

PLANIFICACIÓN DIGITAL DE MANIOBRAS COMPLEJAS EN CN COFRENTES



IGNACIO SABATER SANCHO

Responsable de Ingeniería y Gemelo Digital
GD ENERGY SERVICES (GDES)

INTRODUCCIÓN

La sustitución de grandes componentes en instalaciones nucleares operativas representa un desafío multidimensional que exige una planificación extremadamente rigurosa. Estas maniobras se desarrollan en entornos altamente regulados, con condiciones radiológicas exigentes y márgenes temporales muy reducidos, generalmente durante las paradas de recarga. En este contexto, la seguridad del personal, la integridad de los sistemas, la coordinación entre disciplinas y el cumplimiento normativo se convierten en elementos centrales de todo el proceso.

No se trata solo de definir el objetivo final de la intervención, sino de estructurarlo en fases técnicamente viables, logísticamente ejecutables y documentalmente justificadas. La complejidad del entorno impone una anticipación analítica que permita validar cada decisión antes de su ejecución. Para ello, es imprescindible disponer de información geométrica actualizada y fiable, así como de una estrategia metodológica que combine el conocimiento técnico con herramientas avanzadas de simulación.

En este marco, las tecnologías digitales se han consolidado como recursos imprescindibles. Herramientas como el escaneado láser 3D, el modelado BIM (*Building Information Modeling*) y la simulación mediante gemelos digitales permiten construir representaciones fieles del entorno físico en

plataformas virtuales interactivas. Estas soluciones no solo mejoran la comprensión espacial, sino que también facilitan la coordinación entre disciplinas, la detección anticipada de interferencias, la evaluación de alternativas y la toma de decisiones basadas en datos.

Los beneficios de este enfoque son múltiples: validación de rutas y tolerancias, optimización de secuencias de trabajo, identificación de puntos críticos, reducción de maniobras de riesgo y generación de documentación coherente con la realidad de planta. Además, estos entornos digitales pueden ser utilizados como herramientas formativas para el personal, reforzando la preparación previa a la ejecución y contribuyendo a una cultura preventiva más sólida.

El presente artículo describe el estudio técnico y operativo desarrollado para una posible sustitución, en caso que fuese necesario, de los calentadores 2A y 2B en la Central Nuclear de Cofrentes. La toma de datos realizada durante la recarga R24, mediante escaneado láser 3D de alta precisión, permitió crear un entorno digital completo. A partir de esta base geométrica real se desarrolló un modelo BIM estructurado y un gemelo digital funcional con el que se validaron rutas, secuencias operativas y medios técnicos necesarios para la intervención.

La metodología adoptada no solo confirmó la viabilidad de la operación, sino que generó una base documental robusta, coherente y reutilizable. Además, demostró el valor añadido



Figura 1. Modelado de los calentadores 2AB. C.N. Cofrentes.

del entorno digital como soporte formativo, mejorando la capacitación de los equipos humanos, reforzando la seguridad y reduciendo la curva de aprendizaje.

Este trabajo constituye un ejemplo de cómo la digitalización puede transformar el diseño y la planificación de maniobras críticas en el sector nuclear, impulsando una evolución metodológica hacia modelos de ingeniería predictiva basados en datos reales, simulación avanzada y colaboración transversal.

CONTEXTO DE LA INTERVENCIÓN

La sustitución de los calentadores 2A y 2B en la Central Nuclear de Cofrentes se enmarca en un entorno operativo con condicionantes técnicos, espaciales y radiológicos que obligan a replantear los métodos tradicionales de planificación. Estos equipos, esenciales para el sistema de calentamiento del agua de alimentación y para la eficiencia térmica global de la instalación, están integrados en los condensadores de alta y baja presión, con sus cabezas ubicadas en los cubículos T304 y T306, respectivamente.

La singularidad de esta intervención no reside únicamente en la envergadura de los componentes, sino en las condiciones del entorno. Los calentadores están alojados en zonas clasificadas como “áreas de permanencia reglamentada”, donde el acceso está prohibido durante el funcionamiento normal de la planta. Esta restricción limita las actuaciones a breves ventanas temporales, como las paradas de recarga, lo que reduce de forma drástica el margen disponible para validaciones físicas o improvisaciones técnicas.

Durante la recarga R24 se aprovechó una de estas ventanas para realizar una campaña de escaneo láser 3D de alta precisión. Esta captura del entorno permitió disponer de una base geométrica actualizada, precisa y verificable sobre la que desarrollar la planificación digital. En este tipo de operaciones, donde las validaciones *in situ* son imposibles fuera de momentos muy concretos, la fiabilidad del modelo geométrico es clave para garantizar la seguridad y viabilidad de la maniobra.

Además de las limitaciones temporales, el entorno impone restricciones espaciales severas. Los cubículos T304 y T306 son espacios saturados de estructuras, soportes,

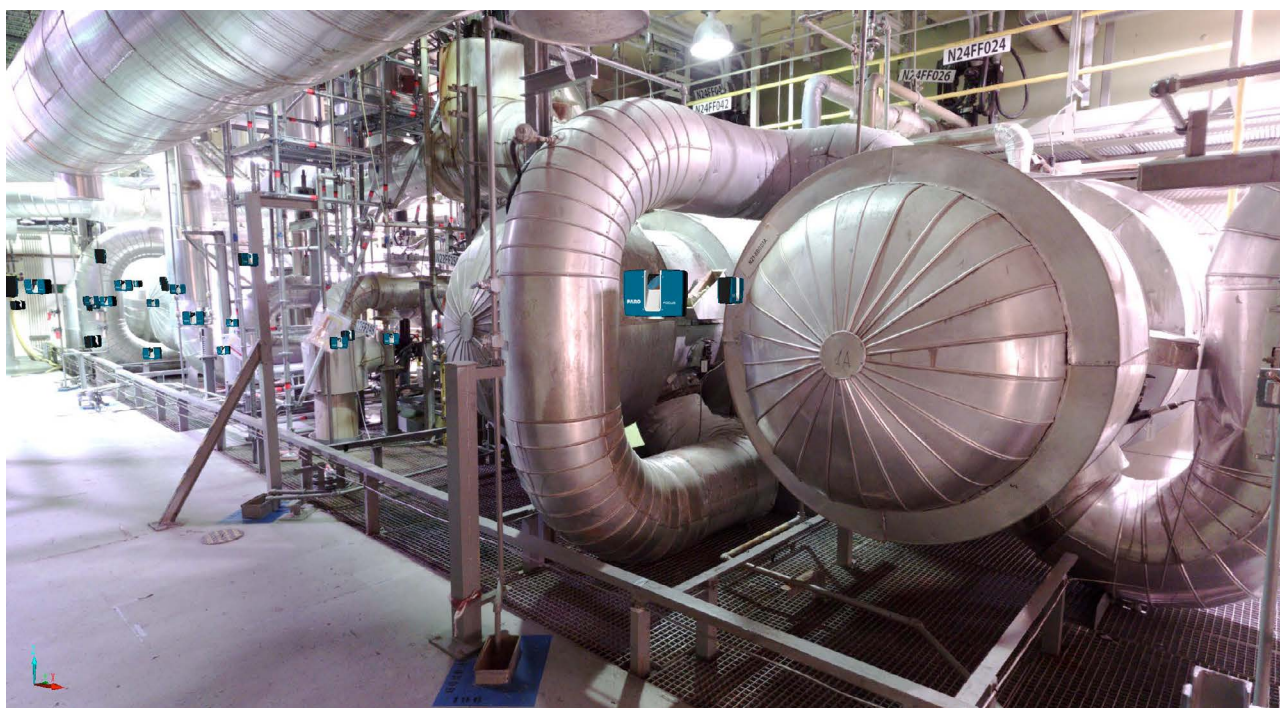


Figura 2. Fotorrealista T304 y T306. C.N. Cofrentes.

conducciones y bandejas de cables que no pueden desmontarse por razones funcionales. La extracción del calentador exige una trayectoria no lineal, con desplazamientos, giros, elevaciones y cambios de plano que deben analizarse con detalle para evitar interferencias y riesgos.

Desde el punto de vista radiológico, ambos cubículos presentan condiciones que restringen el tiempo de estancia del personal, obligando a una organización precisa de los turnos, los medios auxiliares y los recursos humanos. La aplicación efectiva del principio ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*) debe comenzar desde el diseño, utilizando modelos digitales que permitan simular escenarios, identificar puntos críticos y optimizar secuencias.

La operación también afecta a zonas periféricas de la planta: rutas logísticas interiores y exteriores, plataformas de izado, accesos estructurales y puntos de transferencia, cada uno con sus propias limitaciones geométricas, estructurales y de carga. Esta interdependencia exige un enfoque integral que contemple todos los tramos como parte de una única cadena operativa validada.

Frente a estos condicionantes, el desarrollo de un entorno digital completo —basado en datos reales y simulación avanzada— se revela como la herramienta esencial para garantizar la viabilidad técnica, logística y radiológica de la intervención. El modelo generado no solo permite planificar cada fase con antelación, sino que también actúa como base de coordinación y trazabilidad, constituyéndose en una referencia útil y replicable para futuras maniobras complejas en la industria nuclear.

METODOLOGÍA EMPLEADA

La metodología desarrollada para la planificación de esta intervención se basa en una secuencia de análisis estructurada, fundamentada en datos geométricos reales

y en el uso de herramientas digitales avanzadas. El objetivo principal fue construir un entorno virtual fiable que permitiera simular y validar, de forma integrada, todos los aspectos técnicos y logísticos de la maniobra.

El proceso comenzó con el escaneado láser 3D realizado durante la recarga R24. Esta toma de datos incluyó no solo los cubículos T304 y T306 y las rutas logísticas interiores y exteriores, sino también el interior de los condensadores de alta y baja presión, con el fin de capturar la geometría completa de los elementos de suportación de los calentadores. Esta información fue clave para conocer con precisión la disposición de los apoyos internos, las condiciones de extracción y los condicionantes mecánicos de anclaje.

A partir de la nube de puntos obtenida, se generó un modelo tridimensional BIM (*Building Information Modeling*) del entorno, que permitió representar de forma jerárquica y clasificada los elementos presentes, según su función, naturaleza y comportamiento previsto. Este modelo facilitó la detección temprana de interferencias físicas, el análisis de tolerancias críticas y la delimitación de zonas con restricciones de paso o manipulación.

Sobre esta base se integraron los medios técnicos necesarios para la operación: plataformas de trabajo, sistemas de izado, carros de transporte, estructuras temporales y útiles específicos, todos ellos modelados con sus dimensiones reales y condiciones operativas. Esto permitió simular con fidelidad cada fase del proceso, desde el desmontaje de elementos interferentes hasta la extracción, desplazamiento y evacuación del calentador, incluyendo su futura inserción en sentido inverso.

El entorno funcional resultante, estructurado como un gemelo digital operativo, sirvió para ensayar distintas secuencias de actuación, comparar alternativas, evaluar márgenes de

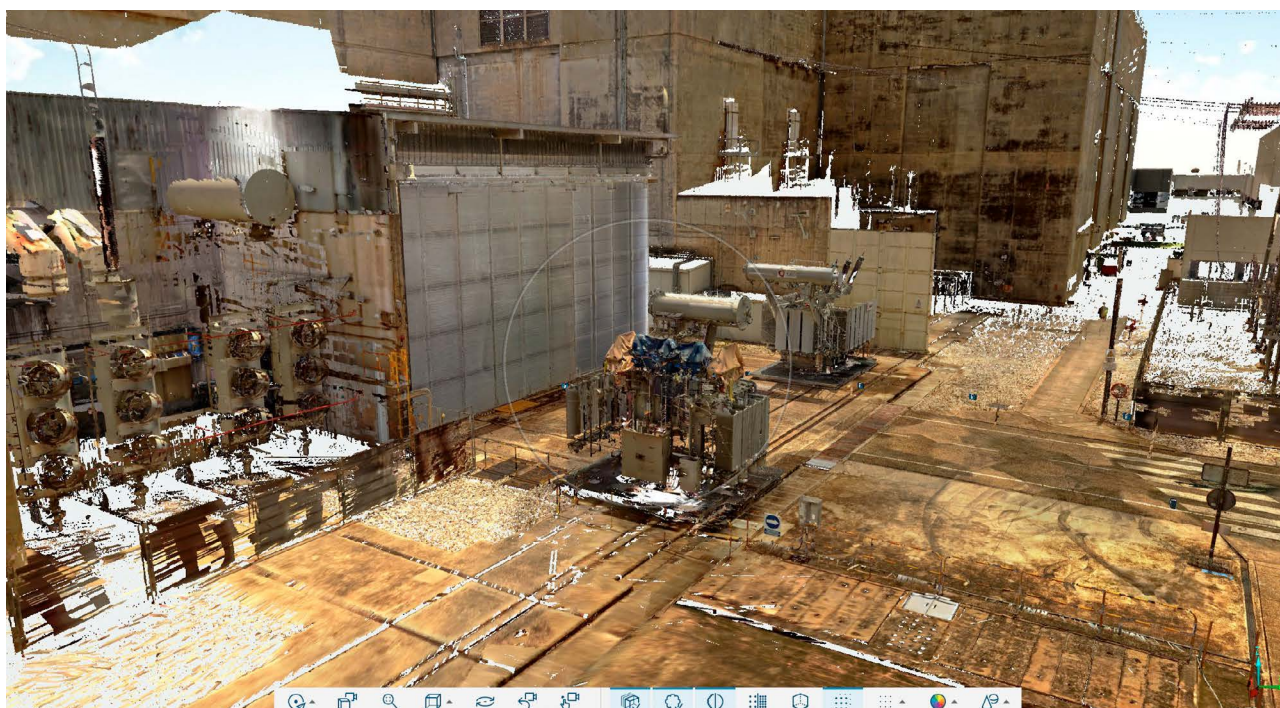


Figura 3. Nube de puntos Removal Shop. C.N. Cofrentes.

seguridad y validar la viabilidad técnica y logística de cada escenario. También se analizaron aspectos relacionados con la gestión radiológica, las interferencias estructurales y la coordinación entre equipos.

Toda la información generada se consolidó en un documento técnico de planificación, que incluye planos, modelos validados, fichas de medios, rutas propuestas, análisis de riesgos e interferencias, y procedimientos preliminares. Esta documentación proporciona una base sólida para la futura ejecución de la intervención y para su seguimiento en tiempo real.

Además de su función técnica, el entorno digital creado se planteó como una herramienta de apoyo formativo. La posibilidad de recrear virtualmente la maniobra permite a técnicos y operarios anticipar escenarios reales, familiarizarse con las condiciones del entorno y reforzar su preparación, lo que contribuye a mejorar la eficiencia, reducir errores y aumentar la seguridad global de la operación.

La metodología adoptada demuestra su eficacia no solo para validar esta intervención concreta, sino como modelo estructurado y transferible aplicable a otras maniobras de alta complejidad en entornos nucleares.

RESULTADOS Y BENEFICIOS OBSERVADOS

El estudio técnico desarrollado ha permitido validar, con un alto grado de precisión y anticipación, la viabilidad integral de la maniobra de sustitución de los calentadores. A través de la simulación virtual basada en geometría real, se consiguió representar de forma fidedigna el entorno operativo y ejecutar un análisis detallado de todos los condicionantes críticos, desde la extracción en origen hasta la evacuación exterior.

Uno de los principales logros fue la capacidad de ensayar virtualmente la secuencia completa de la intervención. Esta simulación permitió analizar múltiples escenarios, ajustar rutas, optimizar el uso de medios técnicos y seleccionar la opción más robusta desde el punto de vista operativo, estructural y radiológico. La comparación objetiva entre alternativas evitó soluciones parciales o improvisadas, aportando solidez técnica a la estrategia final.

Desde el punto de vista logístico, la planificación digital facilitó la identificación de zonas de paso conflictivas, la adaptación de rutas internas, la disposición de apoyos temporales y la evaluación de puntos de transferencia clave. Estos análisis permitieron minimizar maniobras innecesarias, reducir interferencias con sistemas existentes y garantizar la compatibilidad de cargas con las infraestructuras involucradas.

En el ámbito organizativo, el entorno virtual se consolidó como una herramienta de coordinación transversal. Su carácter visual e interactivo mejoró la comunicación entre disciplinas, permitiendo una comprensión compartida de la intervención y favoreciendo una toma de decisiones ágil y bien fundamentada. Este enfoque contribuyó a construir una planificación integrada, reduciendo dependencias críticas y mejorando la sincronización entre áreas técnicas, logísticas, radiológicas y de operación.

Asimismo, se generó un conjunto documental de alto valor técnico: modelos BIM actualizados, rutas validadas, procedimientos preliminares, hojas de verificación geométrica, análisis de interferencias y documentación gráfica asociada a cada fase. Este repositorio constituye un soporte trazable, reutilizable y auditable que puede emplearse como referencia en futuras maniobras de características similares.

En términos de preparación operativa, el gemelo digital permitió simular fases sensibles de la intervención en un entorno seguro y realista, ofreciendo a técnicos y supervisores una herramienta de entrenamiento previa a la ejecución real. Esta anticipación contribuyó a mejorar la comprensión del proceso, reducir la curva de aprendizaje y reforzar la cultura preventiva del equipo implicado.

En conjunto, los beneficios observados tras la aplicación de esta metodología son múltiples y convergentes: validación anticipada, reducción de incertidumbre, optimización logística, alineación organizativa, fortalecimiento documental y mejora en la preparación del personal. Todo ello confirma la eficacia del enfoque adoptado y su idoneidad como modelo de referencia para intervenciones complejas en entornos nucleares.

DESCRIPCIÓN TÉCNICA DE LA MANIOBRA PLANIFICADA

La maniobra de sustitución de los calentadores 2A y 2B se ha diseñado como una secuencia técnica articulada en fases, que abordan de forma integrada la extracción del componente existente, su desplazamiento hasta el exterior y la futura inserción del nuevo equipo. Cada paso ha sido modelado y validado dentro del entorno digital desarrollado, asegurando su viabilidad bajo los condicionantes espaciales, estructurales y radiológicos del emplazamiento.

La operación se inicia con la retirada de elementos interferentes en los cubículos T304 y T306, identificados previamente en el modelo BIM. Esta fase contempla tanto el desmontaje de estructuras auxiliares como la protección de conducciones activas que no pueden ser retiradas. Simultáneamente, se ejecutan cortes controlados en la carcasa de los condensadores para liberar las cabezas de los calentadores, lo que permite su extracción sin comprometer la integridad del resto del sistema.

Como parte de la adecuación de los accesos logísticos, también se contempla la eliminación de muros desmontables situados en el recorrido interno y la retirada de la cubierta y las correas del edificio Removal Shop, lo que facilita la operación de izado final y la transferencia del equipo al exterior. Estas modificaciones han sido evaluadas estructuralmente y planificadas como actuaciones temporales reversibles, integradas en el ciclo general de la intervención.

Una vez liberado el calentador, se procede a su elevación mediante un conjunto de gatos hidráulicos sincronizados, diseñados para controlar el ascenso con precisión milimétrica y reducir solicitaciones mecánicas sobre los apoyos interiores. El equipo es entonces posicionado sobre cunas móviles adaptadas a su geometría, que se desplazan mediante un sistema de "skidding" hidráulico sobre rieles metálicos temporales instalados en el fondo del cubículo.

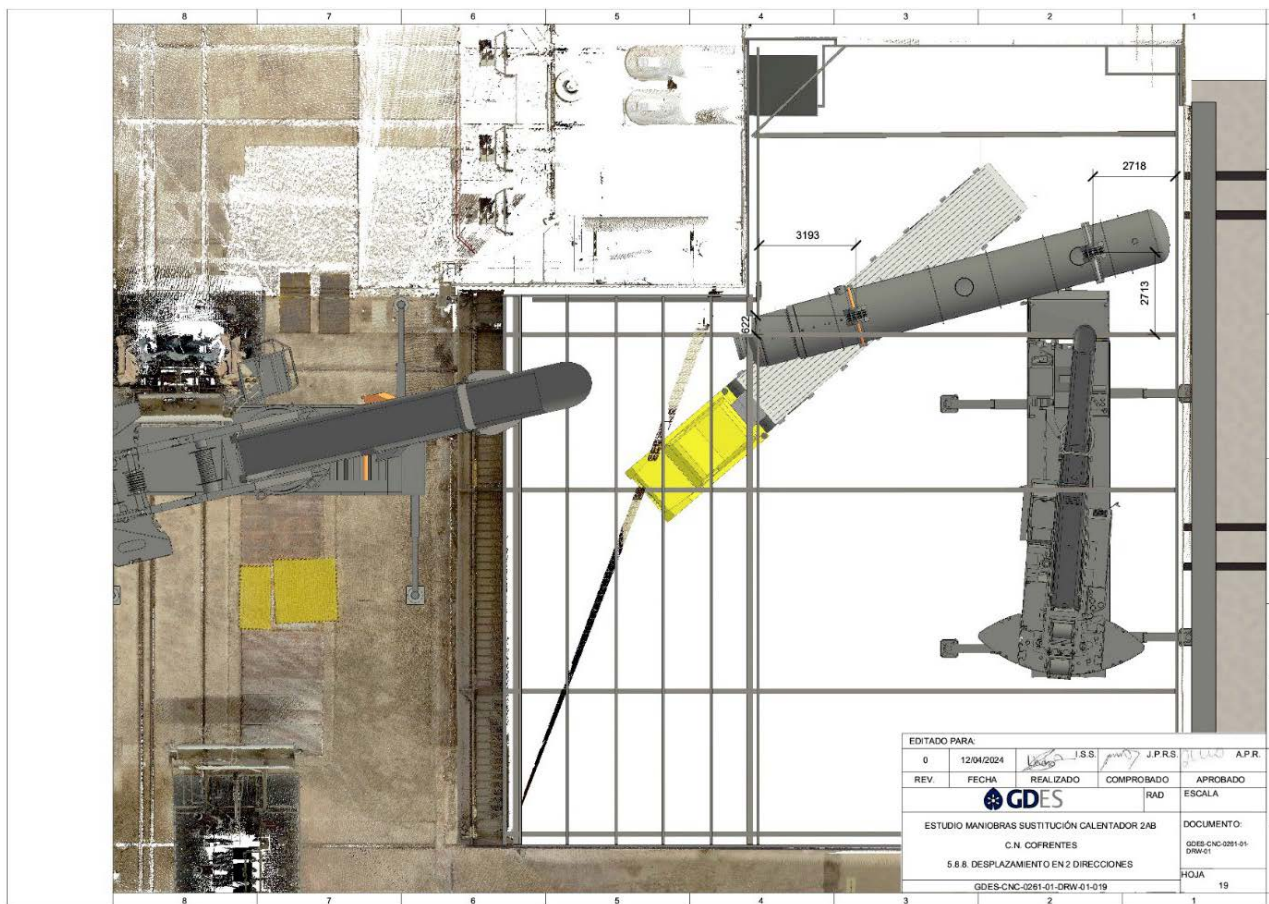


Figura 4. Plano detalle de la secuencia de maniobras necesarias para la extracción.

La fase de transferencia se desarrolla en una zona logística intermedia, donde se realiza el izado mediante una operación coordinada entre dos grúas móviles —una interior y una exterior del edificio Removal Shop— posicionadas estratégicamente para asegurar la continuidad del movimiento sin interrupciones. El calentador se deposita sobre un transporte especial, previamente alineado con las plataformas de carga.

La maniobra inversa ha sido planificada replicando la secuencia validada, respetando las tolerancias estructurales y condiciones de contorno definidas durante la simulación. Se incluyen controles de deformación, verificación de alineaciones y ajustes finales de soporte para asegurar una correcta integración del nuevo equipo en el entorno existente.

Todo el proceso ha sido modelado en detalle dentro del gemelo digital operativo, lo que ha permitido anticipar restricciones, optimizar la secuencia de pasos y garantizar la trazabilidad técnica de cada actuación. Esta planificación, basada en simulación validada, constituye una garantía de control técnico en un entorno altamente restrictivo.

LECCIONES APRENDIDAS Y REPLICABILIDAD

El desarrollo de esta planificación ha permitido extraer una serie de lecciones clave, tanto desde el punto de vista técnico como organizativo, que refuerzan el valor del

enfoque digital aplicado a intervenciones de alta complejidad en entornos nucleares. La integración de tecnologías avanzadas, modelos geométricos fiables y entornos virtuales funcionales ha demostrado ser una herramienta transformadora en todas las fases del proceso.

Desde una perspectiva técnica, el uso de escaneado láser 3D combinado con modelado BIM permitió capturar con exactitud el entorno real, incluyendo zonas de difícil acceso como el interior de los condensadores. Esto permitió validar anticipadamente aspectos críticos como la compatibilidad geométrica, la viabilidad de trayectorias no lineales, los radios de giro y las interferencias estructurales. La simulación detallada con el gemelo digital operativo permitió, además, identificar desviaciones respecto a planos históricos que, de no haberse detectado a tiempo, habrían comprometido la maniobra.

La secuencia virtualizada no solo sirvió para ensayar fases críticas con total seguridad, sino que también permitió introducir ajustes en etapas tempranas del diseño, evitando improvisaciones durante la ejecución. Esta anticipación redujo de forma significativa la incertidumbre asociada a tareas como los cortes en la carcasa de los condensadores, la retirada de muros desmontables o la eliminación de cubiertas estructurales.

Organizativamente, el trabajo sobre un modelo digital común favoreció una coordinación transversal efectiva. La tradicional planificación en compartimentos estancos fue sustituida por un enfoque colaborativo entre las áreas de

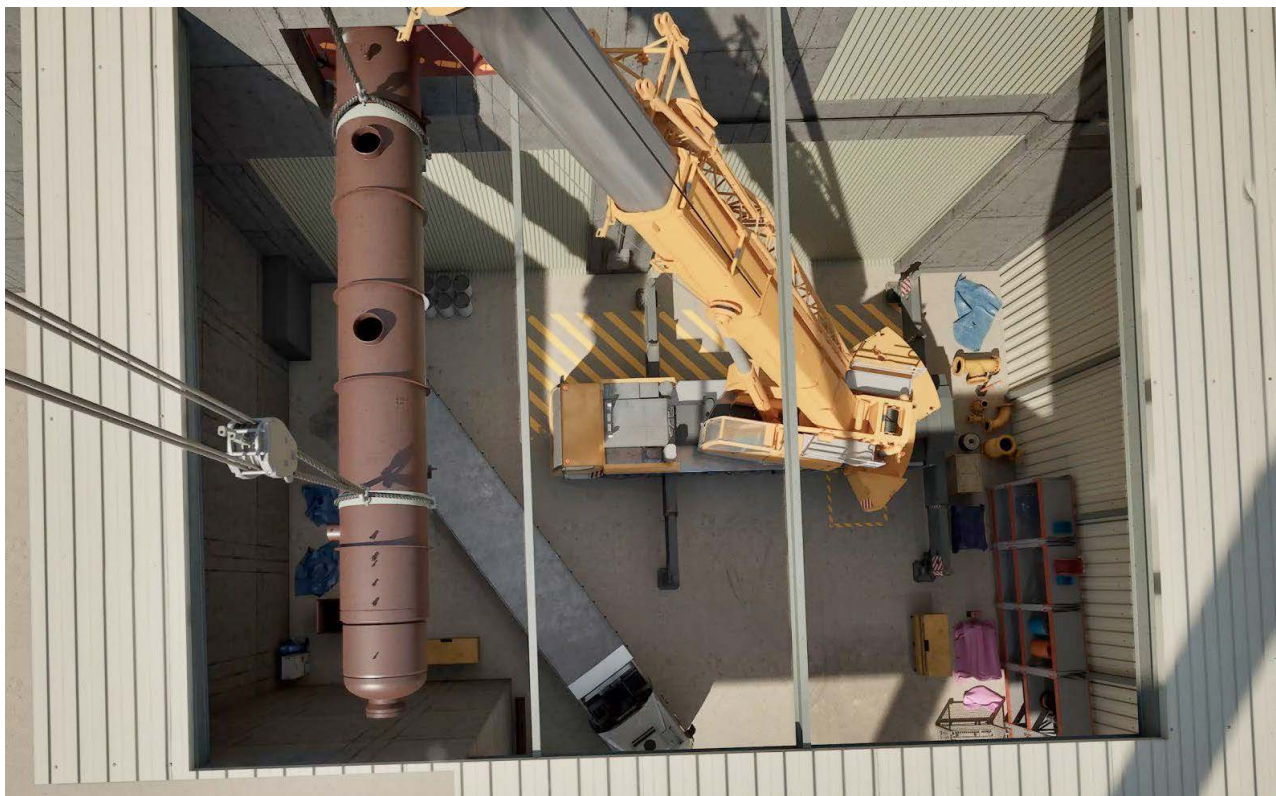


Figura 5. Fotograma simulación maniobra de sustitución del calentador. C.N. Cofrentes.

ingeniería, operación, logística, mantenimiento, seguridad y protección radiológica. Esta sinergia temprana facilitó la detección y resolución ágil de conflictos potenciales antes de su materialización en campo.

Otro aprendizaje relevante ha sido el valor añadido del entorno digital como herramienta formativa. La posibilidad de simular la maniobra en un escenario inmersivo permitió a técnicos, operarios y supervisores familiarizarse con el proceso en condiciones realistas. Esto mejoró la comprensión global, redujo la curva de aprendizaje y aumentó el nivel de preparación del personal, impactando directamente en la seguridad y eficiencia de la futura ejecución.

Desde el punto de vista de la replicabilidad, la metodología seguida se ha mostrado completamente transferible. La documentación generada —rutas validadas, modelos estructurales, animaciones de fases críticas, listas de chequeo, fichas de medios y procedimientos preliminares— constituye una base reutilizable que puede adaptarse a nuevas configuraciones en otros entornos con restricciones similares.

En conjunto, esta experiencia consolida una forma de trabajo basada en ingeniería predictiva, en la que el entorno digital actúa como plataforma común para el diseño técnico, la validación operativa, la capacitación y la toma de decisiones compartida. Más allá de su valor puntual, esta metodología representa una evolución natural hacia modelos de intervención más seguros, eficientes y trazables en la industria nuclear contemporánea.

CONCLUSIONES

La planificación desarrollada para la sustitución de los calentadores 2A y 2B constituye un ejemplo sólido de cómo la aplicación sistemática de herramientas digitales puede transformar el diseño y preparación de maniobras complejas en el ámbito nuclear. La estrategia adoptada ha permitido convertir un entorno restrictivo y de alta exigencia técnica en un escenario completamente analizado, validado y documentado antes de su ejecución.

Más allá de la resolución de un caso concreto, el trabajo realizado consolida un enfoque metodológico replicable, donde la captura de datos reales, el modelado tridimensional y la simulación funcional convergen en un sistema integrado de apoyo a la decisión. Este sistema no solo optimiza las condiciones de intervención, sino que eleva los estándares de trazabilidad, formación y coordinación entre disciplinas.

Uno de los mayores logros ha sido anticipar las dificultades sin necesidad de exposición directa al entorno, lo que refuerza la eficiencia de los recursos, incrementa la seguridad y mejora la calidad de las soluciones adoptadas. Asimismo, la generación de una base documental robusta y reutilizable constituye un activo técnico de valor duradero para futuras actuaciones similares.

Este estudio evidencia que incorporar el entorno digital desde las fases iniciales no es un complemento, sino una necesidad operativa en escenarios de alta complejidad. La ingeniería predictiva basada en datos, simulación y colaboración transversal se perfila como el camino más eficaz para afrontar los nuevos desafíos del sector nuclear, con garantías técnicas, organizativas y regulatorias. ■