

Simulador en la central nuclear de Surry, Virginia.
(Cortesía de INPO)

La tecnología de la simulación en la capacitación de los operadores

Los simuladores de tamaño natural y específicos para las centrales son parte de la nueva realidad

por Thomas Perkins

A fines del decenio de 1960 y principios del de 1970, la industria nucleoelectrica de los Estados Unidos tomó la decisión de emplear simuladores para la capacitación de los operadores de las centrales nucleoelectricas. Durante este período los cuatro vendedores de calderas nucleares de ese país abrieron sus propios centros de capacitación, incluidos sendos simuladores de centrales nucleares de tamaño natural. Explotadores de empresas eléctricas de todo el mundo participaron en cursos generales impartidos en esos centros sobre el funcionamiento de las centrales nucleoelectricas. La capacitación de transición a las características concretas de cada central se realizó una vez que los operadores regresaron a los emplazamientos de sus centrales respectivas.

Para fines de 1978 ya la utilización de simuladores en la capacitación de operadores de centrales nucleoelectricas había ganado aceptación universal. Existían centros de capacitación en Canadá, España, Francia, Japón, Reino Unido, República Federal de Alemania y Suecia, así como en Taiwán (China). La norma nacional norteamericana sobre el empleo de simuladores de

centrales nucleoelectricas para la capacitación de operadores, que se aprobó por primera vez en 1977, estableció requisitos mínimos para los simuladores que se utilizarían en la capacitación y calificación de los operadores de centrales nucleoelectricas: Esta capacitación se concentró fundamentalmente en los procedimientos normales de operación y en el examen de escenarios de accidentes catastróficos improbables. La industria nuclear aseguró al público que las medidas de seguridad incorporadas en los reactores nucleares y en las salas de control garantizaban que "no podían producirse accidentes graves".

El 28 de marzo de 1979 ocurrió un accidente de envergadura en la Unidad 2 de Three Mile Island (TMI), en Middletown, Pennsylvania. Este suceso trajo como resultado que se valorara críticamente el estado de preparación del personal de operación para responder al accidente. Las conclusiones a que llegó la Comisión Kennedy después del accidente y otras recomendaciones con respecto a los simuladores tuvieron una importante repercusión en el enfoque de la industria nuclear sobre la capacitación de los operadores.

La opinión general es que el accidente de TMI no hubiera ocurrido si los operadores hubieran recibido una capacitación adecuada, pero la capacitación mediante simuladores por sí sola no lo habría evitado. Hablando claramente, los simuladores existentes no estaban programados para manipular un transitorio del reactor en

El Sr. Perkins es gerente internacional de la División de Sistemas de Simulación Link de la Singer Company, Silver Spring, Maryland.

Copyright 1985, The Singer Company, Link Simulation Systems Division, a la cual se debe dirigir toda solicitud de reproducir este artículo en su totalidad o en parte.

una situación en que la mayor parte del refrigerante primario se había perdido. El accidente de TMI ha promovido una reevaluación completa de los programas de capacitación de los operadores de la industria nuclear.

El reconocimiento de la complejidad de los procesos, las exigencias que enfrentan los operadores y la importancia de la capacitación se están traduciendo en amplios programas de capacitación administrados por la industria y organismos estatales. El aprendizaje tradicional no puede ya considerarse como un método viable para capacitar a los operadores de las centrales nucleares. El viejo enfoque de "adiestrar la mano y no la mente" ha dado paso a un método integrado, sistemático y funcional para adiestrar al personal de las centrales nucleares.

La complejidad de las centrales actuales exige que el simulador sea el instrumento principal que utilice un instructor calificado para enseñar al operador y valorar su capacidad para actuar en condiciones normales y anormales en las centrales. Con todo, la adquisición de un simulador de tamaño natural específico de centrales es sólo un elemento de un programa de capacitación eficaz. Actualmente los programas de capacitación integrados incluyen extensas clases en las aulas sobre la teoría y los principios de las operaciones, conjuntamente con una capacitación práctica en el simulador. Se destacan las operaciones normales, los accidentes más probables y la interfaz hombre-máquina.

La simulación después del accidente de TMI

El simulador de tamaño natural específico de centrales consiste en una réplica de los tableros de mando de la central, consolas de operación y la central del instructor, activados todos por un gran sistema de computadora digital. Se preparan programas de computadora consistentes en representaciones matemáticas de los fenómenos físicos de los sistemas de la central y de las funciones de traspaso del sistema de control.

Esta descripción es tan válida actualmente como a principios de 1979. La diferencia principal entre los simuladores actuales y los que se entregaban a finales del decenio de 1970 estriba en la fidelidad y la exactitud de la simulación —fidelidad en el desarrollo de los sucesos normales y anormales en las centrales, y exactitud con respecto a los requisitos de tolerancia para las condiciones permanentes y transitorias. (La fidelidad es el grado de similitud con la central de referencia.)

En las secciones siguientes se describen algunas de las características sobresalientes del actual simulador de tamaño natural específico de centrales.

La sala de control

Un simulador de tamaño natural incluye generalmente una réplica fiel y completa de todos los equipos de la sala de control principal de la central. La integridad de la reproducción depende de los requisitos técnicos de cada cliente. Algunas empresas eléctricas especifican una réplica exacta de todos los paneles traseros, la iluminación (incluidos los efectos de oscurecimiento asociados a la puesta en marcha de motores grandes), el tipo de piso e incluso efectos sonoros (ruido de la turbina, descarga de vapores, etc.), coordinados con la apertura de las puertas de la sala de control; otras empresas sólo

exigen la reproducción de los paneles delanteros, y en algunos casos no los incluyen todos.

Un simulador típico de finales de los años setenta tenía una capacidad de entrada/salida (E/S) —índice de la cantidad de instrumentación de la sala de mando simulada— que oscilaba entre 6000 y 8000. Hoy día es usual que tengan capacidad de E/S de entre 16 000 y 20 000. Además de las consolas de la sala de control principal, el panel de apagado a distancia también se reproduce y se sitúa en un local independiente.

Otros equipos de la sala de control principal de la central, como los sistemas de control integrados de la computadora de proceso de la central y los sistemas de representación visual de los parámetros de seguridad, también se incluyen en la actividad de simulación. Al hacerse cada vez mayor hincapié en los sistemas de representación visual pormenorizados, se hace sumamente importante familiarizar a los operadores con la presentación simultánea de la información en tubos de rayos catódicos y en instrumentación convencional.

Mediante esta amplia utilización de los sistemas de representación visual, ahora se puede observar la exactitud y fidelidad de los modelos en un grado que nunca antes estuvo al alcance del aprendiz. Estas nuevas exigencias con respecto a la exactitud y la fidelidad dilatan los plazos de entrega y, en consecuencia, aumentan de forma significativa el costo de los simuladores actuales.

En el presente se realizan estudios para determinar de forma realista qué se necesita para capacitar eficazmente al operador. ¿Acaso los sistemas destinados a operaciones auxiliares y de vigilancia de la central a largo plazo son realmente necesarios para la capacitación mediante simulador? ¿Cuáles son los requisitos para capacitar al explotador de la central y qué otro personal de la central será adiestrado en el simulador? Toda organización que proyecte adquirir un simulador de tamaño natural específico de una central debe formularse estas preguntas.

La cuestión del alcance de la simulación, así como de la fidelidad y exactitud, se debe valorar determinando qué solución es más eficaz en función del costo para brindar una capacitación eficaz al operador. Al tomarse esta decisión es importante recordar el objetivo fundamental del simulador de capacitación: suministrar suficiente información al aprendiz de manera que pueda verificar el funcionamiento normal o anormal de la central, y permitirle que interactúe con el proceso y observe la respuesta de éste ante las medidas de control que el aprendiz adopte o deje de adoptar.

La central del instructor

La creciente complejidad del simulador de capacitación hace que sea cada vez más exigente el papel que desempeña el instructor como director del ejercicio de capacitación. El instructor debe ser capaz de controlar fácil y rápidamente la inserción de desperfectos así como las funciones auxiliares del operador, establecer representaciones visuales de tendencias y, ante todo, supervisar la actividad del aprendiz. Para lograr estos objetivos, la central típica del instructor utiliza representaciones visuales de gráficos en colores en una pantalla grande de alta definición, conjuntamente con un método de diseño "cómodo al instructor" bien elaborado. Esto permite al instructor cumplir rápidamente su principal tarea de establecer el escenario de capacitación.

La utilización de teclas de funciones programables, que ahorran tiempo, la selección de funciones controladas por un cursor y las técnicas de entrada microconducida permiten al instructor invertir más tiempo en la consecución de su objetivo fundamental de enseñar.

Generalmente la central del instructor incluye las características siguientes:

- Inicialización a una situación predeterminada
- Congelación de todos los cálculos
- Inserción de desperfectos (instantánea o lógica)
- Funciones auxiliares del operador
- Retorno a un punto anterior en el ejercicio de capacitación
- Vigilancia de la actividad del aprendiz
- Anulación/fallo de los instrumentos de la sala de control
- Inserción de alarmas falsas
- Aceleración y retraso
- Programas de ejercicios con ayuda de computadoras
- Control de las condiciones ambientales y otros parámetros externos.

Además de la consola de la central del instructor, éste cuenta con un dispositivo manual de control remoto para utilizarlo cuando imparte la capacitación fuera de la central. Este dispositivo permite al instructor controlar el ejercicio de capacitación mientras observa de cerca al aprendiz en la sala de control.

Modelos de sistema primario

Desde el accidente de TMI, en las especificaciones técnicas de los simuladores se ha expresado claramente el requisito de dirigir los procesos de flujo bifásico y los de transferencia de calor asociado. Todos los principales fabricantes de simuladores han emprendido programas de desarrollo para cumplir adecuadamente estos requisitos y en la actualidad la industria de capacitación de explotadores de centrales nucleares dispone de este nuevo tipo de simuladores avanzados.

Por ejemplo el Código Link Termohidráulico y de Tiempo Real Avanzado del Núcleo (REACT) se utiliza como núcleo de los simuladores avanzados de centrales nucleares Link. Ofrece la capacidad predictiva de un código termohidráulico, además de toda la capacidad operacional de un simulador de capacitación. Un sistema de representación visual independiente colocado junto a la central del instructor brinda también información dinámica sobre todos los parámetros necesarios para efectuar diagnósticos a fondo de la capacidad de la central para transferir energía del sistema de refrigeración del reactor a la turbina o a otros sumideros de energía. El modelo está elaborado con leyes físicas y ecuaciones constitutivas básicas que están al mismo nivel de los mejores códigos de análisis de seguridad. Se puede decir que los resultados son los mejores que cabía esperar. La naturaleza predecible de estos modelos avanzados permite capacitar al operador con una profundidad y un realismo sin precedentes.

Ya los fabricantes más importantes de simuladores están demostrando sus modelos avanzados a los posibles clientes y, de hecho, ya en Europa y los Estados Unidos se están diseñando simuladores que los utilizan.

Base de datos del diseño y modificaciones futuras

La fidelidad del diseño de los modelos de sistemas de centrales depende directamente de la calidad de la base de datos del diseño. El acopio y mantenimiento de esta base de datos es una tarea prolongada tanto para la empresa eléctrica como para el fabricante del simulador. La base de diseño debe estar bien definida y el propietario del simulador debe mantener una base de datos precisos y actuales sobre la central de referencia. A medida que se hagan cambios en la central de referencia, cada uno debe evaluarse e incorporarse las modificaciones pertinentes en el simulador. A su vez, la base de datos del diseño del simulador debe estar actualizada para que refleje el estado actual del simulador. Por consiguiente, el sistema computadorizado de gestión de la configuración es ahora un requisito para la mayoría de los simuladores que se fabrican actualmente.

El propietario y el fabricante del simulador deben trabajar estrechamente durante todas las fases del proyecto para acopiar y correlacionar todos los datos aplicables de que se disponga sobre la central de referencia. De ser posible, los datos reales del funcionamiento de la central, incluidos los transitorios de accidente y emergencia, se utilizan en el diseño inicial. Cuando el simulador se diseña antes que la central de referencia o al mismo tiempo, será preciso hacerle un ajuste de precisión después que la central empiece a funcionar. Generalmente este ajuste está a cargo del personal de mantenimiento del soporte lógico del propietario del simulador, o se realiza conforme a un acuerdo independiente con el fabricante del simulador.

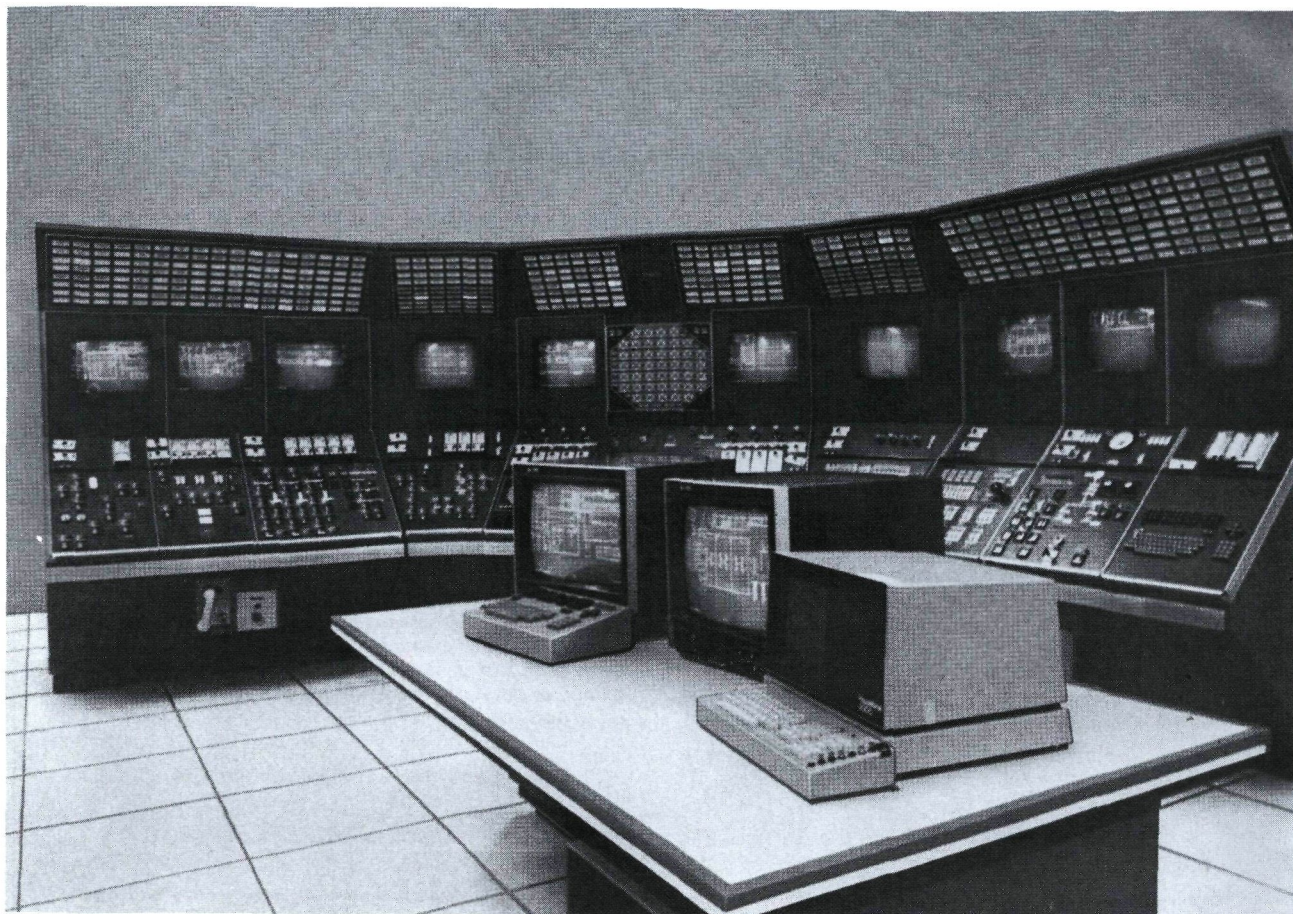
Esta medida del ajuste preciso y las modificaciones futuras de los modelos matemáticos de simulación debe proporcionarse fácilmente para permitir la comprensión de los modelos y su modificación sin afectar el resto del soporte lógico. A este efecto se deben organizar los modelos matemáticos de todos los diversos sistemas en forma de módulo, con un mínimo de duplicación entre ellos. Las modificaciones futuras se facilitan mediante un enfoque de diseño "descendente" de la elaboración de modelos de sistemas —en el que un módulo de control llama a uno o más segmentos de código que, a su vez, llaman a diversos componentes y subrutinas.

Debido a la naturaleza modular de los diseños actuales y a los complejos instrumentos de mantenimiento del soporte lógico que se entregan con el simulador, la mayoría de los propietarios de simuladores pueden aplicar la mayor parte de los cambios sin la ayuda del fabricante original.

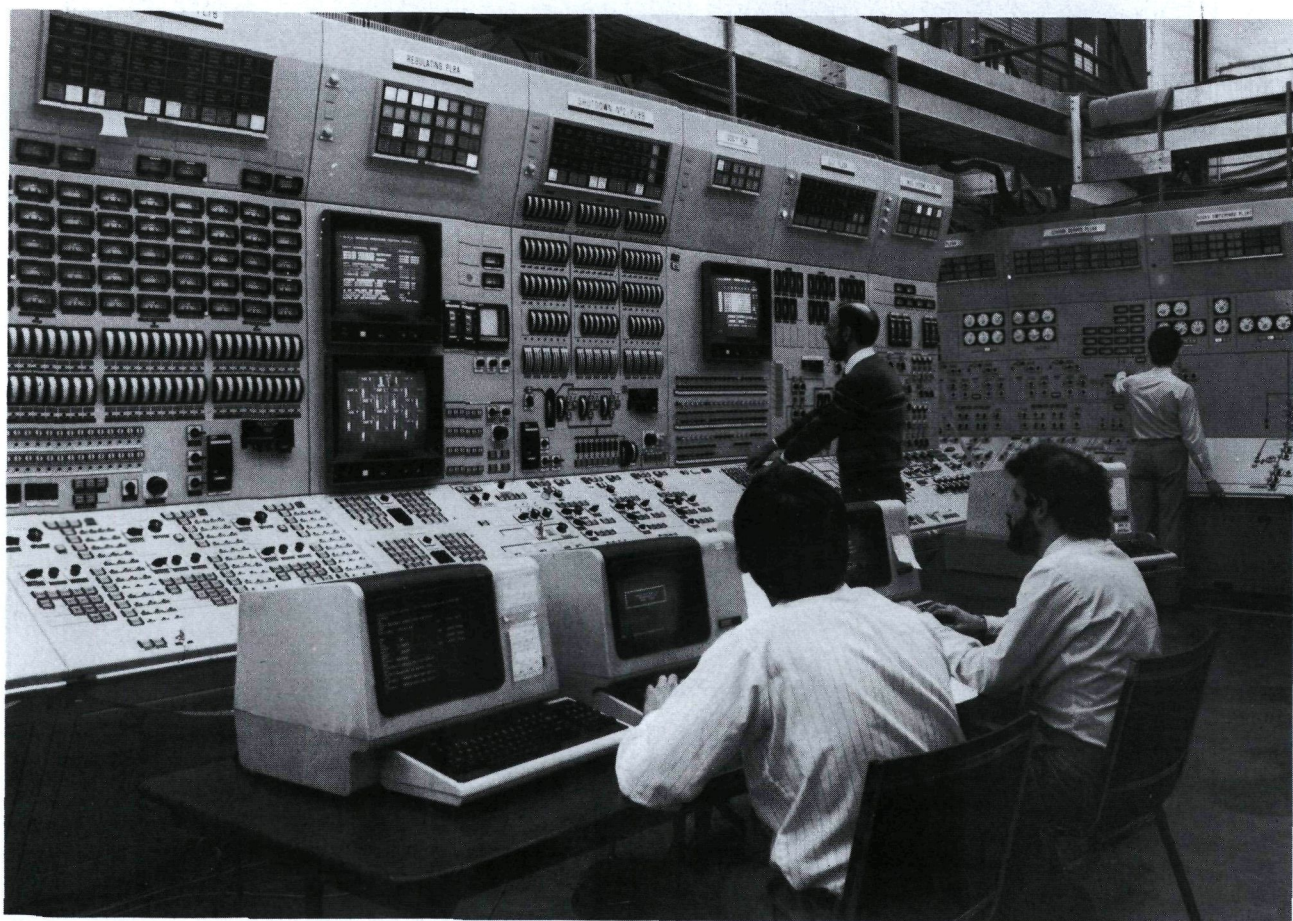
Sistema de computadora

"Sistema de computadora" significa todo el soporte físico y lógico necesario para la aplicación y el funcionamiento adecuados del simulador. Se incluyen asimismo las interfaces de E/S con la instrumentación de la sala de control.

En la actualidad muchos fabricantes de simuladores proponen las computadoras Serie 32 de la División de Sistemas de Computadora Gould. El conjunto de computadoras debe brindar suficiente velocidad de cálculo, capacidad de memoria y flexibilidad de programación para alcanzar los niveles de funcionamiento que exige el simulador.



Los simuladores específicos de centrales son una réplica de una sala de control determinada. Las fotos muestran el sistema de la central nuclear Susquehanna en los EE.UU. arriba y el de la central energética Bruce "B" tipo CANDU de la Ontario Hydro, Canadá. (Foto superior: cortesía de DSS Link; foto inferior: cortesía de CAE Electronics Ltd)



Desde aeroplanos hasta centrales energéticas y más allá de éstas

La base del desarrollo de los complejos simuladores para la capacitación de operarios de centrales nucleares se encuentra en la experiencia obtenida en más de 50 años de tecnología de simulación en la industria aeronáutica.

Durante los últimos cincuenta años, la tecnología de simulación de vuelo pasó de entrenadores mecánicos de pilotos a complejos sistemas computadorizados que imitan misiones al espacio ultraterrestre. Por ejemplo, antes de que el Transbordador Espacial Columbia de los Estados Unidos de América realizar su primera misión operacional a fines de 1982, la tripulación y el personal de apoyo habían utilizado la tecnología de simulación para ensayar sus respectivas actividades desde el lanzamiento hasta el aterrizaje.

Así como durante los últimos 25 años el desarrollo de los simuladores se produjo a partir de la experiencia pasada, ahora los simuladores modernos de las centrales nucleares abren el camino a muchos otros tipos de dispositivos para la capacitación de operarios en la industria de la energía eléctrica y en muchas otras.

Desde 1977 las centrales energéticas de combustible fósil vienen utilizando simuladores complejos de tamaño

natural para el adiestramiento de los operadores. Actualmente existen simuladores de este tipo en diversos países, incluidos Arabia Saudita, Australia, China, Estados Unidos de América, India, Indonesia, República de Corea, República Federal de Alemania y Sudáfrica. En muchos otros países existen simuladores de otros tipos.

Las industrias de elaboración son las que más recientemente han utilizado la simulación en la capacitación de operadores. De hecho, el uso de la tecnología de simulación en esta industria ha ido más allá del adiestramiento de los operadores de las plantas. Hoy día, la tecnología de simulación en tiempo real está demostrando ser un eficaz instrumento en función del costo para el diseño de plantas de elaboración altamente complejas. Por ejemplo, la fidelidad de la simulación permite una mejor comprensión, lo que posibilita al propietario de la planta hacer modificaciones en el diseño de ésta y cambios en el control de los procesos antes de la construcción de la planta y la etapa de arranque o a la par de éstas. En algunos casos, el ahorro en gastos por concepto de equipos y en tiempo de puesta en marcha ha amortizado con creces el costo del simulador.

La experiencia obtenida en la simulación de centrales nucleares ha ayudado a desarrollar sistemas de simuladores para otras industrias, como el que se muestra en esta foto en una planta de elaboración de gas. (Cortesía de la División de Sistemas de Simulación Link)



Normalmente el sistema debe ser capaz de realizar las siguientes funciones:

- Controlar el proceso de simulación
- Reflejar de forma realista las respuestas en tiempo real de las manipulaciones de control del operador-aprendiz
- Mantener el control de todos los dispositivos periféricos de la computadora y de las funciones que deben realizar
- Ofrecer suficiente longitud de palabra digital para reflejar las precisiones especificadas
- Ofrecer tasas de transferencia de entrada/salida suficientes y tasas de interacción de los modelos matemáticos suficientes de manera que las respuestas de la central simulada que se observan en la sala de control no se puedan diferenciar fácilmente de las respuestas de la central verdadera
- Apoyar el mantenimiento del sistema del soporte lógico y programar la actividad de modificaciones mediante procesadores de lenguaje adecuados y un programa de apoyo
- Apoyar las funciones del proceso de segundo plano coincidentes con las operaciones del simulador, en dependencia solamente de la disponibilidad de recursos y tiempo
- Ofrecer suficiente tiempo libre y memoria (o capacidad de ampliación) para dar cabida a modificaciones futuras.

Un sistema típico de computadora Gould incluiría, como mínimo, una computadora doble de la Serie 32/97; una impresora de líneas; terminales de visualización de CRT; unidades de discos de 300-MB; unidades de cinta magnética de 75-IPS; y un lector de fichas de 1000-CPM.

Los avances en el campo de las computadoras ocurren tan rápidamente que, muy a menudo, en el momento de la entrega del simulador su computadora tiene por lo menos una generación de atraso con relación a la situación corriente. Por lo tanto, la portabilidad del soporte lógico se ha convertido en un elemento extremadamente importante del diseño de los simuladores. Algunas de las esferas que reciben actualmente mayor atención en el diseño de un sistema portátil son la utilización del soporte lógico operacional del proveedor de las computadoras sin modificación, toda la programación en un lenguaje de alto nivel y el uso de un diseño y una programación estructurados.

Desperfectos

Se entiende por defectos los fallos o la degradación en el comportamiento de los componentes de la central, y pueden agruparse en dos categorías: defectos genéricos y defectos específicos del sistema. Los genéricos abarcan la mayoría de los

Tendencias en la simulación nuclear

En la industria nuclear, los dos primeros simuladores de centrales nucleares se construyeron en 1957 casi simultáneamente. El primero en terminarse fue el destinado a la capacitación de operadores de la central de óxido de magnesio de Calder Hall en el Reino Unido. El segundo estaba destinado al buque mercante nuclear *Savannah*. Ambos simuladores pueden catalogarse de simuladores replicadores ya que ambos eran una copia fiel de la sala de control de la instalación real. De hecho, el simulador del *Savannah* se podía utilizar para efectuar estudios técnicos sobre el sistema de propulsión del buque.

Los tipos actuales oscilan entre los capacitadores de principios básicos y los de tamaño natural específicos de centrales, que ofrecen una amplia gama de dispositivos de adiestramiento para los estudiantes sin experiencia práctica, así como para quienes tienen años de experiencia operacional real.

Los capacitadores de principios básicos están destinados a ofrecer una comprensión fundamental de la relación causa-efecto entre los sistemas de una central nucleoelectrónica. Se ha comenzado a aceptar sin reservas que el adiestramiento inicial de los operadores y el personal de apoyo se logra mejor en este tipo de simuladores conceptuales. Es más fácil para los aprendices inexpertos aprender los conceptos del funcionamiento de una central nuclear si no se sienten abrumados por los detalles de la réplica de una sala de control. Una vez que se aprenden los principios básicos y se adquieren las habilidades operacionales esenciales, el operador puede pasar con confianza a la capacitación en un simulador replicador.

El simulador de tamaño natural específico de centrales incluye una réplica de la sala de control de la central de referencia. La fidelidad de la simulación de los sistemas de la central es tal que un operador experimentado no podría detectar diferencia alguna entre el funcionamiento del simulador y el de la central verdadera. La exactitud de la simulación está bien definida, con parámetros críticos y tolerancias asociadas claramente especificados.

En estos dos tipos de simuladores existe toda una variedad de mecanismos de adiestramiento para los operadores y el personal de apoyo de las centrales nucleares.

Simuladores en uso

Según los informes del OIEA, la simulación conceptual sobre la base de pequeñas microcomputadoras que no representan todos los detalles del sistema se está convirtiendo en un nuevo instrumento de capacitación. Ya está en uso cerca de una docena de estos simuladores.

Más claramente se advierte una creciente preferencia por los simuladores específicos de centrales. Según cálculos del OIEA, existen en el mundo cerca de 100 simuladores de centrales nucleoelectrónicas de tamaño natural en uso o en construcción.

En Checoslovaquia, el centro de capacitación del Instituto de Investigaciones de Energía Nuclear utiliza un simulador VVER-440 de producción nacional. Este simulador, que es el más avanzado en los Estados Miembros del Consejo de Asistencia Económica Mutua (CAEM), permite simular operaciones normales, ocurrencias previstas y condiciones de accidente.

En el centro de capacitación del Reino Unido para reactores refrigerados por gas Hunterston-B avanzados se ha puesto en funcionamiento uno de los simuladores de central nuclear más complejos del mundo. Utiliza 52 microcomputadoras en una modalidad de proceso paralelo, con una memoria combinada de acceso directo de más de 10 megabytes.

También se ha completado la labor en un simulador francés de análisis funcional de fines múltiples que puede simular operaciones normales y escenarios de accidente complejos en tiempo real. Se le puede utilizar para diseño de sistemas y desarrollo de procedimientos de explotación, pero su principal característica es la simulación de accidentes. El simulador muestra los efectos de un accidente sobre toda la central, junto con varias líneas de acción posibles.

Aunque los simuladores se han utilizado tradicionalmente para capacitar personal y desarrollar procedimientos operacionales, pueden ser también un valioso instrumento de investigación. Esto quedó demostrado en la validación de un indicador visual avanzado de parámetros de seguridad en la central nuclear Loviisa, en Finlandia.

componentes de las centrales, tales como turbinas, válvulas, intercambiadores de calor, reguladores, etc., mientras que los desperfectos específicos del sistema incluyen escape de combustible, escape en el tubo condensador, roturas en las tuberías, etc.

La norma nacional norteamericana sobre el empleo de simuladores de centrales nucleoelectrificadas para la capacitación de operadores exige un mínimo de 75 desperfectos para demostrar las respuestas inherentes de la central y el funcionamiento de sus controles automáticos. Además, la norma también exige que la fidelidad de la simulación permita al operador actuar para recuperar la central o atenuar las consecuencias de los incidentes, y volver a situar la central en condiciones razonables de funcionamiento.

Los simuladores actuales exceden con creces estos requisitos, ya que pueden simular fallos en casi todos los componentes de la central y, por lo tanto, crear muchos cientos de desperfectos. Estos desperfectos genéricos y específicos del sistema, unidos a la capacidad del instructor para crear fallos en cada uno de los equipos de

la sala de control, conducen prácticamente a un sinnúmero de desperfectos.

Una empresa mixta

En resumen, el simulador típico de tamaño natural específico de centrales que se fabrica hoy día constituye una verdadera empresa mixta de propietarios y proveedores. Desde la etapa inicial de recopilación de datos hasta las pruebas finales de verificación, se establece una estrecha relación de trabajo y se crea un fuerte espíritu de equipo. La complejidad cada vez mayor del simulador exige esta estrecha relación, que beneficia extraordinariamente la calidad del producto final.

No debe perderse de vista el objetivo real de un simulador de capacitación ni la forma de utilizar más adecuadamente los diversos instrumentos de capacitación —desde los adiestradores para tareas parciales hasta los simuladores específicos de centrales de tamaño natural— en un programa integrado de capacitación.

