



Rafael VARGAS TRAUD es licenciado con grado en Ciencias Físicas (Universidad Complutense) en 1972, en la especialidad de Cálculo Automático. En la actualidad es el jefe del Departamento de Informática y Simulación en la Subdirección de Formación y Estructura de Tecnatom. Inició su experiencia profesional en CII-Ibérica, trabajando en temas de Informática en Tiempo Real. Tras desempeñar la Jefatura de Grupo de miniordenadores, en 1975 pasó a pertenecer a Tecnatom. Habiendo prestado sus servicios como coordinador del proyecto de desarrollo de los simuladores de Entrenamiento, en 1978 fue promovido como jefe de la Sección de Simulación, donde dirigió diversos proyectos relacionados con la Simulación en tiempo real. Ha sido ponente de diversos cursos nacionales y extranjeros, así como ha participado en varios congresos y realizado algunas publicaciones. Miembro de la SCS (Simulation Computer Society), ATI (Asociación de Técnicas de Informática), SNE (Sociedad Nuclear Española) y vocal de AEIA (Asociación Española de Informática y Automática).

TENDENCIAS ACTUALES DE LOS SIMULADORES DE ENTRENAMIENTO

R. VARGAS TRAUD

INTRODUCCION

El reconocimiento a la importancia de una sólida preparación para los operadores de centrales, y la influencia que una buena formación aporta a su operación segura y económica, así como el empleo de los simuladores de alcance total en dicho programa de formación, son motivos fundamentales para llevar a cabo importantes innovaciones tecnológicas en el campo de la simulación.

Para una empresa de ingeniería de servicios como Tecnatom, que pretende estar en el punto más avanzado de la tecnología de la simulación, cuyo objetivo final es capacitar al operador para que tome las decisiones correctas en cada situación de un modo sistemático, estas premisas han constituido el núcleo básico para la realización de un conjunto de proyectos de desarrollo. En este artículo se mencionan, por una parte, las necesidades que la formación del personal de explotación demanda de los simuladores de entrenamiento, y por otra, se indican las características más importantes que los modelos deben aportar y las limitaciones tecnológicas que el estado actual de los computadores imponen, así como un conjunto de orientaciones que faci-

litan la obtención de los logros esperados.

Finalmente, y a la vista de la dinámica que presenta el mundo de la tecnología de los computadores, de manera que el futuro se convierte en presente a una velocidad difícilmente asimilable por otras consideraciones empresariales, indicamos las tendencias de esta tecnología y de su incuestionable impacto en los programas de simulación.

SIMULADORES DE ALCANCE COMPLETO

ANTECEDENTES

Los simuladores de entrenamiento nacieron como consecuencia de la necesidad de realización de una serie de maniobras, en la propia central, requeridas para la obtención de la licencia del personal de operación concedida por el organismo regulador en los Estados Unidos de América. Este proceso añadía un conjunto de inconvenientes y dificultades a los ya inherentes a las fases de puesta en marcha y arranque de las centrales. Habida cuenta del relativo grado de madurez que los simuladores de vuelo habían alcanzado, en 1968 aparece el primer simulador de entrenamiento para operadores de centrales nucleares.

De este modo se incorporan los simuladores al proceso de formación y examen de operadores.

No debemos olvidar que los simuladores de entrenamiento se originaron ya con unos criterios de alcance muy amplios, al tener que reproducir fielmente la sala de control, incorporando todos los modelos correspondientes a los sistemas y procesos que se actúan y visualizan desde la misma.

Es evidente que el trabajo en tiempo real de los modelos, así como de la gestión de un número muy elevado de señales analógicas y digitales y de las funciones propias de control e información para el instructor, unido a las capacidades tecnológicas disponibles en los computadores de aquella época, provocaron el desarrollo de un software muy rígido cuyos modelos eran extremadamente simples. La tabla I muestra una configuración típica con los dispositivos que se utilizaron.

Esa concepción en su origen de alcance completo, en cuanto a la duplicación del hardware en la sala de control, tuvo sus restricciones con respecto al número de anomalías y maniobras disponibles para el operador, limitando éstas a un conjunto prescrito.

El empleo de modelos simples, que por sí mismos no podrían reproducir los fenómenos físicos complejos que acontecían en diversos transitorios, fue suplido mediante la introducción de curvas fijas que, literalmente, forzaban a los instrumentos simulados a responder, dentro del conjunto de anomalías prescritas, de un modo tal y como se había obtenido por medio de complejos códigos de seguridad y licenciamiento. Lógicamente, cualquier desviación de las acciones previstas para cada anomalía, introducida por un alumno, podía producir resultados imprevisibles.

Estas consideraciones hicieron que los instructores prestaran una atención muy especial a las sesiones de entrenamiento, dentro de unos cauces muy rígidos, vigilando las acciones del operador, así como su adecuado comportamiento.

La evolución de los simuladores de entrenamiento fue válida, y universalmente aceptada hasta 1979. Una vez más, las consecuencias del accidente de Three Miles Island-2 (TMI-2), constituyeron la fuerza motriz de un conjunto de investigaciones y desarrollos orientados a mejorar el grado de realismo de los simuladores, especialmente durante los transitorios severos.

PRINCIPALES CARACTERISTICAS TERMOHIDRAULICAS REQUERIDAS PARA LA SIMULACION DE DIVERSOS TRANSITORIOS

Como posteriormente veremos, es importante realizar un estudio detallado

de los fenómenos que suceden en la evolución de aquellos transitorios que conforman el alcance esperado del simulador en cuestión, ya que dicho alcance define implícitamente los requisitos de los modelos a utilizar.

Hoy día no existe un consenso universalmente aceptado sobre dichos requisitos, en especial en cuanto a la precisión que los simuladores de entrenamiento deberían cumplir, si bien organismos tales como EPRI han llevado a cabo diversos análisis sobre los mismos.

En consecuencia, el alcance de un simulador viene definido por los siguientes criterios:

- Compatibilidad absoluta con los requisitos emitidos por las Instituciones Reguladoras.

Una vez expuestas estas necesidades, podríamos definir un conjunto más o menos extenso de anomalías y condiciones iniciales que las conformaran; sin embargo, parece más racional estudiar los fenómenos o estados que acontecen, y a partir de dicha fenomenología pasar a definir entonces un conjunto de transitorios seleccionados que activen dichos fenómenos físicos, también comúnmente llamados modos dinámicos en la literatura especializada.

En la tabla II se presenta un resumen de los fenómenos más significativos de un reactor PWR en diversas condiciones operacionales y de accidentes.

Así, en los planes de formación considerados se contemplan escenarios que analizan los sucesos resultantes de

T I

SIMULADOR BWR

CENTRAL DE REFERENCIA:	CN COFRENTES
FABRICANTE	SINGER LINK
CONFIGURACION	2 ORDENADORES GOULD 32/55 (1.5 MIPS)
INFORMATICA:	50 KB memoria compartida
	1 MB memoria principal
	1 Disco 80 MB
COMPUTADOR DE PROCESOS:	SIMULACION DEL COMPUTADOR DE PLANTA (200 SEÑALES ANALOGICAS Y 100 DIGITALES)
INTERFASE:	MANETAS : 985
	LUCES : 4.100
	CONTROLADORAS : 84
	INDICADORES REGISTRADORES : 553
CONSOLA DEL INSTRUCTOR:	MALFUNCIONES : 183
	CONDICIONES INICIALES : 60
	PARAMETROS CONTROLADOS : 15
	FUNCIONES REMOTAS : 80
	TIEMPO RAPIDO (X10) Y LENTO (X0.1)

- Experiencia acumulada en la operación de simuladores por las empresas explotadoras.

- Condicionamientos requeridos para ofrecer los más avanzados programas de entrenamiento para el personal con licencia.

- Necesidades actuales y futuras de los planes de formación.

Estos criterios imponen unos requisitos de consistencia, precisión, operación y alcance propiamente dicho.

Tomando en consideración únicamente las necesidades de los futuros planes de formación, el simulador deberá representar adecuadamente:

- Operaciones normales.
- Transitorios operacionales.
- Accidentes, incluyendo las correspondientes acciones mitigadoras y de recuperación.
- Aplicación de las nuevas guías de los procedimientos para emergencias.

cambios, tanto en la notación como en el caudal refrigerante del reactor. El disparo del reactor o el movimiento de barras de control pertenecen a esta categoría de sucesos. Este tipo de transitorios puede ser perfectamente simulado con un modelo monofásico, como sucede en el estado estacionario.

En el circuito secundario se necesita una modelación de un fluido bifásico, tanto en condiciones estacionarias como transitorias. Fenómenos tales como la circulación natural de la mezcla bifásica causada por variaciones en la fracción de huecos, vapor sobrecalentado por descubrimiento de tubos del Generador de Vapor y caudales críticos a través de fugas son característicos del tratamiento de flujo bifásico. El disparo de turbina, la pérdida de agua de alimentación, cierre de las válvulas principales de vapor, y roturas y fugas en las líneas de vapor y agua de alimentación, constituyen escenarios

FAG

FAG

Strahlen-Meßtechnik
System Friesseke

UN PROGRAMA COMPLETO AL SERVICIO DE LA DETECCION Y CONTROL DE LA RADIACION

DOSIMETRIA

AUTORAD FHT-3900



MONITORES DE RADIACION

RADIAMETRO FH-40F



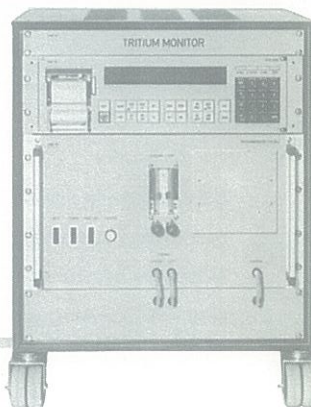
MONITORES DE CONTAMINACION

CONTAMAT FHT-111 E/C



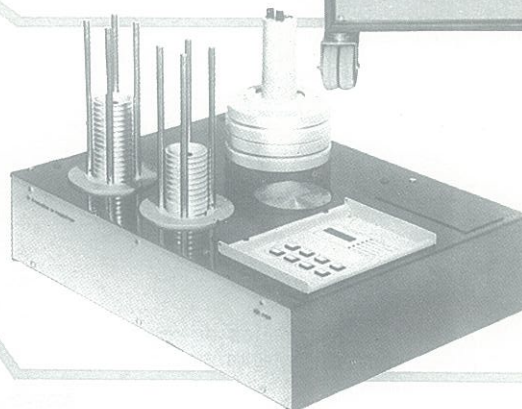
DETECCION EN EL AIRE Y EN EL AGUA

MONITOR DE TRITIO FHT-63



EQUIPOS DE LABORATORIO

DETECTOR FHT 770 M



ELECTRONICA ASOCIADA

MULTICANAL FHT-7000

**TECTORES
EAMPLIFICADORES
EDIDORES DE PARTICULAS SOLIDAS EN EL AIRE...**



IAS NIETO, S.A.

34 BARCELONA Gran Via Carlos III, 140
(93) 203 27 08 - Telex 53986 - Telefax (93) 204 58 53
28008 MADRID Quintana, 23 Teléfono (91) 241 93 67

T II

Fenómenos físicos	SS	TRIP	SLB LFW	SBLOCA	MBLOCA	ATWS
Circulación natural monofásica	--	++	++	++	--	++
Circulación natural bifásica	--	--	--	++	--	++
GV como fuente de calor para el primario	--	--	--	++	++	--
Condensación-reflujo en GV	--	--	--	++	--	--
Limitación del flujo en contracorriente en el extremo superior del núcleo	--	--	--	+	++	--
Limitación del flujo en contracorriente en el anillo de bajada	--	--	--	--	++	--
Enfriamiento local del primario	--	--	++	--	--	--
Condensación en el presionador	+	+	++	--	--	--
Circulación en secundario GV	++	+	-	-	--	--
Descubrimiento de tubos GV	--	--	++	--	--	--
Separación de fases por gravedad	--	--	--	++	--	++
Rellenado	--	--	--	--	++	--
Arrastre en el núcleo	--	--	--	--	++	--
Flujo bifásico en convección forzada (bombas principales de refrigerante en funcionamiento)	--	--	--	++	--	++
Sobrecalentamiento del núcleo	--	--	--	++	++	+
Sobrecalentamiento de vapor	--	--	--	++	++	--
Enfriamiento brusco del núcleo	--	--	--	+	++	--
Ondas de densidad en el líquido	--	--	--	--	++	--
Ondas de densidad en el vapor del secundario	--	+	-	--	--	--
Condensación en el acumulador	--	--	--	+	++	--
Control de presión en presionador	++	++	++	--	--	+
Efecto de huecos en la reactividad	--	--	--	--	+	++
Efectos del sello del lazo primario	--	--	--	++	+	+
Oxidación del zirconio	--	--	--	+	++	--

++ = muy significativo.

+ = significativo.

SS = estado estacionario.

SLB = rotura de la línea de vapor.

MBLOCA = pérdida de refrigerante primario rotura media (7 %-25 %).

LFW = pérdida de agua de alimentación.

-- = no significativo.

--- = no relevante en el suceso.

TRIP = disparo del reactor, movimiento barras de control, disparo de bomba.

SBLOCA = pérdida de refrigerante primario por pequeña rotura (0-7 %).

LBLOCA = pérdida de refrigerante primario gran rotura (25 %2 x 100 %).

ATWS = transitorios con fallo del disparo del reactor.

típicos incluidos en los planes de formación que incorporan la fenomenología anteriormente citada.

Los transitorios de pérdida de refrigerante del reactor, en sus diversas versiones: fugas, roturas de tamaño medio y grandes roturas, incorporan la fenomenología de flujos bifásicos al sistema de refrigeración del reactor, donde simplificaciones mínimas pueden limitar drásticamente el alcance del modelo.

En esta línea de estudio fenomenológico se ha de prestar especial atención, en pequeñas roturas, a condiciones tales como el disparo y arranque de bombas principales, que provocan efectos de funcionamiento con un contenido importante de vapor, separación de fases por efecto de la gravedad con sellado de posibles caminos para el refrigerante, flujo crítico en fugas, etc. En roturas de tamaño medio, las fases son parcialmente separadas como

consecuencia de la gravedad; sin embargo, en las inmediaciones de estas roturas se alcanzan velocidades elevadas del fluido que lo hacen más homogéneo, y donde las fuerzas interfaciales tienen una gran importancia, pues determinan la proporción de la mezcla cuyos efectos y acciones a medio plazo en la evolución del transitorio dependen de la misma. Dependiendo de la localización de la rotura, este fenómeno puede tener consideraciones espaciales apreciables; por ello, la característica tridimensional del modelo ya aparece en este tipo de transitorios. Las roturas de gran tamaño aportan fenómenos tales como vaciado y posterior reinundación del núcleo, mediante el sistema de refrigeración de emergencia del mismo y una serie de escenarios desde el punto de vista de regímenes de transmisión de calor, que son objeto de una mayor investigación dentro del campo de la seguridad nuclear.

En los transitorios anticipados sin actuación del sistema de protección del reactor, normalmente conocidos por ATWS, donde una reducción de la potencia del reactor se produce por la elevada fracción de huecos en el núcleo derivado de las altas temperaturas del combustible, y su influencia en el cómputo total de reactividad, es fundamental la modelación de dicho núcleo, acoplado adecuadamente a la termohidráulica.

Independiente de consideraciones puramente nucleares, como son los accidentes de caída de barras o la evolución espacio-temporal de venenos de fisión, el modelo nuclear debe contemplar, de un modo preciso, el cálculo del flujo neutrónico ante inserciones bruscas de reactividad, derivadas de la vaporización o del colapso de huecos, fenómenos ambos de naturaleza termohidráulica típica. Esta interacción se pone de manifiesto de nuevo en la modelación de los fallos de vaina de combustible, debido a sobrepasar el Límite de Ebullición Nucleada, y su correspondiente escape de productos de fisión del combustible, así como la oxidación de las mismas, con la subsiguiente generación de hidrógeno y su transporte a la contención.

SELECCION DEL MODELO TERMOHIDRAULICO

Como consecuencia de los fenómenos anteriormente expuestos de modo resumido, el modelo hidrodinámico deberá contemplar el tratamiento del fenómeno de flujo bifásico en el sistema primario del reactor, incorporando un modelo de flujo no homogéneo con deslizamiento dinámico y no equilibrio térmico. El carácter de desequilibrio térmico será aplicable al presionador y generador de vapor, en un principio,

estando abierta la posibilidad de extensión al resto del circuito primario.

El sistema de refrigeración se representa, fundamentalmente, mediante una red de elementos básicos tales como:

- Conductos, volúmenes o celdas hidrodinámicas con resolución de las ecuaciones unidimensionales de circulación del refrigerante.
- Nudos que constituyen las uniones de los volúmenes anteriores.

El modelo debe incluir el tratamiento de circulación forzada o natural, con inversión de flujo. La operación de las bombas del primario en condiciones degradadas por formación de vapor será un aspecto importante, así como el cálculo de flujo crítico "mejor estimado" a través de válvulas de alivio y roturas (la Fig. 1 muestra el esquema del modelo completo con diversos puntos origen de anomalías o incidentes simulables). El modelo del generador de vapor describirá el comportamiento termohidráulico de un generador de vapor de tubos en U, con posibilidad de estudiar el fenómeno de convección natural; incluirá la sección de transmisión de calor (tubos en U), el plenum superior con separadores de vapor, *down-comer*, agua de alimentación y el sistema de extracción de vapor que contempla las diferentes válvulas existentes y el baipás de turbina.

Dicho modelo será nodal, incluyendo flujo bifásico con deslizamiento dinámico y correlaciones de transmisión de calor para los diversos regímenes de flujo (Sieder-Tate, Thom, etc.).

Actualmente existe una amplia variedad de modelos termohidráulicos, a partir de los cuales podrían escogerse los requisitos de alcance previamente citados.

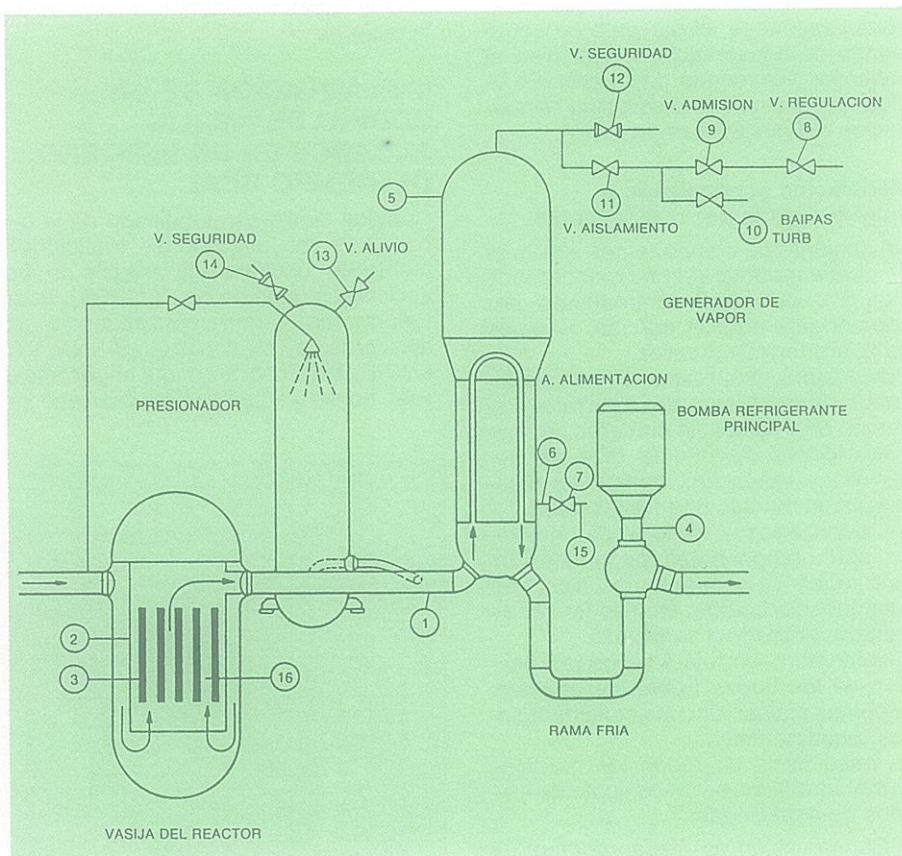
No obstante, independientemente de las opciones de las bases físicas del modelo, existen otras consideraciones intrínsecas al código que pueden facilitar y flexibilizar el uso del mismo, especialmente en el dominio del tiempo real y en un entorno donde los cambios y modificaciones son frecuentes.

Dentro de este conjunto de consideraciones podemos indicar:

- Grado de detalle espacial.
- Topología libre, flexible y fija.
- Nodalización fija, flexible o adaptable.
- Modelación generalizada o individualizada por componentes.

Grado de detalle espacial

Los análisis más conservadores nos indican un número mínimo de 70 nodos para representar el circuito refrigerante del reactor. Por otra parte, la modelación termohidráulica avanzada exige la resolución de un conjunto amplio de ecuaciones diferenciales en cada nodo. Ambos factores suponen un in-



F Esquema del modelo PWR con localización de diversos incidentes.

cremento vertiginoso del cálculo, a medida que la complejidad de la resolución de las ecuaciones y el número de nodos aumentan. Evidentemente, este factor va en contraposición con las capacidades de cálculo de los computadores existentes. Sin embargo, esta limitación no elimina la necesidad existente de simular efectos en dos o tres dimensiones, según veíamos en el apartado anterior.

Se hace necesaria la selección de un código con determinados componentes tridimensionales, como la vasija, amén de otros monodimensionales como los segmentos de tubería, o conexiones entre las mismas.

Topología libre, flexible o fija

La topología fija se refiere a un código diseñado para una configuración de una red o malla específica, mientras que la topología libre se refiere a un código diseñado para manejar cualquier configuración. Mientras que los códigos de topología fija (como los aplicados en algunos simuladores de entrenamiento) representan una solución aceptable para pequeñas redes (pocos nodos), los códigos de topología libre requieren un gran esfuerzo de diseño y altas capacidades de cálculo debido

al uso extensivo de matrices y vectores.

La topología flexible supone una aproximación intermedia entre ambas. En esencia, el nivel de libertad para definir configuraciones viene limitado a aquel requerido para acomodar un conjunto de redes típicas para el tipo de aplicación.

Estas topologías flexibles tienen la ventaja de su aplicación a un conjunto de volúmenes, relacionando entre ellos propiedades comunes (por ejemplo, la presión), definiendo de este modo un bloque o componente básico de la red. En el dominio de la simulación en tiempo real, esta alternativa ofrece grandes ventajas, especialmente en relación con la disminución en el tiempo de cálculo requerido.

Nodalización fija o adaptable

Esta adaptación se refiere a la capacidad de un código para cambiar de un modo dinámico los volúmenes que representan, de un modo discreto, una red. Esta característica se aplica en regiones de alta densidad de volúmenes, donde el estado de un fluido puede estar sometido a variaciones bruscas y verificar detalles con una precisión determinada.

Una nodalización dinámica complica, apreciablemente, el conjunto de ecuaciones de conservación a resolver, al variar los volúmenes de control. Es típica en fenómenos tales como reinundación del núcleo tras un LOCA.

Modelación generalizada o individualizada por componentes

Un conjunto de componentes similares se puede modelar de una manera individual o genérica, entendiendo por componente aquella porción o equipo de la red termohidráulica.

Obviamente, la aproximación de modelación individualizada neutraliza el tiempo de cálculo; sin embargo, es menos efectiva durante la fase de desarrollo y validación, donde los cambios en el modelo son frecuentes.

Se recomienda la elección de un código con componentes genéricos. De este modo un componente único (válvula, tubería, bomba, etc.) deber ser diseñado, probado y verificado.

Finalmente, y en relación con la selección de las bases físicas del modelo, podemos indicar algunas consideraciones fundamentales.

La base física de todos los modelos termohidráulicos es un conjunto de tres tipos de ecuaciones:

- Conservación de masa, momento y energía.
- Correlaciones necesarias para soportar las ecuaciones de conservación. Incluyen los coeficientes de transferencia de calor, fricciones, etc., asociados a la interacción entre el fluido y el medio, y entre las fases del fluido.
- Ecuaciones de estado del fluido.

"El problema termohidráulico" consiste en definir en cada instante el estado de la mezcla bifásica del fluido. La tabla III muestra los diversos modelos disponibles, según el número de ecuaciones de conservación utilizadas. A mayor número de ecuaciones, se puede obtener mayor grado de información.

Suponiendo que la presión fases sea la misma en ambas, se necesitan seis variables independientes para definir el estado de la mezcla.

Por ejemplo:

- Entalpia específica del líquido.
- Entalpia específica del vapor.
- Velocidad del líquido.
- Velocidad del vapor.
- Presión.
- Fracción de huecos.

La principal desventaja del modelo de seis ecuaciones consiste en el elevado número de correlaciones, así como su naturaleza, que se necesita para definirlo, derivada de la incertidumbre en su obtención y medición experimental. Como conclusión de este estudio de opciones se procedió a seleccionar un

código cuyas características figuran en la tabla III.

IMPLANTACION DE UN CODIGO DE AMPLIO ALCANCE EN UN ENTORNO DE TIEMPO REAL

Códigos similares al indicado en la tabla IV venían utilizándose tradicionalmente en funciones de análisis de los accidentes base de diseño (DBA). Posteriormente, y como consecuencia del accidente de TMI-II y otros (GINNA, ST. LUCIE, etc.), cobraron una importancia vital, no sólo aquellos aspectos que in-

este modo, la elevada precisión, el amplio alcance y el alto grado de validación de dichos códigos podrían constituir un beneficio incalculable para los simuladores de entrenamiento. En esta línea de trabajo podemos mencionar los esfuerzos de instituciones tales como Laboratorios Nacionales de los Estados Unidos (LANL, INEL y BNL) el Comisariado de la Energía Atómica Francés (CEA) en combinación con EDF y Thomson, KWU con GRS en Alemania y Tecnatom con General Electric en España.

Podríamos resumir que existen tres objetivos básicos en los programas de

T III								
MODELO	Ecuaciones constitutivas					Restricciones		
	(Correlaciones)				TOTAL	Tk	vr	TOTAL
	Fw	Fi	Qw	Qi				
3C:1M.1K.1E	1	0	1	0	2	2	1	3
4C:2M.1K.1E	1	0	1	1	3	1	1	2
4C:1M.2K.1E	2	1	1	1	5	2	0	2
4C:1M.1K.2E	1	0	2	2	5	1	1	2
5C:1M.2K.2E	2	1	2	2	7	1	0	1
5C:2M.1K.2E	1	0	2	2	5	0	1	1
5C:2M.2K.1E	2	1	1	1	5	1	0	1
6C:2M.2K.2E	2	1	2	2	7	0	0	0

NOMENCLATURA:

cC: mM, kK, eE: c = n.º total de ecuaciones de conservación.
m = n.º ecuaciones de conservación de masa.
k = ídem de momento.
e = ídem de energía.

Fw: Fricción con paredes.

Fi: Fricción entre fases.

Qw: Flujo de calor a través de paredes.

Qi: Flujo de calor entre fases.

Tk: Temperatura fluido/entalpia específica.

vr: Velocidad relativa entre fluidos.

cidian en el circuito refrigerante del reactor, sino la cinética del núcleo, el secundario (BOP) y los controles asociados. Las funciones de análisis se vieron ampliadas con las de predicción, diseño y verificación de procedimientos.

Estos códigos, tales como TRAC-PF1, TRAC-BD1, RELAP-5/MOD2 y RETRAN-02, requieren la utilización de grandes computadores científicos y, a pesar de ello, todavía no son capaces de ofrecer respuestas cercanas al tiempo real, al menos en algunos escenarios de interés.

Ante esta perspectiva, un conjunto de instituciones y empresas han comenzado un camino de desarrollo e investigación orientado a adaptar los códigos de diseño existentes en un entorno de simulación en tiempo real. De

investigación y desarrollo que se llevan a cabo: disminución drástica de los tiempos de ejecución, establecimiento de una interfase hombre-código ágil e interactiva y abaratamiento de los sistemas de cálculo requeridos hasta la actualidad.

Dentro de las investigaciones que se están llevando a cabo para reducir los tiempos de ejecución podemos enumerar las siguientes:

- Minimización del manejo de datos: los códigos, originalmente desarrollados para ordenadores CDC con muy poca memoria residente, presentan un manejo de datos que, trabajando con los ordenadores actuales (de gran memoria central), es muy posible minimizar.
- Sustitución de correlaciones por tablas: las correlaciones utilizadas ne-

cesitan calcular funciones algebraicas complejas que consumen una gran cantidad de tiempo de cálculo.

- La sustitución de estas correlaciones por una búsqueda optimizada en tablas permite reducir, de forma sustancial, el tiempo de cálculo.
- Iteraciones selectivas: dentro del proceso de resolución iterativo, existen una serie de cálculos que se pueden extraer del citado proceso (iterativo), beneficiándose por tanto el tiempo de ejecución.
- Partición del código: esta tarea consiste en fraccionar el código en dos o más programas independientes, que puedan ser ejecutados en multiproceso.
- Vectorización del proceso de cálculo que puede permitir usar eficientemente todas las capacidades de cálculo vectorial que se prevén en los ordenadores futuros.
- Posibilidad de ejecución con paso de tiempo relativamente alto (0,25 segundos) que dependerá de la facilidad de modificación de los métodos numéricos empleados.

Este tipo de simuladores avanzados deben incorporar estaciones gráficas que permitan actuar sobre los modelos en cuestión, de un modo independiente del resto de la estructura clásica de los simuladores. Estas estaciones, autónomas o incorporadas al computador principal, según la arquitectura y sistema gráfico escogido, deben, por tanto,

ejercer un conjunto reducido de funciones del simulador (arranque, parada, detención, iniciación de anomalías, etc.), permitir introducir las acciones del operador, introducir datos o parámetros a modelos y producir una salida gráfica de la información completa y ágil. De esta forma, se facilitan las labores de puesta a punto (verificación, validez y corrección de anomalías). Finalmente, y dentro del capítulo de análisis de la configuración, es obvio que el computador requerido es función directa del mínimo tiempo de ejecución del código alcanzado mediante las técnicas de reducción anteriormente mencionadas.

No obstante, es en este capítulo donde los avances de las ciencias de la computación están produciendo un desplazamiento del centro de gravedad entre los constructores de computadores de alto rendimiento hacia un punto todavía no ajustado. Este segmento del mercado, junto a otros similares, como son: el análisis estructural, las simulaciones aerodinámicas, hidrodinámica, geológica, meteorológica y molecular, y el procesamiento de imágenes, entre otros, conforman un modelo de computador científico, de ámbito departamental, gran facilidad de conexión a otros entornos de conjunto, tanto convencionales como de procesos, así como un robusto conjunto de librerías gráficas.

En estos momentos asistimos a una

carrera contra reloj entre los constructores de superminis, procesadores paralelos de alto rendimiento y supercomputadores científicos para incorporar o dominar estos importantes segmentos del mercado.

La tabla V muestra un resumen del rendimiento de algunos sistemas mono-procesadores en la resolución de un sistema de ecuaciones diferenciales de orden 100, con precisión completa (64 BITS) y programado en lenguaje FORTRAN. La referencia [1] contiene un detallado estudio sobre los resultados de dicho programa de pruebas realizado el pasado mes de octubre. No obstante, la espectacularidad de estos datos puede sufrir importantes variaciones dependiendo de la naturaleza del problema o programa a probar. Así, factores tales como que un código fraccionable puede ser ejecutado en un entorno multiprocesador, que el sistema operativo puede optimizar la ejecución paralela de instrucciones, o que exista un metalenguaje de reconocimiento optimizado de estructuras vectorizables pueden dividir los tiempos de ejecución en un factor de 10 ante dos computadores con ciclo de tiempo escalar semejante.

Evidentemente, existe un límite tecnológico que es el ciclo de tiempo escalar del computador y que hoy oscila entre los 8.5 ns para los sistemas refrigerados por nitrógeno líquido y los 19 ns para aquellos refrigerados por aire. Sin embargo, no es difícil predecir una sustancial disminución, debido a los importantes avances que la física de los semiconductores está experimentando. A este respecto, la figura II, muestra los ciclos previsibles con diversas tecnologías, según muestra el trabajo de Tushar R. GHEEWALA que se menciona en la referencia [2]. En consecuencia, nos encontramos ante el umbral, para los próximos años noventa, de los 2.000 MFLOPS escalares, ampliables a un rango entre los 2.000 y 4.000 vectoriales; es decir, potencias del orden de 10 veces superiores a las actuales.

CONCLUSIONES

Analizadas las características del alcance y precisión que los simuladores de entrenamiento incorporarán a la conclusión de los actuales proyectos de investigación y desarrollo, podemos afirmar que se podrán utilizar como instrumentos para:

- Adiestramiento básico:
 - Operaciones normales.
 - Incidentes operativos habituales (disparos, etc.).
 - Accidentes, incluyendo organización del equipo humano y uso de los procedimientos de operación en emergencias (EOP).
- Adiestramiento avanzado:

T IV

ALCANCE: Análisis de transitorios tanto operacionales como transitorios severos, tales como LOCA's o ATW's, con y sin despresurización.

MODELOS:

- Neutrónico: 3-D con realimentación espacial.
- Transferencia de calor: Transmisión de calor 1-D en vainas y estructuras en toda la curva de regímenes de transmisión, incluyendo calor de radiación.
- Modelo hidráulico:
 - Modelo bifásico de 7 ecuaciones (masa y energía para vapor y líquido y masa para el aire).
 - Correlaciones constitutivas para fricción y transmisión de calor entre fases, en función de cada régimen de flujo.
 - Modelo 3-D para la vasija.
- Métodos numéricos: Método implícito de dos pasos que permita violar el límite de Courant.

COMPONENTES:

Vasija: 3-D (coordenadas cilíndricas) con separadores de vapor y bomba jet.

Características código simulador

- Pipe (Tubería): 1-D, con número arbitrario de celdas.
- Tee (unión): 1-D, con número arbitrario de celdas en cada rama.
- Válvula: Componente «pipe» modificado.
- Channel: Componente «teed» modificado para modelar la fuga de caudal al baipás.
- Fill: Condición de contorno (Velocidad).
- Break: Condición de contorno (Presión).
- Control: Capacidad para modelar elementos sumadores, integradores, adelantos, retrasos, etc.

- Comprensión y aplicación de EOPs.
- Comprensión y análisis de incidentes operativos reales (GINNA, TMI, etc.).

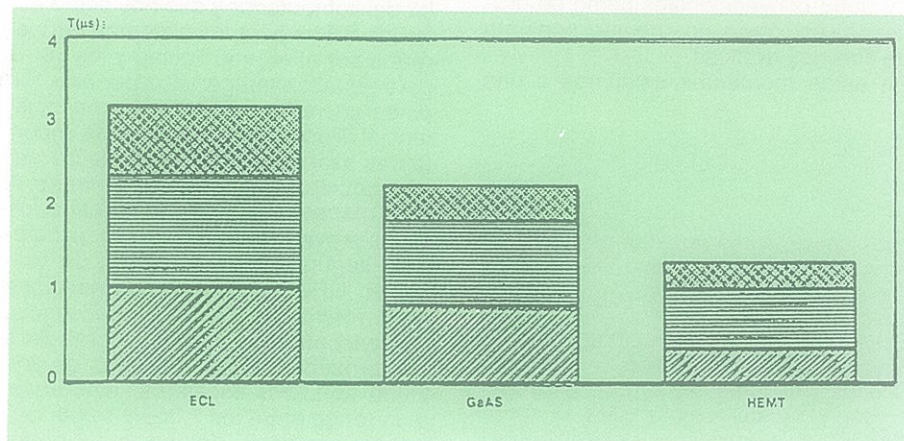
con menor cantidad de información.

- Validación y mejora de:
 - Contenido y formato de las EOPs y de operación normal.

T V

Computador	OS/Compilador	Razón	MFLOPS
ETA 10-E	ETA V/FTN200 (Rolled BLAS)	0.22	56
NEC SX-2	FORTTRAN 77/SX (Rolled BLAS)	0.28	43
CRAY X-MP-4 (1 proc. 8.5 ns)	CFT 77 1.2 (Rolled BLAS)	0.32	39
ETA 10-P	ETA V/FTN200 (Rolled BLAS)	0.50	25
NAS AS/XL V60	VAST/VS 1.4.1 opt = 3	0.58	21
Amdahi 1200	Fortran 77 (Rolled BLAS)	0.69	18
CDC Cyber 205 (2-pipe)	FTN (Rolled BLAS)	0.70	17
Fujitsu VP-200	Fortran 77 (Rolled BLAS)	0.72	17
Siemens H120F	Fortran 77 (Rolled BLAS)	0.83	15
CRAY-1S	CFT (Rolled BLAS)	1	12
DEC VAX 8550/8700/8800	VMS v4.5	13	0.97
Gould 32/9705 mult acc	Fort77 + 4.3	31	0.39
VAX 11 80 FPA	VMS v4.5	88	0.14
Micro VAX II	VMS v4.5	94	0.13

(Fuente: Jack J. Dongarra: "Performance of Various Computer Using Standard Linear Equations Software in a Fortran Environment", 9-X-87.)



F II

- Recalificación:
 - Entrenamiento conjunto del equipo humano ante escenarios altamente complicados o situaciones degradadas.
- Adiestramiento de equipos humanos de respuesta ante crisis:
 - Ejercitar y comprobar la conjunción de equipos humanos de crisis ante unas condiciones operacionales reales. Estos ejercicios suponen la simulación de los escenarios más severos, más amplios en tiempo y
 - Contenido y formato de los procedimientos de vigilancia.

- Contenido y formato del panel de parada remota.
- Desarrollo de nuevos métodos de diagnóstico para nuevos accidentes e incidentes que se postulan.
- Nuevas estrategias de operación.
- Pruebas modificaciones.

REFERENCIAS

- (1) ARGONNE NATIONAL LABORATORY.
Linear Equations Software in a Fortran Environment.

Performance of Various Computers Using Standard.

Jack J. Dongarra.

Mathematics and Computer Science Division

Technical Memorandum N.º 23.
October 9, 1987

- (2) GIGABIT LOGIC, 1984
TUSHAR R. GHEEWALA.
- (3) TRESTA: UN PROGRAMA DE SIMULACION DE PROPOSITO GENERAL CON APLICACION A TRANSITORIOS EN CENTRALES NUCLEARES.
J. M. IZQUIERDO ROCHA; J. HORTAL REYMUNDO.
I. VECI MARRODAN; J. PEREZ SANZ.
F. PELAYO LOSCERTALES; M. SANCHEZ PEREA.
Revista SNE, octubre 1987.
- (4) *Application of Nuclear Plant Analyzers.*
Friedrich Bennewitz.
Kraftwerk Union, Erlangen, Germany.
- (5) *International Nuclear Power Plant. Thermal Hydraulic and Operations Topical Meeting.*
October 22-24, 1984 Taipei, Taiwan.
Plant Analyzer: Its Purpose and Configuration.
Eric Kuang-Hua Lin, Chian-Li Jen (Singer Company).
Stanislav Fabic, Peter Andersen (Dynatek).
- (6) *Advanced Modeling of Power Plant Simulators.*
K. H. Lin, C. L. Jen, S. Fabic, P. S. Andersen.
Int. Conf. on Simulation for Nucl. Reactor Technology, Cambridge, U.K., April 1984.
- (7) P. S. Andersen and S. Fabic.
Theoretical Foundation of an Advanced Simulation Method For Power Plant Thermohydraulics.
Int. Conf. on Simulation For Nucl. Reactor Technology. Cambridge, U.K. April 1984.
- (8) INTERNATIONAL DATA CORPORATION.
Technical Computing.
Volume 1, Number 15
19 October 1987
Donald C. Bellomy, Analyst.
617/872-8200, ext. 336.
IDC.
- (9) *Proceedings of the Third International Topical Meeting on Reactor Thermal Hydraulics.*
Newport, Rhode Island.
USA.
October 15-18, 1985.
Keynote: S. Fabic.
Thermal Hydraulics in Nuclear Plant Simulators.
Author: S. Fabic (DI).