

EL USO DE LOS SIMULADORES DE ADIESTRAMIENTO COMO APOYO PARA EL AJUSTE DE SISTEMAS DE INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL

F. ORTEGA - J.A. RUIZ

Los simuladores de alcance total utilizados en el entrenamiento del personal con licencia de las centrales nucleares se caracterizan por integrar modelos de todos los sistemas de la central para obtener una respuesta integrada en tiempo real, manteniendo un alto nivel de fidelidad funcional y física. Debido a estas características, dichos simuladores vienen demostrando en los últimos años un gran potencial también en el ámbito de las actividades de ingeniería donde pueden apoyar de forma muy efectiva en el diseño y ajuste de modificaciones de planta asociadas a instrumentación y control.

The full scope simulators used for the training of the NPP licensed personnel, are characterised by the integration of models of all the systems of the plant, so that a real time integrated response with a high degree of physical and functional fidelity may be provided. Due to these features, these simulators have showed high capabilities in the engineering field where they can support with effectiveness the design and tuning of I&C plant modifications.

Durante los últimos años se han llevado a cabo en el Sector Eléctrico importantes esfuerzos dirigidos a la mejora del entrenamiento del personal de explotación de las centrales nucleares. En este marco se encuadra el desarrollo de simuladores específicos de alcance total para todas las centrales, que reproducen la respuesta funcional de dichas instalaciones en un entorno físico que replica las condiciones de sala de control. De este modo el personal de operación recibe entrenamiento inicial y reentrenamiento en el mejor hábitat posible.

Los simuladores de Tecnatom reproducen condiciones de operación normal, incidentes y emergencias de modo que, dentro de cada rango de operación se pueden seguir los procedimientos de operación de la central.

Ello es posible gracias al uso de modelos avanzados que resuelven de forma numérica las ecuaciones de conservación, siempre en condiciones de tiempo real.

La precisión de un modelo de simulación depende de múltiples factores, entre los que se pueden destacar los siguientes: las ecuaciones que se resuelven, la calidad de las correlaciones y el mapa de regímenes de flujo utiliza-

dos, las hipótesis y simplificaciones asumidas en el proceso de discretización de las ecuaciones diferenciales, el esquema numérico empleado para la resolución, el detalle de la nodalización (véase a modo de ejemplo la figura 2) y el paso de tiempo de integración.

Los modelos de ingeniería se caracterizan por una gran precisión y un alcance limitado a unos pocos sistemas,



Figura 1. Uso del simulador para ajuste de lazos de control e instrumentación.

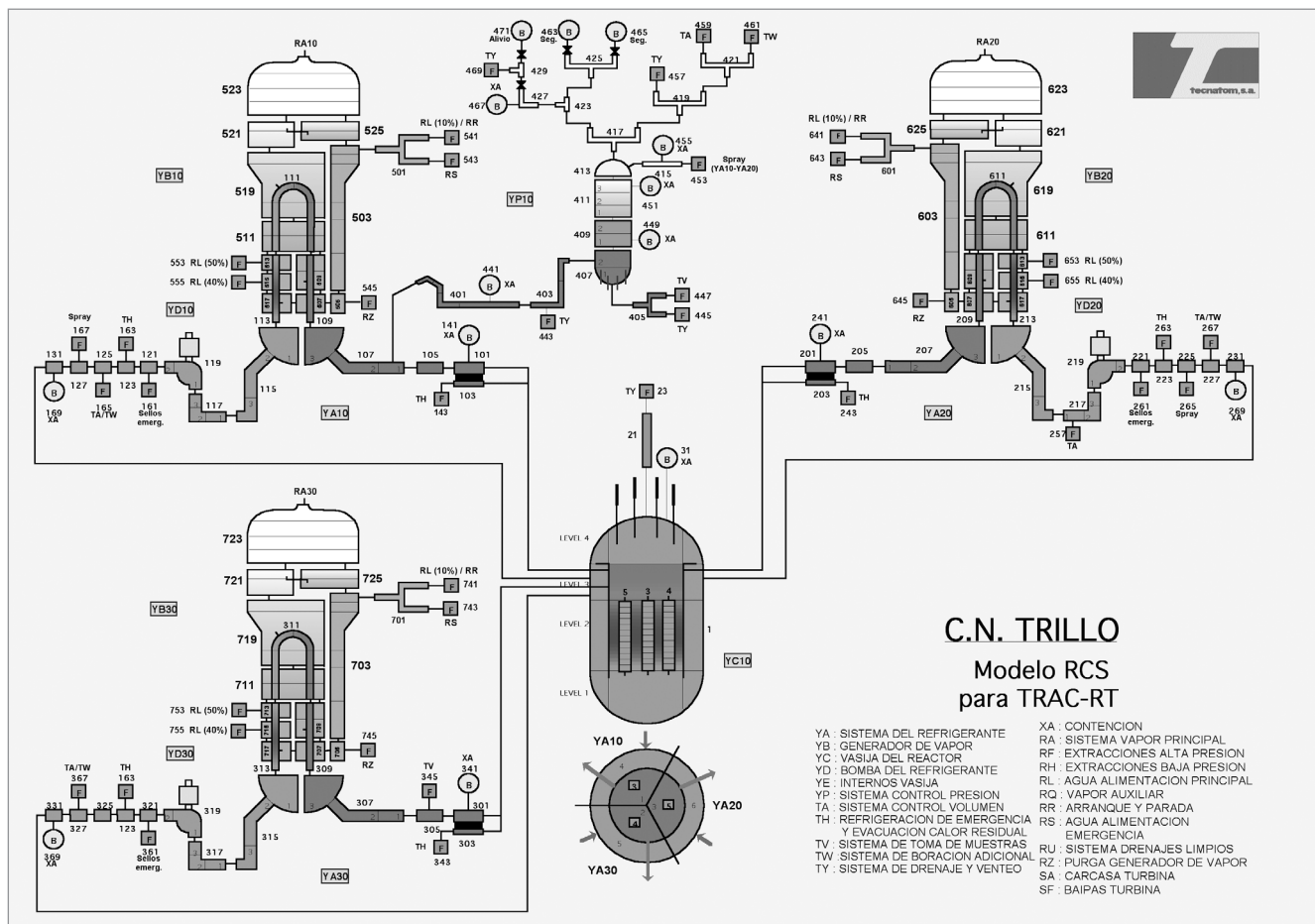


Figura 2. Nodalización primaria para TRAC-RT. Simulador de CN Trillo.

donde el resto de los sistemas de la central aparecen como condiciones de contorno que imitan de forma muy simplificada el comportamiento real, y que además usualmente no pueden ser ejecutados en tiempo real.

La condición de tiempo real de los modelos de los simuladores limita conjuntamente con la capacidad de cálculo de los ordenadores la precisión de los mismos. El gran aumento de la potencia de los ordenadores ha permitido la mejora de la calidad y precisión de los modelos que soportan los simuladores. Los modelos actuales están basados en principios físicos y ecuaciones de conservación que permiten reproducir la respuesta de la central con gran fidelidad, e incluso la simulación del NSSS se hace actualmente con códigos de ingeniería adaptados al entorno de entrenamiento, pero manteniendo su precisión hasta convertir los simuladores réplica de alcance total en herramientas de análisis con capacidad predictiva.

La metodología de validación periódica de los simuladores incluye diversas comparaciones con datos de planta y códigos de ingeniería. De este modo

anualmente se comparan diversos estados estacionarios con datos de planta, permitiéndose únicamente una desviación inferior al 1% en las variables críticas. También anualmente, se comparan los resultados del simulador con datos de planta o con resultados de códigos de ingeniería *best estimate* en una variedad de transitorios que incluyen desde el disparo del reactor al LO-CA base de diseño. Por otra parte, es práctica habitual el reproducir en el simulador incidentes que han tenido lugar en la planta ya sea para comprobar la fidelidad del simulador y permitir el ajuste fino de sus modelos, como para incluirlos en los cursos de reentrenamiento. En las figuras 3, 4, 5 y 6 que se adjuntan se muestran algunos ejemplos de la validación de transitorios.

Aun sin llegar a alcanzar la precisión de los modelos de ingeniería, los simuladores de adiestramiento presentan ciertas características que pueden resultar de gran utilidad para las labores de ingeniería:

- 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 de adiestramiento están preparados para interaccionar *on line* durante la ejecución de cualquier transitorio, con lo que se puede simular con total facilidad las posibles operaciones que deban realizarse en cada momento. En la figura 7 se muestra uno de los paneles del simulador de Almaraz donde coexisten, al igual que en la central, instrumentación convencional y el nuevo sistema de control distribuido de turbina.

- Los modelos son en general fácilmente ajustables, pudiendo cambiar, también de forma *on line*, parámetros internos del sistema, lazos de control o condiciones de contorno, de modo que se pueden comprobar diversas estrategias o ajustes.

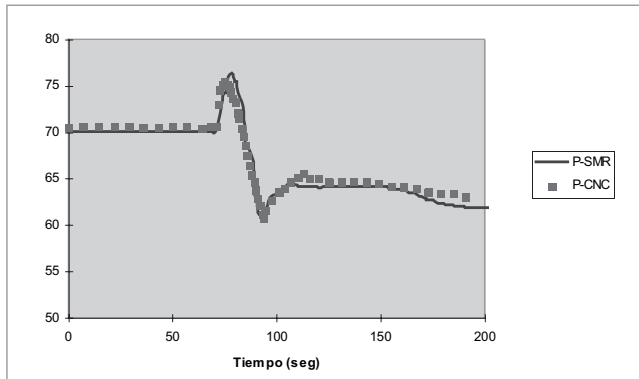


Figura 3. Disparo de turbina en CN Cofrentes. Validación SMR - datos de planta.

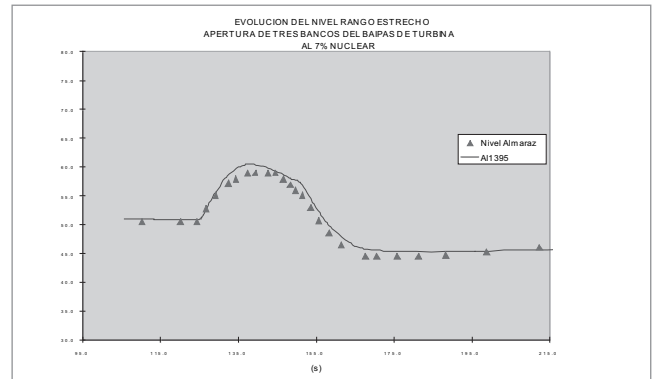


Figura 4. Apertura baipás turbina en CN Almaraz. Validación SMR - datos de planta.

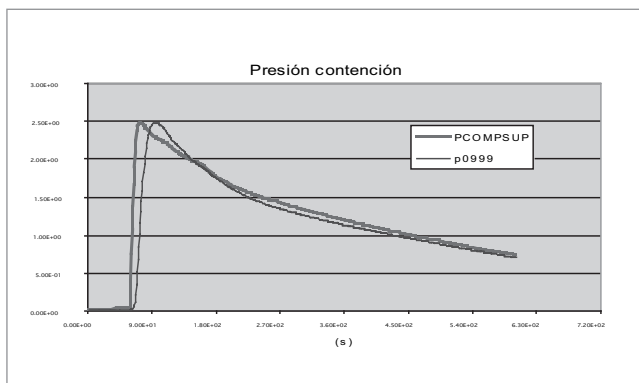


Figura 5. LOCA base de diseño en CN Vandellós II - Validación SMR - código MAAP.

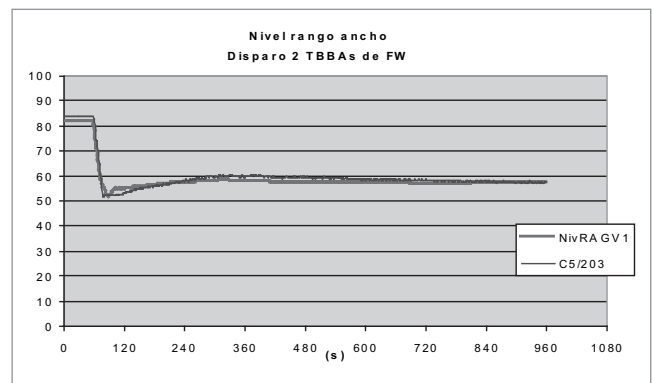


Figura 6. Disparo TBBAs de FW en CN Ascó - Validación SMR - código RELAP.

• Los requisitos del entrenamiento conllevan determinadas funcionalidades a los simuladores (salva de condiciones iniciales, posibilidad de retroceder, de parar la simulación, de reanudar, de

graficar variables internas, de disponer de condiciones iniciales pregrabadas que abarcan desde parada fría a potencia nominal con distintos quemados, etc.) que pueden ser especialmente

atractivas para optimizar los recursos y facilitar la capacidad de análisis en estudios de ingeniería y ajuste de lazos de control.

Estas características permiten que la utilización de los simuladores de alcance total pueda aportar valor a las labores de ingeniería complementando el uso de códigos específicos para el detalle.

Lógicamente los modelos de los simuladores están soportados por conjuntos de ecuaciones que contienen con frecuencia simplificaciones que pueden establecer limitaciones de uso de los modelos, como por ejemplo, el establecer ecuaciones de régimen monofásico en un sistema de agua de refrigeración implicará que dicho modelo no puede ser utilizado para simular operaciones de llenado o aquellas en las que se alcance condiciones de saturación y aparezca la fase vapor.

En consecuencia resulta evidente que cualquier utilización de un simulador para apoyo a tareas de ingeniería tendrá que estar ligado inevitablemente a un análisis previo para determinar las posibles limitaciones que puedan interferir en el desarrollo de la prueba, y

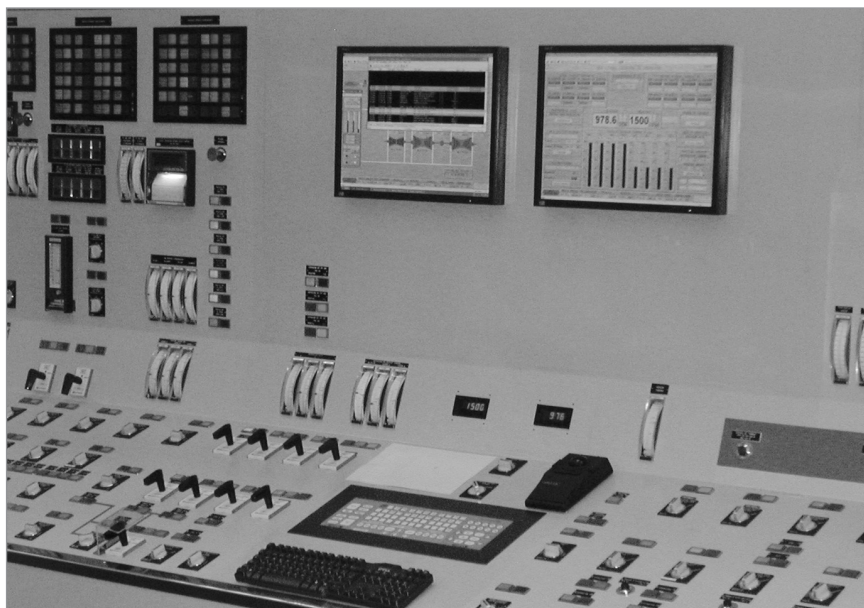


Figura 7. Sistema de control del DEH de turbina. Simulador de CN Almaraz.

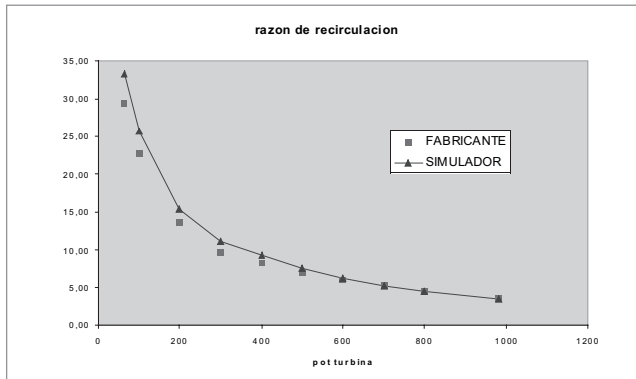


Figura 8. Razón de recirculación GV. Validación SMR - datos de fabricante.

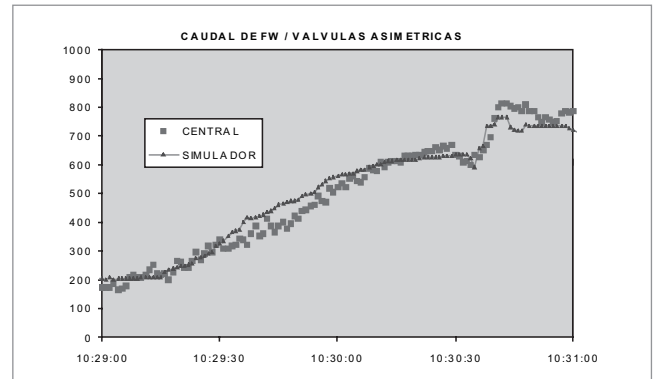


Figura 9. Disparo de turbina en CN Almaraz. Validación SMR - datos de planta. Validación sistema de control de FW.

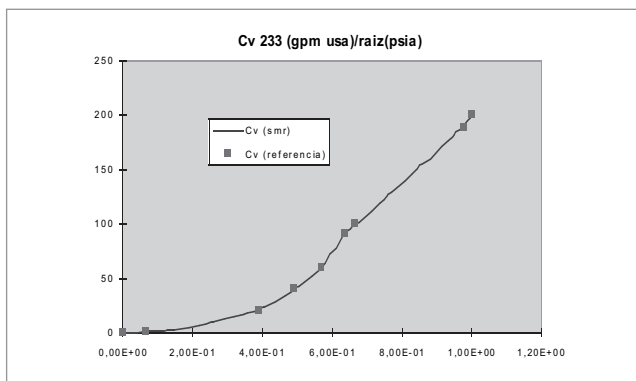


Figura 10. Cv válvula de control en arranques. Validación SMR - datos de fabricante.

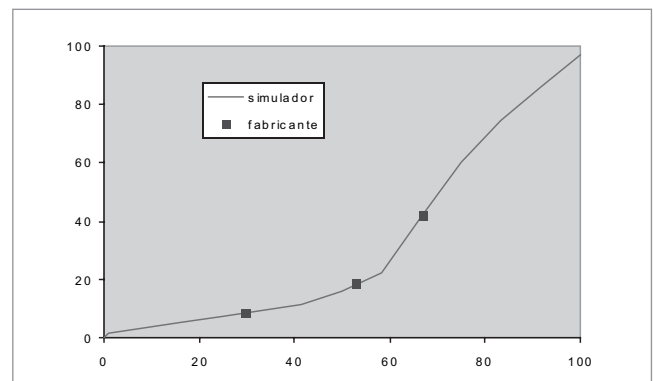


Figura 11. Cv válvulas de eyectores. Validación SMR - datos de fabricante.

para valorar la precisión de los modelos simulados en relación con la precisión necesaria para completar el estudio de ingeniería.

En cualquier caso la experiencia obtenida en los simuladores de Tecnomat demuestra, como veremos en los ejemplos que más adelante se presentan, que el empleo de los simuladores de entrenamiento para análisis de carácter cuantitativo y predictivo resulta muy provechoso. Por otra parte, la simulación integrada y en tiempo real todos los sistemas de la central permite el análisis ágil de la progresión de perturbaciones.

Finalmente, el uso de las herramientas que soportan los modelos y en especial su capacidad interactiva (por ejemplo para modificar *on line* los parámetros de un control PID o la curva característica de una válvula) junto a las capacidades intrínsecas del simulador facilitan de forma especial el trabajo de análisis y ajuste.

EXPERIENCIAS

De todos los aspectos mencionados con anterioridad existe en Tecnomat experiencia contrastada del empleo de

los simuladores como herramientas de apoyo a los trabajos de ingeniería de instrumentación y control. Estas experiencias se pueden agrupar en los siguientes apartados:

Sintonización de lazos de control

Se entiende por sintonización de lazos de control la realización del análisis de la estabilidad y la optimización del binomio estabilidad-rapidez. En estos casos se hace uso intensivo de la capacidad de que disponen los simuladores de graficar las variables internas del modelo (demanda, integral del sistema de control, admitancia, etc.) y, sobre todo, de la capacidad de modificar *on line* los parámetros que definen el sistema de control y / o las características de los equipos. De esta forma el ingeniero que realiza el análisis puede observar la respuesta de los sistemas en distintas condiciones de operación y dispone de la capacidad de ajustar los parámetros mientras ejecuta la prueba, sin tener la necesidad de esperar a disponer de los resultados del transitorio postprocesados, preparar una nueva prueba con un nuevo ajuste de los parámetros y reiniciar el proceso.

Una de las experiencias más significativas en esta línea se realizó en relación con 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 alimentación mediante la actuación sobre la velocidad de las turbobombas de agua de alimentación). Estas modificaciones se instalaron en el simulador varios meses antes de su instalación de la central. Ello permitió validar el comportamiento de los sistemas de control en operación normal y anormal. Como resultado se detectaron en el diseño inicial inestabilidades en el control a bajas cargas por lo que se procedió a un reajuste de los parámetros asociados al control de nivel. Para garantizar la calidad del ajuste fue necesario realizar previamente un trabajo de validación del modelo comparando los resultados del simulador con datos de referencia en transitorios de lazo abierto (respuesta del nivel del generador de vapor ante subidas y bajadas manuales en escalón del caudal de agua de alimentación). Una vez verificada la buena respuesta del modelo en las situaciones de referencia (figuras 8 y 9) se procedió al ajuste obteniendo un

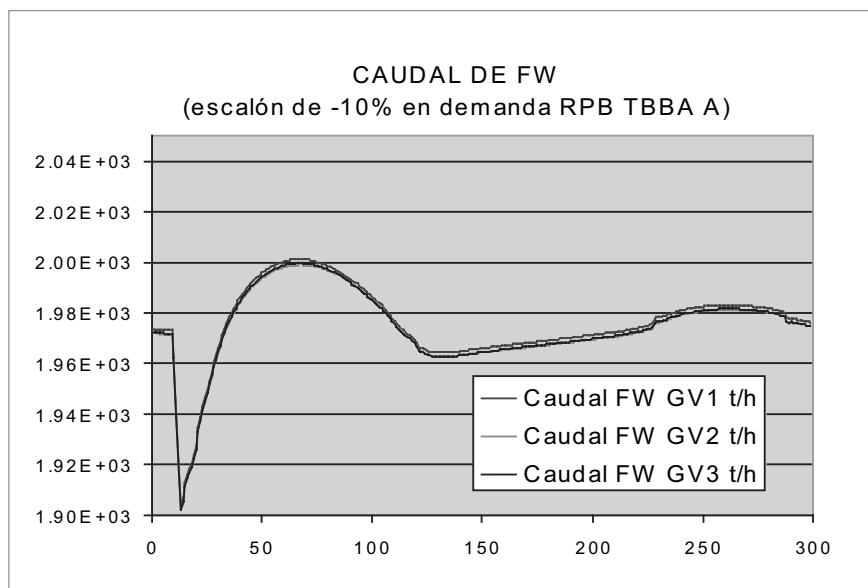


Figura 12. Caudal FW ante escalón setpoint controladora de velocidad de turbobomba A Resultados de la prueba en simulador.

nuevo juego de valores donde se optimizaba la estabilidad / rapidez del sistema de control.

En el simulador de C.N. Cofrentes se han tenido dos experiencias similares. La primera consistió en análisis del comportamiento y la estabilidad ante el cambio de las válvulas del sistema de control de nivel del reactor en arranque (figura 10) con anterioridad a la instalación de los nuevos componentes en planta.

La segunda experiencia estuvo asociada a la sustitución de las válvulas de control de vapor a eyectores de vacío del condensador (figura 11). El uso del simulador permitió establecer parámetros básicos y realizar una sintonización del lazo de control. Un aspecto relevante de esta experiencia consistió en el aprovechamiento intensivo de la capacidad de graficación de las variables internas del lazo de control, lo que permitió acotar los valores posibles del control proporcional para evitar la apertura de las válvulas de alivio existentes aguas abajo, en los transitorios de referencia (escalones en el *setpoint*, fallo del regulador de presión, oscilaciones del regulador de presión y de la presión de comando).

Análisis de lógicas complejas

En las centrales nucleares existen lógicas de protección que tienen un efecto extendido a muchos sistemas y son de difícil 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 modelar de forma integrada todos los sistemas de la central y, por lo tanto, observando los acoplamientos e interacciones de unas cadenas lógicas con otras y analizando 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.

Análisis de la capacidad de sistemas para asumir variaciones con respecto a los valores de diseño

El simulador permite estudiar como progresa a lo largo de los sistemas las perturbaciones provocadas en un punto, de modo que mostrará el efecto de un determinado aumento o cambio de un parámetro de la central, poniendo de manifiesto posibles limitaciones en otros sistemas.

En este apartado una experiencia que podemos destacar es la verificación de la capacidad de las válvulas de control a eyectores del simulador de C.N. Cofrentes para asumir perturbaciones (provocadas en la línea de vapor principal o en sus transmisores de presión) o cómo el modo de fallo (abierto, cerrado o en posición) de estas válvulas afecta a otros sistemas del resto de la planta.

De igual forma que en el caso del cambio de los generadores de vapor, la sustitución de la turbina de C.N. Almaraz se realizó con seis meses de

adelanto en el simulador. Ello permitió analizar la capacidad de las válvulas de control de la nueva turbina para gestionar perturbaciones en la presión del condensador, en la presión de vapor y transitorios en la cadena de calentadores. El punto de mayor interés consistió en la evaluación de la capacidad de dichas válvulas para asumir transitorios de pérdida de rendimiento manteniendo la capacidad de regulación de potencia en el generador principal.

Una experiencia similar a la anterior se realizó posteriormente en el simulador de C.N. Vandellós II en la que se estudió la capacidad del sistema de control de turbina y de sus válvulas de regulación para gestionar bajadas en la temperatura media del primario así como estimar la nueva posición esperada de válvulas de turbina al 100% de potencia.

De este tipo es también el análisis efectuado para C.N. Ascó sobre la capacidad global de los sistemas de la central para asumir el cambio del permisivo de disparo de reactor por disparo de turbina (de P7 a P8).

Una experiencia especialmente interesante en esta línea consistió en la ejecución de transitorios al 110% en el simulador de CN Cofrentes, para analizar las limitaciones que eventualmente podrían presentar los diversos sistemas y equipos para alcanzar la nueva potencia. Debe mencionarse que los equipos de ingeniería ya habían realizado un análisis preliminar al efecto y el objeto del estudio en el simulador fue verificar las conclusiones obtenidas al tiempo que detectar posibles limitaciones no contempladas hasta ese momento. Se detectaron posibles limitaciones en otros sistemas no contemplados inicialmente como: la ΔT entre domo y aspiración de recirculación (que podrían provocar *runback*), la posible baja presión a la descarga de las bombas de condensado, los temporizados de retroceso automático de carga y el pico de presión ante el cierre de una válvula de control de turbina (que podía provocar disparo). En esta misma línea se puede mencionar el trabajo efectuado en la verificación de la capacidad de la controladora maestra de nivel del reactor de C.N. Cofrentes para el aumento de potencia al 112%.

Por último, el simulador de C.N. Ascó se ha empleado para conocer la respuesta combinada de los sistemas de la central, y en especial de los sistemas de control de nivel en los generadores de vapor y de control de velocidad de las turbobombas de agua de alimentación principal, ante escalones



Figura 13. Entorno de supervisión y control OVATION. Simulador de CN Vandellós II.

en la demanda de velocidad en una turbobomba. En especial el interés estaba centrado en conocer la capacidad de los sistemas para estabilizar el nivel y el caudal sin entrar en la zona de run-out de las turbobombas. La experiencia consistió en ejecutar distintos transitorios (aprovechando la capacidad interactiva del simulador de modificar en escalón la demanda) hasta acotar aquellos escalones en que se entraba en zona problemática y en verificar la capacidad de los sistemas de asumir el transitorio (figura 12).

Estudio de tiempos en secuencias de operación

Con frecuencia durante el diseño de una nueva modificación o en el desarrollo de otro tipo de estudios como puede ser los asociados al Análisis

Probabilístico de la Seguridad, interesa estimar el tiempo que transcurre entre determinados eventos que se producen en un determinado escenario de operación, lo cual puede permitir por ejemplo, valorar la posibilidad de llevar a cabo determinadas acciones u operaciones para normalizar o mitigar eventuales anomalías.

En este caso también, el simulador, que aúna la respuesta de los modelos con la fidelidad física de la sala de control, se convierte en una herramienta de gran ayuda.

Algunas experiencias de este tipo han sido:

- Mediciones sobre el tiempo disponible tras disparo hasta alcanzar la activación de la inyección de seguridad tras la sustitución de los generadores

de vapor de C.N. Almaraz. También se estimó en transitorios de pérdida de agua de alimentación el tiempo hasta la pérdida del foco frío secundario (hasta alcanzar el vaciado de los generadores de vapor).

- El estudio en el simulador de C.N. Cofrentes del margen de tiempo disponible para que el operador proceda al cambio del tren de eyectores ante un malfuncionamiento del tren en servicio, observándose que era suficiente para evitar disparos.

Los nuevos sistemas de control digital

Las necesidades de modernización de las centrales nucleares para afrontar una operación fiable y segura en el medio y largo plazo están incidiendo también en los sistemas de instrumentación y control, sustituyendo antiguos equipos por Sistemas de Control Digital (SCD).

La implantación de los SCD en los simuladores (figura 13) ha significado un replanteamiento del enfoque clásico en el que los modelos de simulación incluían tanto el proceso como el control y la lógica, de modo que las controladoras ubicadas en los paneles eran simples carátulas que, reproduciendo el aspecto del equipo real pero sin contener la electrónica asociada a los lazos de control, se limitaban a enviar y recibir señales al ordenador de la simulación. El hecho de que en los nuevos SCD el control se está ejecutando sobre una CPU convencional y la existencia de una compleja interfaz hombre máquina (HMI) ha supuesto que nuevos enfoques se hayan puesto en práctica para incorporar dichos sistemas a los simuladores.

Las estrategias mas utilizadas son la estimulación y la emulación. La primera consiste en la instalación en el simulador del mismo equipamiento que en la central (controladores, servidores, estaciones de usuario, etc) incorporando también los mismos algoritmos, bases de datos, herramientas y utilidades, software y arquitectura informática de la central (modificados mínimamente para soportar las funcionalidades propias de la simulación: detener, avanzar, retroceder, grabar, etc.). De este modo el sistema de adquisición de datos del SCD se comunica con el servidor de la simulación transfiriendo todas aquellas variables del proceso que se necesitan. Esta opción facilita el exacto alineamiento del SCD del simulador con respecto al de la central, garantizando por tanto la fiabilidad de los resultados obtenidos en las fases de desarrollo y pruebas en simulador.



Figura 14. Sistema de control distribuido. Simulador CN Cofrentes.



Figura 15. Sistema de control DEH de turbina Banco de pruebas simulador de CN Almaraz.

La emulación en su versión mas extendida consiste en estimular la HMI del SCD e instalar el software de control, no en el mismo equipo que en la sala de control, sino en el servidor de la simulación, lo cual simplifica la plataforma informática y facilita el cumplimiento de las funcionalidades propias de la simulación.

Ambos enfoques permiten reproducir fielmente la respuesta del sistema en la planta real, por lo que resultan 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 verificación y validación de la HMI ante una gran variedad de distintos escenarios.

En este sentido se puede citar la experiencia en el simulador de C.N. Cofrentes instalando el mismo Sistema de Control Distribuido que en la central (figura 14) controla diversos sistemas del BOP. Desde hace ya varios años todas las modificaciones en dicho sistema son instaladas previamente en el simulador donde se ajustan los lazos de control y se valida la HMI, facilitando de este modo la posterior instalación en la central.

En la actualidad se están iniciando los trabajos para instalar en el simulador de C.N. Almaraz (figura 15) el nuevo sistema control digital del reactor que se va a poner en servicio en la central durante la próxima recarga de 2006. El objetivo es este caso es, adicionalmente al del entrenamiento del personal de operación, la realización de pruebas previas que ayuden a verificar la correcta respuesta de dicho siste-

ma en distintas condiciones de operación.

CONCLUSIONES

Las experiencias obtenidas en la utilización de los simuladores de Tecnatom para el apoyo a las actividades de ingeniería han resultado muy positivas en los distintos campos anteriormente mencionados y significa por otra parte un mayor aprovechamiento de unos activos del Sector, los simuladores, que han supuesto cuantiosas inversiones.

Las pruebas previas de una modificación de planta en el simulador pueden confirmar la idoneidad de los diseños de ingeniería, o relevar comportamientos no esperados en el sistema afectado por la modificación o reacciones de otros sistemas que podrían no haberse tenido en consideración. Igualmente permite estudiar la respuesta en condiciones de operación anormal o de emergencia.

A modo de resumen, conviene sin embargo tener presentes las condiciones mínimas necesarias para que cualquier estudio pueda resultar exitoso:

- Se debe identificar lo mas detalladamente posible el objetivo del estudio a realizar en el simulador
- Se debe realizar un análisis para asegurar que la precisión de los modelos, tanto en su comportamiento lógico como dinámico, es suficiente y coherente con el objetivo del estudio
- Expertos de modelación y de ingeniería deben analizar y valorar los resultados obtenidos.

Bajo estas condiciones, la utilización del simulador redundará en un diseño mas afinado de las modificaciones de la central lo cual facilitará la instalación y puesta en servicio de las mismas, y en definitiva ayudará en la consecución de los objetivos de disponibilidad de la planta.



Fernando ORTEGA PASCUAL es Ingeniero Industrial en la especialidad de Técnicas Energéticas por la Escuela de Ingenieros de Barcelona, inicia su andadura profesional en 1985 en Tecnatom donde obtiene la certificación de "Senior Reactor Operator" para la tecnología BWR, desempeñando funciones de instructor y coordinador de actividades de Adiestramiento. A partir de 1989 se involucra con distintos niveles de responsabilidad en diversos proyectos relacionados con la mejora y el desarrollo de simuladores. En 1992 se hizo cargo de la explotación de los simuladores, siendo nombrado recientemente responsable de la División de Simulación de Tecnatom. A lo largo de su trayectoria ha participando también como experto en la IAEA en el área de la simulación.



José Antonio RUIZ MARTÍN es doctor en Física Teórica por la Universidad Complutense de Madrid. Desde 1988 trabaja en Tecnatom en el desarrollo y validación de códigos termohidráulicos. Desde 1992 es responsable del área de modelos en la explotación de simuladores. Desde entonces ha participado en los desarrollos de todos los simuladores españoles y ha sido jefe de proyecto en la construcción de los simuladores de CN Vandellós II, CN Ascó y CN José Cabrera así como de las actividades de validación del simulador de CN Santa María de Garoña.