

GEMELOS DIGITALES EN INSPECCIONES ESTRUCTURALES EN CENTRALES NUCLEARES



ANDRÉS BLANCO BARRIO
Jefe de Grupo de Proyecto Nuclear.
Responsable Equipos de Inspección
EMPRESARIOS AGRUPADOS
INTERNACIONAL

INTRODUCCIÓN

Las inspecciones estructurales en centrales nucleares representan un pilar fundamental para garantizar la operatividad segura y eficiente de estas instalaciones críticas. Estas inspecciones, que abarcan desde la evaluación de componentes clave hasta la detección de posibles fallos o desgastes, son esenciales para prevenir incidentes y maximizar la vida útil de los activos.

En este contexto y aprovechando las experiencias en otras áreas tecnológicas, esta tecnología de vanguardia promete revolucionar el campo de las inspecciones de equipos y estructuras: los gemelos digitales. Un gemelo digital es una representación virtual y dinámica de un objeto o sistema físico, alimentada por datos en tiempo real y alimentada por algoritmos avanzados de análisis. Al vincular el mundo físico con su contraparte digital, se crea un entorno de simulación que proporciona información precisa y actualizada sobre el estado y comportamiento de los activos que componen la central a evaluar.

DEFINICIÓN DE GEMELO DIGITAL

Para comprender completamente el potencial de los gemelos digitales en inspecciones de equipos y estructurales, es esencial definir este concepto de manera más detallada. Un gemelo digital no es simplemente una representación estática de un activo, sino una entidad dinámica que refleja su evolución temporal y estado en tiempo real, pudiendo llegar a incluir variables como temperatura, presión, vibraciones y más. Esto se lograría a través de una red de sensores distribuidos estratégicamente en la planta, que capturan y

transmiten datos relevantes a un sistema de procesamiento centralizado.

Los modelos 3D, combinados con algoritmos de simulación, permiten visualizar y analizar estos datos de manera intuitiva. Además, la implementación de técnicas de aprendizaje automático y análisis predictivo potencia la capacidad de los gemelos digitales para establecer patrones de degradación, prever problemas potenciales futuros y ofrecer recomendaciones para el mantenimiento proactivo y preventivo.

En los siguientes apartados, se explorará de manera detallada los fundamentos tecnológicos que hacen posible la creación y funcionamiento de gemelos digitales en el contexto de inspecciones de equipos y estructurales.

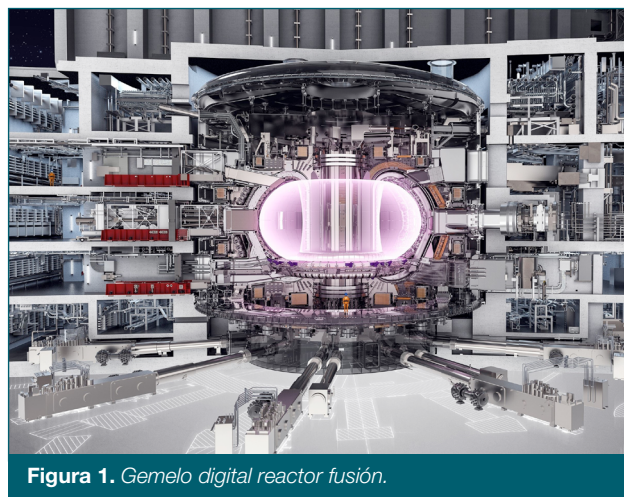


Figura 1. Gemelo digital reactor fusión.

FUNDAMENTOS TECNOLÓGICOS

Los gemelos digitales en su aplicación para inspecciones de equipos y estructurales se basan en una serie de tecnologías clave que permiten su implementación efectiva:

IoT (Internet de las cosas)

El Internet de las cosas es la columna vertebral de los gemelos digitales. A través de sensores IoT estratégicamente ubicados en la central nuclear, se recopila una gran cantidad de datos en tiempo real. Estos sensores pueden medir variables como temperatura, presión, flujo de líquidos, vibraciones, consumo de energía y más. La conectividad IoT permite la transmisión de estos datos a una plataforma central de procesamiento.

Sensores y sistemas de monitoreo

Los sensores a emplear para lograr una mayor efectividad en inspecciones de equipos y estructurales pueden y deben ser extremadamente especializados y versátiles. Por ejemplo, se pueden utilizar sensores ultrasónicos para detectar la corrosión en soportes o tuberías o sensores de vibración para evaluar el estado de las máquinas rotativas. Estos sensores proporcionan datos precisos que son fundamentales para la creación del gemelo digital.

Modelos 3D y software de simulación

La representación precisa de la planta en un entorno virtual es esencial. Se utilizan modelos 3D detallados que incluyen todos los componentes estructurales y sistemas críticos. Con el empleo de los sistemas de monitoreo adecuados es posible llegar a reflejar los cambios en el estado del activo a evaluar en tiempo real en estos modelos. El software de simulación permite analizar el comportamiento de la planta bajo diferentes condiciones y escenarios, lo que ayuda a establecer patrones de degradación y proponer mantenimientos preventivos.

Machine learning y algoritmos de aprendizaje automático

A todo lo anterior, se puede sumar los beneficios que aporta la inteligencia artificial, en particular el aprendizaje automáti-

co. Esta tecnología desempeña un papel fundamental en la interpretación de los datos generados por los sensores y sistemas de monitoreo. Los algoritmos de aprendizaje automático pueden identificar patrones, anomalías y tendencias, lo que permite anticipar problemas antes de que se conviertan en fallos críticos. Además, estos sistemas pueden proporcionar recomendaciones para el mantenimiento preventivo y predictivo.

VENTAJAS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE GEMELOS DIGITALES

A continuación, se presentan alguna de las principales ventajas que la aplicación de un gemelo digital puede aportar en el campo de las inspecciones estructurales:

Mejora en la precisión de las inspecciones y diagnósticos

La precisión en la evaluación del estado de los equipos, sistemas, componentes y estructuras es crítica para la seguridad y el rendimiento óptimo de una central nuclear. Los gemelos digitales permiten una supervisión continua y en tiempo real de condiciones operativas y estructurales. Esto significa que los cambios sutiles que pueden indicar un problema incipiente se detectan de inmediato, mucho antes de que sean visibles en inspecciones físicas visuales convencionales.

Al aprovechar la capacidad de analizar grandes cantidades de datos en tiempo real, los algoritmos de aprendizaje automático pueden identificar patrones y tendencias que podrían pasar desapercibidos para un inspector humano. Como resultado, las decisiones de mantenimiento y reparación se basan en información precisa y actualizada, lo que reduce significativamente el riesgo de fallos catastróficos y mejora la seguridad operativa.

Reducción de costos y tiempos de inactividad

Los gemelos digitales permiten una transición del mantenimiento reactivo al mantenimiento preventivo predictivo o preventivo. Al detectar y abordar problemas en sus primeras etapas de desarrollo, las intervenciones de mantenimiento pueden programarse de manera más eficiente y en momentos que minimicen la interrupción de la producción.

La anticipación de problemas también evita costosas reparaciones de emergencia y reduce los gastos asociados con el reemplazo de equipos o componentes. Esto se traduce en un ahorro sustancial a lo largo del ciclo de vida de los activos de la planta.

Optimización de la planificación de mantenimiento

La implementación de gemelos digitales permite una mejor planificación de los programas de inspección y por consiguiente una optimización del mantenimiento basada en el estado real y la condición de los activos, en lugar de depender de calendarios de mantenimiento preestablecidos. Esto significa que se puede aprovechar al máximo la vida útil de los equipos y componentes, ya que se realizan intervenciones cuando realmente son necesarias, en lugar de basarse en estimaciones generales.

Esta optimización de la planificación de mantenimiento

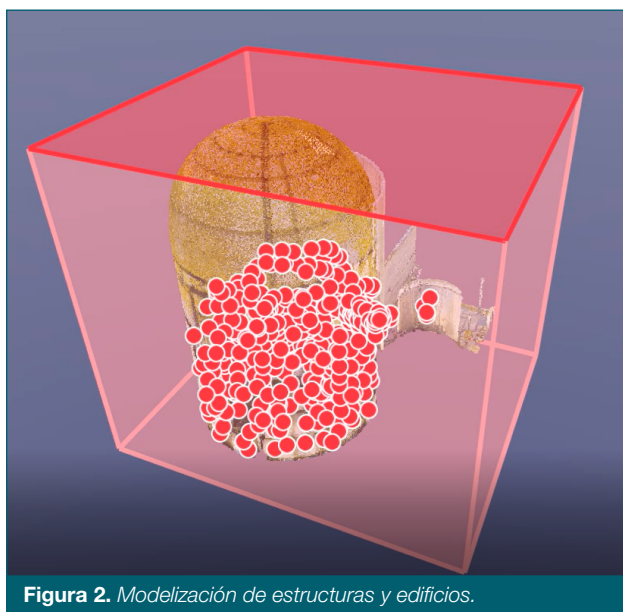


Figura 2. Modelización de estructuras y edificios.

también implica una reducción en la cantidad de trabajos de mantenimiento no programados, lo que a su vez disminuye los costos y el tiempo de inactividad asociados.

Incremento en la seguridad del personal

La seguridad del personal es una prioridad en la gestión de una central nuclear. Al anticipar y abordar problemas potenciales antes de que se conviertan en riesgos significativos, los gemelos digitales contribuyen directamente a la seguridad en el lugar de trabajo.

La reducción de situaciones de emergencia y el tiempo dedicado a reparaciones críticas significa que el personal tiene un entorno de trabajo más seguro y controlado. Además, se puede llevar a cabo una planificación detallada para tareas de mantenimiento que podrían involucrar riesgos, lo que permite implementar medidas de seguridad adicionales cuando sea necesario.

Mejora en la gestión de activos

Los gemelos digitales proporcionan una visión completa y en tiempo real del estado de los activos. Esto facilita la toma de decisiones informadas sobre la gestión de los activos. Se pueden identificar tendencias de desgaste, optimizar la vida útil de los componentes y tomar decisiones estratégicas sobre inversiones en actualizaciones y reemplazos.

Estas ventajas combinadas hacen que la implementación de gemelos digitales en inspecciones estructurales sea una herramienta de un valor incalculable para la industria nuclear, que busca maximizar la seguridad, eficiencia y rentabilidad de sus operaciones con los más altos estándares de calidad.



Figura 3. Simulación de recorridos en planta y localización precisa de equipos.

CASO DE ESTUDIO

Optimización de inspecciones en las centrales nucleares españolas mediante gemelos digitales

El proyecto de digitalización y desarrollo del “Gemelo Digital” en las centrales nucleares españolas se encuentra en una fase temprana de implantación. Dicha primera fase de implantación inicial contempla el proceso de captura de la geometría y distribución de cada uno de los edificios que componen la centrales mediante el empleo del escaneo láser y toma de fotografías (alta resolución, panorámicas 360°, y de alto rango dinámico) que permiten representar la realidad física de la planta.

Los escaneos láser realizados, unido a la captura de fotografías, requirieron de un arduo trabajo de procesamiento y adaptación de la información para poder integrarse en una plataforma de visualización (plataforma “Trueview”) que permita su empleo de manera sencilla por el usuario final. A través de esta aplicación, el usuario no solo puede visualizar imágenes en alta resolución, sino que también le permite realizar recorridos de navegación virtual por los diferentes edificios y estructuras, posibilitando a los usuarios cambiar desde una perspectiva panorámica amplia hasta detalles específicos de su interés. Además, cada una de las imágenes y escaneos realizados contiene gran cantidad de información cualitativa y datos que permiten la generación de una nube de puntos, dotando a la herramienta de un gran potencial que permite al usuario realizar mediciones o consulta de coordenadas que resultan de gran interés para el desarrollo de diferentes trabajos en la central.

En el ámbito de las inspecciones de equipos y estructurales, la información aportada por esta herramienta resulta de gran utilidad y es por ello que, durante los últimos ciclos de inspección realizados en las centrales nucleares españolas, se ha realizado un uso intensivo de la misma aportando grandes ventajas y beneficios tanto en el desarrollo de las inspecciones como en el resultado final de las mismas. Estas ventajas impactan positivamente en la eficiencia y seguridad de las operaciones y resultan cruciales tanto en la fase de preparación de los trabajos como durante la ejecución de los mismos. A continuación, se indican las ventajas y beneficios más relevantes que se han ido obteniendo con el empleo de dicha herramienta:

- Optimización de procesos

- **Localización precisa de elementos:** El Gemelo Digital proporciona una representación tridimensional detallada de la planta, permitiendo a los equipos de inspección localizar con exactitud los componentes y equipos que requieren evaluación.
- **Establecimiento de recorridos de inspección:** Gracias a la representación digital, es posible planificar rutas de inspección eficientes, minimizando tiempos y recursos.
- **Gestión de permisos y accesos:** La herramienta facilita la gestión de permisos de acceso a áreas específicas, asegurando que solo personal autorizado pueda realizar inspecciones en determinadas zonas.
- **Reducción de trabajos auxiliares:** Al contar con información precisa y detallada, se minimiza la necesidad



de realizar trabajos auxiliares para acceder a áreas de interés, lo que a su vez reduce el tiempo y los costos asociados.

- Reducción de dosis y mejora en la prevención de riesgos

- Al permitir una preparación más precisa y detallada de los trabajos de inspección, se reduce la exposición de los inspectores a radiaciones, lo que contribuye a una disminución significativa en las dosis recibidas durante estas actividades.
- La información detallada proporcionada por el Gemelo Digital permite anticipar posibles riesgos y planificar medidas de seguridad de manera más efectiva, minimizando la posibilidad de incidentes o accidentes durante las inspecciones.

- Formación y transmisión de conocimientos

El Gemelo Digital no solo revoluciona la manera en que se llevan a cabo las inspecciones, sino que también se convierte en una herramienta de incalculable valor para la formación y transmisión de conocimientos en el ámbito nuclear:

- Proporciona un entorno de entrenamiento virtual y seguro donde los nuevos inspectores pueden familiarizarse con la distribución de la planta, los equipos y las estructuras sin la necesidad de estar físicamente presentes en el sitio.
- Permite la simulación de escenarios y situaciones de inspección, preparando a los inspectores para enfrentar desafíos reales de manera más efectiva y segura.
- Facilita la comunicación y el intercambio de conocimientos entre inspectores experimentados y aquellos que se están formando, permitiendo la transferencia de mejores prácticas y lecciones aprendidas.
- La representación detallada y precisa del Gemelo Digital sirve como una herramienta visual poderosa para explicar procedimientos, identificar puntos críticos y destacar consideraciones de seguridad.

La aplicación del Gemelo Digital en el ámbito de la inspección estructural ha permitido corroborar, aun en una fase inicial como en la que se encuentran las centrales españolas, las ventajas teóricas que se presuponían de esta nueva tecnología. Se ha demostrado que el empleo de los modelos 3D digitales permiten no solo optimizar los procesos operativos, sino que también mejorar significativamente la seguridad y formación del personal, consolidando su posición como una innovación clave en la industria nuclear.

DESAFÍOS Y CONSIDERACIONES

El desarrollo completo del Gemelo Digital en la industria nuclear conlleva una serie de desafíos y consideraciones que es preciso abordar y tener en cuenta para que el proceso de implantación de dicha tecnología se realice de una manera lógica y segura. Algunos de estos desafíos son los siguientes:

1. Integración de tecnologías y sistemas existentes

La implementación de gemelos digitales requiere la integración efectiva con tecnologías y sistemas existentes en la planta. Esto puede implicar la actualización de hardware, software y la formación del personal para asegurar una transición sin problemas.

2. Recopilación y gestión de datos

La cantidad de datos generados por los sistemas de monitoreo y sensores puede resultar masiva. Por ello, es esencial el establecimiento previo de una infraestructura robusta para la recopilación, almacenamiento y procesamiento de estos datos. Además, se deben implementar medidas de seguridad para proteger la información sensible.

3. Calibración y mantenimiento de sistemas de monitoreo y sensores

Los sistemas de monitoreo y sensores utilizados en gemelos digitales deben ser calibrados regularmente para garantizar mediciones precisas y confiables. Además, se deben realizar tareas de mantenimiento periódicas para asegurar su funcionamiento óptimo.

4. Precisión y fiabilidad de los modelos 3D

La precisión de los modelos 3D es esencial para una representación exacta de los activos. Errores en la creación de modelos pueden llevar a interpretaciones incorrectas de los datos y decisiones erróneas de mantenimiento.

5. Privacidad y seguridad de datos

La recopilación de grandes cantidades de datos sensibles requiere una atención especial a la privacidad y seguridad. Se deben implementar medidas de protección robustas para garantizar que la información no sea comprometida.

6. Optimización de algoritmos de aprendizaje automático

El desarrollo y optimización de algoritmos de aprendizaje automático puede ser un desafío en sí mismo. Requiere una comprensión profunda de los datos y del comportamiento de los activos, así como un proceso iterativo de ajuste y validación.

7. Adopción cultural y capacitación del personal

La introducción de gemelos digitales implica un cambio cultural en la forma en que se abordan las inspecciones y el mantenimiento. Es esencial proporcionar capacitación adecuada al personal para asegurar una adopción efectiva y una comprensión completa de los beneficios.

8. Cumplimiento normativo y regulatorio

Toda central nuclear está sujeta a estrictos requisitos regulatorios y normativos. La implementación de gemelos digitales debe cumplir con estas regulaciones y garantizar que se sigan los procedimientos de seguridad establecidos. Además, es previsible que en el futuro aparezcan nuevos requisitos regulatorios relacionados con este tipo de tecnologías.

9. Escalabilidad y actualización continua

A medida que la planta evoluciona, es importante que los

gemelos digitales sean escalables y adaptables a los cambios. Esto implica la capacidad de agregar nuevos sensores, actualizar modelos y algoritmos, y mantener la infraestructura tecnológica al día.

Estos desafíos y consideraciones deben ser cuidadosamente abordados para garantizar el éxito y la efectividad de la implementación de gemelos digitales en inspecciones estructurales. Cada uno de ellos requiere una planificación y gestión cuidadosa para maximizar los beneficios de esta tecnología innovadora. ar.

FUTURO DE LAS INSPECCIONES ESTRUCTURALES CON GEMELOS DIGITALES

El futuro de las inspecciones estructurales con gemelos digitales se vislumbra prometedor y lleno de oportunidades para la mejora continua de la seguridad y eficiencia en la industria de producción energética nuclear. Algunas tendencias y desarrollos destacados incluyen:

- Integración con Tecnologías Emergentes: En un futuro cercano es esperable que los gemelos digitales tiendan a integrarse aún más con tecnologías emergentes como la realidad aumentada y virtual, lo que permitirá a los técnicos visualizar y analizar los datos de inspección de manera más inmersiva y detallada.
- Automatización y Robótica: La combinación de gemelos digitales con sistemas de robots autónomos permitirá la realización de inspecciones y tareas de mantenimiento de manera más eficiente y segura en áreas de difícil acceso o entornos peligrosos.
- Inteligencia Artificial Avanzada: El desarrollo de algoritmos de inteligencia artificial más avanzados permitirá una mayor precisión en la detección de anomalías y en la predicción de problemas potenciales, lo que llevará a un mantenimiento aún más proactivo.



Figura 5. Industria virtual.

- **Expansión a Otras Industrias:** La tecnología de gemelos digitales, que ha demostrado ser exitosa en la industria de producción energética, se expandirá a otras industrias como la industria manufacturera, la construcción y otras industrias asociadas.

CONCLUSIONES

La implementación de gemelos digitales en inspecciones estructurales ha demostrado ser un avance significativo en la mejora de la seguridad, eficiencia y rentabilidad de las operaciones en centrales nucleares. Los beneficios de esta tecnología son evidentes en la reducción de costos, la optimización de la planificación de mantenimiento y la mejora de la seguridad del personal.

Sin embargo, se deben abordar desafíos como la gestión de grandes volúmenes de datos y la integración de tecnologías existentes y la continua actualización de los elementos involucrados. A medida que la tecnología continúe evolucionando, son de esperar prometedores avances en la capacidad de los gemelos digitales para transformar la forma en que se realizan las inspecciones y el mantenimiento estructural.

En resumen, el futuro de las inspecciones estructurales con gemelos digitales es prometedor y ofrece un camino hacia

operaciones más seguras, eficientes y sostenibles en la industria nuclear y más allá.

REFERENCIAS

- [1] B Danette, A. (2021). Digital Twins and Living Models at Nasa en Digital Twin Summit. Obtenido de NASA Technical Report Center: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20210023699>.
- [2] Consejo de Seguridad Nuclear. (2016). Guía de Seguridad 1.18. Medida de la eficacia del Mantenimiento en Centrales Nucleares. Madrid: CSN.
- [3] Consejo de Seguridad Nuclear. (2024). Supervisión y Control. Inspecciones. Obtenido de <https://www.csn.es/seguridad-nuclear/supervision-control-inspecciones>.
- [4] IBM. (2017). ¿Qué es un gemelo digital? Obtenido de <https://www.ibm.com/es-es/topics/what-is-a-digital-twin>.
- [5] Jackson, C. (2021). The digital twin's changing role. Obtenido de Siemens Digital Industries: <https://blogs.sw.siemens.com/xcelerator/2021/04/26/digital-twins-changing-role/>.
- [6] Siemens Digital Industries. (2024). Gemelo Digital - Siemens Technology. Obtenido de <https://www.sw.siemens.com/es-ES/technology/digital-twin/> ■