

ANALISIS DE TRANSITORIOS: OBJETIVOS, METODOS Y REALIZACION

W. FRISCH y J. E. MIRO

RESUMEN

La aplicación de grandes programas de ordenador al análisis de transitorios en reactores nucleares es una labor fundamental en los distintos campos nucleares: diseño, licenciamiento, explotación. Este artículo pretende, después de hacer una introducción sobre el tema, aclarar algunos conceptos y plasmar la experiencia acumulada en nuestro grupo de trabajo que se dedica al desarrollo y aplicación de métodos de cálculo para el análisis de transitorios.

DEFINICION Y SIGNIFICADO DE LOS TRANSITORIOS

En seguridad nuclear se definen los transitorios como desviaciones del estado estacionario debidas al fallo de algún componente activo y que requieren la actuación de sistemas mitigadores de control o de seguridad.

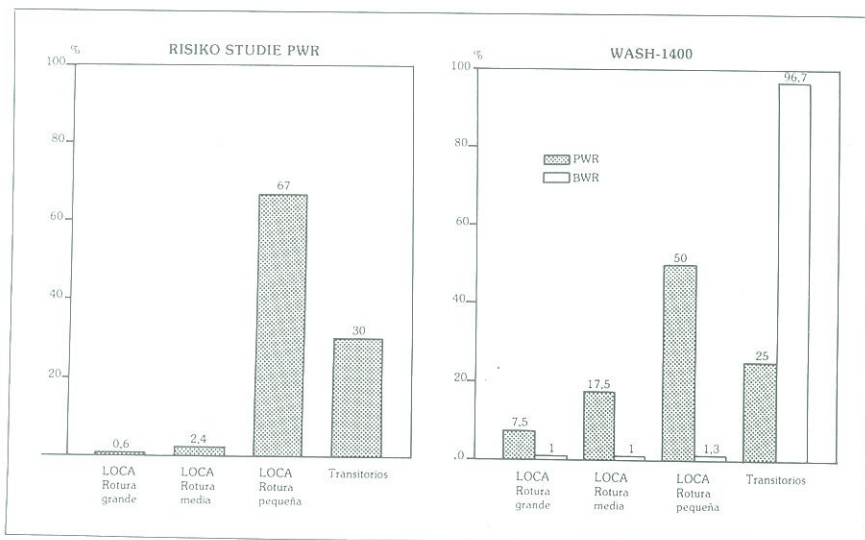
Los transitorios se pueden clasificar de muchas maneras, según el aspecto de ellos que se considere en primer plano. No existe una clasificación universal y la terminología utilizada en la literatura anglosajona diverge, por ejemplo, de la que se encuentra en la germana. No se va a dar aquí, pues, una clasificación general de los transitorios sino que se va a concretar el tipo de transitorio objeto de este estudio, el cual se va a limitar a reactores de agua ligera (PWR y BWR). Se pretende incluir tanto los transitorios previsible como los anormales en el amplio sentido de la palabra, es decir, tanto los transitorios, cuya ocurrencia puede esperarse en el transcurso de la vida de una central, como aquellos que pueden ser calificados de incidentes poco frecuentes y acciden-

tes. La interacción entre los procesos nucleares, los procesos termohidráulicos y los sistemas de control y seguridad es el objeto fundamental de estudio dentro de esta temática sin tener en cuenta en general la dinámica estructural, por constituir ésta una rama separada en el campo del análisis de transitorios.

Al hablar de transitorios es general el suponer que la barrera primaria de presión permanece intacta, quedando excluidos pues de este concepto los accidentes con pérdida de refrigerante (LOCA). La diferenciación entre transitorios y sucesos con pérdida de refrigerante es de origen histórico y obedece al hecho de que mientras los transitorios están caracterizados por la combinación de procesos físicos (neutrónicos, fluidodinámicos, termodinámicos) con acciones de diversos sistemas (control y protección, seguridad), los accidentes con grandes roturas están dominados por fenómenos termohidráulicos y la acción de algunos sistemas de refrigeración de emergencia. Los transitorios con pérdida de refrigerante a través de las válvulas del presionador o con pequeña rotura en el circuito primario (v.g. rotura de tubos en el generador de vapor) se sitúan en la zona límite entre transitorios y accidentes con pérdida de refrigerante, requiriendo métodos de análisis propios de ambas categorías.

Aunque la importancia de los transitorios frente a los accidentes con rotura grande y mediana ha sido reconocida hace ya algún tiempo en el campo de la seguridad nuclear, es instructivo el analizar los resultados de los estudios probabilísticos de riesgos (véase Fig. 1). En un PWR los transitorios aportan el 30 % y el 25 % de la probabilidad de fusión del núcleo, de

FI Probabilidad de fusión del núcleo de un reactor según estudios probabilísticos de riesgos.



acuerdo con el Risiko Studie y el Wash-1400 respectivamente (1). En un BWR alcanzan los transitorios incluso el 96,7 % de dicha probabilidad. La contribución de los transitorios al riesgo total ha sido analizada también para algunas centrales concretas (2).

OBJETIVOS DEL ESTUDIO DE TRANSITORIOS

Los transitorios pueden ser analizados desde varios puntos de vista y persiguiendo fines diversos. Siguiendo cronológicamente la concepción y la vida de una central hay que comenzar con el diseño. Durante esta fase el análisis de transitorios ayuda a garantizar el funcionamiento seguro y eficiente de la central incluso en condiciones anormales y bajo la influencia de perturbaciones.

La optimización de diseño no sólo aumenta la seguridad sino que mejora la respuesta de la planta frente a perturbaciones, consiguiéndose así un mayor rendimiento. Como ejemplos de metas de la optimización pueden citarse la minimización de la frecuencia de parada rápida y de apertura de las válvulas primarias y secundarias (3) y la obtención de grados de quemado altos del combustible. En la RFA, la optimización del diseño ha llevado a la instalación de sistemas limitadores, que tienen una función intermedia entre los sistemas de control y los sistemas de seguridad, haciendo innecesarias las intervenciones de estos últimos en determinadas ocasiones. Por ejemplo, en las centrales alemanas, en caso de producirse un disparo de la turbina, la reducción de la potencia al 30 % evita la parada rápida del reactor y la apertura de las válvulas del presionador y del generador de vapor (sólo queda abierta la desviación de la turbina).

En la fase de licenciamiento, el análisis de transitorios tiene la finalidad de que las autoridades licenciadoras puedan comprobar mediante cálculos propios o ajenos (en la RFA las autoridades utilizan códigos distintos a los de los fabricantes) que se cumplen los requisitos de seguridad especificados en la normativa vigente. En la Tabla I puede verse una lista con los tran-

sitorios típicos analizados en un informe de seguridad estándar alemán para un PWR. En la Tabla II se incluye una lista de los transitorios ATWS a tener en cuenta, aunque dichos ATWS no pertenecen a la categoría de accidentes básicos de diseño.

El análisis de transitorios sirve también como base a estudios probabilísticos de

análisis realizados puede encontrarse en (4).

La supervisión por parte de las autoridades de la operación de una central requiere también el poder analizar los incidentes ocurridos en la misma. Para ello puede ser necesario hacer cálculos basados en el informe del explotador de dicha central y en las medidas registradas en la misma. De esta manera puede reconstruirse el suceso y comprobar la actuación de los distintos sistemas de protección y seguridad así como analizar las consecuencias de los posibles fallos adicionales. Con la información obtenida de esta manera puede comprobarse la efectividad de las instrucciones de operación y de las acciones concretas destinadas a mitigar el incidente.

El análisis de transitorios puede realizarse también en el marco de los llamados simuladores. Dichos simuladores pueden clasificarse en varios grupos. Un tipo de simuladores lo constituyen aquellos que se utilizan exclusivamente para la formación del personal operador de centrales nucleares. Estos simuladores, llamados de entrenamiento, incluyen todos los sistemas fundamentales de la central teniendo en cuenta los de control y protección. Sin embargo, la simulación termohidráulica suele ser simple y la de los componentes sencilla, no ofreciendo la exactitud necesaria en la representación de fenómenos complejos que pueden tener lugar durante transitorios de gran amplitud o con rotura pequeña. Estos simuladores deben representar el transcurso de los procesos en tiempo real.

Otro tipo de simuladores es el llamado simulador de sistemas o analizador de central (systems simulator, plant analyzer). Bajo este concepto se esconden programas avanzados de cálculo que cubren con un alcance de simulación elevado todo tipo de transitorios con y sin pérdida de refrigerante (rotura grande, mediana y pequeña), y a los cuales se les ha dotado de una elevada velocidad de cálculo para poder simular fenómenos en tiempo real o por debajo de él. La característica que la diferencia de los programas de cálculo propiamente dichos es la posibilidad de interacción, que tiene el usuario de los mismos. Así, mientras el simulador está realizando cálculos, el usuario puede variar las condiciones de contorno y simular perturbaciones o fallos en los distintos componentes y sistemas, siendo posible simular las acciones de un supuesto operador que estuviese a cargo de la central durante el incidente postulado. Para facilitar esta interacción, se dota a estos simuladores de pantallas gráficas que de una manera dinámica representan el curso de las variables durante el transitorio. Estos simuladores pueden utilizarse para el adiestramiento de operadores de centrales o también para el análisis de transitorios donde la posibilidad de interacción juegue un papel importante. Una de las aplicaciones que se pretende potenciar en la actualidad es instalar estos supersimuladores en la sala de control de una cen-

T II TRANSITORIOS PARA EL ANALISIS DE ATWS EN PWR

- Pérdida del sumidero de calor principal.
- Pérdida del sumidero de calor principal con pérdida de la tensión en la red.
- Incremento máximo de carga.
- Reducción máxima del caudal de alimentación.
- Reducción máxima del caudal primario.
- Inserción máxima de reactividad positiva.
- Apertura de una válvula del presionador.
- Reducción máxima de la temperatura en el primario, debida al fallo del sistema de alimentación.

fiabilidad y de riesgos señalando la secuencia necesaria de actuación de los diversos sistemas para evitar que los parámetros de la central alcancen valores que lleven a una situación insegura. Mediante dicho análisis tienen que estudiarse las consecuencias del fallo total o parcial de los distintos sistemas limitadores o de seguridad.

Durante la operación de la central, los métodos propios del análisis de transitorios pueden servir para optimizar el funcionamiento de la misma. Así, por ejemplo, el ajuste preciso de los valores consignados de los sistemas de control permite una operación óptima respecto de los límites de seguridad, evitando así la actuación de sistemas de seguridad con el consiguiente aumento de la disponibilidad de la central y disminución de riesgos. Los análisis de transitorios pueden también servir para revisar y optimizar instrucciones contenidas en los manuales de operación. Un ejemplo es el estudio de la problemática de la parada de las bombas de circulación durante un accidente con rotura pequeña. La parada de las bombas, según el tipo de central y el diámetro de la rotura, puede ser beneficiosa, evitando una pérdida mayor de refrigerante, o puede ser perjudicial, al empeorarse la extracción de calor en el núcleo. Para aclarar esta cuestión se realizaron cálculos teniendo en cuenta las características concretas de distintos tipos de centrales y circunstancias del transitorio. Uno de los

T I TRANSITORIOS TÍPICOS CONSIDERADOS EN UN INFORME DE SEGURIDAD STANDAR ALEMAN PARA PWR

- Funcionamiento normal (variación de la carga)
- Funcionamiento anormal (disparo de la turbina)
- Perturbaciones y accidentes:
 - Perturbaciones en la reactividad (introducción de barras de control)
 - Perturbaciones en la evacuación de calor (fallo del autosuministro eléctrico)
- Fallo de sistema de parada rápida (ATWS).

tral e introducirlos como entrada señales procedentes de las mediciones de las distintas variables de la misma. Las predicciones de los simuladores pueden compararse, de una manera continua, con las mediciones de procesos que está teniendo lugar. De esta comparación pueden derivarse diagnósticos sobre la operación de la central. Más problemática parece la idea de que en caso de un incidente en la central, el supervisor de operación pudiese obtener del simulador un pronóstico sobre el transcurso futuro de dicho incidente bajo el supuesto de diversas acciones encaminadas a mitigarlo.

MÉTODOS PARA EL ANÁLISIS DE TRANSITORIOS

El análisis de transitorios se suele realizar con la ayuda de programas de cálculo para ordenador —integrados o no en un simulador—, los cuales tratan de reproducir con un grado mayor o menor de detalle la respuesta de algunos —o de la mayoría— de los sistemas principales en reactores nucleares (5). Basta pasar revista a las últimas publicaciones sobre análisis de transitorios en reactores de agua ligera para encontrar decenas de nombres correspondientes a códigos de cálculo desarrollados por institutos estatales, fabricantes de centrales o explotadores de las mismas en varios países del mundo (6). Es evidente que estos programas no sirven todos para realizar el mismo tipo de cálculos sino que tienen cada uno su campo concreto de aplicación dentro del tema general de los transitorios. Incluso aquellos programas que cubren el mismo campo pueden utilizar distintos métodos y partir de diferentes supuestos para la simulación, aunque se puede hablar de metodologías comunes a grupos de códigos.

Según el alcance de la simulación, podemos distinguir modelos de componentes o subsistemas como pueden ser los modelos de canal de refrigeración o los modelos de núcleo que simulan los fenómenos neutrónicos y termohidráulicos que tienen lugar en su seno. Las condiciones de contorno de estos modelos son parámetros del circuito primario que no son objeto de simulación sino que son establecidos por el usuario del código correspondiente. Otros modelos simulan los sistemas principales del circuito primario (y del secundario en un PWR) pudiendo incluir además el sistema de control y protección y la actuación del sistema de seguridad. Hay códigos que integran varios modelos parciales independientes o modelos parciales detallados dentro de otros más generales, para obtener una simulación detallada y a la vez de gran alcance.

Hay modelos desarrollados específicamente para un tipo de reactor concreto (reactores de agua a presión o de agua en ebullición) o para un fabricante concreto (Westinghouse, KWU etc...). Hay códigos que pueden simular diversos tipos de reactor y diversas configuraciones mediante la combinación adecuada de módulos universales.

Según el tipo de transitorios para los que los modelos hayan sido previstos se distinguen códigos para transitorios sin y con pérdida de refrigerante. Esta distinción se basa en el hecho de que la simulación de unos y otros presenta requisitos distintos. Mientras que para el análisis de transitorios sin rotura es importante una simulación detallada de los principales componentes y sistemas de control, para la simulación de accidentes con rotura grande sólo algunos sistemas juegan un papel importante, siendo fundamental un modelo termohidráulico muy elaborado. En los códigos modernos esta distinción se ha difuminado mucho, habiéndose desarrollado códigos para transitorios y pequeñas roturas (modelos termohidráulicos más sofisticados). También, algunos códigos, originalmente desarrollados para el cálculo de grandes roturas, han incorporado la posibilidad de simulación de sistemas para poder cubrir completamente el campo de los transitorios.

Otras distinciones entre los diversos programas de cálculo provienen de las hipótesis que se hacen para simular los fenómenos físicos y de las técnicas numéricas empleadas.

MODELOS DE NEUTRONICA

La simulación neutrónica puede encuadrarse dentro de modelos de canal de refrigerante, modelos de núcleo o modelos globales de planta. Es general resolver las ecuaciones de difusión neutrónica pudiendo hacerse en 0,1,2 ó 3 dimensiones. Los modelos de núcleo tridimensionales ofrecen la posibilidad de estudiar las distribuciones axiales y radiales de flujo neutrónico y las densidades de potencia locales y su relación con la disposición de las barras de control y sus movimientos. En los modelos de núcleo hay que acoplar un modelo termohidráulico al modelo de cinética neutrónica para poder tener en cuenta las realimentaciones derivadas del refrigerante. En los modelos de planta se suelen utilizar las representaciones puntuales y monodimensionales para simular el núcleo, con el objeto de aumentar la velocidad de cálculo. Los modelos puntuales de cinética neutrónica suelen dar buenos resultados en la estimación de los parámetros globales del núcleo en la mayoría de los transitorios, si se parte de la base de coeficientes de realimentación acertados. Sin embargo, en reactores de agua en ebullición, donde la distribución axial de flujo neutrónico es muy sensible a las variaciones en el refrigerante y en general cuando los transitorios sean de gran amplitud sin que se produzca la parada rápida, puede estar justificada la representación de una o más dimensiones.

Modelos termohidráulicos

Es obvio que en los estudios sobre transitorios en una central nuclear, la simulación de la termohidráulica es fundamental. Para esto, se aplican las ecuaciones

de continuidad, de conservación de la energía y de la cantidad de movimiento de forma diferencial o integral a un volumen de control ocupado por refrigerante. Esto puede hacerse considerando 0,1,2 ó 3 dimensiones. Las opciones puntual y monodimensional son las más utilizadas en el análisis de transitorios pues en general constituyen una buena aproximación de los fenómenos que tienen lugar en un lazo de un reactor, en el que existe una dirección predominante de circulación. Además las representaciones multidimensionales suelen aumentar enormemente el tiempo de computación y con ello el coste. Esto estará justificado para el núcleo del reactor cuando se quieran estudiar con detalle los parámetros locales del mismo.

La simulación de un fluido monofásico (agua subenfriada) no representa dificultad en el plano teórico. No puede decirse lo mismo de los flujos bifásicos (agua con vapor), en el estudio de los cuales se han ocupado muchos investigadores en las últimas décadas (7). Los aspectos más problemáticos se encuentran en la interacción entre ambas fases, por medio de la cual se transmiten masa, energía y cantidad de movimiento. Dicha interacción depende además del régimen de flujo (flujo de burbujas, flujo anular, etc). Muchos experimentos y ensayos han sido realizados en este campo, habiéndose derivado de ellos numerosas relaciones empíricas para estimar otros tantos parámetros importantes en la simulación del flujo bifásico. En los casos en que no existen expresiones analíticas para describir un proceso, hay que tener en cuenta el alcance de la validez de las correlaciones empíricas. Además de las dificultades de tipo teórico hay dificultades de tipo numérico derivadas de la heterogeneidad de la mezcla y de las discontinuidades que representan los cambios de fase (8).

Para poder evadir estas dificultades se pueden adoptar algunas hipótesis que simplifiquen el tratamiento. Una de las más utilizadas consiste en suponer que el agua y el vapor constituyen una mezcla homogénea, esto implica que el agua y el vapor se desplazan con la misma velocidad. Otra hipótesis frecuentemente utilizada es suponer que ambas fases están en equilibrio termodinámico, es decir, a la misma temperatura, que será la temperatura de saturación en este caso. El modelo que contiene ambas hipótesis es conocido como homogéneo en equilibrio. En el otro extremo de la complejidad se encuentra la modelación de los dos fluidos, agua y vapor, por separado (two-fluid model). En este caso se aplican las ecuaciones de conservación por separado a ambas fases. Estas ecuaciones contienen términos que representan la interacción con la otra fase (rozamiento, condensación, evaporación, etc.). Entre el modelo de los dos fluidos y el modelo homogéneo en equilibrio existe una serie de variaciones intermedias (dynamic slip, drift-flux) las cuales realzan la simulación de algunos fenómenos frente a los otros (9), lo cual viene impuesto por una parte por el tipo de transitorio a

analizar, por otra, por la necesidad de buscar soluciones eficientes que reduzcan al mínimo necesario los costes y la complejidad del tratamiento.

MÉTODOS NUMÉRICOS

El sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (espacio y tiempo), resultante de la aplicación de las ecuaciones de conservación junto con las hipótesis consideradas, debe ser resuelto de una manera eficiente mediante técnicas numéricas apropiadas.

Primero hay que efectuar una discretización espacial y dividir el dominio a tratar en intervalos o volúmenes de control. Para transformar las ecuaciones diferenciales en ecuaciones en diferencias, el método más utilizado es el de las diferencias finitas, aunque hay programas que utilizan aproximaciones polinómicas, permitiendo utilizar intervalos más grandes. La integración temporal se puede realizar mediante técnicas explícitas o implícitas. Las primeras son más sencillas y requieren menos tiempo de ordenador para un paso de integración, pero están sujetas a un intervalo de tiempo de integración relativamente pequeño debido a los márgenes impuestos por las leyes de estabilidad. Las técnicas implícitas no están sujetas a límites de estabilidad pero pueden requerir tiempos de computación prohibitivos en caso de tener que integrar sistemas grandes de ecuaciones. Debido a estas consideraciones, algunos programas de cálculo utilizan técnicas del tipo mixto implícito-explicito, buscando una combinación óptima.

REQUISITOS QUE DEBEN CUMPLIR LOS PROGRAMAS DE CÁLCULO PARA TRANSITORIOS

La primera cualidad que se espera de un programa de cálculo es que pueda reproducir con exactitud los procesos dentro del campo de aplicación para el que ha sido desarrollado. Debido a las simplificaciones que contienen todos los programas, esta exactitud no será absoluta. En primer lugar no es posible simular exactamente todos los fenómenos físicos, puesto que algunos de ellos sólo se conocen de manera aproximada (v.g. transición entre los distintos regímenes bifásicos). Incluso si esto fuese posible, las aproximaciones derivadas de las técnicas numéricas son suficientes para producir errores considerables. En cualquier caso es obvio que la exactitud puede mejorarse aumentando el esfuerzo en la simulación (10).

Si se quieren simular de una manera realista los transitorios que tienen lugar en un reactor, habrá que simular todos los sistemas que intervienen durante dicho transitorio. Del mayor o menor grado de detalle en la simulación de un componente o de un sistema dependerá la mejor o peor representación de la actuación del mismo.

Cuando los programas de cálculo, hayan de ser utilizados para realizar un número elevado de cálculos (v.g. estudios de optimización del diseño) o cuando los cálculos cubran períodos de tiempo largos (cálculos de pequeñas roturas), la velocidad de cálculo será una característica muy importante para poder mantener los costes del estudio en niveles asequibles. Cuando el programa sea utilizado como base de un simulador, entonces será imprescindible que se calcule por debajo del tiempo real.

Otra característica muy importante de los códigos de cálculo es la facilidad en su manejo, sobre todo si han de ser utilizados por personas distintas a las que lo desarrollaron. La facilidad de manejo consiste entre otras cosas en que los datos de entrada sean fácilmente obtenibles a partir de los datos de la central, en que sea sencillo el escoger entre las distintas opciones, en que se compruebe la coherencia de los datos de entrada y se advierta al usuario de sus errores, en que los resultados sean presentados de una manera eficiente, y en general en todo aquello que favorezca la interacción entre el usuario y el código.

Cuanto más exacta y detallada sea la simulación en un programa de cálculo, menores serán su velocidad de cálculo y su sencillez. Dicho de otra manera, no pueden potenciarse a la vez todas las cualidades de un código, pues algunas de ellas son incompatibles entre sí. Según los objetivos que se persigan con la utilización del código (licenciamiento, optimización de la operación, estudios de seguridad) y el tipo de cálculos a realizar (transitorios operacionales, grandes LOCA, pequeñas roturas, etc.), habrá que escoger el código que cumpla los requisitos correspondientes.

APLICACIÓN DE CÓDIGOS AL CÁLCULO DE TRANSITORIOS

La utilización de un programa completo de cálculo y su aplicación afortunada al análisis de transitorios requieren del usuario una serie de competencias que se encuentran lejos de la trivialidad. En primer lugar, aunque parezca obvio, se requiere la comprensión de los fenómenos físicos que tienen lugar en la central (neutrónica, termohidráulica, técnica de medición y de control). Además hay que conocer el programa de cálculo a fondo para utilizarlo de una manera óptima y para poder tener en cuenta el rango de validez de los modelos físicos y de las hipótesis contenidas en él. Esto puede conseguirse mediante una comunicación estrecha con el responsable del desarrollo del código y requiere un período de adiestramiento en el manejo y comprensión del mismo. Si el código se aplica al cálculo de transitorios en una central concreta, habrá que conocer en detalle el funcionamiento de los distintos sistemas de control, protección y seguridad, así como las características y

peculiaridades de la misma. La obtención de una documentación actualizada y completa conteniendo los datos de la central requerirá la colaboración del fabricante y del explotador de la misma. Por último, dependiendo del tipo de análisis a realizar, habrá que hacer las hipótesis correctas sobre el estado de partida y funcionamiento de los distintos sistemas (por ejemplo, condiciones iniciales pesimistas en cálculos de licenciamiento).

Los análisis de los incidentes ocurridos en centrales nucleares, realizadas por las autoridades responsables de la supervisión del funcionamiento de instalaciones nucleares pueden requerir la realización de cálculos. Para ello se necesitan programas de cálculo eficientes y se precisa disponer rápidamente de los datos de la central para no retrasar de una manera innecesaria la decisión sobre una posible parada o puesta en marcha. En este sentido, es de una gran ayuda disponer de un banco de datos donde se encuentren registrados los datos de todas las centrales existentes y de donde se pueda extraer de una manera sencilla y fiable la entrada necesaria para un código de cálculo.

VERIFICACIÓN DE LOS PROGRAMAS DE CÁLCULO PARA TRANSITORIOS

Es evidente que antes de que un código de cálculo pueda ser utilizado de manera fiable, es preciso realizar una verificación del mismo frente a datos experimentales. Debido a lo poco frecuente de los transitorios severos en centrales nucleares, no existen medidas con las que contrastar los resultados numéricos para la mayoría de los transitorios considerados. La verificación frente a mediciones en centrales se limita a las pruebas de puesta en marcha y a algunos transitorios e incidentes registrados.

Para completar el campo de la verificación, se recurre a ensayos en instalaciones de pequeña escala que están concebidas para la evaluación de fenómenos aislados (CANON, FRIGG) o para experimentos sobre el comportamiento integral de la

T III

PLANTA EXPERIMENTAL LOFT (LOSS OF FLUID TEST FACILITY)

- Modelo a escala volumétrica 1:62 de un PWR Westinghouse (Trojan) de 1.000 MW.
- Un lazo activo con generador de vapor y bomba; un lazo roto para simulación de roturas.
- Generación nuclear de energía mediante 1.300 barras combustibles (1,67 m. de altura).
- Simulación de los principales sistemas PWR.
- Instrumentación exhaustiva en el circuito primario, pero insuficiente en el secundario.

central bajo perturbaciones típicas de centrales nucleares (LOBI, LOFT, ROSA IV, etc.). En las Tablas III y IV se muestran las características principales de las centrales para ensayos experimentales más importantes en el campo de los transitorios (11) y (12).

T IV

PLANTA EXPERIMENTAL LOBI (LOOP BLOWDOWN INVESTIGATION)

- Modelo a escala de un PWR KWU de 1.300 MW; volumen, potencia: 1:712; presión, temperaturas y alturas: escala 1:1.
- Dos lazos activos con generador de vapor y bomba de circulación, representando tres lazos intactos y uno roto resp.
- Núcleo con 64 barras calentadas eléctricamente.
- Simulación de turbina, condensador, sistemas de refrigeración de emergencia, válvulas de alivio.
- Instrumentación adicional en el secundario.

BIBLIOGRAFIA

- (1) Bundesministerium für Forschung und Technologie. *Deutsche Risiko-*

studie Kernkraftwerke. Verlag TÜV Rheinland, 1979.

- (2) Garrick B.J, Bier V.M. *The risk of transients according to probabilistic risk assessment (PRA)*. Meeting on Anticipated and Abnormal Plant Transients in LWR. Jackson Hole (USA), septiembre 1983.
- (3) R. Meißner, T. Voggerberger. *Optimization of new PWR-plants with respect to incident behaviour*. ANS/ENS 1984 International Conference. Washington (USA), noviembre 1984.
- (4) J.R. Ireland. *The effects of early pump trip on the time-to-core uncover for TMI-type accident*. ANS Specialists Meeting on Small Break Loss-of-Coolant Accident. Monterey (USA), agosto 1981.
- (5) W. Frisch, J.E. Miró. *Métodos desarrollados por la GRS para el cálculo de transitorios en reactores de agua ligera*. Energía Nuclear, Número 147, enero-febrero 1984.
- (6) D. Majumdar. *Nuclear Power Plant Transients: Where are we?*. Department of Energy. Washington D.C., mayo 1984.
- (7) G. Hetsroni. *Handbook of Multiphase Systems*. McGraw Hill Book Co. 1982.
- (8) U. Graf, J. E. Miró, A. Schaefer, W. Werner. *Application of a Discontinuity-Tracking-Technique to Transient Thermal-Hydraulics Analysis*. Sec. International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermohydraulics. Santa Barbara (USA), enero 1983.
- (9) M. Ishii. *Foundation of various two-phase flow models and their limitations*. Simulation Methods for Nuclear Power Systems. EPRI WS-81-2121, Proceedings, mayo 1981.
- (10) W. Frisch. *Simulation of Transients in Light Water Reactors: Desire and Reality*. 10th IMACS World Congress on System Simulation and Scientific Computation. Montreal (Canadá), agosto 1982.
- (11) D.L. Reeder. *LOFT System and Test Description*. (5.5th Nuclear Core 1 LOCEs). NUREG/CR-0247, TREE-1208, July 1978.
- (12) W.L. Riebold, A. Amendola, T.R. Fortescue, H. Staedtke, A. Annunziato, B. Lisanti. *Use of LOBI Test Facility for Plant Transients Simulation Meeting on Anticipated and Abnormal Plant Transients in Light Water Reactors*. Jackson Hole (USA), septiembre 1983.



CSN

CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR

Las Guías de Seguridad contienen los métodos recomendados por el CSN, desde el punto de vista de la seguridad nuclear y protección radiológica, y su finalidad es orientar y facilitar a los usuarios la aplicación de la Reglamentación nuclear española vigente

COLECCION GUIAS DE SEGURIDAD DEL CSN

GUIAS PUBLICADAS

GS-7.1/85 Requisitos Técnico-administrativos para los servicios de Dosimetría Personal Individual.

150 ptas.

GS-10.1/85 Guía básica de Garantía de Calidad para Instalaciones nucleares.

100 ptas.

Pedidos contra reembolso:
HABILITACION - CONSEJO
DE SEGURIDAD NUCLEAR
Sor Angela de la Cruz, 3
28020 MADRID
Tlf. 456 18 12