

REVOLUCIONANDO LA SIMULACIÓN NUCLEAR: EXPLORANDO LAS ÚLTIMAS TENDENCIAS E INNOVACIONES



TANIA CARREIRA COUTO
Ingeniero de operación
TECNATOM

En el dinámico panorama de la tecnología nuclear, la simulación ha surgido como una fuerza crucial, remodelando la forma en que comprendemos, predecimos y mejoramos los procesos nucleares. Desde modelos virtuales de reactores que simulan intrincadas reacciones de fisión y fusión nuclear, hasta plataformas de entrenamiento sofisticadas para operadores nucleares, el mundo de los simuladores nucleares está experimentando un notable proceso de innovación. En este artículo exploraremos las últimas tendencias en la simulación nuclear, descubriendo técnicas de vanguardia, aplicaciones e industrias que están revolucionando la seguridad, eficiencia y avances en este campo crítico.

UN POCO DE HISTORIA

Los simuladores réplica han demostrado ser herramientas fundamentales en la industria nuclear, desempeñando un papel crucial en la formación, entrenamiento, análisis y optimización de las centrales. Estos sistemas de simulación, de alta complejidad tecnológica, reproducen con precisión el comportamiento de una central nuclear en un entorno réplica de la sala de control y su instrumentación, incluyendo todos los sistemas y componentes con presencia en sala de control, acoplados y sincronizados en vivo. Ello permite a los operadores adquirir conocimientos teóricos y prácticos, así como entrenar en situaciones de emergencia y eventos anormales de manera segura y controlada.



La evolución histórica de los simuladores réplica ha sido constante, acompañada de los avances tecnológicos en el ámbito informático, mejorando en términos de fidelidad y capacidad a lo largo del tiempo. Hoy en día, cuentan con modelos sofisticados de sistemas, interfaces gráficas inmersivas, sistemas de visualización avanzados y sistemas de control realistas. Estas características permiten a los operadores sumergirse en entornos virtuales que simulan con gran realismo las condiciones de una central nuclear, brindándoles una experiencia de aprendizaje altamente efectiva.

Uno de los aspectos destacados de los simuladores réplica es su papel en el análisis de transitorios en las centrales nu-

cleares. Los simuladores permiten simular eventos anormales y accidentes, analizar su comportamiento y evaluar las medidas de respuesta y mitigación. Esta capacidad contribuye a mejorar la seguridad y la capacidad de respuesta de las centrales nucleares ante situaciones de emergencia, asegurando así la protección de la población y el medio ambiente. Además, los simuladores réplica son herramientas valiosas en el ajuste del rendimiento de las centrales nucleares y sus lazos de control ya que permiten analizar detalladamente las operaciones y optimizar los parámetros de funcionamiento, para maximizar la eficiencia y la producción de energía de la central.

En esta misma línea, el uso de simuladores en la industria nuclear se ha convertido en una herramienta fundamental para evaluar la seguridad de posibles modificaciones en planta antes de su implementación. Los simuladores permiten recrear de manera precisa el funcionamiento de los sistemas de planta, lo que posibilita realizar pruebas virtuales y escenarios hipotéticos sin poner en riesgo la integridad de la instalación. Los ingenieros y técnicos pueden realizar ajustes y evaluar modificaciones en el entorno simulado, identificando posibles riesgos y conflictos antes de llevar a cabo cambios reales en la planta. Esta metodología de pruebas avanzadas ofrece una valiosa oportunidad para mejorar la seguridad, garantizando que todas las modificaciones sean rigurosamente evaluadas y validadas antes de ser implementadas. En el ámbito de la formación y el entrenamiento, la contribución de los simuladores réplica ha demostrado ser inestimable. Permiten a los operadores adquirir habilidades prácticas y conocimientos teóricos esenciales para la operación segura y eficiente de las centrales nucleares. Además, los simuladores réplica son una herramienta efectiva para evaluar y mejorar la competencia y el desempeño del personal. Es importante destacar la colaboración entre Tecnatom y las centrales nucleares españolas en la aplicación de los simuladores réplica. Esta colaboración ha permitido el desarrollo de proyectos globales de alto valor añadido, asegurando que los simuladores réplica se utilicen de manera óptima y que se cumplan los estándares internacionales de calidad.

¿Y AHORA QUÉ?

Hasta ahora hemos hablado del uso que se le ha dado tradicionalmente a los simuladores, pero ¿qué hay más allá? Un pilar de la innovación es aplicar lo conocido más allá de sus usos tradicionales y la simulación no es una excepción. En la actualidad, nos encontramos en un punto de inflexión, donde las nuevas tendencias en simuladores están llevando esta tecnología a un nivel sin precedentes.

Exploraremos algunas de estas tendencias emergentes, desde el uso de asistentes conversacionales para interactuar con el simulador hasta la integración de la Realidad Virtual para mejorar tareas en campo.

Asimismo, examinaremos cómo la democratización de los simuladores y su aplicación en ingeniería están transformando la forma en que se enfrentan los desafíos y se fomenta el crecimiento en esta industria.

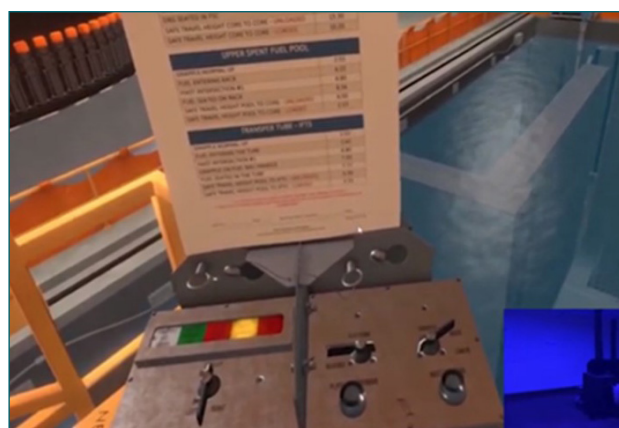
USOS PARA INGENIERÍA

El uso de simuladores como apoyo para ingeniería (SAE, por sus siglas en inglés Simulation Assisted Engineering) es

un recurso de valor incalculable en el campo de la ingeniería nuclear. Ya se están dando pasos para que el simulador de alcance total se integre de forma efectiva y desde el inicio en el propio proceso de diseño de una nueva instalación o modificación al diseño. En los casos más avanzados, la base de datos de control de configuración del simulador está acoplada con la propia base de datos BIM de la planta. De esta manera, la evolución del diseño alimenta en vivo al simulador, que se actualiza casi automáticamente, y permite evaluar y realimentar al diseño, años antes de que la instalación real arranque. La aplicación de simuladores en esta área ofrece ventajas pues permite detectar problemas de forma temprana y permite realizar la puesta en marcha de manera virtual. Esta filosofía de detección temprana no solo optimiza el tiempo y los gastos asociados, sino que también asegura una implementación más suave y segura de los proyectos de ingeniería nuclear. En definitiva, los simuladores como apoyo para ingeniería están abriendo nuevas perspectivas en la industria, mejorando la eficiencia y la calidad de los procesos de diseño, construcción y puesta en marcha.

En los últimos 30 años, los primeros tímidos SAE se han normalizado, hasta un punto en que hoy es usual hacer SAE de cada modificación de diseño. En Tecnatom disponemos de un registro con más de 100 SAEs cubriendo desde la sustitución de grandes equipos (generadores de vapor, por ejemplo), la instalación de nuevos sistemas de control distribuido (hardware o software in the loop), validación de factores humanos de nueva instrumentación, el análisis de eventos inesperados, el ajuste de lazos de control, etc. El uso de simuladores de alcance total se ha normalizado, por lo que ya está en desarrollo un estándar que cubra estas actividades (ANSI/ANS 3.5.1 – “Nuclear Power Plant Simulators for Use in Simulation-Assisted Engineering and Non-Operator Training”).

La formación en la industria nuclear está experimentando una transformación radical gracias a la democratización de los simuladores. La posibilidad de disponer de entornos de operación adaptados a cada perfil de usuario (sala réplica o diagramas PI&Ds dinámicos con mandos de alto nivel tutorizados, ...) permite que otro personal de planta también se beneficien de su utilización. Ingenieros, técnicos y personal de soporte pueden acceder para mejorar su comprensión de los procesos, adquirir habilidades y apoyo relacionado con sus funciones (por ejemplo, para optimizar procedimientos para reducir los plazos de salida de cero en isla). Esta democratización amplía el conocimiento y la



competencia en toda la planta, fortaleciendo el equipo en su conjunto y fomentando una cultura de seguridad y colaboración.

USOS PARA FORMACIÓN

Además de lo mencionado anteriormente, esta democratización de los simuladores se vería potenciada por la implementación de una plataforma integradora que permita a los instructores tener una visión completa de lo que cada alumno está haciendo en su carga individual. Esta plataforma integradora también puede emplear la inteligencia artificial como asistente conversacional para ayudar al instructor. Mediante el análisis de la situación y el rendimiento de los alumnos, la inteligencia artificial ofrecerá sugerencias y recomendaciones para mejorar el proceso de enseñanza y aprendizaje. Este mismo asistente conversacional ayudará al instructor en el entorno clásico del simulador para hacer más sencilla la generación del escenario que requiere en cada momento así como sugerir acciones en base a escenarios de formación anteriores.

La simulación en entorno distribuido es otra característica clave que complementaría la democratización de los simuladores. Esta modalidad permite que tanto alumnos como instructores interactúen virtualmente, (en alguna de las experiencias de Tecnatom se han tenido sesiones de formación con un instructor ubicado en España y alumnos ubicados en dos países diferentes de Latinoamérica). La posibilidad de entrenar y aprender en entornos remotos brinda una mayor flexibilidad en la formación, permitiendo que los empleados se adapten a sus necesidades. En este contexto, los instructores virtuales desempeñarán un papel crucial, ya que guiarán a los alumnos en tiempo real según su desempeño. Esta retroalimentación inmediata y personalizada mejorará significativamente la experiencia de aprendizaje, permitiendo a los participantes corregir errores, perfeccionar técnicas y alcanzar un nivel óptimo de competencia de manera más eficiente.



Otro elemento relacionado con la democratización de la formación es lo que denominamos “píldoras formativas”, entendidas como microsimuladores en web, con acceso 24x7 para la formación base y con sistemas de ayuda al alumno (lógicas de cabinas eléctricas, sistemas de control PI, termohidráulica básica, fundamentos de neutrónica, ...). Las píldoras formativas han permitido, por ejemplo, reducir en un 1/3 los costes de desplazamiento e indisponibilidad

para formación de técnicos de mantenimiento eléctrico en aeropuertos.

La conjunción de la democratización de los simuladores y la simulación en entorno distribuido con instructores virtuales representa un cambio paradigmático en la formación de la industria nuclear. Esta combinación de tecnologías avanzadas no solo aumenta la eficiencia y la efectividad del proceso de aprendizaje, sino que también establece una base sólida para el desarrollo continuo del personal de planta. En un campo donde la seguridad y la precisión son esenciales, estas innovaciones en formación prometen fortalecer la preparación de los equipos y elevar los estándares de excelencia.

AYUDA AL OPERADOR

También destaca la implementación de simuladores avanzados que ofrecen diferentes ayudas al operador. Por ejemplo, generar un gemelo digital permite aflorar una serie de ventajas significativas que transforman la forma en que se opera y mantiene esta infraestructura crítica. Un gemelo digital es una réplica virtual y actualizada casi en tiempo real de la central, de manera que los trabajadores pueden adquirir experiencia práctica en un entorno seguro. En algunas de las aplicaciones desarrolladas en Tecnatom, el gemelo digital se actualiza automáticamente (a petición del ingeniero) a los últimos datos de la central, realiza un conjunto de pruebas virtuales de vigilancia del desempeño en condiciones normales y accidentales, y advierte de desviaciones en los resultados que alertan de fallos incipientes y degradaciones. La toma de decisiones también se ve optimizada, ya que los operadores pueden simular diferentes escenarios y evaluar el impacto de sus acciones antes de implementarlas en el sistema real. En última instancia, el gemelo digital se erige como una herramienta indispensable para mejorar la eficiencia operativa, aumentar la seguridad y garantizar una producción de energía nuclear más confiable y sostenible.

Todo ello precisa de pasarelas que unan las bases de datos de configuración del simulador con las bases de datos de la planta, permitiendo una alineación con el estado real de la central. Gracias a ello, los operadores pueden ensayar maniobras complejas, realizar pruebas de diferentes escenarios y llevar a cabo prejobs de forma segura y efectiva. Esta integración de datos en tiempo real brinda a los operadores la oportunidad de mejorar sus habilidades, perfeccionar su toma de decisiones y optimizar el rendimiento general de la planta. En un entorno donde la seguridad y la eficiencia son cruciales, estas herramientas de simulación están demostrando ser un pilar fundamental para el futuro de la industria nuclear.

Como ya se ha comentado antes, la incursión de asistentes conversacionales en el ámbito de los simuladores nucleares representa un avance revolucionario en la interacción instructor-simulador. Sin embargo, existe otra vertiente de esto y es el uso de asistentes conversacionales por parte del propio operador, permitiéndoles interactuar de manera natural y fluida con el sistema, por ejemplo, para el seguimiento de procedimientos complejos o analizando transitorios en los parámetros de la planta. Gracias a la integración de la tecnología de procesamiento del lenguaje natural, estos asistentes pueden interpretar comandos verbales y res-

ponder a preguntas de los operadores de forma precisa y oportuna. Además, estos asistentes también encuentran aplicaciones en el desarrollo de nuevos simuladores, donde optimizan procesos, como la ejecución de las pruebas de aceptación. Esta combinación de capacidades brinda una herramienta poderosa para mejorar la eficiencia y la usabilidad de los simuladores, allanando el camino hacia un futuro más sofisticado y seguro en la industria nuclear.

Otra tendencia prometedora en la industria nuclear es la adopción de la Realidad Virtual (RV) para mejorar la ejecución de tareas en campo mediante una práctica inmersiva previa. La RV ofrece a los trabajadores de plantas nucleares la oportunidad de simular operaciones y procedimientos complejos en un entorno virtual, antes de enfrentarse a



situaciones reales. A modo de ejemplo, podemos mencionar el modelo de máquina de recarga de combustible en tecnología PHWR unida a una RV de visualización de las propias cavidad y máquina de recarga. Al permitir a los trabajadores practicar y perfeccionar sus habilidades en un ambiente virtual seguro, la RV reduce significativamente el riesgo de errores y accidentes durante la ejecución en el mundo real. Los beneficios de esta tecnología se extienden a áreas como el mantenimiento, la reparación y la inspección de equipos críticos, así como a la formación de nuevos operadores. La RV se perfila como una herramienta esencial para aumentar la confianza, la destreza y la preparación del personal, elevando los estándares de seguridad y eficiencia en la industria nuclear.

EVITAR LA OBSOLESCENCIA

Debido a la extensa vida útil de las centrales nucleares, sus salas de control y simuladores enfrentan el desafío de soportar largos años de uso intensivo, lo que puede generar problemas de abastecimiento de piezas y obsolescencia a largo plazo. El rápido avance tecnológico puede hacer que ciertos componentes se vuelvan difíciles de conseguir o incluso obsoletos, lo que amenaza la operatividad y el rendimiento óptimo de estos sistemas críticos. Esta situación puede aumentar los costes de mantenimiento y reemplazo, y en última instancia, afectar la seguridad y la eficiencia de las centrales nucleares.

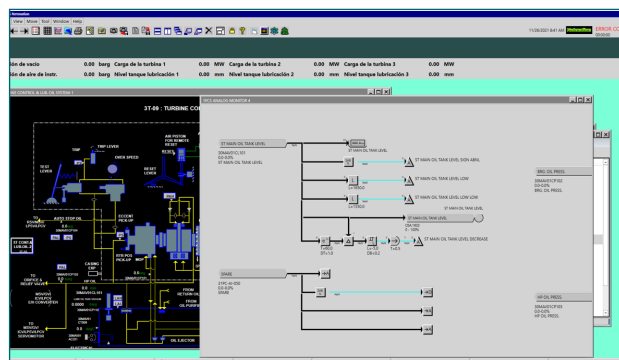
Una solución prometedora para superar estos desafíos es la implementación de salas de control virtual (concepto "Glasstop simulator"). Al tratarse de instrumentación y paneles virtuales, las actualizaciones y mejoras pueden aplicarse



rápidamente, sin la necesidad de reemplazar componentes físicos o realizar cambios costosos en la infraestructura existente. Más aún, se habilita la posibilidad de hacer análisis "what if" al estilo del que INL está realizando recientemente para acoplar una planta de producción de hidrógeno (tecnología de alta temperatura) a una central nuclear a través de un suministro eléctrico "behind the meter" y un nuevo sistema de suministro de vapor. Ello permite a las centrales nucleares mantenerse a la vanguardia de las últimas innovaciones, optimizando su rendimiento y asegurando la seguridad operacional a lo largo del tiempo. La flexibilidad y agilidad que brindan las salas de control virtuales se convierten en una estrategia efectiva para prolongar la vida útil y el funcionamiento óptimo de las centrales nucleares, al mismo tiempo que se asegura una operación eficiente y segura en el contexto del siempre cambiante panorama tecnológico.

DESARROLLO DE SIMULADORES Y OPTIMIZACIÓN DE O&M

Enlazando con la idea anterior, en el desarrollo de nuevos simuladores y en la optimización de la operación y mantenimiento se tiene como uno de los pilares el ahorro de costes. Por ejemplo, el uso de desarrollos inteligentes de modelos y la gestión inteligente de condiciones iniciales en simuladores para ahorrar costes y mejorar la eficiencia. Mediante el aprovechamiento de técnicas avanzadas de análisis de datos y aprendizaje automático, los operadores pueden mejorar la fidelidad y precisión de los modelos de simulación, al mismo tiempo que reducen los recursos computacionales.



les. Los desarrollos inteligentes de modelos permiten una representación más precisa de los complejos procesos nucleares, lo que resulta en una mejor capacidad predictiva

y escenarios de entrenamiento más realistas. Esto no solo mejora la experiencia de entrenamiento para los operadores, sino que también permite identificar oportunidades de optimización en la operación de la planta.

Además de los desarrollos inteligentes de modelos, la gestión inteligente de condiciones iniciales (CI) representa una ventaja significativa en la formación, ya que esta tarea suele requerir una cantidad considerable de recursos. Sin embargo, es fundamental para crear escenarios realistas y efectivos en los simuladores. La clave reside en conseguir que estas condiciones iniciales se generen de manera autónoma mediante desarrollos inteligentes basados en datos previos. Al utilizar técnicas de aprendizaje automático y análisis de datos avanzados, es posible obtener condiciones iniciales precisas y relevantes a partir de bases de datos de mantenimiento e históricos de la central.

CONCLUSIONES

En conclusión, la simulación emerge como una fuerza crucial en la industria nuclear, remodelando la forma en que comprendemos, entrenamos y optimizamos los procesos nucleares. Los simuladores réplica desempeñan un papel esencial, brindando a los operadores conocimientos prácticos y entrenamiento seguro en entornos virtuales. Su evo-

lución histórica, impulsada por avances tecnológicos, ha llevado a simuladores modernos hacia capacidades avanzadas de análisis, mejorando la seguridad y eficiencia de las centrales nucleares.

El desarrollo de gemelos digitales será una ventaja significativa, permitiendo la simulación precisa y continua del comportamiento de la central, facilitando la detección temprana de fallos y optimizando la toma de decisiones. La integración de inteligencia artificial y asistentes conversacionales potenciará aún más estos avances, mejorando la eficiencia operativa y la interacción instructor-simulador.

La adopción de la Realidad Virtual (RV) para mejorar la ejecución de tareas en campo es otra tendencia prometedora, reduciendo el riesgo de errores y accidentes.

Enfrentando el desafío de la obsolescencia, las salas de control y simuladores virtuales ofrecen una solución eficaz, adaptándose rápidamente a los avances tecnológicos sin costosos reemplazos de componentes físicos.

En resumen, con simuladores avanzados y tecnologías emergentes, la industria nuclear se posiciona para un crecimiento seguro, eficiente y sostenible. La innovación en esta área es esencial para asegurar un futuro prometedor en la generación de energía nuclear. ■