

INGENIERÍA DE DESMANTELAMIENTO DE UN GRAN COMPONENTE DE UN REACTOR RBMK



SOFÍA LOBERA RODRÍGUEZ
Ingeniera de desmantelamiento
WESTINGHOUSE ELECTRIC COMPANY



MARK KUNSTAR STASAK
Ingeniero Principal
WESTINGHOUSE ELECTRIC COMPANY

1. INTRODUCCIÓN

La Central Nuclear de Ignalina (*Ignalina Nuclear Power Plant, INPP*), situada en Lituania, consta de dos unidades RBMK (*Reaktor Bolshoy Moshchnosti Kanalnyy*), reactores de tubos de presión refrigerados por agua y moderados por grafito, cada uno con una potencia eléctrica nominal de 1500 MW(e). La Unidad 1 inició su operación en 1983 y la Unidad 2 en 1987. En cumplimiento de los compromisos asumidos por Lituania como parte de su adhesión a la Unión Europea, la Unidad 1 fue parada de forma permanente en 2004 y la Unidad 2 en 2009. Desde entonces, la planta ha pasado completamente a la fase de desmantelamiento.

Cada unidad RBMK está equipada con cuatro Separadores de Vapor (*Steam Drum Separators, SDS*), grandes recipientes de separación agua-vapor que constituían una parte crítica del circuito primario del reactor durante la operación. Los SDS son estructuras cilíndricas de acero al carbono de aproximadamente 34 m de longitud y 3 m de diámetro, con una masa individual de unas 300 toneladas. Además de los SDS, el proyecto incluye el desmantelamiento de todos los sistemas conectados presentes en la sala, entre ellos las tuberías primarias de entrada de agua y salida de vapor, los sistemas de medición y control, las estructuras de acero, las columnas y los soportes. En total, se estima la retirada de hasta 6000 toneladas de material para ambas unidades, con una duración de la ejecución de aproximadamente cuatro años.

Aunque forman parte del circuito primario, los SDS y sus circuitos asociados se encuentran suficientemente alejados del reactor, por lo que el riesgo radiológico procede de la contaminación presente en las superficies y en los componentes internos. En particular, la apertura de las envolventes y la extracción de los internos representan las operaciones con mayor potencial de exposición

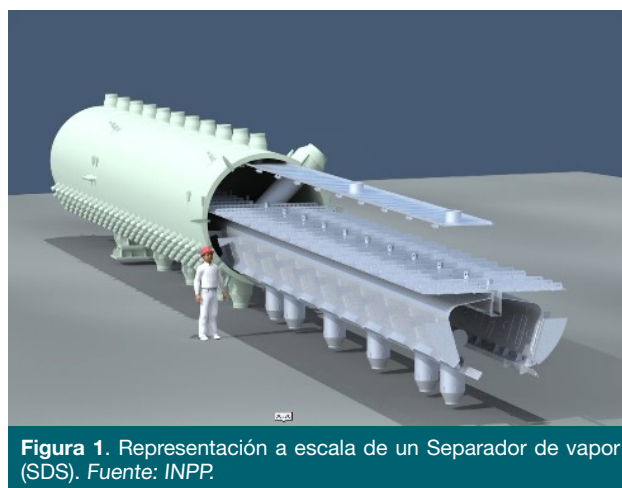


Figura 1. Representación a escala de un Separador de vapor (SDS). Fuente: INPP.

y dispersión de contaminación. Estos condicionantes radiológicos se combinan con importantes retos técnicos, entre los que destacan la accesibilidad limitada derivada de la configuración hermética de las salas, la ausencia de grúas en su parte superior, la elevada masa y las grandes dimensiones de los componentes, y la necesidad de mantener la estabilidad estructural durante toda la secuencia de desmontaje.

La estrategia de desmontaje se ha definido aplicando los principios ALARA desde las fases de ingeniería. Entre las principales medidas consideradas se encuentran el retraso de la apertura de los SDS hasta las etapas finales, la retirada previa de los sistemas circundantes para mejorar los accesos, la utilización de equipos operados a distancia, la selección preferente de técnicas de corte mecánico para los componentes con mayor contaminación y la planificación de las operaciones para reducir el tiempo de permanencia de los trabajadores en las proximidades de las fuentes.

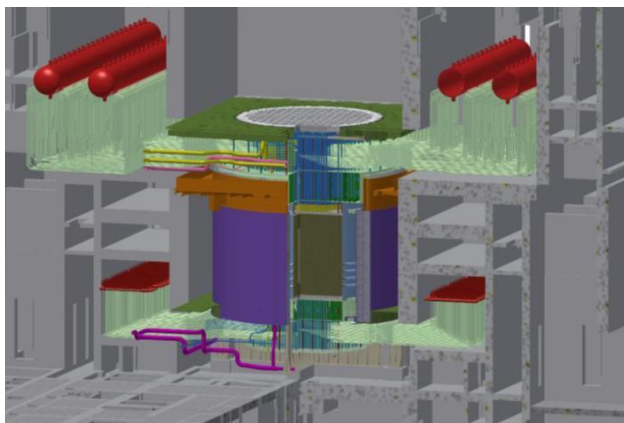


Figura 2. Representación de un reactor RBMK. Fuente: INPP.

La sala de los SDS fue diseñada como un recinto hermético y dispone de un sistema de ventilación que permite mantenerla en depresión respecto a las áreas adyacentes. Durante las operaciones de apertura y segmentación, este sistema contribuirá al confinamiento dinámico de la zona y al control de los aerosoles generados. La adecuación de la ventilación a las operaciones previstas se considera en función de la naturaleza del corte, la generación potencial de humos y aerosoles, y las condiciones radiológicas esperadas. Estas medidas se complementarán con la vigilancia radiológica del área de trabajo y con controles de contaminación y aerosoles durante la ejecución. Cuando las condiciones previstas no resulten compatibles con una

presencia continuada de trabajadores, las operaciones de corte, observación y manipulación se realizarán mediante sistemas operados a distancia.

El presente artículo describe la estrategia y la secuencia de desmantelamiento desarrolladas para los SDS, así como los principales equipos y soluciones de ingeniería seleccionados para su ejecución. Tras dos años para el desarrollo de la ingeniería, el proyecto se encuentra actualmente en sus primeras fases, por lo que los resultados presentados proceden principalmente de las actividades de ingeniería, simulación, desarrollo de prototipos y realización de pruebas.

2. SECUENCIA DE DESMANTELAMIENTO

A diferencia de la mayoría de proyectos de desmantelamiento, el desmontaje de los SDS y sus sistemas asociados se realizará de abajo a arriba. Aunque esta estrategia plantea un reto desde el punto de vista estructural, su adopción responde a dos motivos principales. En primer lugar, permite retrasar la apertura de las envolventes de los SDS y controlar así la dispersión de la contaminación presente en su interior, evitando el deterioro prematuro de las condiciones radiológicas de la sala. En segundo lugar, responde a la inexistencia de un punto de izado, como un puente grúa, en la parte superior de la sala.

La secuencia de desmantelamiento se divide en tres fases:

- Fase 1: Despeje de la zona inferior y central.
- Fase 2: Despeje zona superior.
- Fase 3: Segmentación y desmontaje de los SDS.

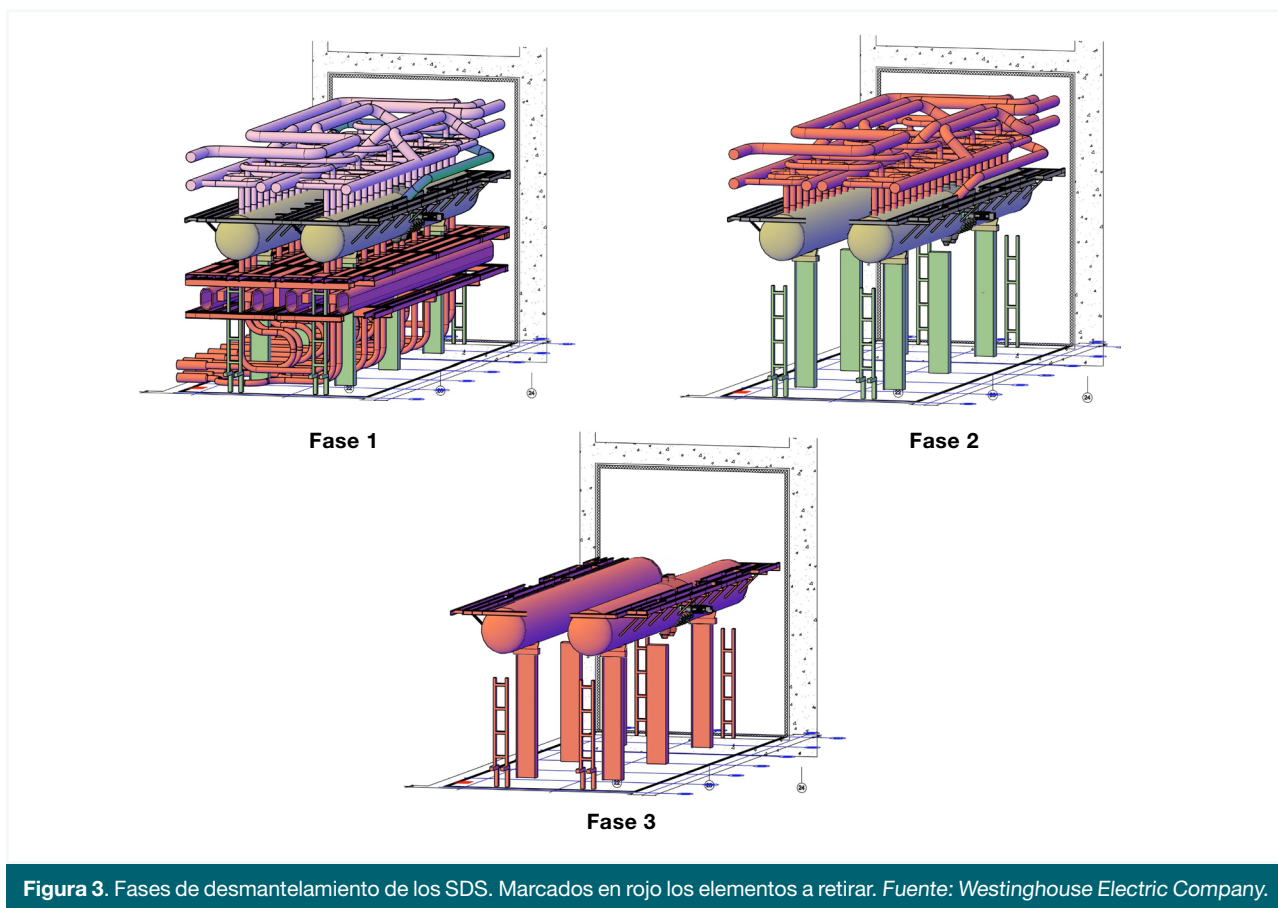


Figura 3. Fases de desmantelamiento de los SDS. Marcados en rojo los elementos a retirar. Fuente: Westinghouse Electric Company.

3. FASE 1: DESPEJE DE LA ZONA INFERIOR Y CENTRAL

La primera fase comprende la retirada de todos los sistemas situados en las zonas inferior y central de la sala, con objeto de generar el espacio necesario para la introducción de la grúa móvil.

En primer lugar, se retirará el sistema de tuberías que conducía el agua de los SDS hasta las bombas de recirculación del circuito primario. Se trata de tuberías de acero inoxidable de aproximadamente 300 mm de diámetro y 15 mm de espesor, que forman un entramado que ocupa toda la parte inferior de la sala. A continuación, se retirarán el emparrillado de soportes y los sistemas de protección entre filas IRP (*Interrow Protection*) y el sistema de monitorización de la integridad del revestimiento del combustible KGO (*Fuel Cladding Integrity Monitoring System, FCIMS*), ambos característicos de la tecnología RBMK. El sistema KGO consistía en una sonda instalada sobre raíles dentro de una guía tubular que recorría longitudinalmente la sala, permitiendo medir la tasa de dosis asociada a cada una de las tuberías agua-vapor procedentes del reactor y detectar posibles fugas de combustible. Por su parte, los IRP estaban formados por vigas de hierro que proporcionaban el apantallamiento necesario para efectuar dichas mediciones de manera selectiva y fiable.

La dificultad principal reside en definir una secuencia de retirada que mantenga la estabilidad de la estructura y permita desmontar elementos pesados y difíciles de segmentar. El caso más exigente corresponde al sistema IRP, constituido por vigas macizas de hierro fundido con secciones de hasta 370 x 1.250 mm. Estas características obligan a desmontar y manipular en altura piezas de gran tamaño. Una vez depositadas en el suelo, se prevé su descontaminación para evitar una segmentación adicional y posibilitar, cuando resulte aplicable, su liberación como grandes componentes.

Las tasas de dosis previstas, del orden de 30 microSv/h, permiten aplicar técnicas de corte in situ, complementadas con medios operados a distancia cuando lo requieran las condiciones de acceso, manipulación o seguridad. Para los elementos contaminados, principalmente las tuberías, se empleará el corte mecánico con objeto de limitar la generación y la dispersión de partículas contaminadas inhalables. En los restantes elementos predominará el corte por plasma. Los equipos más destacados durante esta fase son el robot de demolición y el sistema de izado tipo *jack-up*.

3.1. Robot de demolición para manipulación y corte de tuberías

Debido a que el espacio reducido todavía no permite la inserción de la grúa móvil, durante esta primera fase se utilizará un robot de demolición para la manipulación de cargas y asistencia en el transporte de contenedores.

Este equipo destaca por su fácil maniobrabilidad, largo alcance y su alta capacidad de carga en relación con su tamaño reducido. Además, la posibilidad de intercambio de herramientas hace que pueda ser utilizado tanto para manipulación como para corte. El robot de demolición, equipado con sierra de disco y operado a distancia, asistirá en el corte mecánico de las tuberías.

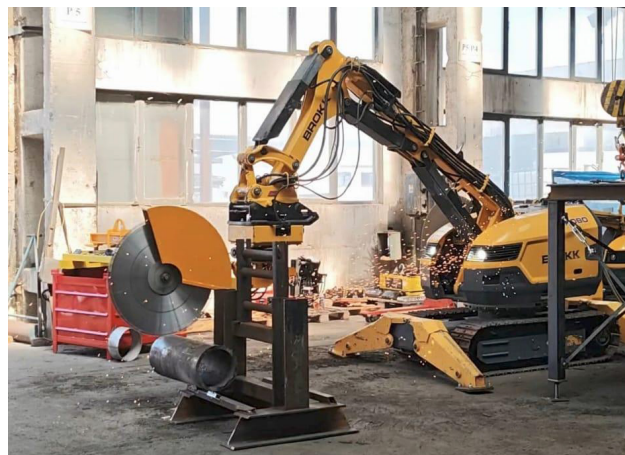


Figura 4. Robot de demolición equipado con sierra de disco. Fuente: Westinghouse Electric Company.

3.2. Sistema de izado tipo *jack-up* para desmontaje de estructuras elevadas

Para asegurar que la estructura permanezca estable durante todo el proceso de segmentación, se utilizará un sistema de izado con gatos y cajas apilables, de tipo *jack-up*. Se trata de un sistema de elevación hidráulico diseñado para el soporte de estructuras pesadas. Está formado por torres de elevación temporales con una gran capacidad de carga, cuya altura se regula a través de elementos modulares de apoyo apilables.

El sistema está diseñado para que la carga permanezca siempre apoyada sobre elementos mecánicos de soporte, evitando un descenso incontrolado en caso de fallo hidráulico o eléctrico. El sistema puede operarse a distancia.

Cada torre tiene una capacidad de carga de 30 t y alcanza una altura de 6 m.

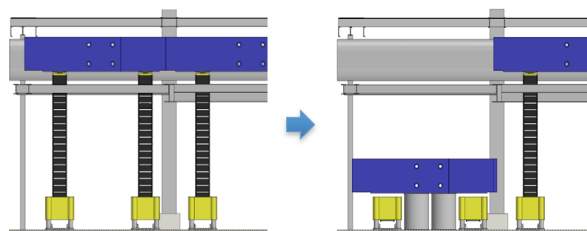
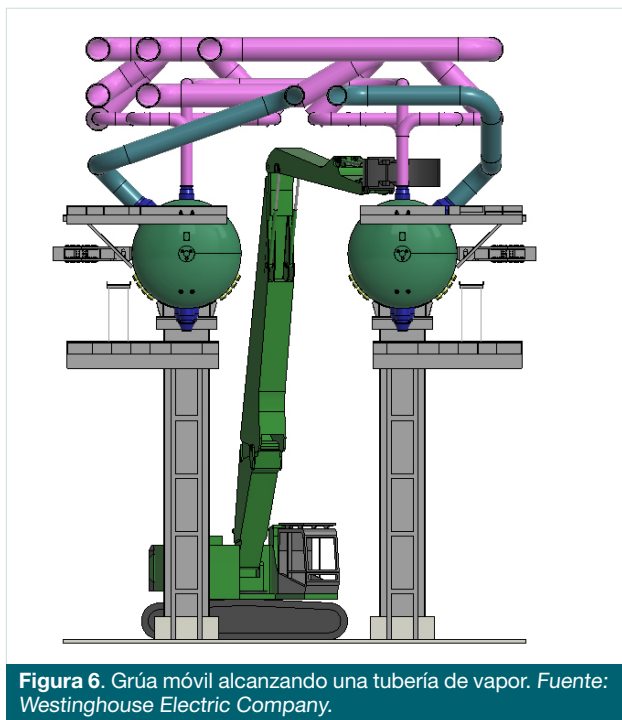


Figura 5. Ejemplo de estructura apuntalada y descendida utilizando sistema *jack-up*. Fuente: Westinghouse Electric Company.

4. FASE 2: DESPEJE DE LA ZONA SUPERIOR

Durante esta segunda fase, se retirará el sistema que llevaba vapor a la turbina. Se trata de un complejo entramado de tuberías de acero al carbono de diámetros y espesores variados, con diámetros de hasta 630 mm y espesores de hasta 28 mm. Se encuentra en la parte superior de la sala, suspendido mediante soportes cableados y apoyado en las envolventes de los SDS.

Las tasas de dosis esperadas en el área de trabajo son ligeramente inferiores a las de la fase anterior, siendo compatibles con la presencia regular de trabajadores, por



lo que se ha seleccionado el corte mecánico *in situ*, una vez habilitado el acceso en altura mediante plataformas elevadoras de tijera. Para poder sujetar los segmentos y manipularlos en altura, se utilizará la grúa móvil.

Una vez liberado el espacio necesario durante la primera fase, la grúa móvil se incorporará como principal medio de manipulación durante el resto del desmantelamiento, compensando la ausencia de un puente grúa en la sala.

4.1. Grúa móvil para manipulación de cargas

La grúa móvil es una máquina de manipulación sobre orugas equipada con un brazo hidráulico de gran alcance, de hasta 16 m en su máxima configuración para este proyecto. Dispone de varios brazos de longitudes y capacidades de carga variables, además de distintos útiles de manipulación intercambiables, lo que permite su aplicación para manipular segmentos de pesos, tamaños y geometrías variables. El equipo se controla desde una cabina, donde el operador es asistido por un sistema de cámaras para realizar trabajos a distancia.

La incorporación de la grúa móvil a la sala de los SDS ha requerido una planificación específica debido a las grandes dimensiones y al volumen del equipo. Su selección no se ha basado únicamente en la capacidad de carga y el alcance necesarios para ejecutar las operaciones de desmontaje, sino también en la viabilidad de su transporte desde el punto de entrada a la instalación hasta su posición de trabajo.

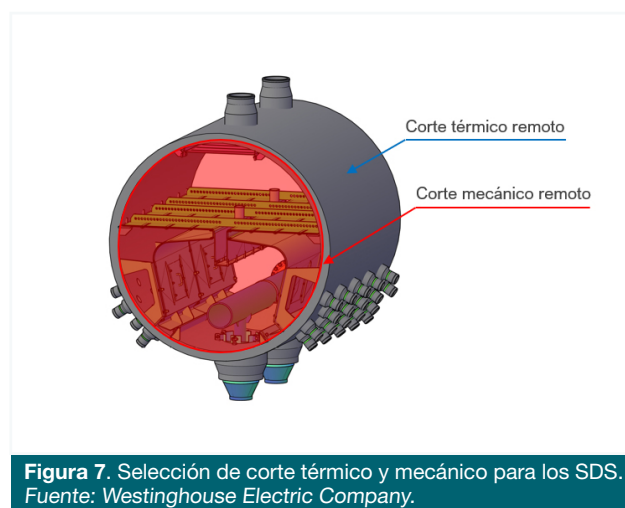
Para ello, se definió cuidadosamente la ruta de acceso a través de la central, considerando las dimensiones de las zonas de paso, los cambios de dirección, las posibles interferencias con estructuras y equipos existentes y el espacio disponible para realizar las maniobras. El análisis permitió comprobar la compatibilidad geométrica entre el útil de transporte de la grúa y las restricciones físicas existentes a lo largo del recorrido. Asimismo, se han

realizado simulaciones tridimensionales dentro de la sala de los SDS para verificar la maniobrabilidad y alcance del equipo.

5. FASE 3: SEGMENTACIÓN Y DESMONTAJE DE LOS SDS

Al inicio de esta última fase tan solo quedarán los SDS sobre las columnas y algunas estructuras auxiliares. Es la fase más compleja, dado que los SDS son la parte más contaminada de todo el conjunto de sistemas de la sala y se trata de estructuras pesadas situadas a unos 10 m sobre el suelo.

Se esperan tasas de dosis incompatibles con la presencia constante de trabajadores en las proximidades de los SDS, hasta 100 microSv/h. Estas condiciones requieren el empleo de sistemas de manipulación a distancia y de una combinación de técnicas remotas de corte térmico y mecánico.



La envolvente de los SDS es de acero al carbono y presenta un espesor de 115 mm. Además, dispone de un revestimiento interior de acero inoxidable de 9 mm. Debido al espesor elevado de la envolvente, se ha seleccionado el oxicorte como técnica de segmentación, ya que permite reducir los tiempos de corte frente a las alternativas mecánicas consideradas. Por otro lado, la sala que alberga los SDS fue diseñada para la operación de la planta como un recinto hermético y dispone de un sistema de ventilación diseñado para gestionar el nivel de concentración de aerosoles radioactivos generados y mantenerla en depresión, evitando así la dispersión de aerosoles potencialmente peligrosos hacia áreas adyacentes.

Los componentes internos son estructuras de acero inoxidable formadas por tubos y placas de geometrías planas y curvadas. Para su segmentación se ha seleccionado el corte mecánico, debido tanto al material como a su mayor nivel de contaminación. La tasa de dosis en contacto de estas estructuras puede alcanzar entre 5 y 10 mSv/h.

5.1. ROV de oxicorte para la envolvente de los SDS

Para la segmentación de las envolventes de los SDS se está desarrollando un vehículo operado a distancia específicamente adaptado a las características geométricas

y operativas de estos componentes. El ROV se desplaza sobre la superficie exterior del SDS y transporta una antorcha de oxicorte, lo que permite ejecutar los cortes sin mantener trabajadores de forma continuada en las proximidades del SDS.

La adherencia del equipo a la superficie de acero al carbono se consigue mediante imanes permanentes. Esta solución proporciona una fuerza de adherencia que no depende del suministro eléctrico y permite mantener el contacto con la envolvente incluso en caso de pérdida de alimentación. Como medida adicional de seguridad, el ROV permanecerá unido a la superficie del SDS mediante un cable de seguridad y recuperación, independiente del sistema magnético de adherencia. Esta línea de retención limitará las consecuencias de una eventual pérdida de contacto entre el vehículo y la envolvente, evitando su caída incontrolada desde la posición elevada de trabajo.

El encendido y apagado de la antorcha, la regulación del suministro de gases y el desplazamiento del ROV se controlan a distancia. Asimismo, los componentes sensibles se encuentran protegidos mediante una carcasa metálica frente a las chispas y proyecciones generadas durante el corte. El diseño integra, por tanto, las funciones de adherencia, desplazamiento, corte, observación, protección y recuperación necesarias para trabajar sobre una envolvente cilíndrica de gran espesor y situada a una altura aproximada de 10 m.

Hasta la fecha, se han realizado ensayos para evaluar la capacidad de adherencia y desplazamiento del ROV, su aptitud para cortar materiales de gran espesor y el control de los residuos secundarios generados durante el proceso, en particular de la escoria fundida procedente del revestimiento interior de acero inoxidable. Asimismo, los ensayos han permitido comprobar la visibilidad disponible para el operador e identificar posibles interferencias entre los sistemas de alimentación y control del vehículo y los elementos del entorno.

5.2. ROV de oxicorte para la envolvente de los SDS

Para el corte de los internos y su retirada se utilizará un robot de demolición similar al utilizado durante la primera fase del desmantelamiento. Se diferencia en que su tamaño y peso reducidos permiten posicionarlo sobre

la envolvente de los SDS e incluso sobre determinados componentes internos.

El robot se equipará con una sierra de disco para las operaciones de segmentación y con un útil de agarre para la recuperación y manipulación de los segmentos resultantes. Una vez cortados, los componentes serán recuperados desde el fondo del SDS y trasladados hasta un contenedor de residuos para su gestión posterior. La posibilidad de intercambiar distintos útiles de trabajo permite adaptar el robot a las diferentes fases de la operación, combinando tareas de corte y manipulación sin necesidad de introducir equipos adicionales en la zona de intervención.

El equipo se opera a distancia mediante cámaras instaladas tanto en el propio robot como alrededor de la estructura a cortar, evitando la exposición directa de los trabajadores.

5.3. Sistemas de manipulación magnética

La manipulación de los elementos más contaminados requiere maximizar la operación en remoto para limitar la exposición radiológica del trabajador. Para ello se emplearán sistemas de agarre magnético, que permiten reducir la intervención directa de los operarios.

Se han seleccionado dos sistemas principales. En primer lugar, se ha seleccionado un imán individual para la manipulación de segmentos. Una de las operaciones principales consiste en sostener, durante el corte, los segmentos de la envolvente de los SDS, cuya superficie es lisa y ligeramente curvada. El imán, acoplado a la grúa móvil, permite realizar esta operación en altura y a distancia.

En segundo lugar, se utilizará un conjunto de imanes, unidos por un balancín separador, que mantiene la separación necesaria entre los imanes para asegurar el contacto con la superficie del contenedor y así, agarrarlo. Los contenedores de transporte se han adaptado mediante la incorporación de una placa metálica en el marco superior, que proporciona la superficie y el espesor de contacto requeridos.

Ambos equipos emplean imanes permanentes cuyo agarre se activa y desactiva mediante un accionamiento mecánico. De este modo, la sujeción de la carga no depende del suministro eléctrico y se mantiene en caso de pérdida de energía. Ambos equipos pueden utilizarse tanto con la grúa móvil como con el robot de demolición.



Figura 8. ROV de oxicorte. Prototipo en pruebas. Fuente: Westinghouse Electric Company.

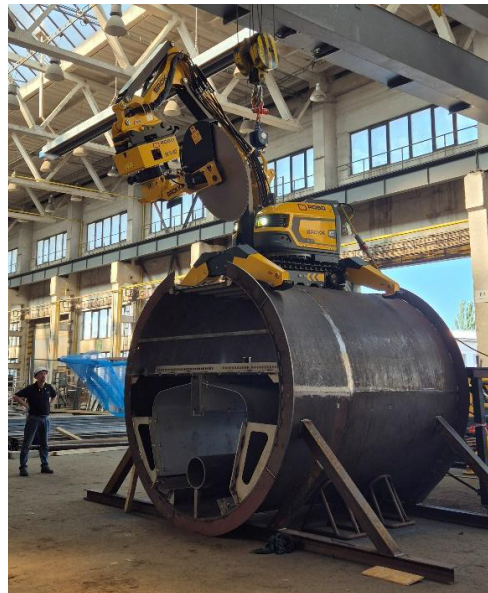


Figura 9. Robot de demolición equipado con sierra de disco para corte de los internos. Fuente: Westinghouse Electric Company.

6. CONCLUSIONES

El desmantelamiento de los Separadores de Vapor (SDS) de la Central Nuclear de Igalina se sustenta en tres elementos clave. En primer lugar, una estrategia de desmontaje cuidadosamente definida, orientada a mantener la integridad estructural, incrementar progresivamente la accesibilidad a los componentes y limitar el deterioro de las condiciones radiológicas del área de trabajo.

En segundo lugar, el diseño de soluciones innovadoras para superar los retos de accesibilidad y manipulación de los segmentos y cargas pesadas. Algunos ejemplos son la utilización de una grúa móvil para compensar la ausencia de puente grúa y la introducción de sistemas de manipulación magnética con imanes permanentes.

Por último, la segmentación se aborda mediante una combinación optimizada de técnicas de corte mecánico

y térmico, tanto *in situ* como remotas, seleccionadas en función de las características geométricas, los materiales, los espesores y las condiciones radiológicas de cada componente. La adecuada elección e integración de los equipos constituye un factor clave para garantizar la seguridad y eficacia de las operaciones.

Asimismo, el proyecto demuestra el valor de integrar equipos comerciales consolidados, como los robots de demolición, con soluciones desarrolladas específicamente para la aplicación, como el ROV de oxicorte destinado a la segmentación remota de las envolventes de los SDS. Las actividades de simulación, desarrollo de prototipos y pruebas realizadas hasta el momento han permitido verificar la viabilidad técnica de las soluciones propuestas y reducir las incertidumbres antes de su aplicación en el emplazamiento.

En conjunto, la metodología desarrollada constituye un ejemplo de cómo la integración de una estrategia de desmontaje adaptada a las condiciones específicas de la instalación, soluciones innovadoras de manipulación y tecnologías avanzadas de segmentación permite abordar de forma segura y eficiente el desmantelamiento de componentes de gran tamaño y elevada complejidad. Asimismo, proporciona conocimientos y experiencias

transferibles, con las adaptaciones necesarias, a otros proyectos de desmantelamiento nuclear.

REFERENCIAS

[1] «Ignalina Nuclear Power Plant», State Nuclear Power Safety Inspectorate (VATESI) - Ignalina Nuclear Power Plant, 2024. Página web (accedido 28 de agosto de 2026). ■