

ANÁLISIS INICIAL PARA EL DESMANTELAMIENTO DEL REACTOR DE VANDELLÒS I



RUI PEDRO DE CASTRO MEIRELES

Director de proyecto para la Ingeniería de Latencia, Desmantelamiento y Clausura de Vandellòs I.
WESTINGHOUSE

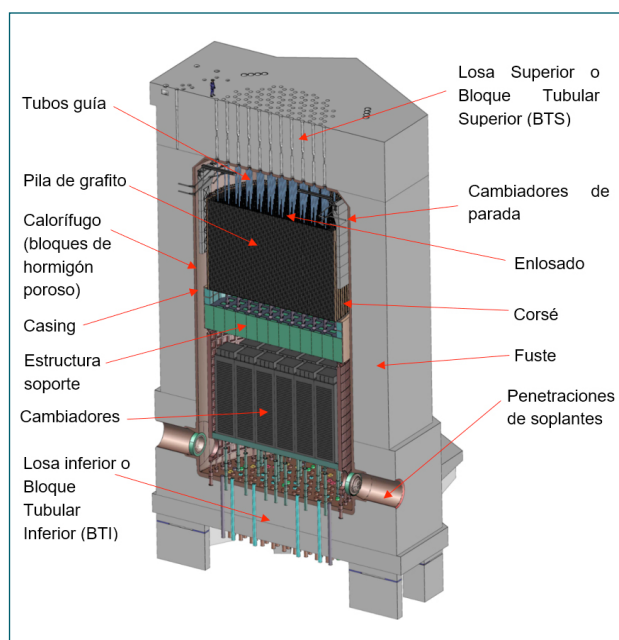
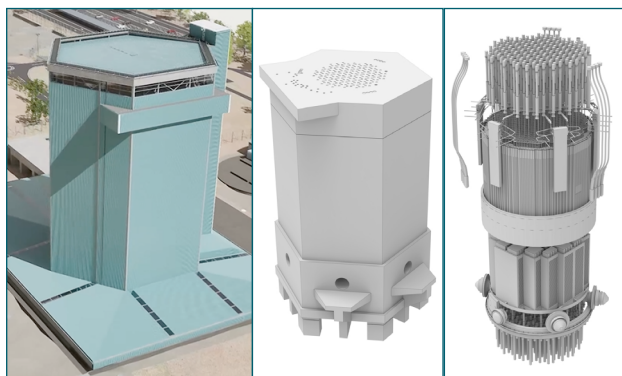


MARÍA ELISA GIMENO BLESÁ

Jefa de Ingeniería del Proyecto de Desmantelamiento y Clausura de Vandellòs I.
EMPRESA NACIONAL DE RESIDUOS RADIATIVOS (ENRESA)

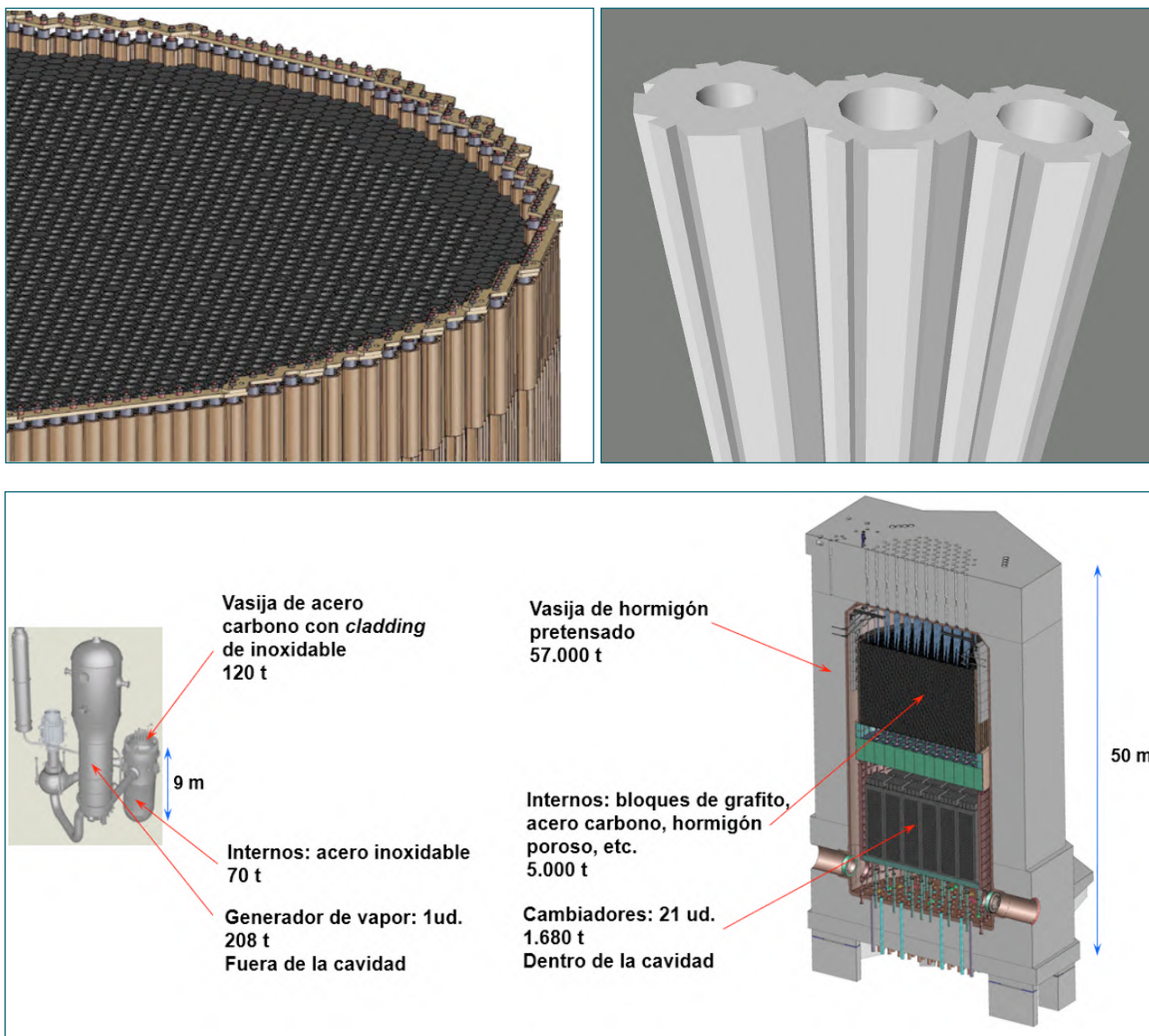
VANDELLÒS I COMO SINGULARIDAD

El reactor de Vandellòs I se compone de una vasija de hormigón pretensado, en forma de prisma recto cercano a los 50 m de altura total, con sección hexagonal regular y cerrado por sendas losas en su parte superior e inferior. Los espesores de las paredes varían entre los 4,75 y los 6 m.



Dicha estructura forma una cavidad interior en forma de cilindro de revolución de eje vertical de 36 m y de 19 m de diámetro, la cual se encuentra revestida con un dispositivo de estanqueidad compuesto por chapa de acero, y con

una protección térmica formada por un sistema de anclajes mecánicos y bloques de hormigón. La cavidad alberga el apilamiento de grafito, las estructuras soporte del mismo, la protección biológica y los cambiadores principales y de parada.



El apilamiento, cilindro recto de eje vertical de 10 m de altura y cercano a los 16 m de diámetro, se compone de más de 35.000 bloques de grafito en forma de barras prismáticas con salientes en forma de cola de milano para ensamblar con los bloques adyacentes, repartiéndose en 8 lechos y totalizando un peso aproximado de 2.400 t.

Un reactor PWR como el ya desmantelado de Zorita (CN José Cabrera) contaba con una vasija de acero de 120 t y 9 m de altura, la cual albergaba unos internos de 70 t, unas 35 veces menos en peso y casi 50 veces menos en volumen que el núcleo de Vandellòs I. En términos de diseño y planificación del desmantelamiento, las implicaciones vinculadas a las diferencias de dimensiones y pesos entre los reactores PWR/BWR y Vandellòs I van más allá de una simple escalación de plazo de ejecución, del número de equipos o del número de trabajadores.

En reactores PWR/BWR es práctica habitual realizar la apertura del reactor y el desmantelamiento de los Internos disponiendo de un blindaje de agua, sin embargo, actualmente hay un consenso generalizado sobre la inviabilidad de aplicación de dicha estrategia en los reactores del tipo

de Vandellòs I, por necesitarse para ello la inundación del interior del cajón.

En el desmantelamiento de los reactores PWR y BWR, las tasas de dosis en los puentes de trabajo de las piscinas de segmentación de internos, gracias al blindaje de agua, se sitúan en el orden de pocas decenas de $\mu\text{Sv/h}$, lo que posibilita la presencia de los operadores de los equipos sobre los mismos de forma regular, y a su vez el empleo de sistemas de desmantelamiento semi-remotos. En Vandellòs I, una vez retirada la losa superior para el acceso al reactor, se esperan tasas de dosis incompatibles con la presencia de operadores, que podrían incluso aumentar a medida que los lechos de bloques se vayan retirando por la mayor exposición de los aceros activados. En un supuesto en el que como parte del Sistema de Desmantelamiento se instalase una plataforma de operaciones circular que cerrase la cavidad por su parte superior, con un blindaje equivalente de 10 cm de espesor de acero, seguirían encontrándose tasas de dosis entre los 0,5 y 1,0 mSv/h sobre la misma. Este escenario implica, necesariamente, la disposición de grandes estructuras y equipos operados de forma totalmente remota así

como los procedimientos y condiciones radiológicas que posibiliten la instalación y el mantenimiento de todo ello.

Las referencias internacionales empleadas durante los análisis de alternativas para el desmantelamiento del reactor de Vandellòs I se agrupan en ejecutadas y en estudio. De las primeras, se consideran de especial interés Windscale AGR (UK), Fort St. Vrain (US) y Brookhaven (US), por su potencial de trasposición a Vandellòs I, al menos de forma parcial. En el segundo grupo, por proximidad y por compartir un entorno colaborativo en esta etapa de estudio y planificación, se encuentran Saint Laurent (FR), Chinon A2 (FR), Ignalina (LT), Latina (IT), y en menor medida la flota Magnox (UK).

Los desmantelamientos de reactores de grafito ya ejecutados, así como los que se encuentran en proceso de estudio, por lo general optaron y planean optar, respectivamente, por el desmantelamiento de la pila de grafito en seco, mediante sistemas y herramientas operadas de forma remota. Como única excepción se encuentra Fort St. Vrain, cuyo reactor fue inundado de agua y su pila fue desmontada mediante un sistema semejante a los empleados para la segmentación de internos en reactores PWR y BWR. Los Sistemas de Desmantelamiento empleados en Windscale AGR y en Brookhaven representaron importantes hitos en el empleo de tecnologías de control y operación remotos, aunque aplicadas con perspectivas y objetos diferentes: desmontaje y extracción de bloque a bloque el primero, demolición y carga a granel el segundo.

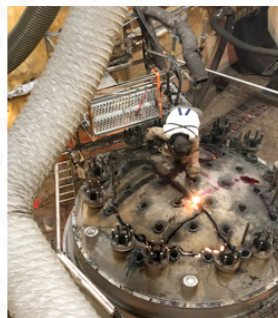
Los Sistemas de Desmantelamiento que se están considerando para los reactores de grafito durante la presente fase de estudio y planificación, de un modo u otro, están basados en las referencias ejecutadas, aunque necesariamente escalados y adaptados a las dimensiones y configuraciones correspondientes. Dadas las condiciones radiológicas de un escenario en seco, cualquiera de los reactores de las flotas UNGG, Magnox, o RBMK, requerirá del empleo de un sistema completo operado de forma remota, al tiempo que por sus dimensiones encontrará diversas limitaciones tecnológicas relacionadas, por ejemplo, con el despliegue vertical de manipuladores y herramientas hasta la cota más baja a alcanzar. De este modo, los Sistemas de Desmantelamiento para el desmontaje del núcleo de los componentes y estructuras activadas de los reactores de grafito, compuestos por los respectivos subsistemas de despliegue, manipulación y herramientas, se encontrarán entre los más complejos de la industria.

La consideración actual, generalizada entre operadores y otras organizaciones, es que el desmantelamiento de las pilas de grafito se llevaría a cabo mediante desmontaje de las unidades que las componen, por extracción vertical de los bloques mediante dispositivos operados de forma remota. El estudio de este método es, al menos por el momento, el que mayor concentración de recursos está captando, al margen de que aún se desconozca en gran medida el estado estructural de las pilas y de los propios bloques que, por otra parte, será determinante para garantizar la viabilidad del desmontaje por extracción vertical.

En parte por las incertidumbres señaladas, pero también porque en España están surgiendo posibles vías de gestión del grafito alternativas al simple almacenamiento final

Sistemas de Desmantelamiento

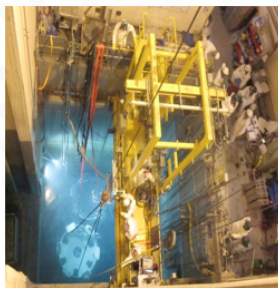
COMPLEJIDAD BAJA
Tapa reactor Bohunice



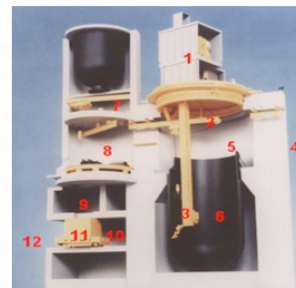
COMPLEJIDAD MEDIA
AWT Bohunice



COMPLEJIDAD ALTA
Internos Zorita



COMPLEJIDAD MUY ALTA
Reactores de Grafito



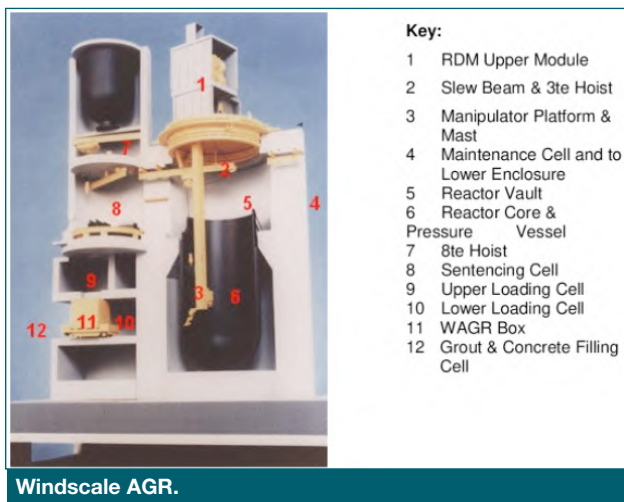
de bloques en contenedores, alternativas como la molienda y fragmentación in situ y el empleo de ROV (Remotely Operated Vehicle) como equipos auxiliares al Sistema de Desmantelamiento principal, empiezan a cobrar protagonismo.

QUÉ SE HA HECHO EN OTROS REACTORES DE GRAFITO

A continuación, se recogen algunos de los aspectos más destacados obtenidos del análisis llevado a cabo de las referencias internacionales en desmantelamiento de reactores de grafito.

Windscale AGR

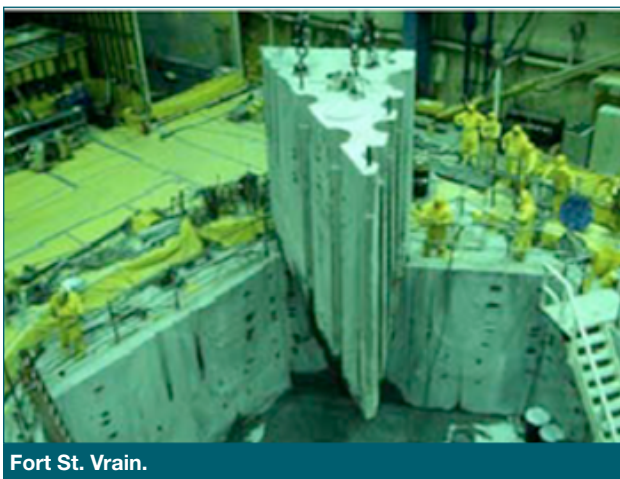
- La RDM (*Remote Dismantling Machine*) del WAGR tuvo un coste de 8,25 Mill£ (año 1990).
- Las tasas de dosis de la *maintenance cell* de la RDM, pese a estar ubicada en la mejor posición posible, alcanzaron los 40 mSv/h tras quedar expuestas ciertas zonas de las estructuras activadas una vez que se retiró una parte del grafito.
- Con un volumen confinado de unos 1.000 m³, se instaló un sistema de ventilación de 15.000 m³/h de capacidad, con un coste de 1,0 Mill£ (año 1990). La mayor actividad másica de un acero cortado mediante oxi-gas fue de 3,52E+06 Bq/g.
- Para la extracción de los 2.024 bloques, uno a uno mediante el brazo manipulador de la RDM, se emplearon 10 meses.



Windscale AGR.

Fort St. Vrain

- La elección de la estrategia de inundar el reactor pudo estar favorecida por las estimaciones previas de tasa de dosis esperables, no obstante, se subestimaron los niveles de activación, lo que resultó en un sobrecoste del 89% y en un incremento de las horas de trabajo en Zona Controlada del 340% respecto a las estimaciones iniciales.
- La losa superior del cajón, con 1.320 t y 4,75 m de espesor, se segmentó in situ en 12 bloques y, a su vez, cada uno de ellos en 3 partes en una estación de corte secundario. La actividad se completó en 9 meses.
- Para un volumen inundado de 1.230 m³ se empleó un sistema de tratamiento de agua que incluía 2 bombas de 114 m³/h de caudal para recirculación, así como sistemas de filtración y desmineralización.
- Para el desmantelamiento de la pila de grafito inundada se empleó como Sistema de Desmantelamiento una plataforma circular giratoria instalada en la parte superior del cajón, dotada de una abertura rectangular diametral. Se supone que como sistema de despliegue se utilizaron pértigas, mástiles, o un aparejo semejante a los empleados en la recarga de combustible.



Fort St. Vrain.

Brookhaven

- Se optó por la excavación o extracción (*mining*) y carga del grafito a granel mediante un sistema operado de forma remota, compuesto por un brazo hidráulico telescópico de grandes dimensiones dispuesto sobre un pórtico de traslación con capacidad de carga de 70 t, operado remotamente. Adicionalmente, como equipo auxiliar se hizo uso de un ROV.
- La extracción del grafito de la pila de 63.000 bloques y 700 t de peso se completó en 3,5 meses (trabajos en 2 turnos/día de 10 horas, 6 días/semana).
- El volumen total del grafito cargado en contenedores de 4 m³ fue de 1.015 m³, frente a los 440 m³ del grafito en la pila (volumen construido).
- Para un volumen confinado de 4.000 m³ se instaló un sistema de ventilación de 8.800 m³/h de capacidad. El confinamiento se componía de un recubrimiento flexible dispuesto sobre una estructura tubular.
- Para mitigar la generación de polvo, en el extremo del brazo hidráulico se implementó un rociador para la proyección de una mezcla de agua y pintura de látex. Gracias a ello, con el 95% del grafito retirado, no había sido necesario sustituir los filtros HEPA sino únicamente los prefiltros.
- En cuanto al corte térmico de los aceros activados, fundamentalmente el liner interior del blindaje biológico, existieron ciertas dificultades relacionadas con la ventilación. En un primer momento se estimó que sería suficiente con un caudal de extracción de 10.200 m³/h, resultando de 4 a 6 veces por debajo de lo que hubiera sido adecuado según análisis posteriores; en consecuencia, hubo un gasto adicional en prefiltros de más de 100.000 USD.

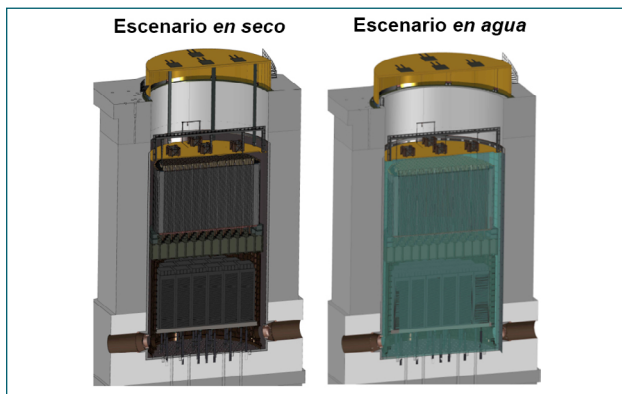


Brookhaven.

LA ESTRATEGIA EN SECO VS. BAJO AGUA

Tras analizar las experiencias del WAGR, de FSV y de Brookhaven, así como el estado de los estudios de Saint Laurent, Bugey 1 y Latina, en 2016 y 2017 se llevaron a cabo una serie de estudios con el objetivo de seleccionar la estrategia de alto nivel para el desmantelamiento de Vandellòs I, y que debía ser continuada en las siguientes fases de ingeniería. Las alternativas objeto de estudio fueron el

desmantelamiento de los internos del reactor en seco, o en agua (sumergidos en agua). Se identificaron y analizaron aquellos factores y fases del proyecto de desmantelamiento que constituían diferencias significativas entre las dos estrategias consideradas, obteniendo como resultado una serie de conclusiones que sirvieron de base para fundamentar la decisión tomada entonces: continuar con la estrategia en seco.



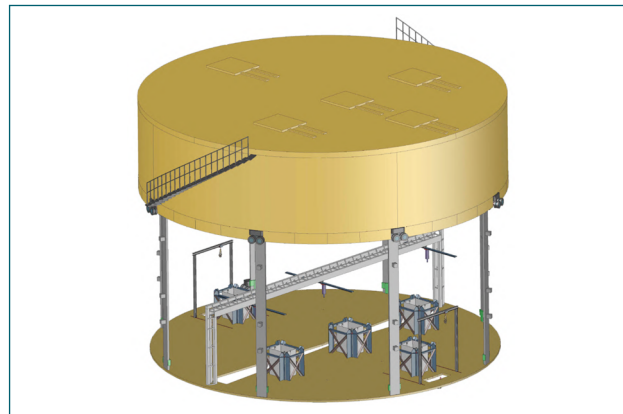
En aquel momento EDF (*Électricité de France*) abandonaba la estrategia en agua por razones técnicas, de gestión de residuos y de seguridad, de modo que, para posibilitar un análisis comparativo independiente, ENRESA impulsó el estudio de una solución a nivel conceptual que pudiese mitigar los riesgos asociados a la inundación del cajón. El concepto ideado consistió en la instalación de una virola cilíndrica metálica inundable entre los internos y la pared interior del cajón, desde las penetraciones de las soplanes de la parte inferior, soldadura in situ, y levantamiento hidráulico de anillos mediante una adaptación del *jacking method* empleado en construcción de tanques. Esta solución conceptual se desarrolló al nivel necesario para adaptarse al objeto y alcance del estudio comparativo de las alternativas y, tras servir a tal propósito, no se continuó profundizando en ella.

La base para la comparación de estrategias se estableció mediante la definición de la secuencia general de actividades para cada alternativa, y en la posterior identificación y estudio de aquellas actividades que aportarían diferencias significativas en la aplicación de los factores seleccionados, tales como tecnología, coste y plazo, impacto radiológico, etc. Dicho concepto de secuencia general de desmantelamiento para ambas alternativas se basaría en el proceso inverso a la construcción del reactor, llevado a cabo éste mediante el ensamblaje y edificación desde la base hacia arriba. De este modo, al margen de la estrategia seleccionada, en seco o en agua, el desmantelamiento se iniciaría desde la parte superior y progresaría hacia abajo a través de la cavidad del reactor.

Con objeto de facilitar la comparación de las alternativas, se optó por definir un concepto de Sistema de Desmantelamiento que fuera potencialmente válido y aplicable tanto al escenario en seco como al escenario en agua, con las correspondientes variaciones específicas. En Vandellòs I, debido a la configuración y dimensiones del reactor, y a las condiciones radiológicas del mismo, se requeriría de un Sistema de Desmantelamiento de complejidad media o

alta si se considera una estrategia en agua, y de alta a muy alta para estrategias en seco.

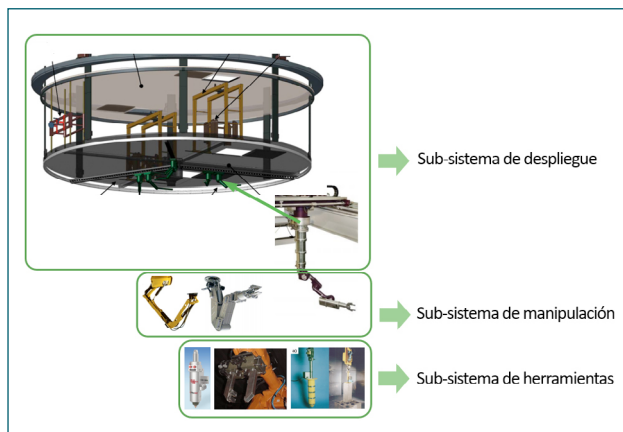
El Sistema ideado para el análisis comparativo, compatible con ambos escenarios, reunía las siguientes características comunes:



- Instalación sobre la losa superior del cajón.
- Cubierta superior de cerramiento (confinamiento).
- Despliegue de equipos de manipulación mediante combinación de giro de la estructura, y de descenso de la cubierta inferior.
- Multiestación para trabajos en paralelo.
- Herramientas de extracción de bloques con movimiento vertical.
- Herramientas de corte de aceros activados.

Los aspectos de este Sistema en los que cabían diferencias sustanciales en función del escenario en seco o en agua, eran los siguientes:

- Clase de confinamiento necesaria.
- Presencia de trabajadores sobre la cubierta inferior descendible.
- Tipo de operación y control.
- Tipo de sistemas de manipulación de herramientas.
- Blindaje.



La comparación de las alternativas en seco y en agua reveló que varios de los factores no lograban ser discriminatorios por no presentar diferencias significativas (tal es el caso del coste y el plazo) mientras que otros, pese a favorecer a alguna de las estrategias (impacto radiológico, residuos secundarios) no llegaron a establecerse como “claves”. Fueron, por encima de cualquier otro, las incertidumbres ligadas no solo a los riesgos derivados de la inundación del cajón sino de la propia operación normal, el factor decisivo en la toma de decisión final.

El resultado del análisis de ambas alternativas, como ya se ha indicado, resultó en la elección de la estrategia en seco para su continuación en las fases de ingeniería posteriores.

PROFUNDIZANDO EN LA ESTRATEGIA EN SECO

Actualmente, el análisis de alternativas está centrado en los aspectos más controvertidos de la estrategia en seco, y en aquellos que en España pueden constituir un caso excepcional por el tipo de gestión final que se adopte para el grafito irradiado.

En general, los proyectos internacionales colaborativos están plenamente focalizados en la estrategia en seco, en particular en la extracción de bloques mediante manipuladores instalados en sistemas de mástil de etapas desmontables y, en menor medida, sobre ROV.

La extracción de bloques enteros de la pila para su colocación en contenedores finales, si bien continúa siendo una de las alternativas a desarrollar en Vandellòs I, no se considera necesariamente la idónea. Westinghouse y ENRESA están explorando alternativas basadas en la fragmentación y molienda remotas realizadas directamente sobre la pila de grafito para su posterior extracción mecánica o por aspiración. Esta vía forma parte del diseño de la solución integral para la gestión final del grafito irradiado, cuya segunda vertiente se desarrolla mediante una serie de investigaciones en colaboración con el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), en el marco del proyecto GRACO. Los objetivos principales de este proyecto son el estudio de la viabilidad de la fabricación de morteros y hormigones utilizando el grafito como árido, así como de la aplicación de diferentes procesos de descontaminación centrados en el ^{14}C .

Un escenario en el que estas nuevas vías gestión final del grafito puedan replicarse a escala industrial, y sean

a su vez aprobadas por el regulador junto con las actualizaciones reglamentarias y operativas necesarias para su almacenamiento en El Cabril, conllevaría que el grafito dispuesto en bloques en el núcleo debiera fragmentarse y molerse en algún momento, implicando que la tendencia generalizada basada en el desmontaje de los mismos pueda no ser la mejor solución para Vandellòs I.

Dicho escenario precisaría de la incorporación de equipos e instalaciones auxiliares adicionales a los ya identificadas para una estrategia de extracción y simple almacenamiento del grafito sin pos-procesado. Entre otros, serían necesarios sistemas de transporte y almacenamiento, alimentadores, equipos de fragmentación primaria, secundaria y terciaria, clasificadores, ciclones, etc., en definitiva, toda una línea de producción industrial para el procesamiento de más de dos mil toneladas de grafito.

CONCLUSIONES

La reducida cartera de referencias de desmantelamientos de reactores moderados por grafito, así como la cantidad de información disponible de las mismas, ha dificultado sumamente configurar una “planta o caso de referencia” para el arranque de los estudios para el Nivel 3 de Vandellòs I. En lo positivo, esta situación ha posibilitado que a lo largo del proceso de análisis de alternativas no hayan existido limitaciones a la hora de plantear soluciones y escenarios novedosos.

De un modo análogo, la corriente imperante basada en la extracción de bloques no debe ser un obstáculo para que se continúen analizando métodos de desmantelamiento del grafito potencialmente más eficaces, seguros y alineados con las posibles vías de gestión que se están investigando en España.

Por el momento, el grafito continúa eclipsando otros elementos críticos del desmantelamiento como son la viabilidad de establecer la infraestructura para obtener las Clases de Confinamiento necesarias, la retirada de la losa superior del cajón, el corte y retirada de los tubos de la parte superior del núcleo, la instrumentación dispuesta sobre los lechos, el corte de más de 2.500 toneladas de aceros activados o el desmontaje del calorifugado. Gran parte de estas actividades deberá llevarse a cabo, al igual que la retirada del grafito, de forma remota, de modo que el Sistema de Desmantelamiento a desarrollar deberá ser compatible con muchos más elementos y operaciones que las inicialmente previstas. ■