiactividad remanente que pueda permanecer en las zonas afectadas por su antigua operación. Es en el momento en el que los riesgos residuales de la central y de su antiguo emplazamiento se hayan eliminado por completo, o bien hayan sido reducidos a un mínimo aceptable, cuando podremos referirnos a su desclasificación como instalación nuclear y a la clausura de la misma. La central nuclear, una vez clausurada, deja de ser una instalación peligrosa y de estar sometida a un control regulador reglamentado.

Proceso de desmantelamiento de la central nuclear de Maine Yankee.

El objetivo final del desmantelamiento de cualquier central nuclear es asegurar que los usos que puedan darse a su antiguo emplazamiento en el futuro no supongan riesgos radiológicos inaceptables para la población ni para el medio ambiente en su conjunto.

En el caso de una central nuclear, las actividades de desmantelamiento son más complejas que en otras instalaciones industriales en las que queden riesgos remanentes tras la finalización de su operación. En primer lugar hay que evacuar los elementos combustibles y demás fuentes radiactivas móviles, es decir, los combustibles nucleares irradiados gastados, donde queda la mayor parte de la radiactividad generada durante la operación de la central. Una pequeña parte de esta radiactividad producida ha podido emigrar a lo largo del tiempo contaminando distintas partes de la instalación.

Esta contaminación se debe a las pequeñas fugas a través de los "pinchazos" o pequeñas roturas de combustible que se pueden producir a lo largo de una operación normal de la central.

Sede del Consejo de Seguridad Nuclear.

Hay que tener en cuenta también los fenómenos de activación neutrónica que han acompañado la producción de la energía eléctrica. Durante el funcionamiento del reactor nuclear se produce un flujo neutrónico que ha activado, en mayor o menor medida, grandes cantidades de materiales diversos, como son los denominados materiales "internos" del reactor, los propios circuitos de refrigeración del núcleo, el hormigón de blindaje y protección biológica, y hasta los generadores del vapor, si estos están situados cerca del reactor. Este fenómeno deja una contaminación radiactiva embebida en el propio material que ha resultado activado durante la operación de la central. El desmantelamiento y clausura de la central implica la retirada de todas estas estructuras activadas.

En el desmantelamiento y clausura de las centrales nucleares intervienen dos elementos importantes que desempeñan un papel decisivo en toda planificación de las actividades implicadas: el trabajo en un entorno de radiaciones ionizantes y la gestión final de los materiales residuales que se generen.

El trabajo en un medio ionizante impone unas restricciones o precauciones importantes en cuanto a la protección radiológica de los trabajadores implicados y al confinamiento de los productos manipulados y material residual generados: los aerosoles o polvos originados durante las propias tareas de desmontaje, demolición y segregación de materiales, y los fluidos generados durante las tareas de descontaminación que se lleven a cabo. Estas restricciones o precauciones sólo pueden respetarse si existe una planificación y organización rigurosa de las actividades a llevar a cabo durante el desmantelamiento. El desmantelamiento de una central nuclear no puede confiarse a cualquier empresa convencional de demoliciones. Se trata de una actividad nuclear que ha de prepararse con una ingeniería especializada, y sobre todo, con operadores y supervisores perfectamente capacitados y dotados de la cultura de seguridad apropiada.

La ejecución de estas actividades en un entorno de radiaciones ionizantes puede requerir de técnicas de control remoto adaptadas a un trabajo en medio hostil (robótica).

Los problemas que plantea la gestión de los residuos radiactivos resultantes de las operaciones de desmantelamiento no son, en principio, distintos de los se que plantean con los residuos radiactivos que se producen regularmente durante el funcionamiento de las centrales nucleares. Normalmente estos residuos radiactivos son de baja o media actividad y de corto período de semidesintegración, pero representan un volumen considerable. Es importante, por consiguiente distinguir entre los materiales residuales, los que son muy radiactivos y que, por tanto necesitan un acondicionamiento y almacenamiento en condiciones especialmente rigurosas, y los materiales residuales con una actividad suficientemente pequeña para que puedan descontaminarse, si es necesario, y tratarse como residuos convencionales o materiales susceptibles de ser reciclados.

El desmantelamiento es un proceso relativamente complicado pero sobre todo, es un proceso dilatado en el tiempo, ya que cada paso o tarea se debe planificar, ejecutar y controlar con un gran rigor. Al terminar, se habrá recuperado el entorno ambiental que existía antes de la construcción de la central y se habrá garantizado la protección radiológica inmediata y la protección radiológica diferida de las personas y del medio ambiente.

Gracias a los programas de investigación y desarrollo que se han llevado a cabo al respecto, la tecnología para realizar las tareas que son necesarias para el desmantelamiento de instalaciones nucleares son hoy suficientemente conocidas y no plantean grandes dificultades. Hasta la fecha se han desmantelado numerosas instalaciones nucleares de investigación en todo el mundo, aunque sólo algunas centrales nucleares comerciales comienzan a ser desmanteladas en la actualidad.

La estrategia y calendario para llegar a la clausura, o etapa final del desmantelamiento de las centrales nucleares, depende de diversos factores propios de cada país, e incluso de cada central en particular:

- La capacidad para gestionar los residuos de alta actividad (combustible irradiado) y la disponibilidad y capacidad de la instalación de almacenamiento o de tratamiento de los mismos.
- La carga radiológica asociada a las tareas de desmantelamiento.
- La capacidad para gestionar el elevado volumen de residuos de baja y muy baja actividad y la disponibilidad de capacidad de almacenamiento para los mismos.

- La disponibilidad de fondos económicos para abordar las actividades de desmantelamiento con la suficiente garantía de seguridad.

Cuanto más rápidamente se aborden las sucesivas tareas del desmantelamiento, mayores serán las cargas radiológicas de los trabajadores y mayor será el volumen de los residuos de media y baja actividad a gestionar. El rápido inicio del desmantelamiento permite, sin embargo, contar con el conocimiento detallado de la instalación que aún posee el personal de explotación de la misma.

La gestión de los residuos radiactivos, incluido el combustible gastado y el desmantelamiento y clausura de instalaciones nucleares, es realizada por la empresa pública Enresa.

Todas sus actividades deben quedar recogidas en su *Plan General de Residuos Radiactivos,* que una vez aprobado por el Gobierno, es revisado periódicamente. En la actualidad está vigente el *VI Plan General de Residuos Radiactivos (2006-2010).*

Este plan es el documento donde el Gobierno establece las estrategias técnicas y también las previsiones económicas en materia de gestión de residuos radiactivos, y desmantelamiento y clausura de instalaciones nucleares.

La evacuación de los residuos de alta actividad, principalmente el combustible irradiado, suele ser una de las primeras etapas de todos los proyectos de clausura de centrales nucleares. Actualmente también se llevan a cabo algunos proyectos de desmantelamiento de centrales con los elementos combustibles irradiados dentro de la instalación, en este caso la instalación continua requiriendo controles de seguridad aún más estrictos.

Sede de Enresa.

Los costes de la totalidad del proceso también son un factor importante a tener en cuenta. Si se pretende llegar al final del desmantelamiento de forma inmediata tras el cese de operaciones de la central, los costes del proyecto pueden ser muy elevados, debido sobre todo a las protecciones tecnológicas que se precisarán durante el desarrollo de las actividades, costes que disminuirán tras un período de espera o "enfriamiento" de la central, durante el cual los materiales radiactivos presentes decaerán a un nivel inferior. Por otra parte, los costes de mantenimiento de la central cerrada en condiciones de seguridad durante largos períodos de tiempo son también muy elevados.

Estrategias y fases para el desmantelamiento

Estrategia de desmantelamiento

Parece deducirse de todo lo anteriormente expuesto que el desmantelamiento de instalaciones nucleares ha de plantearse como un proceso complejo y dilatado en el tiempo, con un cierto distanciamiento entre una y otra etapa.

Conocida la historia operativa de una central y efectuado un estudio del inventario radiactivo y de los componentes, equipos, sistemas y partes que contienen contaminación radiactiva, se procede a efectuar una planificación de las posibles estrategias de desmantelamiento.

En principio existen tres estrategias básicas diferentes para desmantelar y clausurar una central nuclear:

- *Desmantelamiento inmediato*
  Comienza, normalmente, unos años después de la parada definitiva de la central, a fin de que haya un período de transición entre el estado operativo de la planta y el comienzo del desmantelamiento activo de la misma. Durante este tiempo pueden efectuarse las actividades preparatorias del desmantelamiento, evacuación de los elementos combustibles y retirada de los residuos radiactivos que quedan de la fase de operación.
- *Desmantelamiento diferido*
  Después de la retirada de los elementos combustibles gastados y algunos componentes y estructuras, la instalación se mantiene en un estado pasivo o de latencia por un período de tiempo que puede oscilar entre los 30 a 100 años, después del cual se procede a su desmantelamiento total. Esta estrategia implica establecer un programa de control y vigilancia de la instalación en su estado latente para asegurar en todo momento el nivel de seguridad de la misma. Este período de latencia se denomina, a veces también, período de decaimiento, por la disminución de la radiactividad a medida que pasa el tiempo, hecho que se puede aprovechar para mejorar las condiciones radiológicas de la instalación cuando se aborde el desmantelamiento integral de la misma.
- *Acondicionamiento* in situ
  Cuando se opta por encapsular y aislar la instalación en su propio emplazamiento y mantenerla así durante un período de tiempo adecuado para que los niveles de radiactividad decaigan lo suficiente para poder liberar dicho emplazamiento del control regulador. Esta estrategia implica, de hecho, el almacenamiento de los residuos en el propio emplazamiento de la instalación y se ha utilizado en algunos casos para reactores de investigación.

Debido a las numerosas circunstancias específicas que pueden influir en aspectos básicos de los desmantelamientos, estas estrategias pueden estar modificadas y entremezcladas a fin de ajustarse a las condiciones particulares de capa país, instalación, condiciones sociales, etc.

Desmantelamiento del reactor WAGR (Windscales Advances Gas-cooled Reactor), uno de los proyectos piloto del programa de investigación y desarrollo de la Comisión Europea para el desmantelamiento y clausura de instalaciones nucleares.

En el desarrollo de cada una de estas posibles estrategias de clausura, los factores que reciben una consideración mayor son:

- La carga radiológica que supondría para los trabajadores el desmantelamiento inmediato.
- Los residuos generados y la capacidad disponible en el país para su tratamiento y almacenamiento.
- El coste, incluyendo la necesidad del mantenimiento de la vigilancia durante el período de espera.

Fases de los desmantelamientos

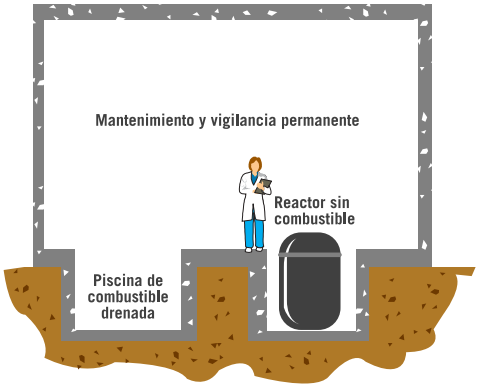
Es tónica habitual referirse a tres etapas o fases diferentes en los desmantelamientos de las centrales nucleares. Fases que se asocian a otros tantos niveles que definen el estado en el que queda la planta tras dichas etapas.

Nivel 1

1. Estado de la planta y de los equipos:

Se han retirado los elementos combustibles irradiados, las barras de control y los líquidos contaminados.

Se mantiene la barrera contra la contaminación (circuito primario) tal y como estaba durante la operación de la planta, pero los sistemas abiertos se cierran y sellan (válvulas, tapones, penetraciones, etc.).



Nivel 1. Instalación en estado casi original

Se mantiene el edificio de contención en situación operativa (en condición estanca) para evitar cualquier liberación de material radiactivo. Se mantiene bajo control la atmósfera interior de la contención (humedad, radiactividad, temperatura). Se mantiene bajo control el acceso al interior del edificio de contención y el personal que entra es sometido a controles radiológicos.

2. Vigilancia de la planta:

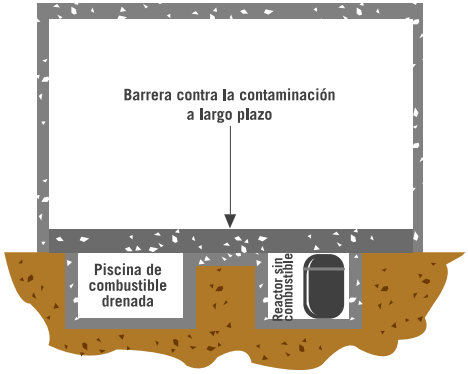
Durante este periodo la central se mantiene bajo vigilancia, por lo cual es imprescindible que los equipos de vigilancia de la radiación estén plenamente operativos, tanto dentro de la planta como en el área circundante.

El control de la instalación requiere la existencia de un programa de inspección específicamente enfocado a comprobar el buen estado de los cierres y sellos de las barreras de referencia que siguen estando operativas.

Nivel 2

1. Estado de la planta y de los equipos:

La barrera contra la contaminación (el circuito primario) se reduce a su mínimo tamaño, retirando las partes más fácilmente desmontables, y se cierran o sellan las penetraciones en la barrera que permanece aún. El sellado de la barrera se refuerza por medios físicos y, si es necesario, se añade un blindaje biológico que encierra la citada barrera.



Nivel 2. Instalación en latencia

Después de descontaminar hasta niveles considerados como aceptables, el edificio de contención y los sistemas de ventilación pueden ser modificados o eliminados si ya no son necesarios para la protección radiológica. Dependiendo de hasta qué punto se han eliminado o descontaminado los equipos, puede permitirse el acceso al edificio de contención (si éste no se ha derribado).

Las partes y edificios no radiactivos en la instalación pueden ser reconvertidos para otros fines. Los materiales no contaminados o suficientemente descontaminados pueden ser reutilizados fuera de la instalación.

2. Vigilancia de la planta:

La vigilancia en torno a la barrera contra la contaminación puede reducirse, pero es recomendable la realización de pruebas y chequeos periódicos de la misma, así como la vigilancia del medio ambiente. Se llevan a cabo inspecciones externas de los sellos de las penetraciones.

No es necesaria la continuación de las medidas sobre la estanqueidad del edificio de contención (si éste permanece aún).

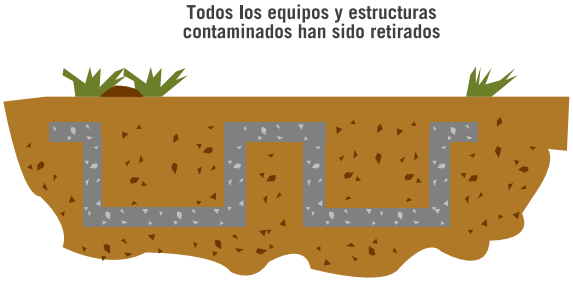
	NIVEL 1 Cierre bajo vigilancia	**NIVEL 2** Liberación parcial y condicional del emplazamiento	**NIVEL 3** Liberación total e incondicional del emplazamiento
Estado de la instalación	Mantenimiento en el estado original	Reducción al mínimo de los volúmenes confinados Reforzamiento de la estanqueidad y protección biológica	Desmantelada
Estado de los equipamientos	Mantenimiento de barreras Acceso muy limitado Confinamiento controlado	Una o varias barreras Acceso libre alrededor del confinamiento	Se han retirado los materiales con actividades significativas
Disposiciones particulares	Evaluación de fuentes radiactivas	Descontaminación de las zonas liberadas	Ausencia de radiactividad
Vigilancia	Continua	Restringida e intermitente	No necesaria
Inspección	Periódica y continua	Escalonada en el tiempo	No necesaria
Verificación	Adaptada al nivel de riesgo	Menos rígida y adaptada al nivel de riesgo	No necesaria
Duración	20-50 años	100-200 años	Ilimitado

Nivel 3

1. Estado de la planta y de los equipos:

Los materiales, equipos y partes de la planta que tengan niveles de radiactividad significativos con respecto al fondo ambiental después del proceso de descontaminación, se retiran del emplazamiento. Todas las partes restantes deben tener niveles de contaminación por debajo de los límites autorizados y su impacto radiológico debe ser muy similar al del fondo radiactivo natural del emplazamiento.

La instalación queda desmontada por completo y su emplazamiento puede ser destinado a otros fines sin ningún tipo de repercusiones desde el punto de vista de la protección radiológica.



Nivel 3. Instalación desmantelada

2. Vigilancia de la planta:

El emplazamiento pasa a ser de libre disposición sin restricciones de uso a causa de la radiactividad. No es necesario el mantenimiento de ningún tipo de vigilancia.

El VI Plan General de Residuos Radiactivos (2006-2010) ya selecciona, para el caso español, la estrategia de desmantelamiento, de manera que para las centrales nucleares en explotación, se realice un desmantelamiento que alcanzará directamente el nivel 3.

La experiencia obtenida en el desmantelamiento de las centrales nucleares ha demostrado que esta clasificación en etapas y niveles puede ser innecesariamente rígida y, a veces, no representa exactamente la realidad.

Así, en determinados países, se están abordando tareas de desmantelamiento de centrales nucleares sin que el combustible irradiado haya sido retirado del emplazamiento. Esta opción se utiliza cuando no existe la posibilidad de transportar dicho combustible hasta una instalación de almacenamiento de residuos de alta actividad o a una de reelaboración del combustible irradiado.

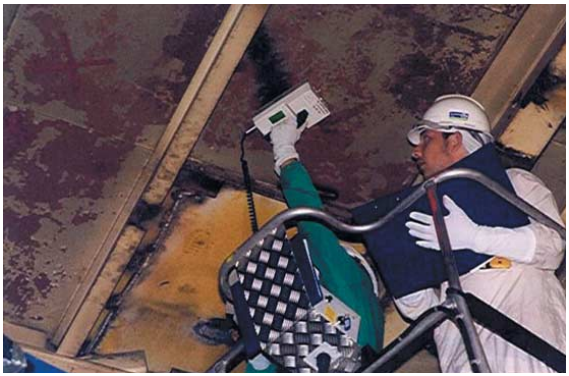
No obstante, para efectuar el desmantelamiento de una central y llegar a su clausura es necesario retirar finalmente el combustible, por lo que la opción a la que se ha hecho referencia en el párrafo anterior sólo es una solución transitoria para abordar situaciones dificilmente realizables en otro caso.

Sólo se considera que se ha completado realmente el desmantelamiento de una central nuclear cuando se ha concedido su clausura liberando sin restricciones su antiguo emplazamiento.

La evaluación de las posibles estrategias de desmantelamiento, planteadas en los términos anteriores, permite discernir las opciones aceptables técnicamente, desde el punto de vista de la seguridad nuclear y la protección radiológica, entre las cuales puede optarse por razones sociales o de estrategia energética.

Así, puede optarse por diversas alternativas de desmantelamiento. A título de ejemplo, se pueden enumerar tres que resultan bastante significativas:

- Desmantelar hasta el nivel 3 de forma inmediata, dejando disponible el emplazamiento para otros fines en un plazo de entre seis y doce años.



Comprobación del nivel de descontaminación alcanzado, antes de proceder a liberar o desclasificar estructuras y edificios.

- Desmantelar hasta el nivel 1 en un plazo corto (de tres a cinco años), dejar pasar un periodo de espera (enfriamiento) de 20 a 30 años con la central en situación de cierre bajo vigilancia, y después terminar el desmantelamiento hasta el nivel 3, dejando libre el emplazamiento en un periodo total de unos 30 o 40 años.

- Desmantelar hasta el nivel 2, en un plazo de unos cinco a siete años, dejar transcurrir un periodo de espera (enfriamiento) de unos 100 años con una liberación parcial del emplazamiento, y después terminar el desmantelamiento hasta el nivel 3, quedando libre el emplazamiento en un periodo de unos 110 años.

Demolición de la contención de la central nuclear de Maine Yankee.

Aspectos más destacados

Las características de la planta, su localización y la cantidad residual de radiactividad son elementos importantes a la hora de definir la estrategia de desmantelamiento. En los apartados que siguen se tratan de forma individualizada los aspectos más significativos de un proceso de desmantelamiento.

Descarga y gestión del combustible irradiado

Una vez finalizada la fase productiva de la central nuclear y declarado el cese definitivo de su explotación, se aborda de forma inmediata la primera de las actividades de esta nueva etapa: la descarga del combustible del núcleo y su almacenamiento temporal en las piscinas de combustible. Esta descarga se efectúa normalmente haciendo uso de los medios habituales de mantenimiento que se utilizaron para las sucesivas recargas.

Antes de iniciar cualquier actividad de desmantelamiento de las centrales nucleares hay que evaluar los elementos combustibles irradiados que pudieran quedar o que los mismos se mantienen en las adecuadas condiciones de seguridad y sin que se vean afectadas por el desmantelamiento.

Durante este periodo los elementos combustibles que permanezcan en el reactor y los que hayan sido transferidos a la piscina de combustible han de seguir refrigerados a fin de evacuar su calor residual. Para esta refrigeración se utilizan los mismos sistemas que estaban diseñados para garantizar la refrigeración durante las paradas del reactor.

Almacenamiento temporal de elementos combustibles en contenedores de hormigón y acero.

El combustible, por fin, se retira de las piscinas de almacenamiento y se traslada, bien a instalaciones de almacenamiento temporal centralizado o bien a las instalaciones de reelaboración del combustible nuclear. La capacidad de recepción de uno y otro tipo de destino puede condicionar el calendario de la evacuación de los elementos combustibles de la piscina y por tanto el programa de desmantelamiento establecido.

Es habitual, por el motivo anterior, que se construyan instalaciones auxiliares al propio desmantelamiento de la central, para que en el propio emplazamiento se puedan almacenar de manera temporal fuera de la piscina los combustibles irradiados, de manera que no interfieran las tareas propias del desmantelamiento. En estos almacenes temporales los elementos combustibles se almacenan en seco en contenedores de diversos diseños y propósitos (almacenamiento - transporte).

Inventario radiactivo

La radiactividad que queda en la planta, una vez retirado el combustible se localiza, principalmente, en el circuito primario y contiene productos radiactivos resultantes de dos orígenes:

- La fisión y activación del combustible (productos de fisión e isótopos de elementos pesados como el plutonio, neptunio o americio producidos a partir del uranio).

- La irradiación con neutrones de los materiales que forman la vasija y otros componentes del reactor (productos de activación, tales como el cobalto-60, o ciertos isótopos radiactivos del magnesio, cromo, hierro o níquel y, en los reactores que contienen grafito, el carbono-14).

Así pues, en el desmantelamiento de centrales nucleares se encuentran materiales activados y contaminados (como la propia vasija del reactor y sus componentes) y materiales contaminados superficialmente (como ciertas partes del circuito primario). La contaminación superficial más importante se encuentra en el interior de los sistemas, que es por donde circula el fluido del circuito primario, mientras que las superficies exteriores presentan unos niveles de contaminación inferiores.

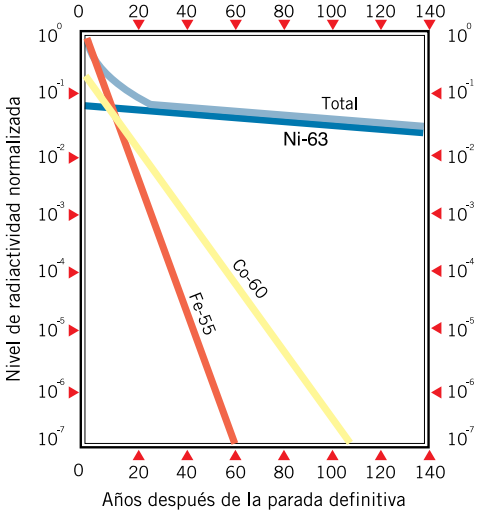
En el inventario radiactivo hay productos de vida corta y de vida larga. La actividad más alta corresponde a isótopos de corta vida, de hasta 30 años de período de semidesintegración, y puede obtenerse una considerable rebaja en el inventario de material radiactivo a manejar durante el desmantelamiento, demorando algunas etapas de éste hasta que los productos radiactivos de vida más corta se hayan desintegrado en un gran porcentaje.

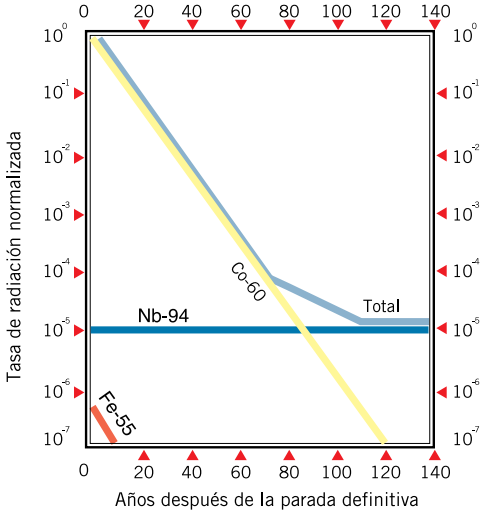
Si el inventario de isótopos radiactivos de una instalación dada fuera rico en isótopos de vida larga emisores alfa (como ocurriría en instalaciones de reelaboración de combustible o de fabricación de combustible que contenga plutonio) la ventaja de retrasar el desmantelamiento sería mínima.

La tasa de radiación y, en consecuencia, el riesgo radiológico en el acceso para el desmantelamiento de las estructuras del núcleo y de otros componentes de un reactor está dominada, en los primeros 90-100 años, por la actividad de cobalto-60 formada, y ésta, a su vez, depende de la composición del acero con el que están fabricados.

Después de este tiempo, la radiactividad dominante procede de otros isótopos, como el níquel-59 o el níquel-63, isótopos que tienen mucha menor repercusión radiológica que el cobalto-60. Además, son isótopos de larga vida, por lo que dilatar el desmantelamiento total más de 90 años presenta pocas ventajas en materia de protección radiológica.

En hormigón, los radioisótopos más importantes son el europio-152 y el 154 cuyas vidas medias son de 13 y 8,8 años, por lo que un enfriamiento de 90 años reduce sus actividades en factores de 180 y 1.200, respectivamente.





Dependencia de la actividad y de la tasa de dosis con el tiempo transcurrido tras la parada definitiva de una central nuclear. Tanto la actividad como la tasa de dosis se refieren a los isótopos radiactivos típicos en los componentes activados del reactor. En la figura se aprecia que si bien, tras un primer período de enfriamiento de unos 40 años, la actividad predominante es la del níquel-63, la tasa de dosis, y por tanto el riesgo de irradiación para las personas, sigue siendo dominado por el cobalto-60 hasta que hayan transcurrido los primeros 100 años desde la parada definitiva.

El carbono-14 es un radisótopo de vida larga (hacen falta más de 5.700 años para reducir su actividad a la mitad), pero la radiación beta que emite tiene una baja energía, por lo que no constituye un riesgo de irradiación, aunque debe tenerse muy en cuenta a la hora del almacenamiento de residuos.

La contaminación en los edificios periféricos al de contención y de los equipos fuera del circuito primario es, normalmente, de niveles muy inferiores por lo que si tales equipos y edificios se descontaminan en los primeros momentos de las etapas de desmantelamiento, el esfuerzo de mantenimiento continuado y la vigilancia necesaria se reducen de forma considerable.

En general, puede decirse que realizar una descontaminación previa al desmantelamiento reduce los niveles de radiación en un factor comprendido entre 10 y 100, equivalente a tiempos de enfriamiento de 15 o 30 años, por lo que suele optarse por efectuar dicha limpieza en las primeras fases del desmantelamiento.

Es evidente que todo lo dicho en este apartado se refiere a centrales nucleares que se someten a un proceso de desmantelamiento después de terminar de manera ordenada su vida operativa. El planteamiento sería muy diferente, y el proceso mucho más complejo, en el caso de tratarse de plantas en las que, como consecuencia de algún accidente, se hubiese liberado en la instalación una parte importante del inventario radiactivo contenido en el combustible irradiado (caso del accidente de la central norteamericana de la Isla de las Tres Millas o Chernóbil-4).

Tecnologías utilizadas en el desmantelamiento

Las tareas involucradas en un proceso de desmantelamiento pueden clasificarse en estas grandes áreas:

- Descontaminación *in situ* de componentes y conducciones.
- Desmontaje de equipos, incluyendo las operaciones a control remoto y la utilización de herramientas para segmentar tuberías, componentes, la vasija del reactor y los componentes internos.
- Mantenimiento de la integridad a largo plazo de los edificios y estructuras.
- Gestión de residuos, incluyendo:

  -Implantación de medidas técnicas para efectuar la segregación de diferentes categorías de residuos y así reducir el volumen de residuos que deben ser almacenados y, subsiguientemente, los costes.
  -Tratamiento, reducción de volúmenes y acondicionamiento de los residuos generados.

-Traslado de los residuos generados a las instalaciones donde serán almacenados.

Las técnicas de descontaminación *in situ* están bien desarrolladas y han sido probadas, tanto en tareas de mantenimiento convencional, como en caso de desmantelamiento.

Dado que los componentes desmantelados no van a ser reutilizados en la instalación, pueden usarse métodos de descontaminación más eficaces (ácidos más fuertes, abrasivos, etc.) que si se tratase de una descontaminación de mantenimiento durante la etapa operativa de la planta.

Como ya se ha dicho, la mayoría de los componentes no están activados en su estructura interior, sino que presentan una contaminación superficial, por lo que pueden ser descontaminados con mayor facilidad.

En la selección del tratamiento de descontaminación debe considerarse no sólo su eficiencia, sino también su coste, el tiempo necesario y el tipo y volumen de residuos radiactivos que se generan.

El desmontaje de sistemas nucleares lleva consigo la segmentación de componentes de gran volumen (como la propia vasija) para reducirlos a tamaños que faciliten el traslado al lugar de almacenamiento prefijado y obtener el mejor aprovechamiento posible del espacio disponible de almacenamiento.

La práctica ha demostrado que estas tareas son factibles, incluso por utilización, en muchos casos, de herramientas industriales disponibles comercialmente. No obstante, también se han efectuado importantes avances en el desarrollo de equipos específicos a control remoto para reducir los niveles de exposición de los trabajadores en zonas de alto nivel de radiación.

También se han probado, en la práctica, métodos adecuados para la demolición de estructuras de hormigón reforzado y la escarificación de las superficies de hormigón contaminado.

Todos los rellenos de hoquedades y zonas del subsuelo se realizan con material limpio, tras comprobar que todas las estructuras subterráneas remanentes han sido adecuadamente descontaminadas y desclasificadas.

No obstante, todas las técnicas que son, o podrían ser, utilizadas en el desmantelamiento de centrales nucleares continúan siendo objeto de estudios y desarrollo, habida cuenta del gran número de desmantelamientos que están planificados para un futuro inmediato (240 centrales nucleares según datos de la Agencia de Energía Nuclear de la OCDE).

Protección radiológica de las personas y del medio ambiente

El objetivo primario de cualquier programa de desmantelamiento es garantizar la salud de los trabajadores, del público y la protección del medio ambiente. Los reglamentos y limitaciones existentes a estos efectos durante la etapa de operación de las centrales son aplicables a la etapa de desmantelamiento, con las salvedades propias de la naturaleza de las operaciones.

Las exposiciones del público durante las etapas de desmantelamiento son mínimas, del orden de una pequeña fracción de las que se producen durante la etapa de explotación de la central. Por tanto, la protección al público no es un factor limitante a la hora de planificar un proceso de desmantelamiento.

Lo mismo puede decirse del impacto radiológico ambiental derivado del proceso de desmantelamiento; por tanto, tampoco es éste un factor que condicione la opción o el calendario del proceso que deba ser elegido.

Los trabajadores deben llevar protecciones para minimizar las dosis recibidas durante el trabajo.

No ocurre lo mismo con respecto a la protección de las personas que trabajan en el desmantelamiento de la planta. Aquí es de extraordinaria importancia la aplicación del principio ALARA (tan bajo, como sea razonablemente posible) para reducir la exposición de este colectivo de personas.

La reducción de las dosis recibidas por los trabajadores durante el desmantelamiento es posible gracias a la utilización conjunta de los siguientes factores:

- Retraso en las tareas de desmantelamiento de las zonas más contaminadas radiactivamente hasta que el inventario de isótopos radiactivos haya descendido a unos niveles más favorables.
- Utilización de equipos de manipulación teledirigidos o automáticos.
- Imposición de procedimientos de operación y de normas de protección radiológica para cada tarea a realizar.
- Empleo de blindajes y otros equipos adecuados de protección personal.
- Un buen conocimiento de las condiciones radiológicas reales de la instalación.

Gestión de los materiales residuales generados

Unos de los aspectos que merecen destacarse en el desmantelamiento de las centrales nucleares es la gestión del gran volumen de materiales residuales que se generan. En definitiva el desmantelamiento consiste conceptualmente en el desmontaje y troceado de las estructuras y sistemas de la central, y en el acondicionamiento y expedición de distintos bultos de materiales que cumplan determinados criterios de aceptación.

Este proceso implica establecer un sistema de segregación y gestión de las distintas corrientes de los materiales residuales, de manera que el flujo de las distintas corrientes se pueda controlar de manera rigurosa manteniendo en todo momento la trazabilidad de los mismos.

Medidas de protección respiratoria utilizadas en las diversas actividades de descontaminación y desmantelamiento.

La mayoría de los materiales residuales generados en los desmantelamientos son materiales residuales convencionales sin contaminación radiactiva.

Segregación y acopio de materiales residuales durante el desmantelamiento de instalaciones nucleares.

La desclasificación y verificación de la ausencia de contaminación de las estructuras y chatarras metálicas que se generen, es un paso obligado antes de volver a ser utilizadas o ser recicladas como materia prima.

Del resto de materiales residuales la mayoría presenta una contaminación radiactiva baja o muy baja. Una pequeña proporción de estos materiales, que dependerá fundamentalmente de la historia operativa y de los incidentes habidos en la central, deberán acondicionarse y gestionarse como residuos de baja y media actividad.

Sólo algunos materiales en contacto o próximos al núcleo del reactor, como los internos, la vasija, etc., intensamente activados durante la operación al haber estado sometidos a intensos flujos neutrónicos, pueden ser considerados como residuos de alta actividad.

El volumen de los residuos que deben ser tratados y almacenados disminuye a medida que va transcurriendo el tiempo desde el fin de la operación. Por tanto, también por el interés en la reducción del volumen de residuos radiactivos generados, es adecuado demorar determinadas etapas de desmantelamiento.

El problema básico de estos residuos no es su actividad sino su volumen. La Agencia de Energía Nuclear de la OCDE estima que el volumen medio de los residuos generados durante el desmantelamiento de una central nuclear de potencia está entre los 10.000 y los 15.000 metros cúbicos por cada gigavatio eléctrico de potencia de la central desmantelada. En este sentido el uso o no de técnicas de descontaminación, compactación y reducción de volumen de materiales residuales radiactivos son de gran importancia en el planteamiento de la estrategia de desmantelamiento de las instalaciones, ya que pueden reducir significativamente el volumen final de residuos radiactivos a gestionar.

Contenedores de materiales desclasificados listos para su expedición.

Del total de acero resultante en el desmantelamiento de una central de un gigavatio, cerca del 50% es potencialmente reutilizable. Asimismo, de las 180.000 toneladas de hormigón que resultarían, unas 13.500 toneladas estarían potencialmente contaminadas y unas 4.700 toneladas potencialmente activadas.

El volumen de residuos, si bien es elevado, sólo representa una fracción del orden del 1% con respecto al total de residuos de baja y media actividad generados por la elaboración del combustible y la operación de una central nuclear durante un período de 25 años (según estimaciones de la NEA/OCDE).

Coste del proceso de desmantelamiento

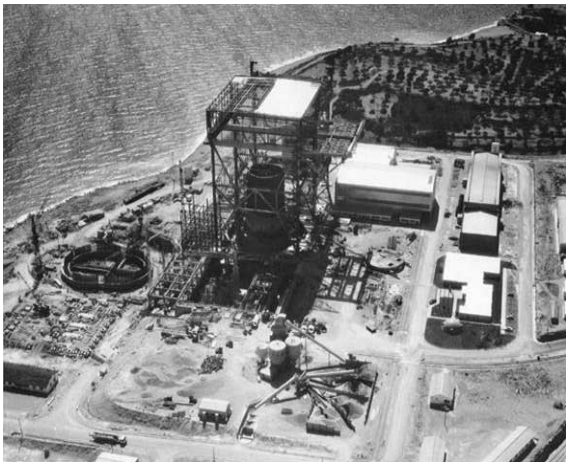
Las estimaciones de los costes del desmantelamiento de una central nuclear dependen de los países, de la secuencia de etapas de desmantelamiento que se haya seleccionado, del calendario en el que deben cumplirse cada una de dichas etapas y de las acciones que se cubran en cada una de esas etapas.

En general, todavía existen bastantes discrepancias en las estimaciones efectuadas por los diferentes países acerca de los costes de desmantelamiento. Esto es debido a las diferentes situaciones de cada país en cuanto a las estrategias y condiciones del entorno que pueden afectar muy significativamente a los costes del proceso. Normalmente los costes de desmantelamiento, junto a los costes de la gestión definitiva de los residuos radiactivos que se generen, se internalizan como un componente más del coste de la producción de la planta durante su etapa operativa.

Se estima que el coste de un proceso de desmantelamiento está entre el 1 y el 2% del valor de la energía producida por la central.

El desmantelamiento de la central nuclear Vandellós I

La central nuclear Vandellós I, ubicada en l'Hospitalet de l'Infant en la provincia de Tarragona fue la segunda central nuclear que se conectó a la red eléctrica española en marzo de 1972. Vandellós I ha sido la única central nuclear española de tecnología grafito-gas y su titular era Hispano-Francesa de la Energía Nuclear Hifrensa.



Central nuclear Vandellós I durante la construcción.

Central nuclear Vandellós I durante la operación.

La explotación de Vandellós I finalizó el día 31 de julio de 1990 cuando el Ministerio de Industria y Energía, tras el incendio ocurrido en la central el 19 de octubre de 1989, suspendió con carácter definitivo el permiso de explotación concedido a Hifrensa para la operación a potencia de la central.

El accidente ocurrido en la central no supuso la liberación de radiactividad alguna al exterior de la instalación, aunque ésta quedó seriamente afectada en lo que se refiere a los sistemas de seguridad que necesitaba para continuar su operación en condiciones seguras. El Consejo de Seguridad Nuclear analizó la situación en la que se había quedado la planta tras el incendio

e identificó una serie de requisitos de seguridad que se debían cumplir antes de reanudar las actividades de la central nuclear Vandellós I. El titular, tras el análisis de dichos requerimientos, llegó a la conclusión de que las modificaciones correspondientes exigían unas inversiones injustificables desde el punto de vista del criterio de optimización de costes establecido para el sistema eléctrico español, y presentó a las autoridades su renuncia a la reanudación de la operación de la central.

Tomada la decisión del cese definitivo de explotación de la central nuclear Vandellós I se inicia la primera de las etapas del desmantelamiento: la descarga del combustible del núcleo del reactor, operación no habitual en un reactor de recarga en continuo, en el que el desmontaje del núcleo presenta una situación singular de riesgo. La descarga del combustible del reactor fue autorizada por Resolución del Ministerio de Industria, Comercio y Turismo de 22 de marzo de 1991, una vez evaluados por el Consejo de Seguridad Nuclear los documentos presentados por el titular.

Inmediatamente después de la decisión de la parada definitiva de Vandellós I, Enresa, como empresa responsable de la gestión final de los residuos radiactivos, inició los estudios para seleccionar la alternativa de clausura más conveniente. Las conclusiones del estudio se concretaron en el plan de desmantelamiento de la central nuclear Vandellós I que fue presentado a la aprobación de las autoridades. El 27 de noviembre de 1992, el Ministerio de Industria, Comercio y Turismo aceptó la alternativa que Enresa propuso para el desmantelamiento y clausura de la instalación.

Camisas de grafito. Residuos radiactivos generados durante la operación de la central nuclear Vandellós I, almacenadas en los silos de la central.

La estrategia elegida para el desmantelamiento y clausura de la instalación contempla tres períodos o fases en el desarrollo del PDC (Plan de Desmantelamiento y Clausura). La consecución de la primera de las fases ha dejado el cajón del reactor, ya descargado, junto a sus estructuras internas y sistemas de control en un período de espera y decaimiento denominado fase de latencia.

Tras este período de latencia, que tiene una duración prevista de unos 25 años, se procederá a desmontar y desmantelar el cajón del reactor con el objeto de liberar la totalidad de los terrenos de la instalación.

La central nuclear Vandellós I es la primera que se desmantela en nuestro país y una de las primeras centrales nucleares comerciales de potencia que se desmantela en el mundo, por lo que los estudios técnicos elaborados al efecto, las propias actividades y trabajos de desmantelamiento, así como el control regulador que el CSN lleva a cabo sobre todo el proceso, son seguidos con especial interés por los expertos del sector.

Celda de trituración de las camisas de grafito recuperadas de los silos de almacenamiento de la central nuclear Vandellós I.

En la primera fase Hifrensa, la empresa explotadora de la central nuclear, se responsabilizó de las actividades de acondicionamiento previo de la instalación antes de iniciar propiamente el proceso de desmantelamiento. Las actividades más significativas de esta fase fueron la retirada y expedición a Francia del combustible gastado para su reprocesado, y la extracción y preacondicionamiento de los residuos depositados durante la operación de la instalación en los denominados silos de grafito.

A finales de 1994 se evacuó el último de los elementos combustibles irradiados que quedaba en la piscina de combustibles de Vandellós I para proceder a su reciclado en Francia. El acondicionamiento de los residuos radiactivos de operación y la extracción y pre acondicionamiento del grafito de los silos finalizó en el año 1997.

La segunda fase se llevó a cabo en virtud de la Orden Ministerial de fecha 28 de enero de 1998, por la que se autorizó la transferencia de la titularidad de la central nuclear de la empresa Hifrensa, su antiguo titular de explotación, a Enresa, y se otorgó a ésta la autorización para ejecutar las actividades de desmantelamiento de la central reflejadas en el Plan de Desmantelamiento y Clausura de Vandellós I (PDC).

Estado de los silos de grafito de la central nuclear Vandellós I, una vez concluida su descontaminación. Se pueden apreciar las hoquedades producidas por la retirada del material contaminado, así como los puntos de medida para la verificación radiológica en el proceso de desclasificación de los mismos.

En esta segunda fase, ya bajo responsabilidad de Enresa, se llevaron a cabo actividades de desmantelamiento de ciertas partes activas de la instalación, se ha procedido a confinar y aislar herméticamente el cajón del reactor y a la puesta en servicio de los nuevos sistemas diseñados específicamente para la latencia de la instalación, lo que permitirá mantener el cajón del reactor controlado en las adecuadas condiciones de aislamiento durante toda la duración del período de latencia.

Una actividad importante de esta fase fue la puesta a punto de los equipos, sistemas y procedimientos que permitieron separar y segregar los materiales residuales no radiactivos de los materiales radiactivos, que deben ser gestionados posteriormente con medidas de seguridad específicas.

Verificación radiológica final de una pared, tras su descontaminación, con el objeto de su desclasificación.

La Dirección General de Política Energética y Minas del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio autorizó el 17 de enero de 2005 la fase de latencia de la instalación nuclear, quedando Enresa como titular de la misma y como responsable de la ejecución de las actividades de vigilancia y mantenimiento, en tanto dure dicha fase.

Estado actual del desmantelamiento de la central nuclear Vandellós I.

Volúmenes procesados del desmantelamiento de la central nuclear Vandellós I

Tipo de residuo	Cantidad-toneladas	Destino
Chatarra convencional	16.500 t	Reciclado
Escombros de hormigón	277.000 t	Vertedero
Residuos radiactivos (1)	2.000 t	Almacén de residuos de baja y media actividad de El Cabril
Total	**310.000 t**	

(1) Incluye 1.128 t en camisas de grafito.

El desmantelamiento de la central nuclear José Cabrera

La central nuclear José Cabrera está situada en el municipio de Almonacid de Zorita (Guadalajara), en la comarca de La Alcarria, junto al río Tajo. Es propiedad de Unión Fenosa Generación, y fue la primera central nuclear que entró en operación en España. Comenzó su construcción en 1965, y fue conectada a la red eléctrica en 1969.

Etapas de la vida de la central nuclear José Cabrera.

En la actualidad dispone de una declaración de cese definitivo de la explotación emitida por la Dirección General de Política Energética y Minas del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (Orden Ministerial de 20 de abril de 2006) desde el día 30 de abril de 2006.

Enresa ha presentado en mayo de 2007 la solicitud para proceder al desmantelamiento de la central que se estima comenzará a lo largo del año 2009.

A diferencia del caso de Vandellós I, descrito en el punto anterior, el Plan General de Residuos Radiactivos contempló, para el resto de las centrales en operación, un desmantelamiento que alcance el nivel 3 de forma inmediata, dejando disponible el emplazamiento para otros fines.

La central nuclear José Cabrera es la primera que aborda esta estrategia, y en la actualidad, se encuentra en la primera fase del proceso de desmantelamiento.

Se han retirado todos los elementos combustibles irradiados y las barras de control, y se han almacenado en el foso de combustible gastado. El resto de los sistemas se mantienen como estaban en operación, existiendo un control de la contención y de aquellos sistemas que se consideran importantes para la condición de parada.

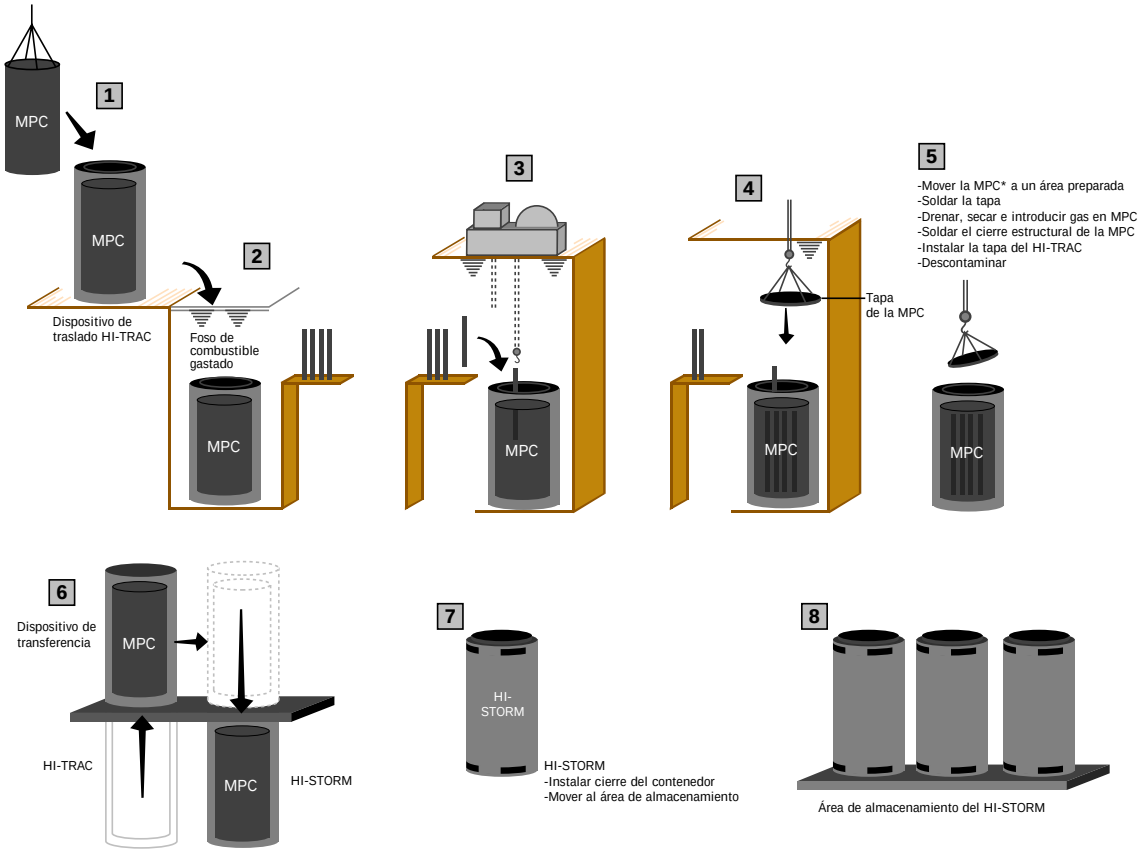
Almacenamiento temporal individualizado de los elementos combustibles en el emplazamiento de la central nuclear José Cabrera.

Durante este periodo, la central se mantiene bajo vigilancia, con los equipos de vigilancia de la radiación operativos, tanto dentro de la planta como en el área circundante. Existe un programa de inspección y prueba específico para la nueva condición de la instalación.

La normativa española exige que se haya extraido todo el combustible irradiado de la instalación antes de recibir la autorización de desmantelamiento. La central nuclear José Cabrera ha elegido construir una instalación auxiliar, denominada Almacenamiento Temporal Individualizado (ATI) dentro del emplazamiento de la instalación.

El objetivo es almacenar de manera temporal, fuera de la piscina los elementos combustibles irradiados, de manera que se pueda solicitar la autorización de desmantelamiento, y que no existan interferencias con las tareas propias del mismo.

En este almacén temporal individualizado, los elementos combustibles, y residuos de alta actividad son almacenados en contenedores en seco, que se refrigeran por medios pasivos, es decir, no necesitan de nuevos sistemas que aseguren la refrigeración de los mismos.



Operaciones de descarga de los elementos combustibles de la piscina de combustibles y carga en contenedores para su almacenamiento en seco.

*(Multiple Pourpose Canister)

Realización de frotis en el programa de caracterización de la planta.

Los contenedores que se vayan a emplear tanto para el almacenamiento como para el transporte, deben ser aprobados previamente

En el caso de la central nuclear José Cabrera, el sistema de almacenamiento seleccionado es el contenedor de almacenamiento HI-STORM, y el contenedor de transporte HI-STAR, ambos de diseño americano (HOLTEC).

Además de las actividades propias de la extracción del combustible desde el foso de combustible gastado al Almacén Temporal Individualizado (ATI), se han llevado a cabo procesos tales como la descontaminación de los circuitos primario y auxiliar de la instalación. Dichas actividades están orientadas a reducir las posibles dosis que se reciban por parte del personal, en los trabajos de desmantelamiento y a gestionar mejor los mismos.

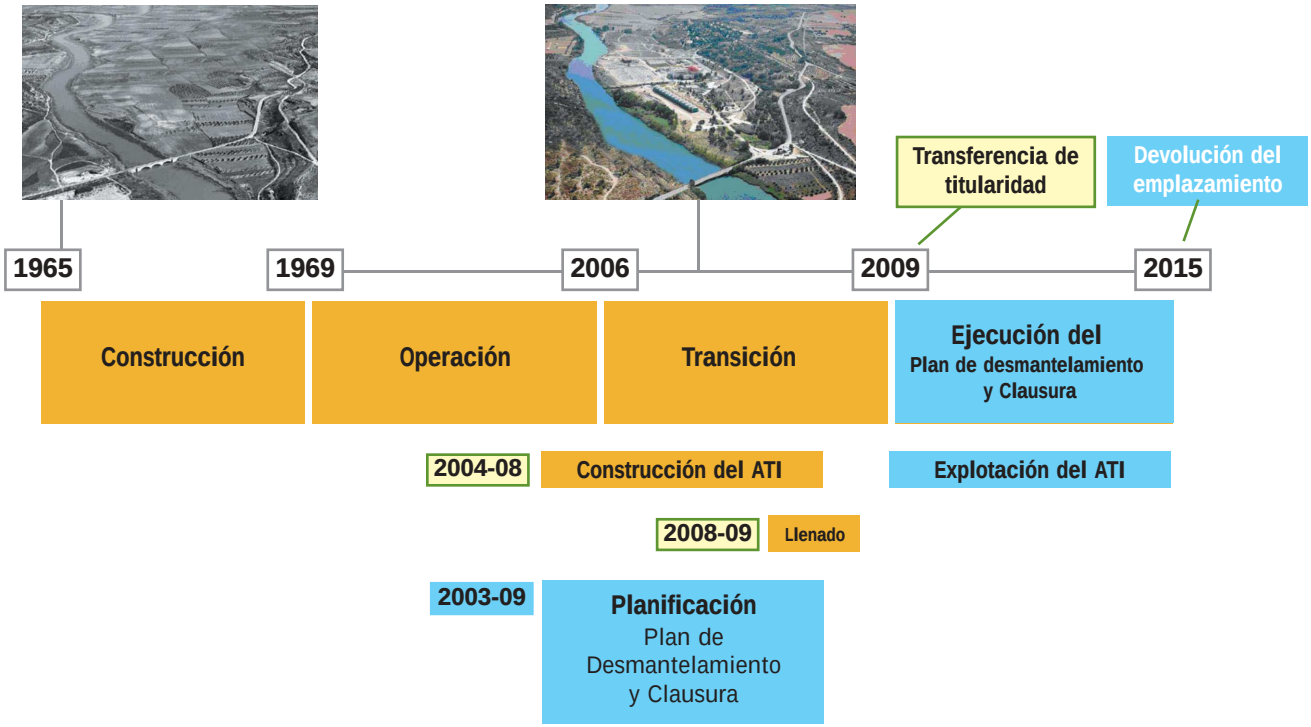
Otra actividad es la caracterización radiológica de la instalación. Se lleva a cabo en el período entre el final de la operación y el inicio del desmantelamiento. Es, desde el punto de vista del desmantelamiento, un punto clave ya que sirve para marcar las estrategias para llevarlo a cabo y define, entre otros aspectos, las zonas radiológicas y el tipo de contaminación de las mismas. Esta información es necesaria para plantear futuras actuaciones de descontaminación, protecciones al personal trabajador, planificación de desmontaje de equipos y gestión de residuos.

Escarificado y toma de muestras para el programa de caracterización de la instalación.

Como ya indicamos, durante este período de cese de explotación, los sistemas se encuentran en unas condiciones similares a las de explotación, aún cuando muchos de ellos no cumplen ninguna función de seguridad.

Por esta razón, durante esta fase se procederá a realizar el llamado “descargo” definitivo de sistemas, o lo que es lo mismo, anular su capacidad de operación. De esta forma se reduce el número de sistemas activos de los que dispone la central nuclear, manteniendo únicamente aquellos que sean de seguridad, o importantes para la condición de parada de la instalación.

El calendario propuesto para el desmantelamiento de la central nuclear José Cabrera es el siguiente:



Responsabilidad de Enresa

Responsabilidad del titular de la central

El Consejo de Seguridad Nuclear

Las centrales nucleares están sujetas antes de su operación, a un sistema de autorizaciones previas por parte de las autoridades competentes, así como a una posterior regulación y control de su operación para poder garantizar la seguridad durante su funcionamiento.

Las centrales nucleares que cesan su operación, por razones técnicas, económicas o por un cese obligado de su actividad, continúan estando sujetas al mencionado sistema de control regulador, en tanto que las autoridades competentes sigan considerando que la radiactividad residual de las mismas representa una fuente potencial de daños biológicos a los individuos que puedan resultar afectados o que la propia instalación inactiva representa un riesgo ambiental inaceptable.

Los titulares de los proyectos de desmantelamiento han de someter a las autoridades los informes de seguridad en los que se analicen los riesgos previstos durante el desarrollo de las actividades de desmantelamiento y en los que se expongan los procedimientos y protecciones que se pondrán en práctica para evitarlos.

El Consejo de Seguridad Nuclear creado mediante la Ley 15/1980, reformada por la Ley 33/2007 de 7 de noviembre, es un organismo independiente de la Administración central del Estado, que tiene como fin primordial velar por la seguridad nuclear y la protección radiológica. Entre sus funciones está la de evaluar la seguridad de los proyectos de desmantelamiento de las centrales nucleares, e informar a las autoridades ministeriales para que concedan o denieguen las autorizaciones necesarias. Los informes del Consejo de Seguridad Nuclear son preceptivos y vinculantes en materia de seguridad nuclear y protección radiológica.

Otra de las funciones del Consejo de Seguridad Nuclear es la de inspección y control de las instalaciones nucleares. Las actividades de desmantelamiento con mayor implicación radiológica son directamente controladas por el inspector residente del CSN en las centrales nucleares en desmantelamiento y en ocasiones por inspectores expertos desplazados al efecto para supervisar determinados aspectos concretos de las actividades de desmantelamiento.

El Consejo está capacitado para suspender las actividades de desmantelamiento de las instalaciones nucleares por razones de seguridad. Concede las licencias para las personas respon-

sables de la operación y las actividades de desmantelamiento y establece los límites y requisitos que deben cumplir dichas actividades para que el desmantelamiento no suponga un impacto radiológico inaceptable para las personas ni para el medio ambiente.

El Consejo es quien, en la última etapa del proceso de desmantelamiento, evalúa las condiciones radiológicas en las que queda el emplazamiento de la antigua central nuclear después de finalizadas las actividades de desmantelamiento y, en función de los resultados de dicha evaluación, propone a las autoridades ministeriales la concesión de la declaración de clausura para la central nuclear desmantelada.

El Consejo de Seguridad Nuclear mantiene informada a la opinión pública sobre todos los temas de su competencia, incluido el desmantelamiento de las centrales nucleares. Asimismo informa anualmente de sus actuaciones al Congreso de los Diputados, al Senado y a los Parlamentos de aquellas comunidades autónomas en cuyo territorio estén radicadas instalaciones nucleares, elaborando un informe anual sobre el desarrollo de sus actividades que recibe una amplia difusión.