

INSTALACIONES PARA EL DESMANTELAMIENTO DE GRANDES COMPONENTES DE CENTRALES NUCLEARES



HUGO MEJÍA
Customer Manager
CYCLIFE GRUPO EDF



OPHELIE DARBON
Jefe de Proyectos
CYCLIFE ENGINEERING



GRÉGORI DIMITROFF-MEKAROV
Jefe de Proyectos
CYCLIFE ENGINEERING

Contexto y desafíos del desmantelamiento de grandes componentes

El desmantelamiento de grandes componentes metálicos, como los **generadores de vapor (GV)** o el presurizador, representa un desafío considerable debido a su tamaño, masa y la necesidad de proteger a las personas y al medio ambiente.

El desmantelamiento de grandes componentes presenta desafíos específicos, como son:

- **Volumen de residuos:** el desmantelamiento de estos componentes genera volúmenes significativos de residuos, especialmente de baja (RBMA) y muy baja actividad (RBBA). En Francia, por ejemplo, se estima una producción acumulada de entre 2,1 y 2,3 millones de m³ de residuos RBBA al final del desmantelamiento de los reactores actualmente en funcionamiento. En el corto y mediano plazo, se prevé que aproximadamente **500.000**

toneladas de metales RBBA necesitan una solución de tratamiento que permita una minimización y/o una revalorización de estos residuos. Sin una solución técnica y económicamente viable, estos metales se almacenarán como residuos radiactivos.

- **Protección radiológica:** Aunque la evacuación del combustible nuclear reduce alrededor del 99% de la radiactividad de una instalación, los trabajos en componentes activados y contaminados presentan importantes desafíos de la protección radiológica para los trabajadores. En el caso del generador de vapor, cerca del **98% del inventario de radiactividad** se localiza en el haz de tubos y la cámara de agua del circuito primario, y las operaciones de extracción y descontaminación de estas partes suelen ser largas, complejas y sólo se pueden automatizar parcialmente. Esto exige medidas de protección específicas, y el cumplimiento del principio ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*), impone un mayor número de recursos humanos.



Figura 1. Operación de corte de la parte superior de un generador de vapor, dentro del taller de gestión de grandes componentes en Cyclife en Suecia. (Fotografía cortesía de Cyclife)

- **Complejidad técnica y conocimiento histórico:** los grandes componentes han estado en funcionamiento durante varias décadas, en este sentido, la posible pérdida de conocimiento histórico de su explotación, falta de planos digitales y la falta de una caracterización radiológica precisa, son retos significativos.
- **Costes y plazos:** las operaciones de desmantelamiento de grandes componentes son inherentemente complejas y costosas, con el riesgo de importantes desviaciones de costes y retrasos.

Estrategias de desmantelamiento de grandes componentes

Una vez definida la estrategia general de desmantelamiento de una instalación nuclear (inmediato o diferido), los grandes componentes pueden gestionarse de dos maneras principales.

- **Estrategia de corte in situ o desmantelamiento in situ:** implica el corte y segmentación de los grandes componentes directamente dentro del edificio del reactor, **en áreas especializadas existentes o en nuevas instalaciones, dentro del emplazamiento de la central.** Los segmentos resultantes se acondicionan y se envían y almacenan (*repository*) temporal o definitivamente.

Esta estrategia se ha implementado con éxito en diversas centrales en España, Suecia o Alemania. Particularmente adaptada a los componentes más activados, como la vasija o los internos, es viable para otros grandes componentes en función de diversas consideraciones, técnicas y económicas.

- **Ventajas:** permite el desmantelamiento de grandes componentes sin necesidad de transporte de piezas masivas fuera del emplazamiento de la central. Es adecuado cuando:

- no se dispone de instalaciones externas para el tratamiento de grandes componentes,
- el coste de adecuación de edificios existentes en la central o la construcción de una instalación nueva, lo justifica.

La construcción de una instalación en el emplazamiento también tiene una mejor aceptación social, ya que permite mantener el empleo a nivel local y alimenta el ecosistema de subcontratistas. Finalmente, el uso de instalaciones dedicadas in situ, elimina la dependencia a actores terceros, y reduce la incertidumbre relacionada con costos variables asociados al transporte, como por ejemplo el precio del petróleo o las condiciones climáticas.

- **Inconvenientes:** si no se dispone de zonas específicas, puede aumentar la exposición a la radiación para el personal debido al trabajo en zonas afectadas por las fuentes de radiación localizadas cercanas al componente en cuestión.

Requiere la instalación de áreas de corte dedicadas. Por ejemplo, la **descontaminación de los generadores de vapor** en la **central de Chooz A** en Francia planteo importantes desafíos técnicos debido a su tamaño (pesando 110 toneladas y midiendo 14 metros de alto) y al espacio confinado. Para esta operación, se implementaron técnicas específicas, como el **lavado**

mecánico de los tubos obturados gracias a un tala-drado más un sandblasting (granallado), seguido de un lavado químico de los mismos.

- **Estrategia de grandes componentes, “Rip & Ship” o desmantelamiento externo:** consiste en el **traslado de grandes componentes completos**, como los generadores de vapor (GV), a **una instalación de almacenamiento temporal** (con el fin de aprovechar la reducción de la actividad radiológica por decaimiento natural) **o a una planta de tratamiento externa**. Esta es una opción que ha demostrado ser exitosa para generadores de vapor y otros grandes componentes.

- **Ventajas:** es una **forma rápida y efectiva de gestionar grandes componentes**, ya que: **reduce significativamente la exposición a la radiación de los trabajadores** al minimizar el manejo in situ de materiales activados; los componentes se manejan como piezas grandes en grandes contenedores. Optimiza la reducción del volumen de residuos y el reciclaje de metales, gracias a procesos de descontaminación y corte, que pueden combinarse con la fundición descontaminante.
- **Inconvenientes:** requiere una logística de transporte compleja para piezas muy pesadas y voluminosas. Este último factor, puede además encontrarse con problemas de aceptación de la opinión pública frente al transporte de grandes componentes contaminados, en vías y carreteras públicas. La disponibilidad de instalaciones externas especializadas para el procesamiento es un requisito.

¿In situ vs Rip & Ship?

La experiencia internacional demuestra que ambas estrategias pueden ser implementadas con éxito.

En la **tabla** a continuación se indican las principales modalidades de implementación.

Los criterios de selección están con frecuencia asociados a:

- **Exigencias reglamentarias y operacionales:** posibilidad de modificar la licencia de desmantelamiento, recursos humanos, restricciones ALARA.
- **Prioridades específicas del sitio:** tiempo exigido de evacuación, secuencia de desmantelamiento, espacio disponible, necesidad de paralelización de operaciones
- **Disponibilidad de un almacenamiento temporal:** periodo de decaimiento estipulado.

- **Estrategia de gestión de residuos:** capacidad disponible, costes de almacenamiento de residuos, minimización del volumen, horizonte temporal de almacenamiento

- **Opinión pública**

- **Costes**

En algunos casos, el transporte de grandes componentes contaminados o activados puede ser problemático desde el punto de vista de la aceptación de la opinión pública. En este caso, la construcción de instalaciones de desmantelamiento en el emplazamiento de la central puede ser una alternativa.

Por otro lado, la Autoridad de Seguridad Nuclear (ASN) en Francia, considera que el desmantelamiento de grandes componentes debe ser rápido para reducir las fuentes de peligro y poder reutilizar al máximo los recursos físicos y humanos disponibles en la central en el momento del cierre. Por tanto, el uso de instalaciones de tratamiento de grandes componentes existentes permite una evacuación rápida de los grandes componentes, y el acceso a tecnologías de descontaminación y de reducción de volumen de residuos, como la fundición, que de otra forma serían muy costosas de implementar dentro de la central.

Es por esto, que operadores como PreussenElektra GmbH en Alemania, la Nuclear Decommissioning Authority (NDA) en el Reino Unido, o el grupo Électricité de France (EDF) en Francia a través de su filial Cyclife, han optado por una estrategia equilibrada en función de los costes y con el objetivo de minimizar los residuos generados, apoyándose de manera significativa en instalaciones de tratamiento externas.

Adicionalmente, en la filosofía del grupo EDF, centralizar el tratamiento de sus grandes equipos en instalaciones fuera de la central, disminuye el riesgo de un impacto en la planificación y permite reducir los costes de equipos de descontaminación, corte y espacios de almacenamiento, gracias entre otros, a la economía de escala.

El **gráfico 1** muestra un comparativo de las opciones para el tratamiento de grandes componentes, desde el punto de vista de las necesidades del grupo EDF. Esta estimación se ha realizado en base a una estrategia de economía de escala, que incluye el tratamiento de los grandes componentes retirados y en operación de las centrales nucleares en Francia.

In situ	Rip & Ship
Segmentación dentro del edificio de origen	Construcción de una nueva instalación de tratamiento y almacenamiento de material radiactivo fuera de la central
Construcción de un taller dedicado para la descontaminación y corte de los componentes dentro del emplazamiento de la central	Tratamiento en una instalación externa, desmantelamiento solo o combinado a la fundición
Almacenamiento temporal directo del componente o equipo completo o partes del componente, en un Centro de Almacenamiento para decaimiento (latencia).	



Figura 2. Transporte de un Generador de Vapor, dentro las instalaciones de Cyclife en Suecia. (Fotografía cortesía de Cyclife)

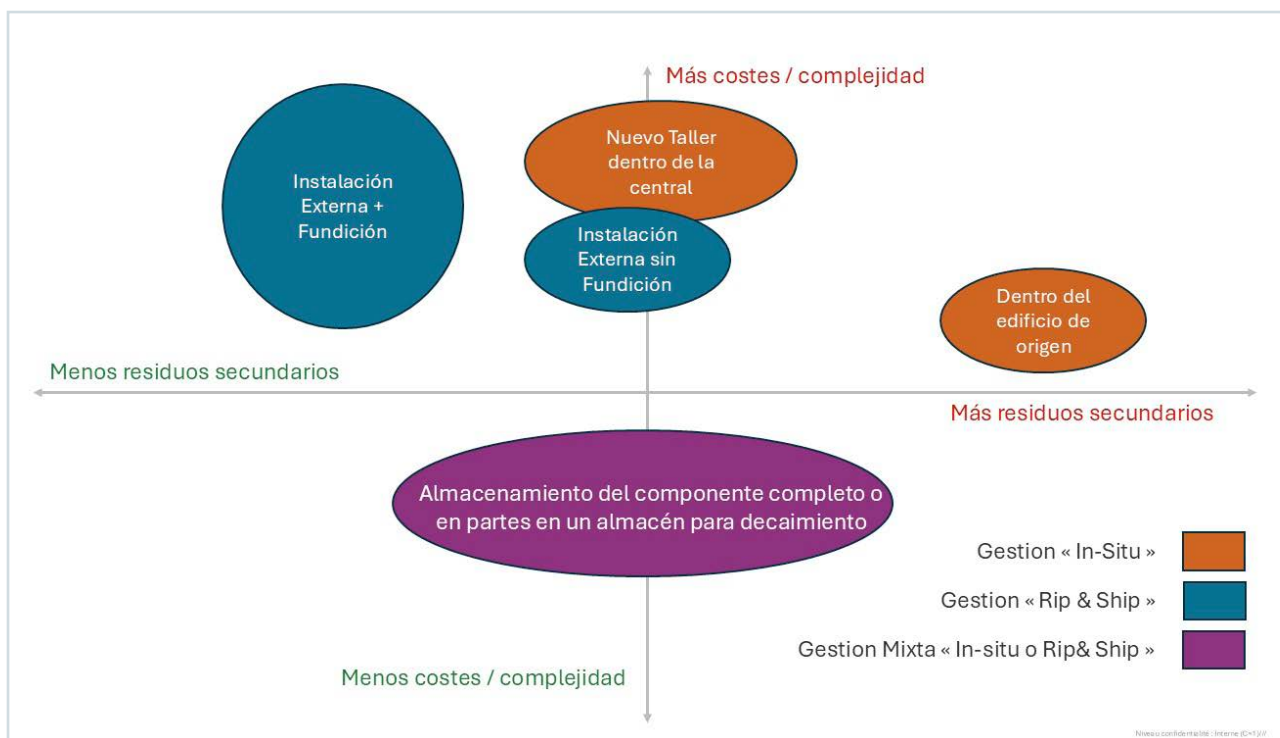


Gráfico 1. Tratamiento de Generadores de Vapor, Comparativo de “Costes y Complejidad” vs “Residuos”. (Fuente: Cyclife)



Figura 3. Vista aérea de la futura instalación Tecnocentro, en el sitio de la central nuclear de Fessenheim. (Fotografía cortesía de Cyclife).

El proyecto “Tecnocentro” (Technocentre), una apuesta francesa para el tratamiento de grandes componentes a nivel mundial

El Tecnocentro (**Figura 3**) es un proyecto pionero de EDF (gestionado por su filial Cyclife) para **valorizar los metales de muy baja actividad**, principalmente procedentes del desmantelamiento de centrales nucleares y reciclarlos en la industria convencional. Se ubica en el sitio de la central nuclear de Fessenheim, cuyas dos unidades cesaron su actividad en 2020.

1. Capacidad y componentes tratados: la instalación, de 15 hectáreas con 30.000 m² de superficie de planta, tendrá una capacidad de tratamiento de **25.000 toneladas de acero al año**, incluyendo de 12 a 18 generadores de vapor. También podrá almacenar 5 GV y 320 contenedores. Las principales fuentes de metales, actualmente identificadas, provendrán de los generadores de vapor reemplazados de las centrales de EDF, los aceros de la planta de enriquecimiento Georges Besse 1 de Eurodif, y otros componentes metálicos como tuberías, bombas e intercambiadores. Sin embargo, el Tecnocentro tendrá una capacidad instalada suficiente para tratar grandes componentes provenientes de otras partes del mundo, siempre y cuando estos cumplan los criterios de aceptación de residuos.

2. Proceso: el Tecnocentro utilizará un **horno de arco eléctrico** para la fundición a aproximadamente **1.650 °C**. Esto permite separar las impurezas (que se concentran en la escoria) y producir lingotes de acero que cumplen con los criterios radiológicos para su gestión convencional (concentración de actividad inferior o significativamente inferior a 1 Bq/g). El proceso incluye etapas de prepa-

ración (descontaminación, corte, clasificación), fundición, caracterización radiológica y acondicionamiento.

3. Ventajas: el reciclaje permitirá liberar hasta el 80% del material de un generador de vapor y hasta el 95% de otros materiales metálicos. La valorización de 500.000 toneladas de acero **ahorrará 450.000 m³ de volumen de almacenamiento** en los centros de residuos. Además, reducirá el consumo de energía en un 40% y la huella de carbono en un 60% en comparación con la producción de acero a partir de mineral bruto.

4. Cronograma y empleo: la puesta en servicio está prevista para 2031, generando aproximadamente **180-200 empleos directos permanentes**. El coste de inversión estimado es de unos 450 millones de euros.

Retos futuros

El desmantelamiento de grandes componentes beneficia de una creciente experiencia internacional, sin embargo, existen desafíos tecnológicos, económicos, así como limitaciones que aún deben resolverse, algunos ejemplos son:

- El reciclaje del Inconel del haz de tubos del GV.
- La minimización del volumen de resinas utilizadas para los procesos de descontaminación química.
- El diseño de herramientas de corte modulares, con el fin de hacerlas más versátiles, adaptables y reutilizables.
- La cooperación internacional y el intercambio de experiencias, puede verse entrabado por consideraciones de propiedad intelectual e intereses económicos. ■