

El valor añadido de los simuladores réplica en la explotación de las centrales nucleares

P. A. Díaz Girón, F. Ortega y N. Rivero

Los simuladores réplica de sala de control son herramientas de una gran complejidad en las que la aplicación de los avances tecnológicos han posibilitado disponer de una alta fidelidad física y funcional. Constituyen por ello una herramienta versátil y poderosa capaz de aportar un alto valor añadido en muchas de las actividades relacionadas con la explotación de las centrales

Tecnatom en los últimos años ha extendido el uso de estos simuladores, inicialmente centrados en el entrenamiento del personal de operación, a una amplia variedad de aplicaciones de ingeniería y operación. Basándose en esta experiencia, el artículo presenta las diferentes vías en las que el simulador puede y debe contribuir positivamente a conseguir una operación segura y fiable de las centrales.

Nuclear power plants full scope replica simulators were in the past solely designed following operational personnel training criteria. Nevertheless, these simulators not only feature a high fidelity replica control room but also provide an accurate process response.

Control room replica simulators are presently based on complex technological platforms permitting highest physical and functional fidelity, allowing to be used as versatile and value added tools in diverse plants operation and maintenance activities. In recent years, Tecnatom has extended the use of such simulators to different engineering applications. This article intends to identify the simulators use in training and other applications beyond training.

INTRODUCCIÓN

El concepto de simulador réplica de sala de control de las centrales nucleares proviene de su antecesor el simulador de vuelo, en el que la reproducción del entorno de la cabina del piloto permitió establecer criterios de diseño y características en los simuladores, podríamos decir que con más ingenio que tecnología. En ambos casos, el elemento impulsor de dichos desarrollos fue la necesidad de disponer de personal cualificado para garantizar una operación segura.

El uso de los simuladores réplica de sala de control en la industria nuclear se remonta al final de los años 60 en el que se desarrolló el simulador de la central nuclear de Dresden. Importantes limitaciones en el alcance y precisión de los modelos caracterizaban a este simulador.

Tecnatom, en el año 1979, inició la explotación de dos simuladores réplica de las salas de control de las centrales nucleares de Cofrentes y Lemóniz. Estos simuladores, que tipificaban las dos tecnologías disponibles en España

(PWR y BWR), tenían un uso polivalente, proporcionando entrenamiento a otras centrales con procesos similares. Desde entonces, el parque de simuladores español se ha extendido progresivamente, disponiendo todas las plantas nucleares en la actualidad de un simulador específico réplica de sala de control, plenamente integrado en sus planes de entrenamiento y sobre el que cualificar a su personal de operación.

Como se describirá a lo largo del artículo, nada tienen que ver aquellos primeros simuladores con el parque actual, en cuanto a tecnología, regulación existente y metodologías asociadas. Veremos también que, consecuentemente, el valor añadido que ahora aportan sobre la explotación de las centrales nucleares es mucho mayor.

El artículo se estructura en dos secciones: la primera se centra en presentar las características tecnológicas y metodológicas del desarrollo, operación y mantenimiento de los simuladores réplica de sala de control, mientras que en la segunda se presentan las utilizaciones que en la actualidad se están realizando



PEDRO A. DIAZ GIRÓN

es Ingeniero Industrial, especialidad en Técnicas Energéticas, por la Universidad Politécnica de Madrid. Desde 1990 trabaja en Tecnatom, desempeñando sus funciones en el ámbito del desarrollo, validación y utilización de los simuladores. En la actualidad es jefe de Mantenimiento de Simuladores.



FERNANDO ORTEGA PASCUAL

es Ingeniero Industrial en la especialidad de Técnicas Energéticas, se incorpora a Tecnatom en 1985 obteniendo la certificación de "Senior Reactor Operator". Ha desarrollado su carrera profesional en distintas áreas del ámbito nuclear: adiestramiento, simulación, I&C e ingeniería de operación. En la actualidad es Gerente del Área de Salas de Control y Simulación.



NORBERTO RIVERO MORENO

es Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, especialidad en Hidráulica y Energética, por la ETSICCP de la Universidad Politécnica de Madrid. Desde 1983 forma parte de Tecnatom S.A, donde ha ocupado diferentes puestos como responsable de Informática técnica y de Desarrollo de simuladores. En la actualidad es adjunto al gerente del negocio de Salas de control y Simulación.

de los simuladores en las áreas de entrenamiento, operación e ingeniería.

LOS SIMULADORES RÉPLICA DE SALA DE CONTROL EN LA INDUSTRIA NUCLEAR

Génesis y evolución

Los simuladores nacen como una herramienta de formación a la que confiar un papel esencial en el conocimiento y la operación segura de la instalación, sobre todo en el estudio de las respuestas en condiciones de accidente. El objetivo que siempre se ha pretendido es recrear una réplica del entorno de operación de la planta en el que interaccionar, disponiendo de la misma información y de las mismas limitaciones que existirían en la situación real.

Respecto a la evolución experimentada en las capacidades y características de los simuladores, podríamos distinguir varias etapas:

- Los primeros simuladores de entrenamiento, en los que las severas restricciones de capacidad de cálculo imponían unas reglas estrictas a la hora de la optimización y sencillez de los modelos de simulación. El requisito de ejecución en tiempo real era el máximo atributo que debía preservarse, para así evitar un entrenamiento incorrecto y una falsa comprensión del comportamiento del proceso. Como resultado, el alcance y precisión de los modelos era muy limitado, no siempre basados en principios físicos e incapaces de proporcionar respuestas precisas ante situaciones de operación anormal y de emergencias. Otra de las características destacables de estos simuladores era su elevada dificultad de mantenimiento.
- La primera generación de simuladores aparece cuando ya existe una actividad industrial y una sistemática de desarrollo de estos sistemas por compañías especializadas. Se generan metodologías de desarrollo y herramientas primitivas de apoyo a la ejecución y al mantenimiento. A esta etapa pertenecen los dos primeros simuladores que Tecnatom integró en su centro de entrenamiento. En esta etapa siguen existiendo importantes limitaciones en la precisión y alcance del proceso simulado, restricciones aún impuestas por la capacidad de computación de los equipos. La normativa de referencia más ampliamente utilizada aparece en el año 77, esta es la norma ANSI 3-5: *Nuclear Power plant simulators for use in operator training and examination*.
- La segunda generación de simuladores se propicia como consecuencia de eventos como TMI (Three Mi-

le Island) que impulsan la necesidad de disponer de modelos de simulación capaces de reproducir de forma amplia, y suficientemente precisa, el comportamiento de las plantas en situaciones de emergencia. Es en este momento en el que, aun existiendo limitaciones de cálculo en los ordenadores, se incorporan modelos de alta precisión basados en una rigurosa conservación de los principios físicos básicos. Tecnatom en este aspecto fue pionero incorporando en sus simuladores modelos termohidráulicos basados en códigos de ingeniería tipo *best estimate*.

- La tercera generación corresponde a una etapa de madurez tecnológica. Las plataformas de cálculo ya no representan limitación alguna, salvo casos excepcionales, para la ejecución en tiempo real de los modelos de los simuladores de entrenamiento. En esta etapa existen herramientas especializadas de generación automatizada de los modelos de simulación, permitiendo optimizar los procesos en el desarrollo de nuevos simuladores. La normativa de referencia sigue siendo el estándar ANSI 3-5, en la actualidad en su edición del año 2009. Las mejoras en los modelos de simulación existentes, tomando como base el uso de códigos de ingeniería, la incorporación de nuevos sistemas digitales de Instrumentación y Control y la modernización de otros subsistemas del simulador como: consola del instructor, sistema de entradas-salidas, plataforma de cálculo, etc, constituyen los principales cambios que se llevan a cabo en el parque actual de simuladores en explotación (figura 1).

Requisitos de alcance y extensión

Como ya hemos definido previamente, un simulador réplica de alcance total reproduce la sala de control real, sustituyendo los procesos reales por complejos programas de computador, que denominamos modelos, cuyos cálculos alimentan una interfaz hombre-máquina, ofreciendo predicciones realistas del comportamiento de la instalación. Estos modelos se han de ejecutar en tiempo real en todo el rango de operaciones exigido.

Figura fundamental de un simulador es el instructor que mediante escenarios predefinidos y un entorno de supervisión y control, conocido como consola del instructor, monitoriza y evalúa el desempeño de los alumnos.

Los atributos más relevantes de los simuladores de alcance total réplica son:

- **Extensión:** un simulador de alcance total debe incluir todos los sistemas y componentes asociados susceptibles de ser operados y monitorizados desde sala de control.
- **Precisión:** los modelos de simulación deben ser formulados a partir de principios físicos y a la resolución de las ecuaciones de la física, química, neutrónica, termodinámica y termohidráulica, que representan los fenómenos que se producen en la central. Los requisitos y los rangos de precisión proporcionados por los modelos se encuentran claramente establecidos en la normativa de los simuladores de entrenamiento.
- **Rango de operación:** el simulador debe comprender en su rango de operación los procedimientos de operación general, de operación anormal

EVOLUCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE SIMULACIÓN

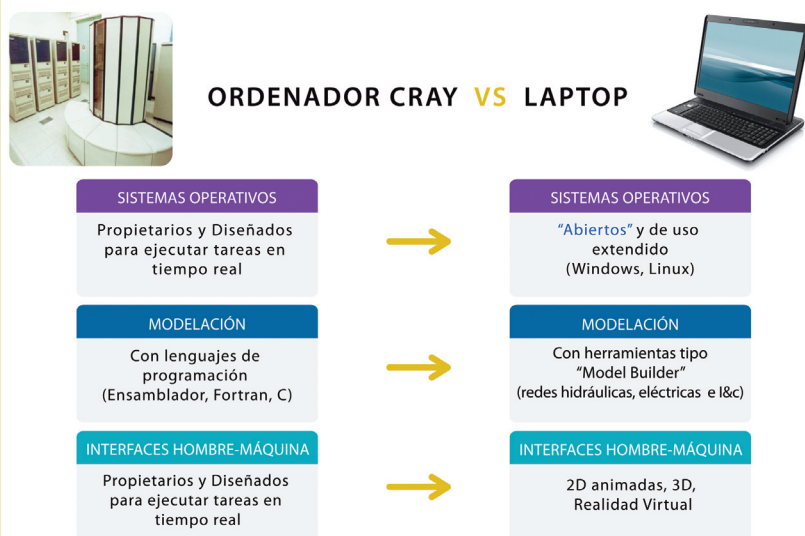


Figura 1: Evolución tecnológica.

(malfuncionamiento de equipos), de emergencias y los procedimientos de vigilancia e instrucciones particulares, excluyéndose el tratamiento de los accidentes severos.

- **Fidelidad física:** el simulador también debe satisfacer los requisitos asociados al desarrollo de habilidades, teniendo en cuenta consideraciones de factores humanos, es decir se exige que la interfaz hombre-máquina sea una réplica de la que existe en la realidad, o lo que es lo mismo se requiere la máxima fidelidad física a los paneles, instrumentos, interfaz gráfica y entorno (habitáculo, mobiliario, iluminación, etc) (figuras 2, 3 y 4).

La tecnología de simulación

No hace falta remontarse muchos años atrás para recordar que el desarrollo de los modelos se llevaba a cabo a través de instrucciones de algún lenguaje de programación, mayoritariamente Fortran, y la ayuda de librerías de rutinas. Esta labor casi artesanal conllevaba un importante esfuerzo, esfuerzo que se traducía en coste y tiempo en el desarrollo de nuevos simuladores y en su posterior mantenimiento.

Afortunadamente, la evolución de la tecnología de simulación ha sido espectacular y la utilización intensiva de herramientas especializadas en la generación automática de los modelos es hoy día habitual. En la actualidad cualquier empresa que pretenda competir en el área de simulación debe disponer, entre otras, de un conjunto de herramientas de generación de modelos, capaces de automatizar, y por lo tanto optimizar, el desarrollo de los modelos de un simulador. Como componentes tecnológicos más relevantes de un simulador destacamos:

- Entorno de simulación que permite sincronizar, ejecutar y supervisar la ejecución en tiempo real de los modelos, gestionar las bases de datos del simulador y depurar, en paralelo con la ejecución de los modelos, posibles errores embebidos.
- Herramientas de generación de modelos, especializadas según la tipología del sistema: redes eléctricas, hidráulicas o fluidos de carácter monofásico, sistemas de lógica y control, etc. Estas permiten el desarrollo automático de los modelos mediante una interfaz gráfica y la caracterización de los sistemas.
- Modelación del área termohidráulica y neutrónica, donde las tendencias del mercado confirman la apuesta de Tecnatom iniciada en proyecto MAS (Modelos Avanzados de Simulación) en los años 80 de disponer de códigos



Figura 2 y 3: Simuladores de las centrales nucleares de Ascó I y Vandellós II en el centro de entrenamiento de Tecnatom en Tarragona.



Figura 4: Simulador de la central nuclear de Trillo en la sede de Tecnatom (Madrid).

de ingeniería tipo *best estimate* (TRAC, RELAP, PANACII, NES-TLE, ...) utilizados para el licenciamiento y optimizados para su ejecución en tiempo real y para tener una capacidad de interacción *on-line* con el entorno de la simulación.

Adicionalmente a este puzzle necesario de herramientas deben existir aplicaciones esenciales en todo simulador, como la que gestiona la operación y supervi-

sión del instructor u otras relacionadas con la generación de gráficos dinámicos.

Finalmente, y como pieza estratégica en la etapa de mantenimiento de un simulador, hay que destacar su Control de Configuración, herramienta basada en un conjunto de bases de datos interrelacionadas y procesos con una gestión tipo *work-flow* que asegura la mantenibilidad del simulador al poder

identificar en todo momento: qué se ha hecho, donde se ha alterado el simulador, quien lo ha hecho, qué documentación existe de referencia y de nueva generación. En definitiva, esta herramienta, de uso requerido por la normativa, traslada y automatiza la metodología de mantenimiento de simuladores y sus procedimientos soporte (figura 5).

Líneas de futuro de los simuladores

La evolución futura de los simuladores vendrá definida por la interacción entre sus elementos impulsores: por un lado las necesidades asociadas a la explotación de las centrales y por otro la aplicación de los avances tecnológicos.

Podemos apuntar algunas líneas tecnológicas que están ya en marcha y que en gran medida introducirán nuevas aplicaciones, en algún caso aun no consolidadas.

- En cuanto a alcance, los simuladores réplica de sala de control traspasarán cada vez con mayor intensidad las paredes de la sala de control para incluir equipos, paneles, instrumentos, etc, que se hallan localizados en campo. Ello se llevará a cabo mediante representaciones de paneles virtuales en grandes pantallas táctiles y mediante el uso de herramientas de realidad virtual que permitirán por ejemplo a los operadores locales formarse en tareas que se realizan en zonas controladas sin impacto radiológico.

- En lo que respecta a la precisión de los modelos de simulación, la incorporación de modelos específicos de ingeniería seguirá su curso ampliando su ámbito de actuación a cada vez mas sistemas, permitiendo por un lado reproducir fenomenologías que hasta ahora se encontraban fuera de los límites de la simulación, y por otro alcanzando cada vez más precisión y fidelidad con la respuesta real de la central. Derivado de lo anterior y como consecuencia de los nuevos sistemas de información de datos de planta existentes, el simulador en su configuración grafica total o parcial cada vez aparecerá más presente físicamente en la sala de control, alimentado con datos de planta, manteniéndose "autoajustado" y listo para apoyar al equipo de operación en simulaciones de posibles estrategias de operación.
- Respecto a las plataformas de cómputo de los simuladores, la potencia de cálculo de los nuevos ordenadores personales permite ya una instalación de los simuladores en plataformas muy sencillas, con lo que el simulador gráfico será cada vez más una herramienta integrada en los entornos de trabajo habituales.

¿CÓMO PUEDEN APORTAR VALOR LOS SIMULADORES RÉPLICA DE SALA DE CONTROL?

Como se ha visto, los simuladores actuales son herramientas de gran compleji-

dad tecnológica y, consecuentemente, de un elevado coste que pueden y deben aportar su valor en muchas de las actividades asociadas a la explotación de las centrales nucleares.

Obviamente, el área de entrenamiento del personal de operación es históricamente la aplicación más relevante pero, como veremos, los usos del simulador ya no se centran únicamente en la formación de este personal sino que, cada vez más, se orienta, ya sea en su versión simulador réplica o en su versión simulador gráfico (SGI), a otros colectivos de las centrales.

Los actuales simuladores proporcionan hoy día una réplica fiel tanto de la instrumentación y del entorno de la sala de control como del comportamiento del proceso, pudiendo ser utilizados en la actualidad en plataformas de cómputo de bajo coste y portables. Por todo ello, veremos que también proporcionan un gran valor añadido en actividades relacionadas con la operación de la central, como puede ser en el desarrollo y revisión de procedimientos y en gran número de actividades de ingeniería en las que se diseñan cambios que afectan a la operación y a la interfaz hombre máquina de la instalación.

Los simuladores dentro del plan de entrenamiento

Desde su origen, los simuladores siempre se han utilizado para iniciar y reforzar los conocimientos, es decir, se trata de entender cómo se comportan y responden los procesos y cómo utilizar la información que llega a la sala de control para poder diagnosticar una situación determinada y reaccionar de forma adecuada ante ella. También, desde el inicio, los simuladores han destacado como el entorno requerido para desarrollar habilidades, es decir la adquisición de las destrezas necesarias para responder con la celeridad que requiera cada caso. Más adelante, en el uso de los simuladores aparecieron otras consideraciones como las asociadas al factor humano, entrando en juego el entrenamiento en los factores que influyen en la toma de decisiones, en el error de diagnóstico o en el error de actuación. Consolidados estos aspectos, aparecen también otros asociados a la cohesión del equipo y su integración dentro de la estructura organizativa de la central. El simulador de entrenamiento se convierte de este modo en un entorno más para desarrollar y reforzar actitudes que conduzcan a la consecución de los objetivos.

Es importante destacar que el simulador como herramienta de entrenamiento ha de ser integrado dentro de un plan global de formación. Sin esta

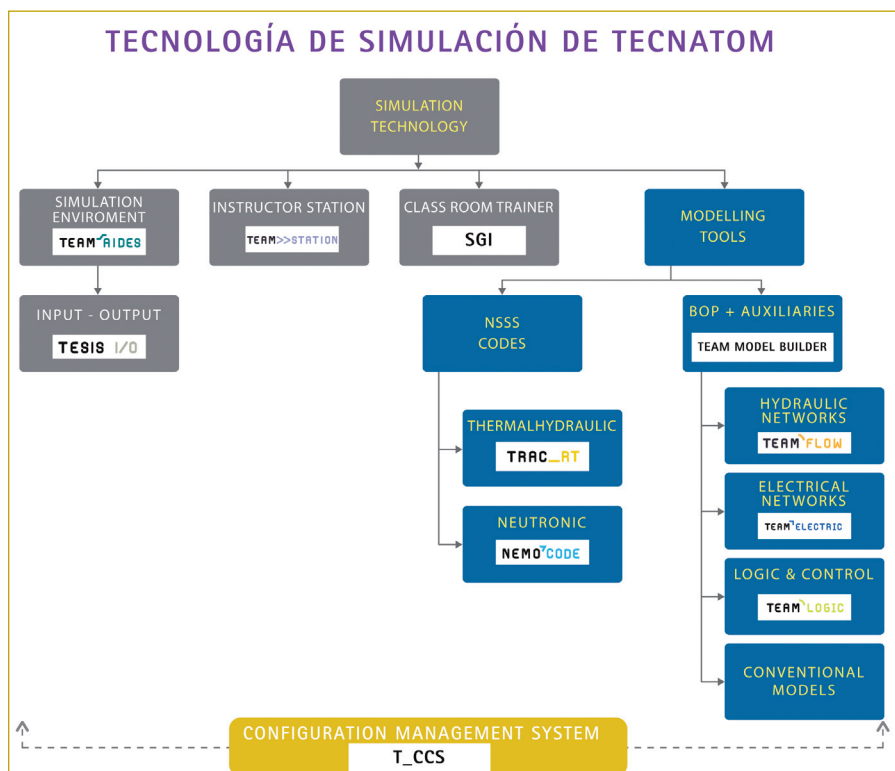


Figura 5: Entorno de tecnología de simulación.

integración, la aportación de los simuladores carecería de una sistemática de uso, proporcionando un rendimiento muy limitado.

Una de las metodologías más extendidas para el desarrollo de los planes de formación es el Enfoque Sistemático de la Capacitación (*Systematic Approach to Training*). Esta metodología distingue una fase de análisis del puesto de trabajo, donde se identifican las tareas asociadas al puesto y como consecuencia de estas tareas los conocimientos, habilidades y actitudes que se requieren para su correcto desempeño, asociándose a cada entorno determinado: aula, simulador, puesto, etc.

Tras esta fase de análisis, se determina cual debe ser la estructura del plan de entrenamiento, lo que completaría la fase de diseño. Es en la fase de desarrollo donde se establecen los contenidos, creándose los medios de apoyo necesarios para satisfacer los objetivos de entrenamiento definidos. Estos contenidos, en el caso de entrenamiento en simuladores, se centrarían en el diseño de los escenarios de entrenamiento. Estos escenarios tienen un carácter crucial, están sujetos a la normativa y deben ser sometidos a procesos de validación que garanticen el cumplimiento de los objetivos. En esta validación están involucrados todos los agentes: instructores, expertos en simulación y responsables de operación del simulador.

Tecnatom colabora con las centrales nucleares españolas en la aplicación en todas sus fases de esta metodología, aportando, además de experiencia y de garantía del cumplimiento de los requisitos del organismo regulador, estándares internacionales de calidad, como son los establecidos por INPO (*Institute of Nuclear Power Operations*), instituto con el que existe un acuerdo de colaboración y que desde 1979 aporta a la industria nuclear referencias de alto valor añadido.

Este compromiso con la excelencia en la formación ha de evitar la burocratización de la formación, riesgo en el que se puede caer en un entorno regulado, e ir más allá, proporcionando un valor añadido en la operación eficiente y segura de las plantas. Es por eso por lo que es importante llevar a cabo un proceso de evaluación del entrenamiento en simulador, siguiendo metodologías de referencia contrastadas. La evaluación parte del análisis de la opinión de los receptores de la formación, estableciendo referencias en la evaluación del aprendizaje y de los comportamientos, para al final determinar el impacto en la eficiencia. Todo este proceso es monitorizado con unos indicadores de formación, que aportan alertas para identificar las correcciones que se pongan de manifiesto.

En la actualidad los colectivos de operación de todas las centrales nucleares españolas son inicialmente cualificados en los simuladores que Tecnatom dispone en sus centros de entrenamiento; mediante este proceso estructurado y supervisado por el regulador español, acceden los nuevos operadores a su licencia de operación. Esta licencia es renovada con carácter periódico, mediante, entre otras actividades, la asistencia a sesiones específicas de recalificación en los mencionados simuladores.

Simuladores réplica versus modelos de ingeniería. Analogías y diferencias

Antes de abordar la utilización del simulador réplica en otros ámbitos distintos al del entrenamiento, conviene hacer una reflexión entre las diferencias entre éstos y los modelos de simulación específicamente desarrollados para ingeniería. En este sentido podemos decir que, aun sin alcanzar la precisión de los modelos de ingeniería, los simuladores de entrenamiento presentan ciertas características que resultan de gran utilidad para su aplicación a la ingeniería, ya que:

- Los simuladores réplica representan un conjunto integrado de modelos que permite mostrar el comportamiento global de la planta teniendo en cuenta la interrelación entre los distintos sistemas. Normalmente los modelos de ingeniería se establecen para sistemas aislados, o incluso para componentes específicos de sistemas, donde el resto de los sistemas de la central y las cadenas lógicas de la misma se reproducen de forma muy simplificada.
- Los modelos de los simuladores réplica están preparados para interactuar con ellos durante la ejecución de cualquier transitorio, con lo que se puede simular con total facilidad las posibles operaciones que deban realizarse en cada momento.
- Los modelos de los simuladores réplica son en general fácilmente ajustables, pudiendo cambiar, también de forma interactiva los parámetros internos del sistema, de los lazos de control y las condiciones de contorno, de modo que se pueden comprobar diversas estrategias o ajustes.
- Los requisitos de entrenamiento conllevan determinadas funcionalidades a los simuladores réplica, como por ejemplo: salva de condiciones iniciales, posibilidad de retroceder en el tiempo, detención de la simulación, reactivación, graficación de variables internas, disponer de condiciones iniciales pregrabadas que abarcan desde parada fría a potencia nominal con distintos quemados, etc., que pue-

den ser especialmente atractivas para optimizar los recursos y facilitar la capacidad de análisis en estudios de ingeniería.

Estas características hacen que la utilización en ingeniería de los simuladores réplica, aunque diseñados originalmente para su uso en entrenamiento, aporte un valor añadido complementario al uso de otros modelos de detalle basados en códigos específicos.

Es importante conocer que los modelos de los simuladores están basados en conjuntos de ecuaciones que contienen, con frecuencia, simplificaciones que pueden establecer limitaciones en su uso, como por ejemplo: establecer ecuaciones de régimen monofásico en un sistema de agua de refrigeración, lo que implicaría que dicho modelo no deben ser utilizados para simular operaciones de llenado o aquellas en las que se alcance condiciones de saturación y aparezca la fase vapor.

Es por todo lo anterior por lo que la utilización de un simulador para apoyo a actividades de ingeniería tendrá que estar ligada inevitablemente a un análisis previo, para así determinar posibles limitaciones e impacto de estas en el desarrollo de las pruebas, y para valorar la precisión de los modelos simulados en relación con la precisión necesaria para completar el estudio de ingeniería.

Si comparamos los requisitos que deben cumplir los simuladores de entrenamiento con los de ingeniería, quizá la diferencia más notoria se encuentra en el de la ejecución en tiempo real. Mientras que este es un requisito primario en el entrenamiento, los análisis de ingeniería no exigen su cumplimiento y se suelen focalizar en la precisión de los resultados. En el pasado, cuando las limitaciones de potencia de cálculo de los ordenadores eran grandes, la precisión de los modelos de los simuladores réplica claramente se sacrificaba por el condicionante de tiempo real.

Ingeniería asistida por simulación. Concepto y aplicaciones

La ingeniería en el diseño de proyectos cuenta frecuentemente con herramientas de modelación capaces de proporcionar típicamente información estática del comportamiento de sus diseños. Estas herramientas limitan poder experimentar estos diseños en escenarios de validación dinámicos, en los que ensayar diferentes operaciones y condiciones dinámicas.

La concepción de Ingeniería Asistida por Simulación (SAE, *Simulation Assisted Engineering*) proporciona soluciones a este déficit, permitiendo a los ingenieros enfrentarse de forma eficiente al comportamiento dinámico

de sistemas complejos y de esta manera poder optimizar los diseños. El objetivo prioritario que se persigue es la identificación temprana de problemas y errores que se incorporan al ciclo de desarrollo y así evitar importantes costes en la revisión del diseño durante las etapas de fabricación y puesta en marcha.

La ingeniería asistida por simulación utiliza plataformas de simulación como herramientas base de apoyo a las actividades de ingeniería de modificaciones al diseño de una instalación. Para tal fin se pueden aprovechar plataformas existentes como son los simuladores réplica o gráficos o realizar nuevos desarrollos ad-hoc orientados a objetivos concretos. La utilización de los simuladores de entrenamiento permite realizar una evaluación previa del impacto de la modificación en el conjunto de la instalación, persiguiendo una realimentación al diseño y lo que es más importante: la detección temprana de potenciales errores (figura 6).

Pieza clave de aplicación con éxito de estrategias SAE en los simuladores de entrenamiento se basa en disponer de una metodología consolidada. Esta debe iniciarse con una definición clara de qué esperamos que aporte el simulador. Una vez identificado el objetivo, debemos establecer si los modelos tienen el alcance adecuado para el análisis, es decir, determinar su idoneidad. Si pretendemos ver cómo evoluciona, por ejemplo, el caudal de fuga por los cierres de una bomba, por el deterioro mecánico durante un determinado periodo de funcionamiento, es muy probable que el simulador no nos sirva. Si por el contrario, pretendemos analizar la estabilidad de un lazo de control en un determinado transitorio, la aportación puede ser significativa. Tras este análisis pueden ser necesarios diversos ajustes que refuerzan la validez del modelo. Llegados a este punto se trataría de diseñar un programa de pruebas, cuyo resultados, después de haber sido sometidos a un adecuado tra-

tamiento de las incertidumbres, puedan revertir sobre la ingeniería de diseño.

En los últimos años las actividades SAE que se realizan en Tecnatom han experimentado un gran crecimiento, observándose cada día un mayor acercamiento de las organizaciones de ingeniería de las centrales a los simuladores. Podemos afirmar que ello ha sido debido sin duda a los resultados satisfactorios obtenidos en las experiencias realizadas, en las cuales se ha comprobado el alto valor añadido que aportan posibilitando que el diseño llegara ajustado y probado a la fase de implantación en la central con lo que se ha facilitado la reducción del tiempo de puesta en marcha del sistema, garantizando además el ajuste operacional del sistema para todas las condiciones de operación.

En ese sentido cabe destacar como más relevantes las positivas experiencias en:

- El cambio de los generadores de vapor de las centrales nucleares Ascó, Almaraz y Angra I.
- La incorporación del nuevo sistema de seguridad EJ de C.N. Vandellós
- Los respectivos aumentos de potencia llevados a cabo en las centrales nucleares Cofrentes y Almaraz

Adicionalmente a los análisis anteriormente mencionados, cobra un interés especial el uso de los simuladores en los proyectos de modernización de la instrumentación y control, a los que se refieren los apartados siguientes (figura 7).

Los simuladores en los proyectos de mejora de I&C. Sintonización de lazos de control

La sintonización de lazos de control consiste en la realización de un análisis de estabilidad y la optimización del binomio estabilidad-rapidez. En estos casos se conjugan la experiencia del equipo de ingenieros de I&C de Tecnatom con la capacidad que disponen los simuladores de graficar las variables internas del modelo (demanda, integral del sistema de control, Cv, etc.) y, sobre todo, de la capacidad de modificar de forma interactiva los parámetros que definen el sistema de control y/o las características de los equipos. De esta forma el ingeniero que realiza el análisis dispone de la capacidad de ajustar cualquiera de los parámetros mientras ejecuta la prueba, sin tener la necesidad de esperar a disponer de los resultados del transitorio y preparar una nueva prueba con un nuevo ajuste de los parámetros para reiniciar el proceso.

Una de las experiencias más significativas en esta línea se llevó a cabo en el cambio de los generadores de vapor de C.N. Almaraz y de sus sistemas de control asociados (nivel rango estrecho y control de ΔP vapor-agua de alimen-

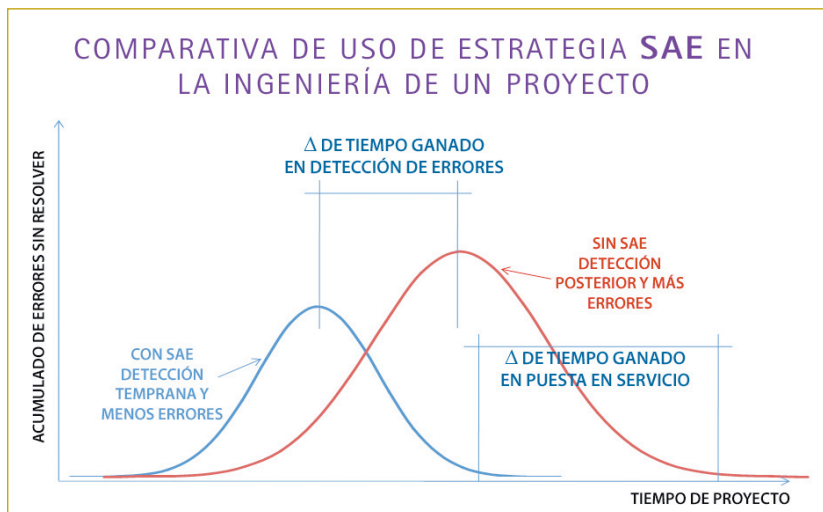


Figura 6: Comparativa en la detección de errores con y sin estrategia SAE.



Figura 7: Esquema de integración de una plataforma SAE en un proyecto.

tación mediante la actuación sobre la velocidad de las turbo-bombas de agua de alimentación). El nuevo diseño del sistema de control se instaló en el simulador varios meses antes de su puesta en servicio en la central, lo que permitió validar su comportamiento en operación normal y anormal. Para garantizar la calidad del ajuste fue necesario realizar previamente un trabajo de validación del modelo. Tras ello, se procedió al ajuste obteniendo un nuevo juego de valores donde se optimizaba la estabilidad-rapidez del sistema de control en cualquier condición operativa.

En el simulador de C.N. Cofrentes mencionamos dos experiencias relevantes: la primera consistió en un análisis del comportamiento y de estabilidad ante el cambio de las válvulas del sistema de control de nivel del reactor en arranque, con anterioridad a la sustitución de dichos sistemas en planta y la segunda experiencia estuvo asociada a la sustitución de las válvulas de control de vapor a eyectores de vacío del condensador. El uso del simulador permitió establecer parámetros básicos de las características de los componentes que iban a ser sustituidos y realizar una sintonización del lazo de control ajustada para todo el rango de operación de la planta.

Otros usos en el área de I&C. Análisis de lógicas

Otro aspecto del área de I&C en el que los simuladores aportan valor es en el análisis y validación de lógicas complejas. En las centrales nucleares existen lógicas de protección que tienen un amplio efecto extendiéndose a muchos sistemas de la planta, esto dificulta su análisis si se desea contemplar su efecto ante distintas condiciones de operación. Cabe citar, a modo de ejemplo, las señales de aislamiento de sistemas o las protecciones del sistema de distribución eléctrica.

En este tipo de análisis se aprovecha la capacidad del simulador de tener disponibles, de forma integrada, todos los sistemas de la central y, por lo tanto, poder observar los acoplamientos e interacciones de unas cadenas lógicas con otras y así analizar la progresión de perturbaciones a lo largo de la propia cadena lógica global. Como ejemplo relevante de este tipo de experiencias se pueden citar las pruebas realizadas sobre la lógica de la distribución eléctrica de C.N. Cofrentes, previas a la instalación del interruptor de generación.

Integración previa de los nuevos sistemas de control digital en los simuladores

A la medida que se moderniza la instrumentación y control de las plantas mediante sistemas digitales, denominados

como de control distribuido (SCD), la disponibilidad de estos sistemas en el simulador antes de su puesta en servicio en la planta, no solo redundará en poder llevar a cabo un entrenamiento anticipado sino también en apoyar el proyecto de I&C de la planta. Esta estrategia, que se ha convertido en una buena práctica, se está llevando a cabo en la mayoría de las modificaciones de I&C, proporcionando unos excelentes resultados.

La estimulación de los sistemas reales mediante un simulador permite reproducir fielmente la respuesta del sistema, por lo que resulta de gran ayuda tanto durante la fase de validación previa a la instalación del SCD en la planta como al ajuste de posteriores modificaciones de lazos de control y a la verificación y validación de la interfaz hombre-máquina ante una gran variedad de escenarios.

La experiencia ha demostrado que la instalación previa en el simulador, junto con el diseño y ejecución de un adecuado conjunto de pruebas, permite identificar errores y áreas de mejora, que de otro modo podrían haber quedado ocultos hasta su instalación, puesta en marcha, o en algunos casos hasta su operación. Podemos afirmar que en la mayoría de los casos el uso del simulador ha contribuido de una forma significativa a optimizar el proceso de puesta en marcha.

La experiencia en estas aplicaciones es muy amplia y se extiende a todas las centrales españolas en sistemas tales como control del reactor, control de turbina, computadores de planta, etc. La plataforma tecnológica sobre la que se implementa el nuevo sistema de I&C no representa un problema, y de hecho se ha trabajado sobre la mayoría de soluciones propietarias, tales como: WDPF y Ovation (Westinghouse/Emerson), Experion (Honeywell), Teleperm XP y XM (Siemens), o Mark VI (GE).

Destacamos la experiencia de C.N. Cofrentes, donde desde hace ya años y de forma sistemática el equipo de ingenieros de I&C de Tecnatom viene abordando la modernización de gran parte de los sistemas del BOP siguiendo la secuencia: diseño e implementación de la modificación en la plataforma de I&C existente en el simulador, ejecución de las pruebas de factoría en el simulador con la presencia del cliente, instalación en la planta y ejecución de las pruebas de aceptación.

Los simuladores y la ingeniería del factor humano. Proyectos de modernización de las salas de control

La modernización de los sistemas de I&C ha supuesto cambios en la concepción original de las salas de control, convirtiéndose en salas híbridas, con información soportada en monitores conviviendo con instrumentación convencional.

Esta transformación de las salas de control, que se acrecienta con el horizonte de extensión de la vida útil de las centrales a 60 años, debe ser analizada desde el punto de vista de la ingeniería de factores humanos.

Para realizar este tipo de análisis la metodología más extendida se basa en la aplicación de las guías internacionales de ingeniería de factores humanos, IFH, emitidas por la *US Nuclear Regulatory Commission*, *NUREG 700: Human-system interface design review guidelines* y *NUREG 711: Human factors engineering program review model*, entre otras. Bajo estas premisas, el rediseño de una sala de control debe garantizar una interfaz hombre-máquina unificada que reduzca el error humano y garantice la operación segura y eficiente de la central.

El proceso de validación de los aspectos relativos a la ingeniería de factores huma-



Figura 8: Verificación y validación de factores humanos en el simulador de CN Almaraz.



Figura 9: Interacción con paneles virtuales 2D-3D.



Figura 10: Simulador gráfico interactivo (SGI).

nos se basa en el diseño de un conjunto de escenarios que cubran las situaciones operativas asociadas a la nueva interfaz hombre-máquina y en su ejecución con un turno de operación. De esta manera se puede evaluar para cada uno de ellos si la información que recibe el operador es suficiente para realizar un adecuado diagnóstico, si el volumen de información sobrepasa la carga que puede ser asimilada y procesada por el operador en el proceso de toma de decisiones y si existen interferencias en el equipo de operación.

En este tipo de proyectos, el simulador de entrenamiento constituye un medio idóneo en el proceso de verificación y validación (V&V) al ofrecer un entorno mucho más versátil que la sala de control real y la capacidad de realizar la validación en cualquier escenario del simulador en el que intervenga la nueva interfaz hombre-máquina.

Las experiencias obtenidas en los proyectos de nuevos controles de turbina, del reactor o de nuevos sistemas de información han contribuido a mejorar el diseño de su interfaz hombre-máquina. Cabe mencionar en este sentido la experiencia con el nuevo sistema EJ de CN Vandellós, en el que se incorporaron dos

paneles nuevos a sala de control, y donde se diseñaron e implementaron previamente en el simulador dos configuraciones distintas de interfaz hasta consolidar una tercera que finalmente fue la que se instaló en la central (figura 8).

Los simuladores en las actividades de ingeniería de operación

Se denomina tradicionalmente ingeniería de operación a todas aquellas actividades que teniendo un sustrato de ingeniería se desempeñan en torno a la operación de la central. En este capítulo se pueden enmarcar, tanto actividades relacionadas con el diseño, validación y ejecución de los procedimientos de operación, como otras aplicaciones que complementan la información de sala de control, facilitando el diagnóstico, la toma de decisiones o la ejecución de maniobras.

Dentro de este ámbito se consideran los sistemas de filtrado de alarmas, de información del computador de planta, procedimientos computarizados, diagnóstico termoeconómico, análisis de rendimientos, etc. En todas estas actividades los simuladores réplica aportan valor en los procesos de diseño, verificación y validación de los mismos.

Es práctica habitual que los procedimientos de operación, en especial los de operación general y operación ante incidentes y accidentes se analicen y se validen mediante escenarios específicos en los que se comprueba la viabilidad de su diseño para conseguir alcanzar el estadio operativo pretendido.

Otro aspecto que es necesario verificar es la disponibilidad de la información requerida por el procedimiento en los términos y unidades adecuados así como la viabilidad de la ejecución de las maniobras en tiempos coherentes con la capacidad de respuesta del equipo humano o las limitaciones que establezca la interfaz hombre-máquina.

La utilización en este ámbito de los simuladores réplica específicos de cada central permite garantizar, antes de su implantación en la central, la fiabilidad de los procedimientos de operación y de los sistemas de información de la operación no alcanzable por otras vías.

En Tecnatom se dispone de experiencias muy satisfactorias en el desarrollo de herramientas de ayuda a la toma de decisiones que utilizan modelos de simulación.

Este tipo de aplicaciones, instalados en sala de control, combinan la información obtenida directamente de planta, normalmente del computador, con la simulación para predecir los ajustes y estado de equipos óptimo para realización de determinadas maniobras (figuras 9 y 10).

CONCLUSIONES

Los simuladores réplica de las centrales nucleares son unos sistemas de alta complejidad tecnológica, cuyo desarrollo y mantenimiento exige un gran esfuerzo metodológico, tecnológico y económico. Debido a ello constituyen un poderoso instrumento que puede y debe ser aplicado adecuadamente para facilitar la explotación de la central.

La adecuada utilización del simulador conlleva al desarrollo de servicios y proyectos globales de alto valor añadido para las centrales nucleares en los que el simulador, pieza clave de este entramado, se debe necesariamente combinar con una base metodológica orientada a garantizar resultados fiables, y con un equipo humano que reúna un profundo conocimiento de la operación de la central, de la tecnología de simulación y de la instrumentación y control.

Adicionalmente, con la perspectiva del alargamiento de la vida útil de las centrales a 60 años, práctica ya casi habitual en el entorno internacional, pone especial énfasis en la modernización de los sistemas de I&C y de la sala de control, donde los simuladores réplica deben aportar un importante valor añadido para contribuir a la operación segura y fiable de las centrales. ■