

DESARROLLO E IMPLANTACIÓN DEL CÓDIGO SIMTRAN-EL PARA VIGILANCIA Y PREDICCIÓN EN LÍNEA DE NÚCLEOS PWR

J.M. ARAGONÉS - C. AHNERT - D. MARTÍNEZ - J. SALADIE - P. MORENO - M. MARTÍN

ANTECEDENTES

El Sistema Español de Análisis de Núcleos de Agua a Presión (SEANAP), fué validado¹ con el diseño y medidas de unos 60 ciclos de operación de 6 reactores PWR en España. Se basa en códigos y métodos de desarrollo propio²⁻⁴, siguiendo una evolución que se resume en la tabla I.

I. EVOLUCION DEL SEANAP

Sistema Español Análisis Núcleos Agua a Presión

SEANAP (PIE, 87-89)

- Optimización de Recargas y Gestión del Combustible
- Análisis del Diseño Nuclear
- Validado en 60 Ciclos de 6 Centrales Españolas

SIMTRAN (PIE, 90-92)

- Análisis de Transitorios del Núcleo
- Análisis de Maniobras Operacionales
- Validado en Benchmark Internacional (NEA/NSC)
- Transitorio de Aumento de Caudal en C.N.V. Ciclo 4,

SIMTRAN-EL/PIE (PIE, 93-94)

- Vigilancia en Línea del Núcleo
- Predicción de Maniobras Operacionales
- Prognosis y Diagnosis de Transitorios
- Implantado en C.N. Vandellós II (Junio 1994).

Dentro del Proyecto de Investigación del PIE, realizado en 1990-92, sobre Métodos Avanzados de Análisis Nuclear (MAAN), se desarrolló el código SIMTRAN⁵ para el análisis acoplado neutrónico-termohidráulico de núcleos de agua a presión en estado estacionario y transitorios lentos (de Xenon) y rápidos. Este código se validó positivamente con los Benchmark⁶ del NEA/NSC de expulsión de barras de control y con el análisis del transitorio de aumento de caudal ocurrido en el ciclo 4 de Vandellós⁵.

Partiendo de este producto, se ha desarrollado en el período 1993-94 otro Proyecto de Investigación del PIE, con titularidad de ENDESA y realizado conjuntamente por ANV, DENIM-UPM y

PMSA, para la vigilancia y análisis en línea de núcleos de agua a presión, con su primera implantación y prueba en la C.N. Vandellós-II. El Proyecto ha incluido las actividades de desarrollo y validación de modelos neutrónicos-termohidráulicos, dirigidos principalmente a modelar la instrumentación neutrónica y termohidráulica "incore" y "excore", y a facilitar la simulación continua en línea, con adquisición de las variables medidas relevantes para la vigilancia del núcleo, y las simulaciones paralelas para predicción y análisis de maniobras, calibraciones, proyección del ciclo, transitorios y oscilaciones.

Las especificaciones del Proyecto y las adicionales desarrolladas por la dirección técnica de ANV a lo largo de su realización, para la vigilancia y predicción en-línea del núcleo con alcance y detalle completos, exceden con mucho a las de los códigos de vigilancia de núcleos PWR actualmente disponibles comercialmente, tales como CECOR⁷, BEACON⁸, o POWERTRAX⁹.

En este artículo, resumimos los resultados del desarrollo de los modelos y su validación. También se resumen las interfases maquina-usuario, con conexión en-línea al ordenador de proceso de C.N. Vandellós y visualización actualizada de las variables medidas y calculadas, para facilitar las funciones de vigilancia y predicción. Se resumirán, finalmente, las capacidades funcionales del código SIMTRAN-EL, para vigilancia y predicción de núcleos PWR, y sus cualidades demostradas, como conclusión de las experiencias y resultados de su implantación y utilización en la C.N. Vandellós-II, desde el arranque del ciclo 7 en mediados de junio de 1994.

DESARROLLO DE MODELOS INTEGRADOS NEUTRÓNICOS Y TERMOHIDRÁULICOS

Los modelos desarrollados se resumen en la tabla II. Su alcance y metodología,

José M^a ARAGONÉS, Catedrático de Física Nuclear y Director del Departamento de Ingeniería Nuclear de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

Carolina AHNERT, Profesora Titular de Tecnología Nuclear en la ETS de Ingenieros Navales de la UPM.

David MARTÍNEZ, Licenciado en Ciencias Físicas y Jefe de Tecnología Nuclear e Informática de la Central Nuclear de Vandellós-II (CNV).

Juan SALADIE, Licenciado en Informática y responsable de informática en CNV.

Pablo MORENO, Doctor Ingeniero Industrial y Director General de PMSA.

Mariano MARTÍN, Licenciado en Ciencias Físicas, trabaja en desarrollo y aplicaciones termohidráulicas en PMSA.

II. DESARROLLO de MODELOS

NEUTRÓNICOS

- Modelización Axial Variable con Rejillas
- Factores Nodales Integrales del Ciclo
- Modelización Cámaras Excore
- Modelización Minidetectores Incore
- Control de Asimetría Axial y Estabilidad del Xenon

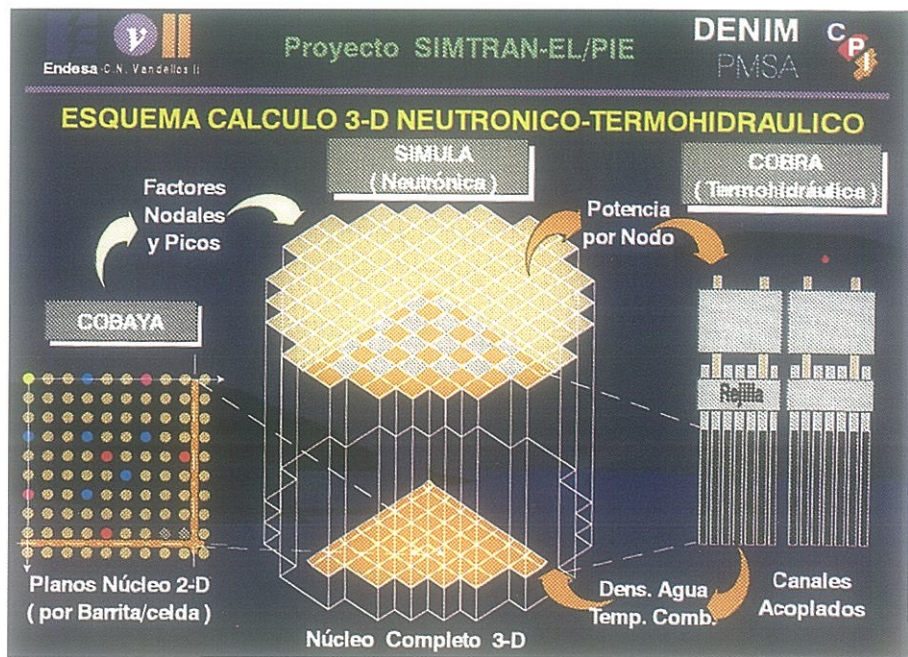
TERMOHIDRÁULICOS

- Modelización de Termopares y Canales Variables
- Distribución Caudales Lazos/Canales
- Subcanales Críticos Embebidos en Núcleo
- Modelización de Oscilaciones del Primario

que se han descrito en un artículo técnico especializado¹⁰, se resumen a continuación.

El código SIMTRAN-EL ha sido mejorado y extendido, en sus componentes neutrónicas (SIMULA), termohidráulicas (COBRA) y de acoplamiento (figura I), para obtener una modelización más exacta y detallada en estado estacionario y en transitorios; al tiempo que completa y automática, en el sentido de disponer de las bases de datos integradas para todas las condiciones de operación a lo largo del ciclo, y de autoejecutarse periódicamente actualizando las condiciones adquiridas en línea y las soluciones tridimensionales correspondientes, sin intervención del usuario. Se han extendido los canales hasta los cabezales de los elementos combustibles, con características variables con la altura, para tratar los efectos de mezcla en las temperaturas de los termopares. La distribución del refrigerante en los anillos reflectores de la vasija y a la entrada de los canales combustibles se calcula por un reparto empírico de los caudales y entalpías de entrada a vasija por cada lazo (ramas frías).

También se han extendido los mode-



F I

los y bases de datos para la determinación de las tasas de reacción en las minicámaras de fisión intranucleares y su comparación sistemática en 3-D con las trazas normalizadas de los mapas de flujo medidos (INCORE). Las diferencias entre las tasas medidas y calculadas, para los mapas de flujo más recientes, se suavizan y extrapolan de forma secular, para su aplicación a la autocalibración de las distribuciones 3-D de potencia calculadas, de forma opcional.

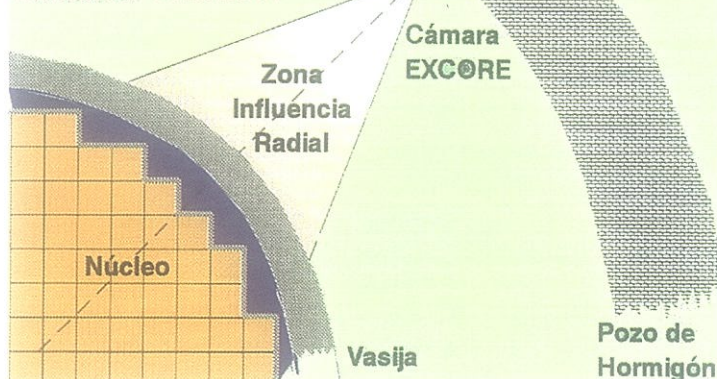
La modelización de la respuesta de las cámaras excore del rango de potencia se ha desarrollado mediante matrices de respuesta genéricas, que transforman las fugas neutrónicas del núcleo, en 3-D, en respuestas de los detectores. La atenuación neutrónica

en las estructuras y anillos reflectores de la vasija, se ha calculado tridimensionalmente (figuras II y III) por técnicas de trazado de rayos, con reflexiones en el pozo de hormigón de la vasija y secciones eficaces de atenuación calculadas por transporte 1-D en 24-grupos y geometría cilíndrica. La figura IV recoge la atenuación efectiva del flujo neutrónico colapsado a dos grupos, rápido y térmico, donde se observan los efectos de los anillos reflectores de agua (variable con las temperaturas de entrada a la vasija) y de reflexión en las paredes del pozo de la vasija.

El control de la asimetría axial de potencia se realiza en PWR a través de la diferencia de las corrientes medidas en las secciones superiores e

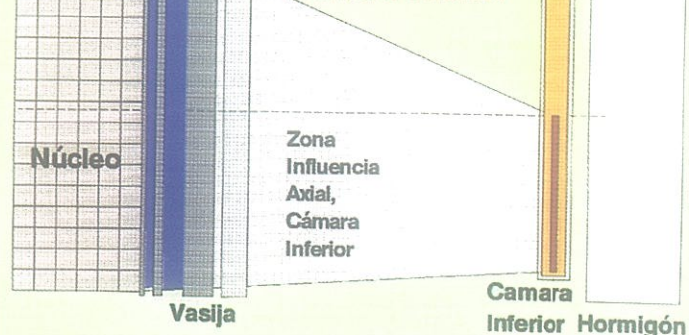
F II

Sección Horizontal del Núcleo, Vasija y Cámaras EXCORE

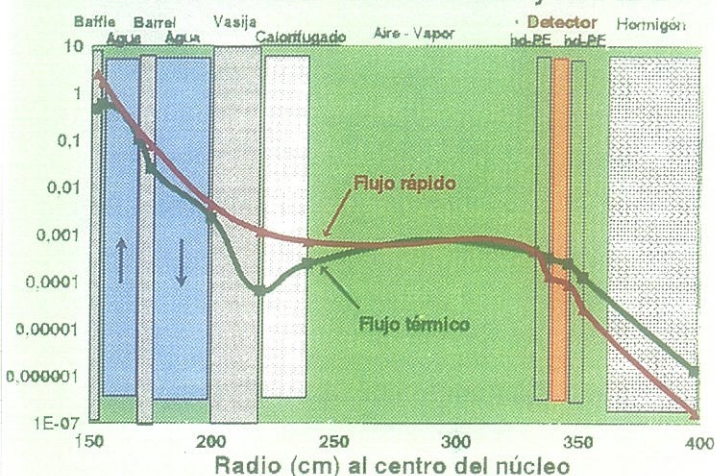


F III

Sección Vertical del Núcleo, Vasija y Cámara Inferior

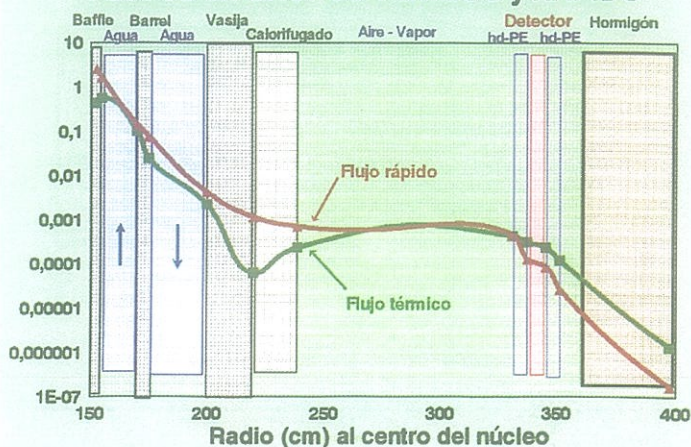


FLUJOS en GRUPOS TERMICO y RAPIDO



F IV

FLUJOS en GRUPOS TERMICO y RAPIDO



F V

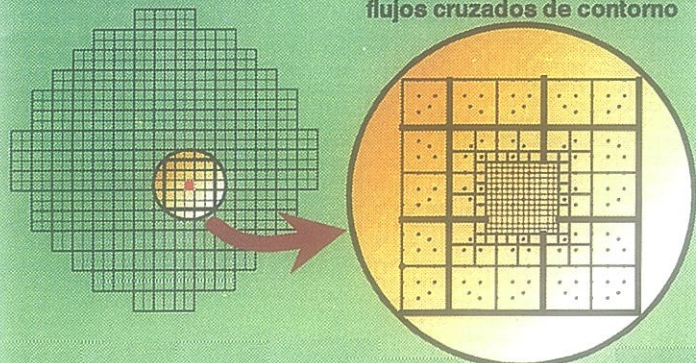
F VI

F VII

Esquema de Generación de la malla embebida

Núcleo Completo
4 Canales/Elemento

Subcanales Individuales
entorno canal/nodo crítico
flujos cruzados de contorno



Dif. A.O. (%) SIMTRAN - Medido INCORE



inferiores de las cámaras *excore*, que se relaciona con el "axial offset (*incore*)", mediante una calibración cruzada durante una oscilación axial de potencia inducida durante el arranque del ciclo (al 75 %), que debe revisarse con cada mapa de flujo mensual. De ahí que el simulador en-línea deba calcular fielmente no solo la distribución intranuclear 3-D de potencia, sino también las respuestas en las 8 cámaras *excore* de potencia, como se mostrará en el apartado de validación. SIMTRAN-EL realiza búsquedas automáticas de la inserción del control, y boro crítico correspondiente, para lograr que la asimetría axial sea lo más próxima posible al objetivo nominal, en las predicciones de maniobras operacionales. La asimetría axial de potencia en PWR está influida fuertemente por la del Xenon, con oscilaciones libres divergentes al final del ciclo,

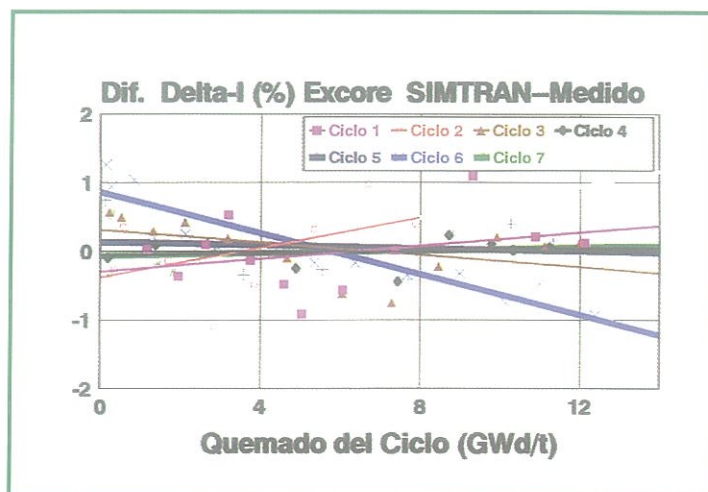
por lo que la vigilancia de la estabilidad axial del Xenon permite detectar el inicio de oscilaciones e indicar las acciones correctoras en el momento y sentido oportunos. SIMTRAN-EL calcula en 3-D las concentraciones del ^{135}I y ^{135}Xe y su derivada temporal instantánea, suministrando en-línea el diagrama modal de evolución de la asimetría axial del Xenon, junto con el de la asimetría axial de potencia, y acotando el espacio y sentido de las actuaciones correctoras (figura V).

El análisis embebido de los subcanales acoplados, en torno al más caliente, se ha desarrollado mediante un cálculo en paralelo de COBRA con las condiciones de contorno de flujos cruzados y potencias 3-D nodales y por barra combustible, obtenidas de SIMTRAN-EL para el núcleo completo, con 4 canales por elemento com-

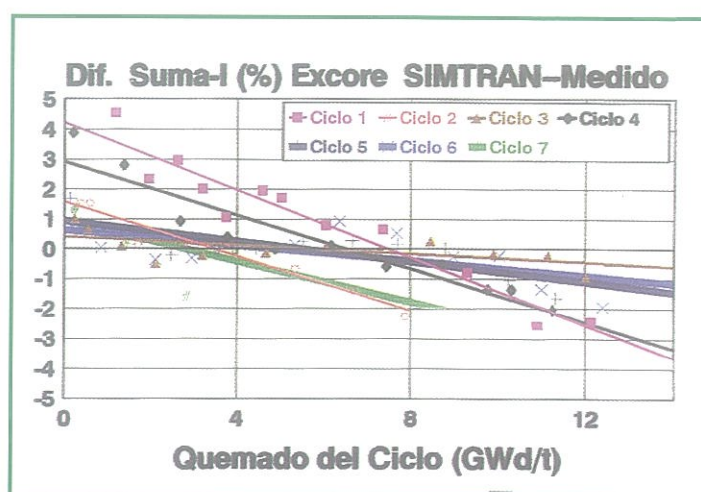
III. RESULTADOS DE VALIDACION

- **Benchmarks Internacionales:** Potencias por Barra y Expulsiones de Barras de Control
- **Transitorio Real:** Aumento de Caudal en V-4
- **Pruebas Arranque:** Ciclos 1 a 7 de CNV
- **Prueba CTM:** Respuesta *Excores* a EOC-6
- **Mapas Incore:** 84 Mapas Ciclos 1 a 7
- **Vigilancia en Línea:** Ciclo 7 de CNV.

bustible (figura VI). Este análisis detallado proporciona los factores de pico y márgenes térmicos (DNBr y temperaturas máximas del combustible y vaina) de forma detallada "best-estimate".



F VIII



F IX

IV. Desarrollo e Integración de las Interfases Máquina-Usuario

Interfase de Adquisición de Datos :

- Variables del Núcleo Medidas
- Del Ordenador de Proceso por Red Local
- Adquisición/Análisis cada 15 segundos
- Ejecución de SIMTRAN-EL cada 5 minutos

Interfase Gráfica de Usuario :

- Selección de Opciones y Datos mínimos
- Gráficos de Resultados de SIMTRAN-EL y de Variables Medidas.

V. Modos de Operación de SIMTRAN-EL

- Vigilancia en Línea (ETF + Xenon)
- Calibraciones de Instrumentación
- Análisis de Mapas de Flujo Incorre
- Evaluación de Márgenes Térmicos (DNBR)
- Seguimiento y Proyección Nominal del Ciclo
- Predicción de Maniobras Operacionales
- Diagnóstico y Pronóstico de Transitorios

RESULTADOS DE VALIDACIÓN

La mayor parte de las actividades de modelización del núcleo de ANV y de validación y análisis, han sido realizadas y contrastadas con las medidas y pruebas de todos los ciclos previos, especialmente el ciclo 6 último, con resultados muy extensos y positivos. Con la implantación en línea del modo de vigilancia regular y automática desde el arranque del ciclo 7 y la puesta a punto y operación rutinaria de los otros modos de operación a lo

largo del ciclo, se ha extendido la base de datos de validación y análisis, al tiempo que se ha desarrollado una positiva experiencia de utilización. Un resumen de los resultados de validación obtenidos se recoge en la tabla III.

Una parte importante del trabajo de validación se ha dedicado a calificar los cálculos de la asimetría axial de potencia intranuclear y de las corrientes en las cámaras *excore*. La figura VII recoge las diferencias entre SIMTRAN-EL y las medidas, procesadas con el código INCORE, para el *Axial Offset* (A.O.) de potencia en todos los mapas de flujo a potencia nominal medidos en los Ciclos 3 a 6 de CNV, junto con su ajuste lineal en función del quemado del ciclo. Prácticamente todas las diferencias son inferiores a $\pm 0,5\%$, dentro de los criterios de aceptación ($\pm 2\%$).

Las figuras VIII y IX recogen las diferencias entre SIMTRAN y las medidas en las diferencias normalizadas (Delta-I) y en las sumas (Suma-I) de las corrientes *excore*, para las condiciones de todos los 84 mapas de flujo medidos en los Ciclos 1 a 7 de ANV, junto con las regresiones lineales en función del quemado de cada ciclo. Prácticamente todas las diferencias están dentro de $\pm 1\%$ en ΔI y $\pm 2\%$ en Suma-I, habiéndose realizado una calibración media de las corrientes *excore* en cada ciclo.

Otra validación importante se ha obtenido con el análisis de la prueba de medida del coeficiente de temperatura del moderador (CTM) a potencia y 300 ppm, cerca del final del Ciclo 6 (EOC-6) de CNV, cuyos resultados se recogen en las figuras X y XI. En esta prueba se enfria lentamente (en 1,5 h), en unos $2,5^\circ\text{C}$, la temperatura de entrada al núcleo, midiéndose una disminución de las corrientes de las cámaras *excore* de un $-3,2\%$, aunque la potencia térmica del núcleo se mantiene constante; que SIMTRAN calcula

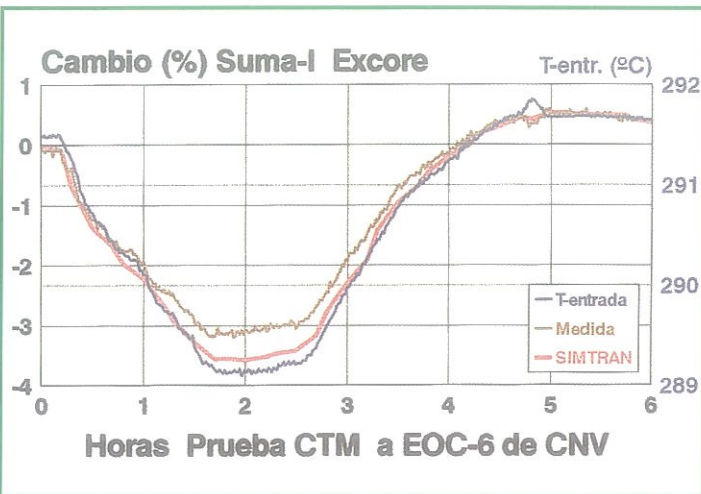
en un $-3,5\%$, con buena reproducción de la evolución medida (fig. X). La diferencia normalizada de las corrientes *excore* aumenta desde el $0,5\%$ al $2,6\%$, según la medida, y al $2,4\%$ según el cálculo de SIMTRAN (fig. XI).

En la figura XII se muestra el acuerdo entre las concentraciones críticas de Boro medidas y calculadas por SIMTRAN-EL a lo largo de la primera mitad del Ciclo 7. Las concentraciones medidas incluyen el efecto del quemado isotópico del ^{10}B , por absorción neutrónica al paso del agua a través del núcleo, en la gráfica se ha incluido la evolución del boro medido reducido a la abundancia natural del ^{10}B , con un cálculo¹¹ que tiene en cuenta la tasa de absorción efectiva del boro y los aportes reales de boro natural en las maniobras y disparos previos.

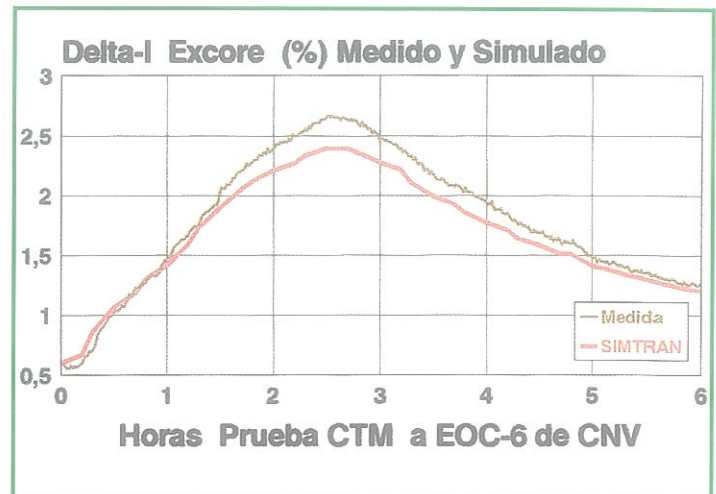
DESARROLLO E INTEGRACIÓN DE LAS INTERFASES MÁQUINA-USUARIO

El código SIMTRAN-EL, sus bases de datos y códigos auxiliares y las interfases gráficas de usuario y de adquisición en línea de variables medidas (tabla IV), han sido implantados en una estación de trabajo HP-9000/700 del grupo de TNO de C.N. Vandellós para su puesta a punto y operación automática desde el arranque del ciclo 7, a mediados de junio. Réplicas del sistema completo han sido también implantadas en estaciones de la misma serie en el grupo de ingeniería del combustible de ANV (Barcelona), en el DENIM-UPM (Madrid), y en CPI (Valladolid). Las versiones de SIMTRAN también han sido implantadas en estaciones DEC en PMSA (Madrid).

Durante 1995 se está realizando, por encargo directo de ANV, el desarrollo y calificación de los procedimientos



F X



F XI

específicos de vigilancia en-línea, calibraciones incore-excore, predicción y actualización de maniobras operacionales, seguimiento y proyección nominal del ciclo y diagnóstico y pronóstico de transitorios y oscilaciones inducidas por el primerio. En esta fase pre-operacional se implantarán también procedimientos de QA, incluyendo la documentación y archivo de modificaciones, instalación de bases de datos, incidencias operativas, calibraciones y autoverificaciones.

MODOS DE OPERACION DEL SIMULADOR EN LÍNEA SIMTRAN-EL

El código SIMTRAN-EL proporciona las siguientes capacidades y funciones en sus diversos modos de operación (tabla V):

Vigilancia continua en línea.

Se activa automática y regularmente, cada 5 minutos, leyendo el estado tridimensional de potencia, quemado, historia espectral, Xenon y Yodo previo; todas sus bases de datos integrales del núcleo y ciclo; y adquiriendo las señales medidas relevantes para la evolución y contrastación del núcleo. Tras avanzar explícitamente el quemado, Xenon y Yodo, se calculan (en unos segundos) las soluciones acopladas neutrónicas-termohidráulicas tridimensionales en el momento de la adquisición, determinando los parámetros del núcleo y distribuciones 1D y 2D de las variables relevantes. Estos parámetros y distribuciones se visualizan de forma continua, con refresco de actualización automática, mediante una interfase gráfica de usuario (GUI) desarrollada e implantada en C.N. Vandellós por CPI; inclu-

yendo la evolución de factores de pico, vigilancia de asimetría axial, estabilidad del Xenon, historia de parámetros medidos, calculados en línea y previstos y distribuciones intranucleares. También se gestiona de forma automática el registro de los variables históricas y estados tridimensionales del núcleo.

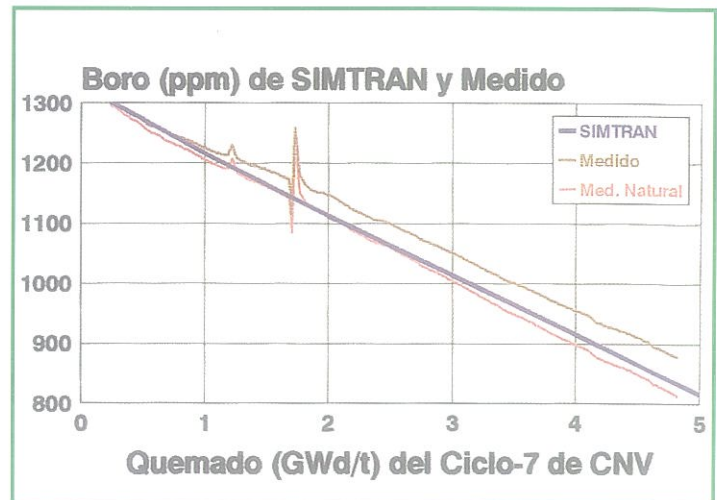
Calibración de Instrumentación (incore-excore)

En paralelo, se simula una oscilación axial de potencia para obtener múltiples puntos de calibración incore-excore, en torno a un punto medido (con mapa de flujo), para contrastar y actualizar, en su caso, la calibración de la instrumentación excore. El código SIMTRAN-EL es también una herramienta útil para el análisis de incidencias en la instrumentación y en su calibración, al permitir el estudio de efectos de variación de las condiciones operativas que pueden afectar a la instrumentación neutrónica o termohidráulica.

Análisis de Mapas de Flujo Incore

Se activa por el usuario en el momento de la realización de cada mapa de flujo, mensualmente. Calcula y registra las tasas de reacción en las posiciones instrumentadas de las trazas incore. Tras el proceso del mapa de

F XII



flujo con el código INCORE, se extraen las trazas normalizadas y se ejecuta un programa auxiliar ("trazas"), que compara sistemáticamente las tasas de reacción medidas y calculadas, analizando la evolución histórica de las diferencias puntuales e integradas y ajustando las desviaciones seculares, que se suministran a SIMTRAN para su interpolación tridimensional en las distribuciones de potencia hasta el siguiente mapa.

Evaluación de factores de pico y márgenes térmicos detallados.

Se ejecuta en paralelo de forma regular programada, cada hora, o activada por el usuario. Se inicia desde el estado tridimensional actual del modo de vigilancia, activando las opciones de cálculo y registro de las condiciones de contorno (flujos cruzados) entre los canales termohidráulicos medios por cuarto de elemento combustible. Estas condiciones se transmiten, junto

con las potencias nodales y por barra combustible, precalculadas en los diversos planos del núcleo, a un código auxiliar que selecciona los elementos críticos y prepara la configuración y generación de potencias detalladas, en barras/subcanales individuales, para el código COBRA. De la solución detallada se obtienen las potencias/temperaturas/DNBR en las barras y subcanales más calientes, para visualización y registro histórico.

Seguimiento y proyección nominal del ciclo.

Se activa regularmente, cada 6 horas, en paralelo a la vigilancia en línea. A partir del estado tridimensional de quemado e historia espectral, obtiene las soluciones en condiciones nominales, registrando los parámetros nominales y objetivos de boro, Xenon de equilibrio, asimetrías axiales de potencia, Xenon y Yodo, coeficientes y defectos de reactividad, etc. Opcionalmente, con la frecuencia deseada, también actualiza la proyección nominal hasta el final del ciclo, con "coastdown", en su caso; y los valores de bancos de control, defectos de reactividad, margen de parada, etc.

Predicción de criticidad y maniobras operacionales

A activar por el usuario en paralelo con la vigilancia en línea. Se puede avanzar al tiempo y quemado deseado, o partir del estado actual, p.e. tras disparo. Se facilita la selección de maniobras pre-programadas o recomendadas, que especifican las rampas y niveles de espera de potencia y los criterios de boración/dilución y de control de asimetría axial. La predicción puede reactualizarse con la frecuencia deseada desde el estado real de vigilancia. Los resultados previstos pueden visualizarse con la evolución real de la vigilancia en línea, para cualquier parámetro o diagrama de evolución, estabilidad, etc. También pueden realizarse todo tipo de simulaciones a partir de estados previos registrados o avanzados, como por ejemplo para la prognosis de las pruebas de medida del CTM a potencia.

Diagnosis y prognosis de transitorios rápidos y oscilaciones.

La simulación de transitorios reales o anticipados puede activarse a partir del último estado del núcleo, actualizado por la vigilancia en línea, o de cualquier estado previo o previsto del ciclo. El transitorio u oscilación puede especificarse en múltiples variables de entrada al núcleo, o por lazo individual, mediante tablas a interpolar line-

almente, por oscilaciones senoidales de cualquier amplitud y frecuencia, o por un fichero con múltiples pasos de tiempo, generado a partir de los registros del SAT mediante un programa auxiliar "ad hoc". SIMTRAN proporciona la potencia instantánea generada y la evolución de los factores de pico, otros parámetros de salida del núcleo y distribuciones 1D y 2D máximas o instantáneas. También calcula la reactividad dinámica equivalente para cinética puntual, que puede usarse como entrada a los códigos de análisis termohidráulico de planta RELAP, TRAC, etc.

CONCLUSIONES

Las cualidades del SIMTRAN-EL/PIE para la vigilancia y predicción en-línea de los núcleos de agua a presión, logradas con el desarrollo del Proyecto, se resumen en la tabla VI. Hay que destacar que SIMTRAN-EL es el mismo código a emplear en análisis de diseño, con las consiguientes sinergias de validación y calificación; así como de economía y QA en la generación de las bases de datos para cada ciclo y unidad.

Como producto de un Proyecto de Investigación del PIE, el código SIMTRAN-EL/PIE y sus códigos auxiliares, están a disposición de todas las centrales españolas con núcleos de agua a presión; precisando su implantación únicamente de la adaptación de las interfaces de adquisición de datos y gráfica de usuario, en función de los sistemas informáticos disponibles y los requisitos específicos de utilización. Tanto el producto del Proyecto, como las interfaces máquina-usuario y los procedimientos de vigilancia y predicción en-línea, que se han desarrollado por cuenta de ANV, están en fase de cesión a la DTN para su comercialización nacional e internacional.

REFERENCIAS

1. C. Ahnert, J.M. Aragonés et al., "Validation of the Pressurized Water Reactor Core Analysis System SEANAP", *Nucl. Sci. and Eng.*, **100**, 305 (1988).
2. C. Ahnert, J.M. Aragonés, "Fuel Management and Core Design Code Systems for Pressurized Water Reactors", *Nucl. Technology*, **69**, 350 (1985).
3. J.M. Aragonés, C. Ahnert, "A Linear Discontinuous Finite Difference Formulation for Synthetic Coarse-Mesh Few-Group Diffusion", *Nucl. Sci. and Eng.*, **94**, 309 (1986).
4. C. Ahnert, J.M. Aragonés, "A Coupled Fine Coarse-Mesh Few-

Group Diffusion Method", *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **47**, 414 (1984).

5. F. Merino, C. Ahnert, J.M. Aragonés, "Development and Validation of the 3-D PWR Core Dynamics SIMTRAN Code", *Proc. Int. Conf. on Math. Methods and Supercomputing in Nucl. Appl.*, Kernforschungszentrum Karlsruhe, **1**, 646 (1993).

6. H. Finnemann, H. Bauer, A. Galati, R. Martinelli, "Results of LWR Core Transient Benchmarks", *Nucl. Energy Agency, OECD Paris, NEA/NSC/DOC(93)25* (1993).

7. L.A. Banda, D. Bollacasa, "Evolution of Core Power Monitoring Systems at ABB Combustion Engineering Nuclear Power", *Proc. Spec. Mtg. on In-Core Instrum. and Reactor Core Assessment*, *Nucl. Energy Agency, Pittsburgh*, **5**, 1 (1991).

8. C.L. Beard, "Experience with the BEACON Core Monitoring and Support System", *Proc. Spec. Mtg. on In-Core Instrum. and Reactor Core Assessment*, *Nucl. Energy Agency, Pittsburgh*, **5**, 2 (1991).

9. H. Moon, C.A. VannederMass, I.Z. Stone, "Pin Power and Detector Modelling in the POWERTRAX Core Monitoring System", *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **70**, 343 (1994).

10. J.M. Aragonés, C. Ahnert, "Computational Methods and Implementation of the 3-D PWR Core Dynamics SIMTRAN-EL Code for Online Surveillance and Prediction", *Proc. Int. Conf. on Mathematics and Computation in Nucl. Eng.*, *Am. Nucl. Soc., Portland (OR-USA)*, en prensa (1995).

11. J.M. Aragonés, C. Ahnert, A. Crespo, J.R. León, "Isotopic Depletion of Soluble Boron in a PWR", *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **57**, 314 (1988).

VI. CONCLUSIONES

Cualidades del SIMTRAN-EL-PIE

- **Detallado** : 3-D, Xenon, picos, trazas, excóres
- **Preciso** : de Diseño + autocálculos
- **Rápido** : 5 seg. en-línea, 1 min. predicciones
- **Adaptable** : A cada Ciclo, Unidad y Central
- **Alcance Completo** : Multifuncional integrado
- **Fácil Uso** : Interfase de menús y gráficos
- **Fiable** : Datos, códigos y procs integrados.
- **Propio e Independiente** : Códigos fuente, asistencia directa, libre de licencias
- **Validado** : En mas de 60 Ciclos y benchmarks
- **Licenciable** : Vigilancia de ETF modificadas
- **Exportable** : A centrales PWR (más competitivo que BEACON, CECOR, POWERTRAX, ...)
- **Extendible** : Acoplamiento con RELAP para simulación detallada best-estimate de la planta.