



Joaquín MARTÍN BERMEJO es Licenciado en Ciencias Físicas por la Universidad de Zaragoza (1975). En 1976 ingresó en Westinghouse Sistemas Energéticos Española (WSEE) donde ha trabajado sucesivamente en los departamentos de Proyectos, Seguridad Nuclear, SEP de Zorita y Análisis Probabilistas de Seguridad (APS). En la actualidad es el responsable del área de Simulación de operación de centrales PWR de WSEE.

Joseph BOUCAU es "Ingenieur Civil" (equivalente a Ingeniero Industrial Superior), rama eléctrica, por la Universidad belga de Mons (1978). Después de varios trabajos en la industria ingresó en Westinghouse Energy Systems International (WESI) en 1981, donde ha trabajado fundamentalmente en el área de análisis de accidentes, termohidráulica aplicada a simulación y procedimientos de operación de emergencia.

Vicent HANCART es "Ingenieur Civil", rama mecánica, por la Universidad Católica de Lovaina (UCL) (1984), e ingeniero nuclear por la misma universidad (1985). En 1986 comenzó a trabajar en el grupo de análisis de sistemas de Westinghouse Energy Systems International (WESI) y desde 1989 forma parte del grupo de simulación y seguridad nuclear.

Yves PATERNOSTER es "Ingenieur Civil", rama física aplicada, por la Universidad de Bruselas (1979). Después de un año de trabajo en un programa de investigación sobre enriquecimiento isotópico de uranio en la Universidad de Bruselas, trabaja desde 1981 en Westinghouse Energy Systems International (WESI) donde ha desarrollado su actividad profesional principalmente en las áreas de diseño nuclear, termohidráulica y simulación.

SIMULACION CON SISTEMA OPERATIVO UNIX: ANALIZADOR INTEGRAL DE PLANTA

J. MARTIN - J. BOUCAU - V. HANCART - Y. PATERNOSTER

INTRODUCCION

Después del accidente de TMI, tanto los organismos reguladores como las compañías eléctricas tomaron una mayor conciencia de la importancia que la formación de su personal tenía en la seguridad y disponibilidad de las centrales nucleares. En particular, esta afirmación se ha hecho patente en el caso de los operadores y del personal de apoyo a la operación de centrales nucleares para los cuales se necesita un entrenamiento de tipo práctico, que es muy difícil de conseguir dentro de la misma instalación. Por esta razón hace ya mucho tiempo que la industria nuclear ha aceptado como solución el utilizar diversos sistemas de simulación para el entrenamiento de este colectivo.

Entre estos sistemas, el clásico simulador de "alcance total" es, sin duda, el más conocido, y su uso por los operadores de centrales nucleares es un requisito previo para obtener la licencia de operación en la mayor parte de los países con centrales nucleares. Este simulador reproduce lo más fielmente posible la disposición y configuración de los diversos paneles y consolas de una determinada sala de control, y permite modelar el comportamiento dinámico de la central en condiciones de operación y de accidente. Otro simulador, de más reciente desarrollo, pero muy extendido como el anterior dentro de la industria nuclear, es el denominado "simulador de ingeniería"

o "simulador compacto", de dimensiones físicas más reducidas que el anterior, ya que, aunque también emplea paneles y consolas, su número es menor y su tamaño más pequeño. Sin embargo, una característica común en ambos casos es el uso de potentes ordenadores (mainframes), así como de sofisticados códigos de cálculo numérico.

El avance de los sistemas informáticos en los últimos años ha puesto a disposición de la industria en general, y de la nuclear en particular, una gran cantidad de opciones, sobre todo en el entorno de los mini y microordenadores, que con unas prestaciones relativamente similares y a precios más bajos que los de los grandes ordenadores (mainframes) han abierto un nuevo campo en el desarrollo de sistemas de simulación. Por otra parte, la introducción de algunas simplificaciones en los modelos termohidráulicos utilizados habitualmente ha permitido una gran reducción del tiempo de cálculo y, por tanto, su uso dentro de estos nuevos entornos informáticos ha supuesto la aparición de un nuevo concepto en el área de la simulación. El objetivo principal de estos nuevos sistemas no es el de sustituir o competir con los simuladores de "alcance total" o de "ingeniería", mencionados arriba, sino complementarlos mediante un enfoque de tipo más conceptual y fenomenológico. Ni tampoco es su objetivo el realizar análisis complejos con hipótesis conservadoras como los exigidos por el organismo regulador para su inclusión en el

capítulo 15 del Informe Final de Seguridad, sino aplicarlos a una amplia gama de estudios de ingeniería con unas hipótesis realistas (best estimate) dentro de unos plazos de tiempo y unos precios muy razonables.

Por todo lo anterior, el grupo de Simulación de Westinghouse Energy Systems International (WESI) ha desarrollado y puesto a punto un nuevo concepto de simulación, denominado METS (Modular Engineering and Training Station), que tiene como soporte físico (hardware) una red de estaciones de trabajo con sistema operativo UNIX, y que ya ha sido aplicado para la simulación de centrales nucleares de agua a presión (PWR), mediante la integración de un código de cálculo numérico llamado TREAT (Transient Real-time Engineering Analysis Tool), que permite modelar con precisión los fenómenos termohidráulicos producidos tanto durante transitorios operacionales como en condiciones de accidente. A esta aplicación se la conoce como "Analizador Integral de Planta" y sus características principales se describen en este artículo.

SIMULACION Y UNIX

A la hora de seleccionar el sistema informático que sirviera de soporte a esta nueva herramienta de simulación se definieron previamente los requisitos imprescindibles que debía reunir, y que fueron los siguientes:

- El software utilizado habría de tener un alto nivel de portabilidad.
- El hardware debería ofrecer la mejor relación coste-beneficio, pero en cualquier caso debería tener suficiente capacidad para permitir la simulación en tiempo real.
- El sistema debería disponer de capacidad para reproducir gráficos de alta resolución.

Después de un estudio detallado de los sistemas informáticos existentes en el mercado, se llegó a la conclusión de que el entorno que mejor cumplía con los anteriores requisitos era el de las "estaciones de trabajo" con sistema operativo UNIX. El término "estación de trabajo" (en inglés "workstation") se acuñó a comienzos de la década de los 80, y fue la casa Apollo Computer la que lanzó el primer modelo al mercado. Dos lustros después, lo que en un principio fue una idea derivada del avance tecnológico se ha convertido en un producto que abarca crecientes campos de actividad y constituye actualmente el eje fundamental de la estrategia de las grandes compañías. ¿Pero qué son realmente las "estaciones de trabajo"? En pocas palabras se podría decir que son familias de microordenadores (la mayoría con una arquitectura de 32 bits), muy potentes (procesadores

de más de 10 MIPS), con gran capacidad para el manejo de gráficos y que pueden conectarse entre sí por medio de redes de comunicación de alta velocidad. Habitualmente existe una estación principal que se utiliza como "servidor" de las otras y sobre la cual se cargan y ejecutan los programas de cálculo numérico. A la estación principal se le pueden conectar un número ilimitado de estaciones periféricas menos potentes (y de menor coste) que pueden acomodar los paquetes gráficos.

De esta forma el usuario puede acceder al mismo tiempo a varias pantallas conteniendo la información más relevante de la central, así como simular acciones del operador sobre determinados componentes. También se puede disponer de "ventanas" que permiten acceder a bloques de información diferente dentro de una misma pantalla.

En lo referente al sistema operativo, la mayor parte de las "estaciones de trabajo" utilizan UNIX y todo parece indicar que se impondrá definitivamente como estándar. Sin embargo, el principal inconveniente de UNIX es que no permite un gran control sobre la programación de las tareas necesarias para cumplir con el requisito de tiempo real mencionado anteriormente. En nuestro caso, este problema ha sido resuelto de la siguiente forma:

- Limitando al máximo las entradas y salidas (I/O) al/del disco duro.
- Cerrando la red de comunicación a otros procesos diferentes a los del propio sistema operativo y a los relacionados con los programas de simulación.
- Disponiendo de un margen de ciclo computacional suficiente.

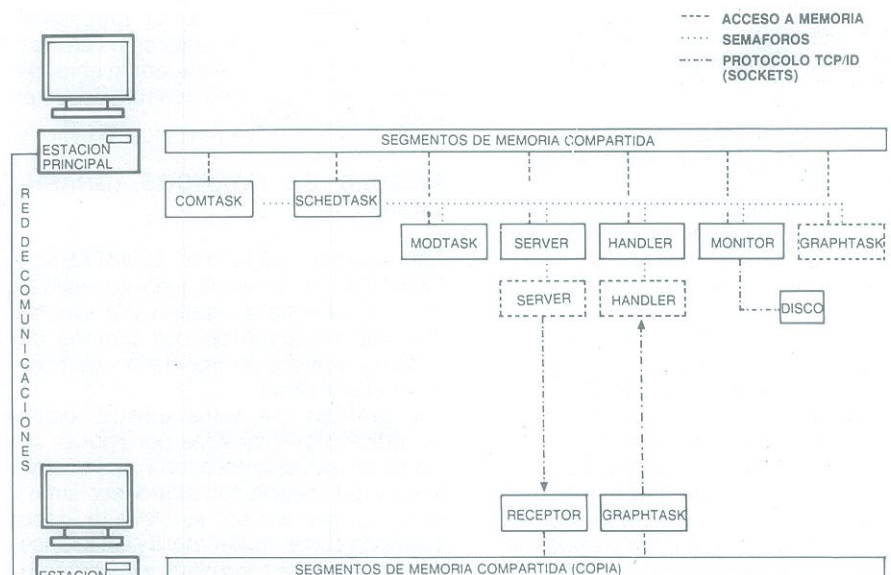
DESCRIPCION DE LA ARQUITECTURA INFORMATICA DEL SIMULADOR

La arquitectura informática del simulador tiene como soporte una base de datos repartida entre segmentos de memoria compartida (zonas de memoria que pueden ser accedidas por varios procesos diferentes) y segmentos de memoria asignada dinámicamente. La función de la memoria compartida consiste en almacenar todos los valores de las variables globales utilizadas durante la simulación, mientras que la memoria asignada dinámicamente almacena toda la información relevante a dichas variables en una base de datos o diccionario de variables. Información que incluye la descripción de la variable, su dimensión, su tipo y su dirección en la memoria compartida.

El conjunto de programas que constituyen METS está estructurado en diferentes módulos independientes, que se comunican entre sí por medio de esa "memoria compartida", a la cual tienen acceso total (ver fig. 1). Asimismo cada módulo crea al principio del todo una copia del diccionario de variables mencionado anteriormente. De esta forma se puede acceder a las variables, bien *directamente* "apuntando" a sus direcciones en memoria compartida (mediante punteros), cuando se necesite hacerlo en el menor tiempo posible, o bien *indirectamente* utilizando el diccionario de variables.

Los módulos que componen METS (siete en total) son los siguientes:

- Módulo interactivo o de comandos (COMTASK).



F1 Estructura informática del simulador METS (Modular Engineering and Training Station).

- Módulo de modelos fenomenológicos (MODTASK).
- Módulo de planificación de procesos (SCHEDTASK).
- Módulo de seguimiento de parámetros y de tendencias (MONITOR).
- Módulo de gráficos (GRAPHTASK).
- Módulo de comunicaciones a través de la red (SERVER/RECEPTER).
- Módulo de tratamiento de acciones (HANDLER).

Los códigos fuente de todos estos módulos están escritos en lenguaje de programación "C". A continuación se presenta una breve descripción de cada uno de ellos.

MODULO INTERACTIVO O DE COMANDOS (COMTASK)

La misión principal de este módulo es la de controlar a los demás en tiempo de ejecución y proporcionar al usuario una amplia variedad de funciones de interfase, tales como:

- Cargar o grabar los ficheros con las condiciones iniciales de simulación del o al disco duro.
- Paralizar y continuar la simulación.
- Asignar o modificar el valor de las variables de simulación y mostrarlas en pantalla.
- Inicializar transitorios y/o fallos de determinados componentes.
- Almacenar en disco los datos de una determinada condición de planta en cualquier momento del transitorio para su utilización posterior.
- Permitir acceso a la base de datos (diccionario de variables).

Este módulo puede ser accedido, bien directamente desde el "sistema de ventanas" de la estación de trabajo principal (servidor), o bien desde un vídeo terminal remoto conectado a la estación de trabajo principal con una interfase en serie.

MODULO DE MODELOS FENOMENOLOGICOS (MODTASK)

La función principal de este módulo es la de llamar a las subrutinas del programa de modelos, es decir, de cálculo numérico, de forma secuencial. Como ya se dijo, MODTASK está escrito en "C" y tiene acceso directo a la "memoria compartida". Sin embargo, el programa de modelos está escrito en FORTRAN 77 y el único tipo de memoria que tiene asignada son los "COMMON BLOCKS", que no pueden ser accedidos por otros procesos de los diferentes módulos. Esto se resuelve fácilmente copiando los segmentos de memoria compartidos en los "common blocks" de FORTRAN y viceversa, aunque una descripción detallada está fuera del alcance de este artículo.

Por lo general cada subrutina del programa de modelos está dedicada a al tratamiento de un aspecto particular o a una parte específica de la simulación. La llamada a las subrutinas se controla por medio de una matriz de banderas (flags) que pueden ser accedidas desde COMTASK. De esta forma se puede modificar el alcance de la simulación sin más que congelar una determinada parte de los modelos.

MODULO DE PLANIFICACION DE PROCESOS (SCHEDTASK)

Este módulo es responsable de lo siguiente:

- Mantener el funcionamiento del simulador en tiempo real.
- Asegurar que los distintos módulos son ejecutados en su apropiada secuencia lógica.

Este módulo es el primero en ser creado cuando comienza la simulación. Para realizar las funciones anteriores utiliza unas llamadas al sistema existentes en UNIX, denominadas "semáforos", cuya filosofía básica es no permitir que dos módulos diferentes estén activos al mismo tiempo. Con esto se consigue, por un lado, evitar conflictos de accesos a la misma zona de memoria compartida por dos procesos diferentes y, por otro, seguir la secuencia de ejecución lógica.

MODULO DE SEGUIMIENTO DE PARAMETROS Y DE TENDENCIAS (MONITOR)

Este módulo permite al usuario seleccionar una serie de variables (60 como máximo) para visualizar en pantalla el cambio de los valores de éstas durante el desarrollo de la simulación, así como almacenar dichos valores en un fichero en el disco duro para su procesamiento posterior. Tanto la selección de las variables como el almacenamiento de los valores en disco se controla desde el módulo COMTASK.

MODULO DE GRAFICOS (GRAPH-TASK)

Este módulo, junto con COMTASK y MONITOR, es el encargado de realizar la interfase entre el usuario y la simulación. Se compone de dos familias de gráficos: gráficos de ingeniería y gráficos de entrenamiento.

Los gráficos de entrenamiento están formados principalmente por figuras sinópticas que permiten una interacción directa del usuario con el proceso simulado. La interacción se lleva a cabo actuando con el "ratón" de las estaciones de trabajo sobre los menús y los componentes activos (válvulas, bombas, barras de control, etc.) de estas figuras sinópticas. La filosofía general de estos gráficos

de entrenamiento es la de proveer al usuario de toda la información necesaria y la de permitir las interacciones con todas las partes del proceso simulado como si fuese una instalación real.

El propósito de los gráficos de ingeniería es el de suministrar una información que, no estando normalmente disponible en la planta real, es, sin embargo, necesaria para entender determinados fenómenos físicos o mejorar de efectividad de ciertos aspectos del proceso. Un ejemplo de particular interés es, en el caso de un Reactor Nuclear de Agua Ligera, el conocimiento de las propiedades termodinámicas del fluido en todas las partes del modelo. Estos datos, que sólo son accesibles en parte a través de la instrumentación de la planta real, son, sin embargo, de un interés primordial en los estudios de ingeniería.

Para poder seguir los cambios de los parámetros más importantes de la simulación existen unas curvas de tendencia que muestran la evolución de éstos en el tiempo. La lista de variables que pueden utilizarse a tal fin la define el usuario desde el módulo MONITOR y puede modificarse dependiendo del escenario considerado.

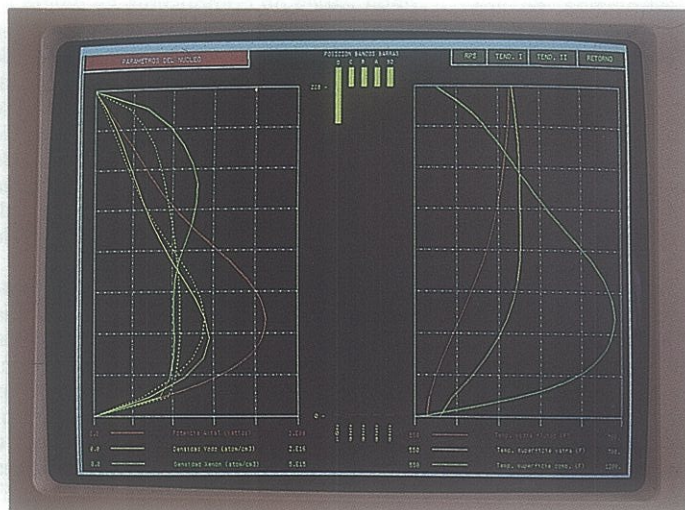
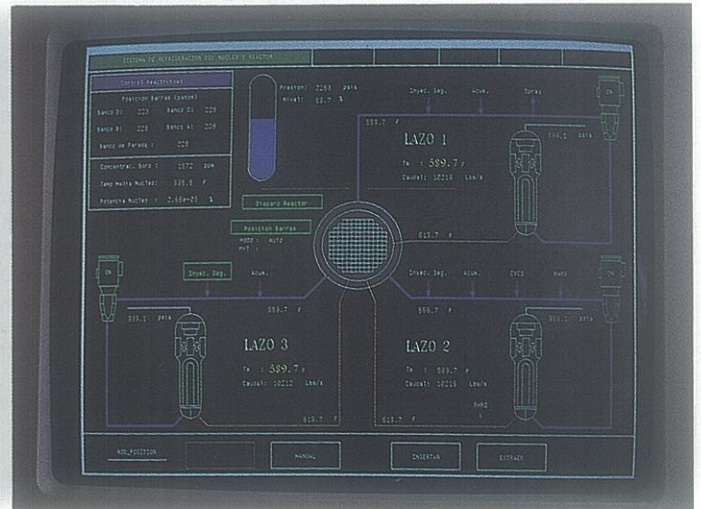
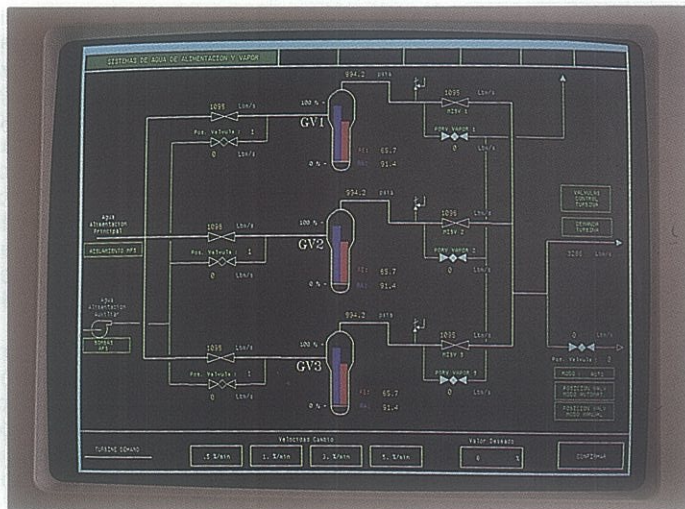
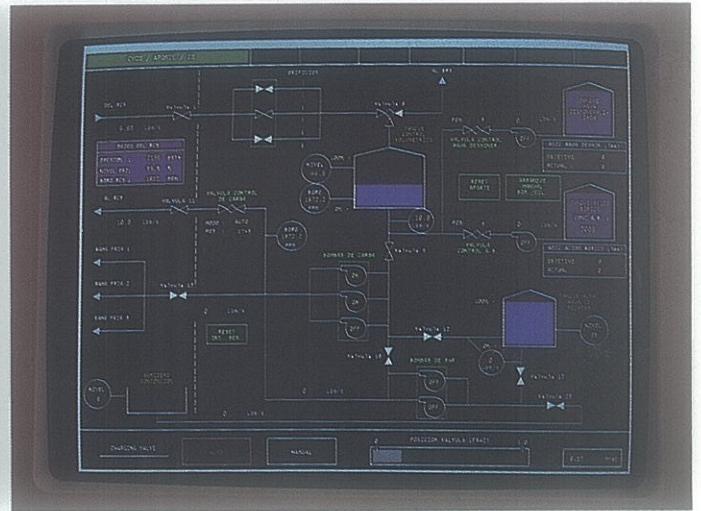
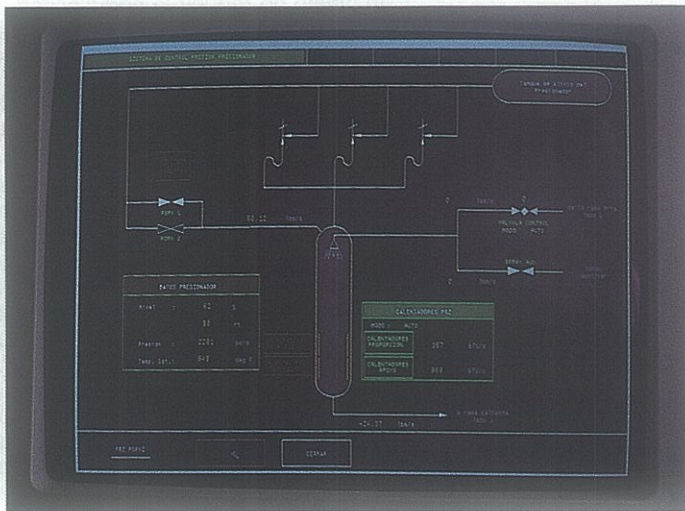
El módulo gráfico ha sido programado usando el paquete gráfico "DV-Tools" de la compañía Visual Intelligence Corporation. Este paquete permite una fácil integración del módulo gráfico sobre una gran cantidad de sistemas informáticos. En nuestro caso, el simulador se programó en primer lugar sobre una estación de trabajo Apollo y luego se transportó para una aplicación particular a estaciones de trabajo SUN. Las vistas gráficas se han realizado utilizando el editor gráfico "DV-Draw", que acompaña a "DV-Tools", lo que hace que la integración de cualquier nueva vista en el módulo de gráficos sea relativamente fácil.

En la figura II se muestran varios ejemplos de los gráficos que pueden obtenerse con la aplicación del simulador "METS" para centrales nucleares, que se describe más adelante.

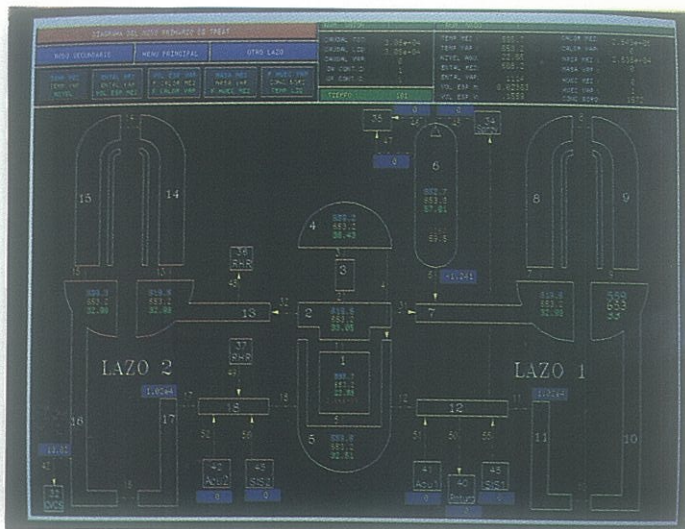
MODULOS DE COMUNICACIONES A TRAVES DE LA RED (SERVER/RECEPTER)

Como ya se mencionó anteriormente, el simulador trabaja sobre una red de estaciones de trabajo. Esta característica es muy importante si se tiene en cuenta que el proceso simulado incluye la representación y control de varios parámetros al mismo tiempo o que varias personas pueden estar entrenándose a la vez en el simulador.

La arquitectura del sistema se basa en una estación de trabajo principal en la que se ejecutan MODTASK, COMTASK, SCHEDTASK, MONITOR Y, eventualmente, GRAPHTASK, y estaciones se-



F II Ejemplos de gráficos obtenidos con la aplicación del simulador "METS" para centrales nucleares.



F III Nodalización típica del circuito primario de un reactor de dos lazos.

cundarias en las que se ejecutan GRAPH-TASK.

La comunicación entre la estación principal y las secundarias se realiza mediante un tipo de llamadas al sistema existente en UNIX (sockets), que emplean el protocolo TCP/IP. Los módulos de comunicación SERVER y RECEPTER utilizan estas llamadas para enviar y recibir, respectivamente, la información de la base de datos.

MODULO DE TRATAMIENTO DE ACCIONES (HANDLER)

Existe otra tarea importante dentro de la comunicación a través de la red, y es la de recibir y tratar las peticiones que las estaciones secundarias realizan a la estación principal.

Cuando se hace una petición desde una estación secundaria en una ventana gráfica, el módulo gráfico GRAPHTASK envía la petición a la estación principal, ésta la recibe y es HANDLER quien se encarga de tratar esta petición. Como en los módulos anteriores, la comunicación entre las dos estaciones se realiza mediante las llamadas al sistema denominadas "sockets".

PRIMERA APLICACION DEL SIMULADOR "METS": ANALIZADOR INTEGRAL DE PLANTA PARA CENTRALES PWR

La primera aplicación de esta herramienta de simulación ha sido la integración del código termohidráulico TREAT dentro de la arquitectura de METS descrita anteriormente para su uso en la simula-

ción de la operación de reactores nucleares de agua a presión (PWR). A esta aplicación se la conoce como "Analizador Integral de Planta".

El código TREAT (Transient Real Time Engineering Analysis Tool) está escrito en lenguaje FORTRAN y acopla un modelo termohidráulico del sistema nuclear de suministro de vapor (NSSS) en condiciones de fluido bifásica, no homogénea y de no equilibrio, con un modelo de cinética de neutrones unidimensional. A continuación se presentan las características más relevantes de TREAT.

DESCRIPCION DE TREAT

TREAT es un código termohidráulico que puede ejecutarse en tiempo real y de forma interactiva, y permite modelar las características esenciales de los sistemas de los circuitos primario y secundario de un reactor de agua a presión (PWR).

La nodalización de los circuitos primario y secundario se realiza mediante dos subsistemas independientes. La red de nodos, junto con sus correspondientes uniones, puede ser tan detallada como el usuario desee, aunque existe un límite máximo tanto para el número de nodos como para el de uniones. En ambos subsistemas, primario y secundario TREAT puede modelar una mezcla bifásica, no homogénea y en estado de no equilibrio. Cada nodo puede dividirse en dos regiones diferentes (vapor y líquido) y las ecuaciones de conservación de masa y energía se resuelven independientemente para cada una de ellas. En la figura III se muestra el esquema de nodalización típico del circuito primario de un reactor PWR de dos lazos de Westinghouse.

Con objeto de reducir la complejidad de este conjunto de ecuaciones se han introducido algunas simplificaciones en el modelo. Así, por ejemplo, todas las propiedades termohidráulicas de un subsistema dado (primario o secundario) se calculan suponiendo una presión global única para dicho subsistema. Esto conlleva una serie de ventajas tales como una gran reducción en el tiempo de cálculo y una mayor estabilidad del sistema de ecuaciones. Por otro lado, la ecuación de conservación del momento se expresa en términos de caudales volumétricos y se utilizan errores volumétricos locales entre nodos contiguos, junto con las pérdidas debidas a fricción y fuerzas gravitacionales, para calcular la variación del caudal en las diferentes uniones. El hecho de utilizar caudales volumétricos en lugar de caudales máscos contribuye a que la estabilidad de las ecuaciones sea mayor.

Las ecuaciones de conservación de masa y energía, junto con la ecuación de conservación del momento, constituyen un conjunto de cinco ecuaciones, cuya resolución permite calcular las propiedades termohidráulicas de cada nodo. Para ello, sin embargo, se necesitan además una serie de ecuaciones adicionales, como, por ejemplo, las correlaciones de "drift flux", que permiten convertir el caudal volumétrico total en caudales máscos de vapor y de líquido utilizados en las ecuaciones de conservación de masa.

El código TREAT incluye modelos para núcleo del reactor, cinética de neutrones unidimensional, transferencia de calor en el núcleo y en los generadores de vapor, sistemas de control y protección del reactor y bombas principales. Los componentes y sistemas auxiliares y de la parte convencional (BOP) se modelan como condiciones de contorno.

En el modelo del núcleo del reactor, cada varilla de combustible se divide en 18 nodos axiales, que se corresponden directamente con otros 18 nodos de fluido que se utilizan para representar las condiciones termohidráulicas del fluido alrededor de la varilla. Este modelo permite calcular la distribución axial de temperaturas de las varillas, y también las propiedades termohidráulicas (entalpía, calidad, volumen específico, etc.) de la mezcla existente en el núcleo.

El modelo de cinética unidimensional utiliza una ecuación espacio-tiempo que relaciona la variación de la concentración de neutrones con las tasas de producción, fugas y absorción de éstos. Los resultados que se obtienen son: distribuciones axiales del flujo neutrónico y de potencia, concentración de los productos de fisión y calor de desintegración. El cálculo de las concentraciones de los productos de fisión (I, Xe...) permite seguir la evolución de los transitorios de Xenon durante variaciones de carga.

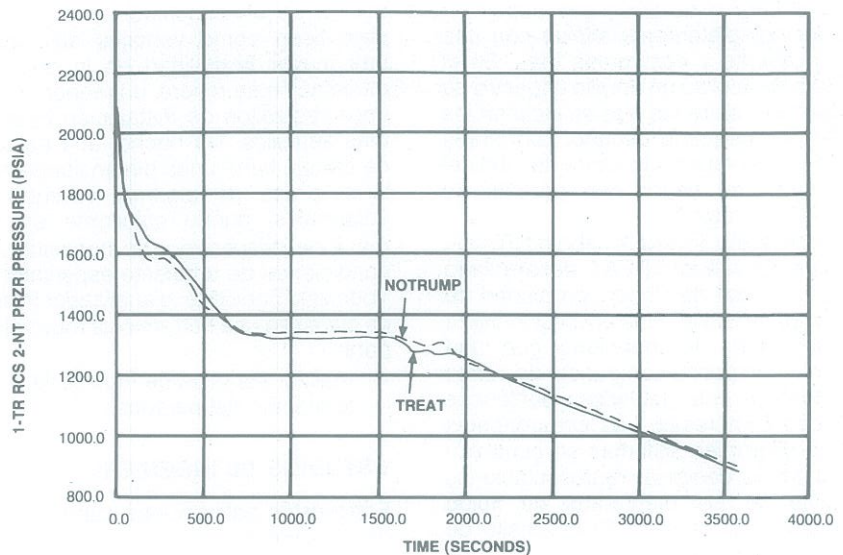
Los modelos de transferencia de calor permiten calcular los diferentes coeficientes de transferencia de calor por convección y los flujos térmicos en los sistemas primario y secundario, así como la transferencia de calor por conducción en los metales existentes en dichos sistemas.

Los sistemas de control de potencia del reactor, presión del presionador, nivel del presionador, caudales de vapor y agua de alimentación y nivel de los generadores de vapor pueden operar en modo automático, respondiendo así a cambios en la demanda de carga, o bien en modo de control manual. El sistema de protección "vigila" los valores de diversos parámetros, y cuando éstos sobrepasan los de sus puntos de tarado fijados se simula la actuación de los sistemas de salvaguardias de la central. Los puntos de tarado que se vigilan son los de disparo del reactor, inyección de seguridad, actuación del agua de alimentación auxiliar, disparo de turbina, aislamiento del agua de alimentación principal, aislamiento de la línea de vapor y aislamiento de la descarga.

El modelo utilizado para las bombas principales determina la presión de descarga y la velocidad de la bomba tanto durante operación normal como en marcha inercial. Estas características se calculan a partir de curvas normalizadas para la presión de descarga y el par resistente hidráulico y de una ecuación característica para el par resistente de fricción.

Los modelos para los caudales de contorno permiten controlar de forma manual o automática los diferentes caudales de sistemas y componentes que no se modelan explícitamente, tales como carga/descarga, inyección de seguridad, inyección de acumuladores, rociado del presionador, válvulas de alivio y seguridad del presionador y de los generadores de vapor, roturas, etc. De esta forma existe la posibilidad de modelar con detalle prácticamente todos los sistemas de la central.

El código TREAT está en continua evolución y periódicamente se incorporan modificaciones para darle más capacidad y permitir así el análisis de escenarios que por su complejidad requerirían códigos más sofisticados. Así, por ejemplo, se ha creado una versión de TREAT para incluir gases incondensables, junto con vapor en la región superior de los nodos. Esta versión ha sido utilizada por el grupo de propietarios de Westinghouse (WOG) durante la resolución del problema de la pérdida de sistema de evacuación de calor residual en condiciones de operación con los lazos parcialmente llenos. En la actualidad se está procediendo a la validación de un modelo para la contención, basado en el código COMPACT, que ha sido incorporado recientemente a TREAT.



F IV Transitorios de presión en el sistema de refrigerante del reactor (TREAT) y en el presionador (NOTRUMP).

LICENCIAMIENTO DE TREAT

El código TREAT ha sido ampliamente validado tanto con respecto a datos de planta como a otros códigos termohidráulicos avanzados:

- Los resultados de análisis de LOCA de tamaño pequeño y de refrigeración del núcleo a largo plazo sin descubrimiento del núcleo, realizados con TREAT, se han comparado con los obtenidos utilizando el código NOTRUMP, licenciado por la NRC. La figura IV muestra la evolución del transitorio de presión durante un LOCA de 1,5 pulgadas en rama fría, calculado por TREAT y NOTRUMP, y se observa la gran similitud entre las previsiones de ambos códigos. De esta forma, la NRC ha evaluado y aprobado el código TREAT para analizar escenarios, específicos para cada central, de refrigeración del núcleo a largo plazo y de parada fría utilizando equipo de seguridad, siempre que no se produzca el descubrimiento del núcleo.
- Además de su validación con respecto a otros códigos termohidráulicos TREAT se ha validado con respecto a transitorios reales ocurridos en algunas centrales, tales como la rotura de un tubo de un generador de vapor de la central de R.E. Ginna, la pérdida de carga en la central de North Anna, la fuga en los sellos de una bomba principal en la central de H.B. Robinson y la rotura de tubo de un generador de vapor en North Anna. La figura V muestra la comparación entre la evolución real del transitorio de presión durante un ejercicio de parada fría utilizando equipo de seguridad realizado en una central americana y los resultados obtenidos de los análisis

del mismo con el código TREAT durante un período de 25 horas.

EXPERIENCIA CON TREAT

El código TREAT ha sido utilizado extensamente en el desarrollo de los procedimientos de operación de emergencia (ERG) del grupo de propietarios de Westinghouse (WOG), y también en la verificación y validación de estos procedimientos de forma específica para algunas centrales. Debido a sus características de ejecución en tiempo real y de forma interactiva, TREAT es el instrumento ideal para preparar estrategias a seguir en situaciones de emergencia, ya que permite evaluar las acciones de recuperación de la central tomadas por los operadores.

También se ha utilizado TREAT en los EE.UU. para la realización de evaluaciones y estudios técnicos que requieran largos plazos a un coste relativamente bajo comparado con los códigos que requieren procesamiento por lotes (batch). Así, por ejemplo, se ha realizado la simulación de la parada fría y la refrigeración a largo plazo de las centrales de Diablo Canyon y Shearon Harris.

El tema de seguridad, relacionado con la pérdida del sistema de evacuación de calor residual (RHR) en condiciones de operación con los lazos parcialmente llenos, ha sido tratado por el WOG mediante la realización de numerosas simulaciones utilizando TREAT. Otros análisis de transitorios han sido realizados también en diversas centrales americanas, tales como R.E. Ginna, H.B. Robinson 2 y North Anna 1.

En Europa se ha realizado un estudio de los transitorios de presión a bajas temperaturas (Pressurized Thermal Shock)

para la central de BR3, que posee un reactor completamente atípico con una rama caliente y dos ramas frías. En el estudio se analizó un amplio espectro de transitorios, entre los que se incluían los LOCA, de pequeño tamaño; las roturas de líneas de vapor, y la rotura de tubo del generador de vapor con pérdida de circulación natural.

Otra aplicación llevada a cabo en Europa es la del Simulador TREAT, desarrollado para la central de Chooz, propiedad de la compañía SENA. Esta aplicación utiliza un simulador de ingeniería con una consola compacta, compuesta de varios monitores de color, teclados y periféricos de copias impresas. Los componentes de los diferentes sistemas se controlan directamente desde las representaciones gráficas de los diagramas de fluido mostrados en pantalla. El propósito de este simulador fue el de entrenar a los operadores de SENA con los procedimientos específicos de su central. La elección del código TREAT vino dictada por la gran flexibilidad de éste para modelizar la planta, lo que le convertía en el más idóneo para dicho propósito. El alcance de la modelización comprendía, además del sistema nuclear de generación de vapor (NSSS) básico, la simulación detallada del sistema de inyección de seguridad, incluyendo válvulas y bombas tanto en el modo de inyección de seguridad como de recirculación.

En España se ha utilizado TREAT durante el proceso de validación del sistema de representación gráfica de los parámetros de seguridad (Safety Parameter Display System, o simplemente SPDS) de la central de Ascó. El trabajo consistió en la simulación de diversos transitorios cuyos resultados, en términos de parámetros termodinámicos, se grabaron en cintas magnéticas y posteriormente se utilizaron como datos de entrada para comprobar la respuesta del SPDS.

La más reciente aplicación de TREAT consiste en la validación de los procedimientos de operación de emergencia y del "Simulador de Ingeniería" de la central suiza de Beznau. Dicha central está llevando a cabo desde hace un par de años un extenso programa de actualización y, por tanto, ha habido que escribir nuevos procedimientos, así como modificar el simulador de ingeniería para incorporar los diferentes sistemas que se han implantado. Nuevamente, la gran flexibilidad del código TREAT para modelizar la planta ha permitido su utilización con excelentes resultados.

APLICACIONES DEL ANALIZADOR INTEGRAL DE PLANTA

El analizador integral de planta basado en TREAT posee la misma capacidad para ampliar su alcance a otros modelos

que la de un simulador de ingeniería, pero tiene como ventajas adicionales una mayor flexibilidad en lo que a la modelación se refiere, un menor coste y unos requisitos de instalación bastante más sencillos. De hecho, una estación de trabajo tiene unas dimensiones similares a las de algunos ordenadores personales, puede colocarse en una mesa de despacho y no necesita unas condiciones de ambiente especiales. Todo esto convierte al analizador integral de planta en una herramienta muy valiosa para:

- realizar estudios de ingeniería, y
- formación del personal.

ESTUDIOS DE INGENIERIA

Entre estas aplicaciones cabe destacar las siguientes:

- Evaluar transitorios operacionales tales como arranques, seguimientos de carga, disparos del reactor..., así como transitorios debidos a accidentes tales como rotura de tuberías del refrigerante primario (LOCA) de tamaño pequeño, rotura de tubo del generador de vapor, rotura de líneas de vapor principal, pérdida de energía externa, inyección de seguridad inadvertida, etc.
- Elaboración, verificación y validación de procedimientos de operación de emergencia específicos de cada central.
- Análisis de sistemas de protección y control.
- Evaluación del impacto de modificaciones de diseño.
- Estudio de márgenes de operación.
- Simulación de pruebas de arranque y planes de emergencia.
- Evaluación de nuevos temas relacionados con la seguridad.
- Revisión de especificaciones técnicas.
- Realización de análisis de "mejor

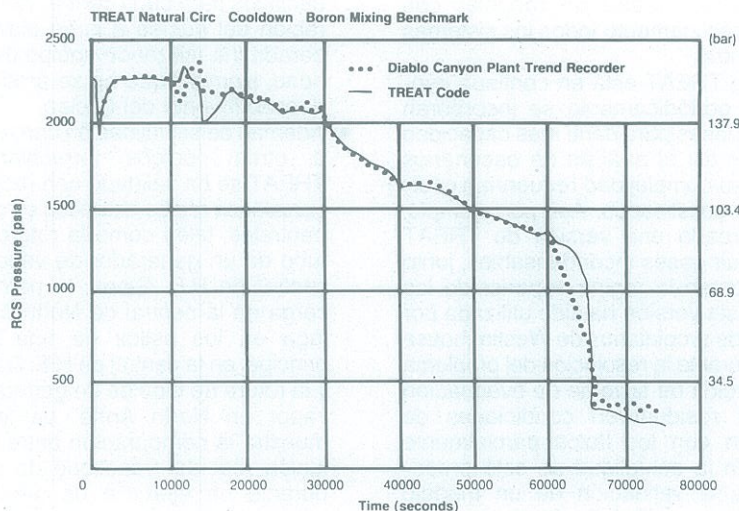
estimación" (Best estimate) para definir/justificar de forma realista los criterios de éxito de sistemas utilizados en los Análisis Probabilistas de Seguridad (APS).

FORMACION DE PERSONAL

Puesto que el analizador integral de planta proporciona al usuario una visión integrada de la evolución de todos los parámetros más relevantes, contribuye a mejorar y complementar los programas de formación habituales basados en clases teóricas en aulas y en sesiones prácticas en simulador de alcance completo tipo sala de control.

El analizador integral de planta TREAT constituye la herramienta ideal de entrenamiento para mejorar la comprensión por parte de los operadores de los fenómenos físicos y del comportamiento de la central durante transitorios operacionales y de accidente. Con él es posible seguir la evolución de los parámetros más importantes, así como conocer los márgenes de seguridad disponibles en cada instante por medio de diferentes representaciones gráficas en pantalla. Esto descarga al operador de los rutinarios paseos a lo largo de la sala de control del simulador de alcance total para accionar botones y manetas de forma casi mecánica, y le permite conocer y evaluar el efecto de sus acciones en el proceso de recuperación de la central.

Por otro lado, el analizador integral de planta es un sistema de fácil utilización y se tarda aproximadamente dos horas en familiarizarse con su manejo. Esto lo convierte en un instrumento muy atractivo para personal no relacionado directamente con la operación (grupos de apoyo, tecnología nuclear y resultados, licenciamiento, etc.), para los cuales el entrenamiento en la sala de control de



F V Comparación del transitorio de presión en el sistema de refrigerante del reactor obtenido con TREAT y los datos reales de Diablo Canyon.

simuladores de alcance total supone un esfuerzo adicional al no estar tan familiarizados como el personal de operación. Finalmente, debido a sus reducidas dimensiones, el analizador integral de planta se puede transportar fácilmente al lugar elegido por el usuario, bien sea oficina técnica o emplazamiento de la instalación, permitiendo así que el personal reciba el entrenamiento "in situ" sin necesidad de largos desplazamientos.

RESUMEN

El analizador integral de planta basado en el código TREAT es un sistema informático integrado que, de forma interactiva y en tiempo real, permite modelar las condiciones termohidráulicas en regímenes de fluido bifásico, no homogéneo y de no equilibrio, que pueden existir durante los posibles transitorios de un reactor de agua a presión (PWR) mediante una configuración de "estaciones de trabajo".

Las principales ventajas de este sistema son:

- Gran flexibilidad en el modelado, que permite reproducir los sistemas específicos de cada central.
- Facilidad para aumentar el número de sistemas modelados.



F VI Equipo básico del analizador de planta instalado en las oficinas de WSEE de Madrid.

- Interfase hombre-máquina muy sencilla que facilita el entrenamiento del personal con los procedimientos específicos de su central.
- Buena relación coste/beneficio.

El analizador integral de planta basado

en el código TREAT es una herramienta muy adecuada para aplicaciones específicas de cada planta, tales como análisis de transitorios, validación/verificación de procedimientos de emergencia, evaluaciones de seguridad y entrenamiento de personal.

**DISEÑO
FORMATIZADO**

Realice sus informes y presentaciones en color, proyecciones y retroproyecciones de gráficos de barras, de líneas, tartas, cuadros y tablas, textos y diseños especiales, en Senda Gráfica.

SENDA GRAFICA, S.A.

Isla de Saipán, 47
28035 MADRID
Tel. (91) 373 47 50
Telefax (91) 316 91 77

INCREMENTO DE ENERGIA, POTENCIA E INVERSIONES EN SOLAR TERMICA

