

Predictor de estabilidad para la vigilancia continua de un reactor tipo BWR

Yolanda Tofiño Gómez

Como consecuencia de la susceptibilidad de los reactores de agua en ebullición (BWR) de sufrir inestabilidades de potencia, se ha desarrollado el programa LIP (LAPUR Input Preprocessor) que determina automáticamente la razón de decaimiento (DR), como medida del margen de estabilidad. Para cálculos de DR, el programa LAPUR es una buena alternativa predictiva: una rápida ejecución para una precisión aceptable. LAPUR exige una entrada de datos compleja, dependiente de la configuración instantánea del núcleo, requiriendo un control exhaustivo de su generación. LIP, con carácter modular, genera automáticamente la entrada de datos a partir del sistema de vigilancia del núcleo, CAPRICORE (basado en SIMULATE-3), obteniendo la DR durante la operación. Esta herramienta puede acelerar las maniobras en arranques y otros transitorios, aumentando la disponibilidad de la planta.

As result of the susceptibility of the Boiling Water Reactors (BWR) to suffer from power instabilities, the program LIP has been developed (LAPUR Input Preprocessor), which automatically determines the decay ratio (DR), as stability margin indication. For DR calculations, LAPUR program is a good predictive alternative: a fast execution for an acceptable precision. LAPUR demands a complex input, dependent on the instantaneous core configuration, requiring an exhaustive control of its generation. LIP, with a modular character, automatically generates the input from the core monitoring system, CAPRICORE (based on Simulate-3), obtaining the DR during the operation. This tool can accelerate the start-up manoeuvres and other transients, increasing the plant availability.

INTRODUCCIÓN

Es bien conocido que, en determinadas condiciones de operación, los reactores de agua en ebullición (BWR), son susceptibles de inestabilidades termohidráulicas, que pueden provocar oscilaciones de la potencia del reactor. El parámetro que se utiliza para medir el margen de estabilidad es la razón de decaimiento o "Decay Ratio" (DR).

DR es el cociente entre dos amplitudes consecutivas en una oscilación de potencia. Si el valor obtenido es inferior a la unidad, $DR < 1$, el núcleo sería estable, es decir, si se le sometiera a una perturbación, la potencia oscilaría de manera amortiguada hasta un nuevo estado estacionario final.

La obtención del DR en CN Cofrentes se realiza mediante cálculos analíticos con el código LAPUR, en el dominio de frecuencias, en condiciones envolventes para cada ciclo, reevaluándose en cada uno de ellos. Debido a la rapidez de ejecución del programa LAPUR, el sistema puede ser una herramienta predictiva de gran capacidad.

Para conseguir valores de DR más realistas y de manera simultánea a la

operación del reactor, podría utilizarse el programa LAPUR obteniendo los datos de entrada a partir del sistema de vigilancia del núcleo, CAPRICORE.

Para obtener resultados de DR, en pocos segundos, pueden aplicarse técnicas de colapsamiento, reduciendo el núcleo a un conjunto de canales promedio representativos, sin mermar en la precisión del DR obtenido y conservándose la distribución de caudales y la caída de presión a través del núcleo.

El programa necesita la generación de una entrada de datos de cierta complejidad, que representa la configuración del núcleo en el instante a considerar. Por este motivo, la principal fuente potencial de errores, en la realización de cálculos de estabilidad con códigos, es la generación de los datos de entrada, lo que ha llevado a desarrollar el programa LIP (LAPUR Input Preprocessor), que acopla el sistema de vigilancia del núcleo, CAPRICORE (CN Cofrentes) con el código de Estabilidad, LAPUR. LIP facilita el proceso y asegura el cumplimiento de los requisitos de garantía de calidad necesarios.

José March-Leuba* en el informe Técnico de Evaluación (SER), para el código de análisis de estabilidad STAIF acoplado con MICROBURN-2 (equivalentes al código LAPUR y SIMULATE3, respectivamente) indica que en todos los códigos de análisis de estabilidad, la preparación de la entrada de datos es donde se encuentra la mayor fuente de errores (ref 1).

Para poder realizar el acoplamiento con los máximos beneficios, el sistema a definir debería ser automático, sin precisar ninguna intervención del personal de ingeniería nuclear.

El LIP facilita el proceso y asegura el cumplimiento de los requisitos de garantía de calidad necesarios.

Este proyecto está englobado dentro de un trabajo de I+D+I denominado DROP (Decay Ratio On-line Predictor) desarrollado por IBERDROLA INGENIERÍA y CONSTRUCCIÓN S.A.U., IBERDROLA GENERACIÓN S.A. y la Universidad Politécnica de Valencia.

*José March-Leuba es miembro del Laboratorio Nacional de OAK RIDGE y contratado por la NRC como experto para la evaluación técnica de las Metodologías de Análisis de Estabilidad de reactores tipo BWR.

LIP

LIP genera automáticamente los datos de entrada para la estimación analítica del DR a través del código LAPUR, de tal manera que esta herramienta puede acoplarse al sistema de vigilancia del núcleo, CAPRICORE (basado en el código SIMULATE), generando una herramienta predictora de la estabilidad de manera continua y en paralelo a la operación del reactor.

El esquema de acoplamiento que se sigue en el software generado (LIP) se muestra en la figura 1.

Los códigos principales que van a ser acoplados son: LAPUR y SIMULATE-3.

SIMULATE-3 (ref 2) es el código nodal avanzado en tres dimensiones que se utiliza en el diseño y seguimiento de los parámetros de seguridad de los núcleos de los reactores PWR y BWR.

El código LAPUR (ref 3 y 4) fue creado por el Laboratorio Nacional de Oak Ridge (ORNL) y es empleado en la evaluación de la estabilidad de los reactores tipo BWR en distintas condiciones de operación. El código consta de dos módulos autónomos, LAPURX y LAPURW.

El LAPURX es el código encargado del cálculo de los parámetros termohidráulicos que caracterizan el estado estacionario del refrigerante y aquellos necesarios para el tratamiento de las ecuaciones dinámicas del refrigerante, el combustible y el campo neutrónico.

El LAPURW resuelve las ecuaciones dinámicas para el refrigerante, el combustible y el campo neutrónico en el dominio de la frecuencia.

PAPU es un programa desarrollado por el Departamento de Ingeniería Nuclear de la Universidad Politécnica

de Valencia para la obtención de los coeficientes de reactividad necesarios para la entrada del LAPURW.

El sistema de acoplamiento generado está programado en lenguaje Fortran y sigue la estructura de la figura 2.

El esquema global de programación del acoplamiento es el que se muestra en el esquema de la figura 3.

La finalidad de LIP es la generación de los datos de entrada para el análisis de estabilidad con el código LAPUR, a través de los datos leídos de Capricore: datos neutrónicos, termohidráulicos y de diseño del núcleo. Con estos datos, se generan unas tarjetas y el resto las crea LIP siguiendo un riguroso criterio de cálculo y comprobaciones de consistencia, generando la entrada de datos definitiva.

Una de las partes a destacar de este programa es el colapsamiento del núcleo (constituido por 624 elementos) en un número de regiones térmicas (de equivalencia termohidráulica). La generación de estas regiones requieren técnicas de colapsamiento para lo que se necesitan bucles iterativos. De esta manera reducimos el tiempo de ejecución del LAPUR.

Cada canal está compuesto por un número de elementos combustibles, correspondientes a un tipo de diseño mecánico.

VERIFICACIÓN DE LA CONSISTENCIA

Durante la ejecución de este programa, se realizan varias comprobaciones para asegurar el correcto funcionamiento del proceso.

Se asegura que la división en regiones del núcleo se hace correctamente, en cuanto a potencia. Si no es así, el

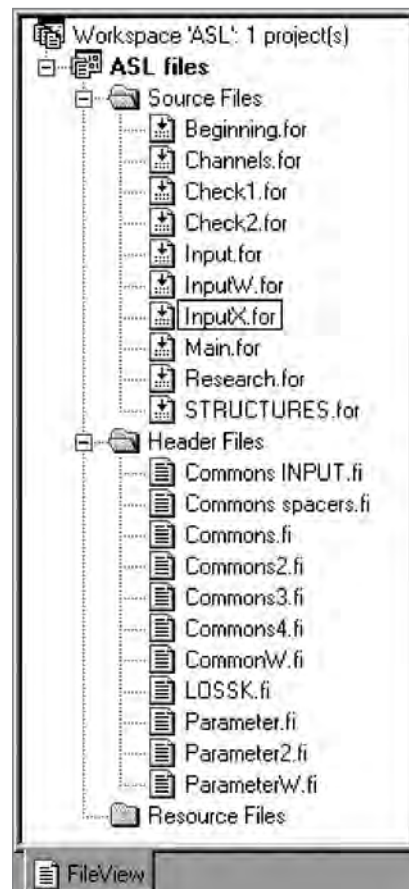


figura 2: Estructura del programa LIP.

proceso se detiene e informa del origen del error. La comprobación consiste en verificar que la distribución de potencia tridimensional obtenida en SIMULATE-3, es consistente con las distribuciones axiales de cada una de las regiones térmicas en las que se ha dividido el núcleo y se conserva la potencia total. Si esto no fuera así, se devuelve un mensaje de error y el acoplamiento se detiene.

Se generan bases de datos donde se listan las regiones térmicas generadas. En ellas se describen los elementos que lo componen, sus coordenadas matriciales, coordenadas de núcleo, tipo de elemento combustible al que corresponde, así como el tipo de diseño mecánico y el tipo de pérdida, además del caudal activo correspondiente a cada uno de los elementos, el caudal de entrada y el caudal de las barras de agua correspondientes. También se listan las constantes de pérdidas equivalentes asociadas a la placa soporte inferior (lower tie plate), las de los orificios de entrada y a la expansión a la salida de la placa soporte superior (upper tie plate).



figura 1: Esquema de acoplamiento del análisis de estabilidad al sistema de vigilancia del núcleo.

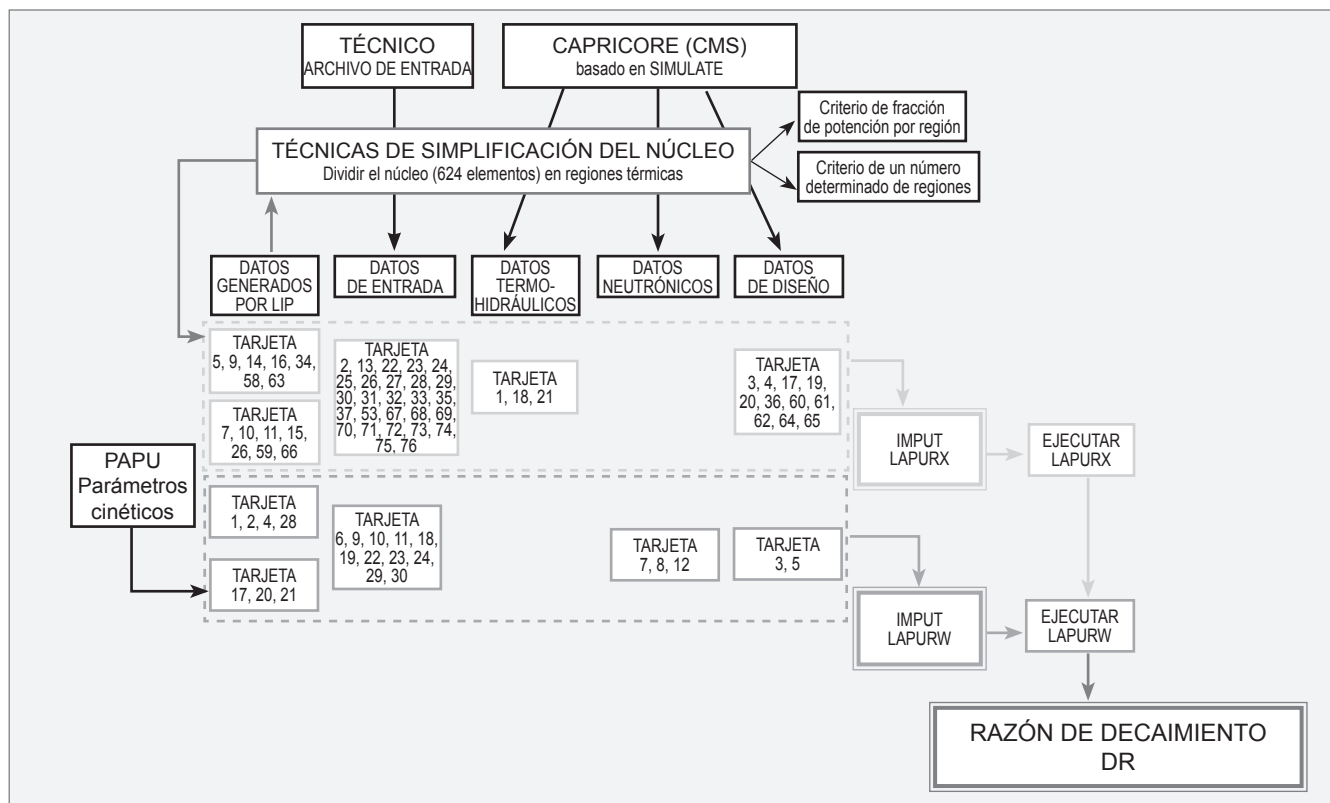


figura 3: Esquema de programación del acoplamiento.

En otra base de datos, se genera un listado de los elementos que constituyen cada una de las regiones térmicas en las que ha dividido el núcleo, con sus correspondientes coordenadas, elemento asociado, tipo de pérdidas y además la potencia asociada a ese elemento así como el perfil de potencia asociado a dicho elemento. Además, se realiza una nueva comprobación de potencia, para verificar que la potencia asociada, a la región, se corresponde con la suma de los factores radiales de los elementos que componen dicha región.

Además de todas las comprobaciones realizadas, también se realiza un análisis de la distribución de caudal en cada canal, así como la lectura del valor de DR resultado del estudio de estabilidad.

Internamente, durante la ejecución, se hacen otras comprobaciones para asegurar el cumplimiento de la garantía de calidad exigida.

Como se observa en la figura 4 y en la figura 5, el programa de acoplamiento es muy preciso ya que los puntos de caudal obtenidos con LIP son los mismos que los obtenidos en SIMULATE.

También se demuestra, que la caída de presión en el núcleo, es prácticamente igual que la obtenida en SIMULATE, como se ve en la tabla 1 y en la tabla 2.

tabla 1: Comparación entre caídas de presión (PSIA), 8 regiones.

Δ PSIMULATE	Δ PLIP	ERROR(%)
9,36800	9,34964	0,196%

Fuente: Iberinco

tabla 2: Comparación entre caídas de presión (PSIA), 200 regiones

Δ PSIMULATE	Δ PLIP	ERROR(%)
9,36800	9,35193	0,172%

Fuente: Iberinco

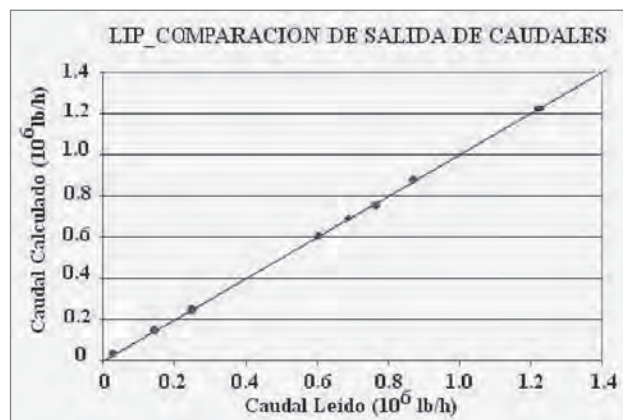


figura 4: Comparación de distribución de caudales para un modelo de 8 regiones de LAPUR frente a SIMULATE-3

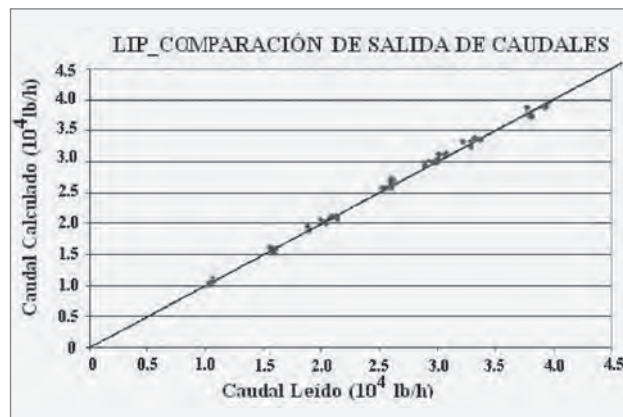


figura 5: Comparación de distribución de caudales para un modelo de 200 regiones de LAPUR frente a SIMULATE-3

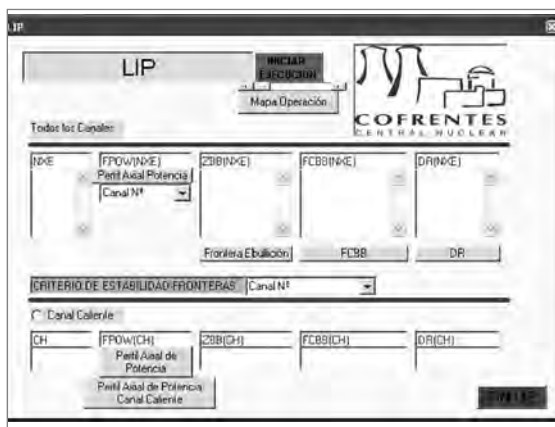


figura 6: Pantalla principal de la aplicación.

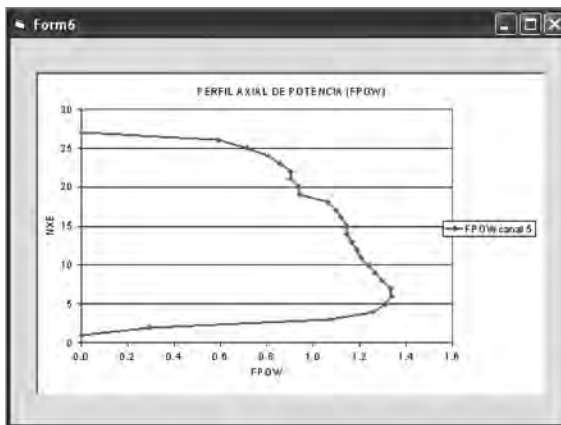


figura 8: Perfil Axial de Potencia de cada canal

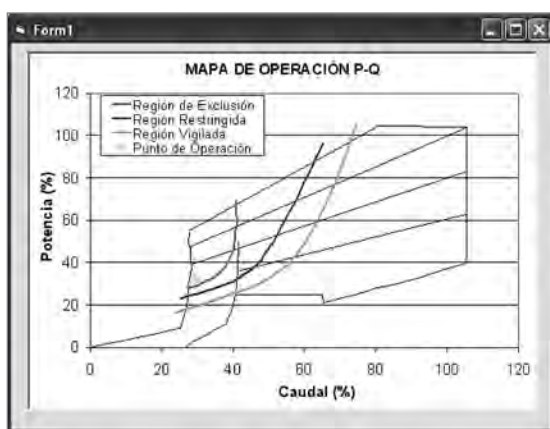


figura 7: Punto de operación en el mapa Potencia-Caudal.

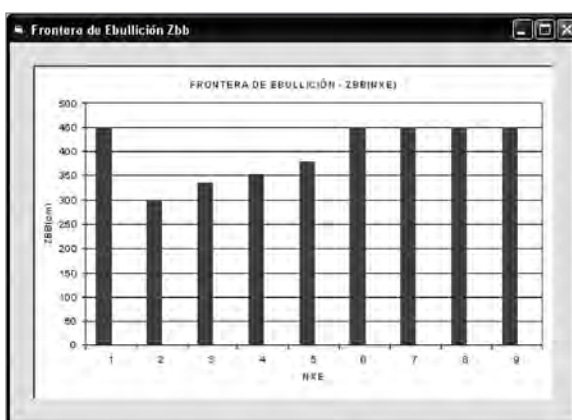


figura 9: Inicio de ebullición para cada uno de los canales.

Como se puede comprobar el grado de exactitud del programa LIP, es óptimo, lo que verifica el correcto funcionamiento del acoplamiento.

PROTOTIPO

Como ejemplo de la puesta en marcha de las posibilidades que puede ofrecer este proyecto, se ha realizado un prototipo de aplicación del software generado, LIP (figura 6). En esta aplicación se representa una básica simulación de las ventajas aportadas por el acoplamiento. El paso siguiente de este proyecto es su puesta en marcha y licenciamiento e implementación como predictor.

Los resultados que se pueden obtener son:

- Punto de operación en el mapa caudal-potencia (figura 7).
- Perfil axial de cada uno de los canales en los que se ha colapsado el núcleo (figura 8).
- Frontera de ebullición, elevación a la que se inicia la ebullición en los canales (figura 9).

- Criterio de estabilidad $FCBB < 1$, según la E1A, referencia 5, 6 y 7 (figura 10). Si $FCBB$ es < 1 el inicio de ebullición está por encima de el tercio inferior del núcleo, lo que garantiza márgenes amplios de estabilidad.

- Criterio de estabilidad E1A, ref 2 (figura 11).

- Perfil axial de potencia de cada uno de los canales que se ha colapsado el núcleo (figura 12).

- Perfil axial de potencia del canal más caliente (figura 13).

Además de las salidas expuestas genera un archivo EXCEL para dejar registradas las salidas de datos obtenidas a través del software generado y que ha constituido este proyecto (LIP).

CARACTERÍSTICAS DEL PROGRAMA LIP

Las características principales del software generado son:

- Su carácter modular y sencillo que facilita su trazabilidad y verificación. Genera internamente librerías de datos

que facilitan la posibilidad de cálculos posteriores y comprobaciones, así como múltiples análisis internos para el correcto seguimiento de la ejecución.

- Evita errores en la generación de los datos de entrada.

- La principal ventaja es la automatización del sistema de análisis de estabilidad del núcleo durante los desplazamientos en el mapa de operación. Haciendo accesible a los operadores de Ingeniería Nuclear una herramienta rápida y precisa para la estimación de los márgenes de estabilidad que acelere las maniobras en arranques y otros transitorios.

- Obtiene márgenes de estabilidad más precisos y reales.

- Facilita al operador una herramienta sencilla de análisis de estabilidad, cumpliendo con los requisitos de Garantía de Calidad.

- Facilita las maniobras de subida de potencia hasta su valor nominal.

- Permite anticiparse y predecir la estabilidad durante la operación, aumentando la disponibilidad de la planta.

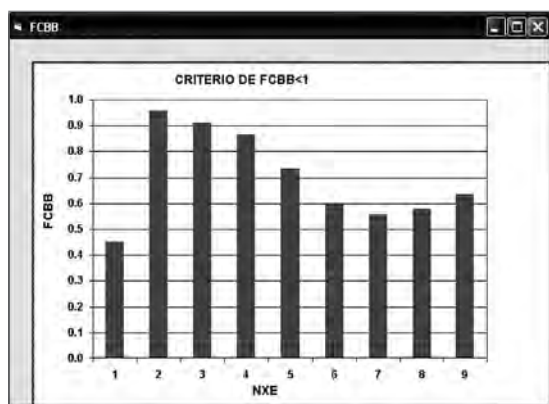


figura 10: FCBB para cada uno de los canales.

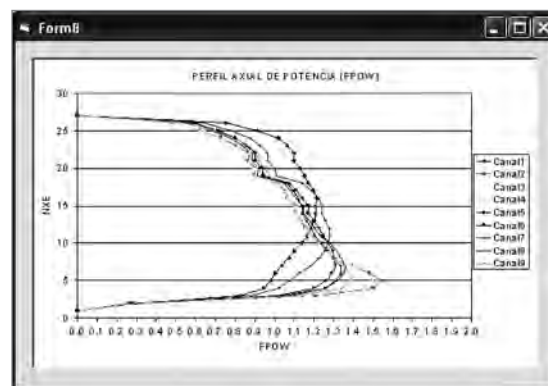


figura 12: Perfiles axiales de potencia correspondientes a todos los canales del núcleo.

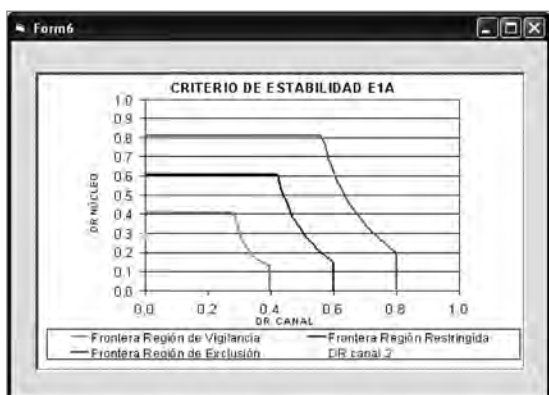


figura 11: Localización del punto de operación según el criterio de estabilidad basado en la E1A

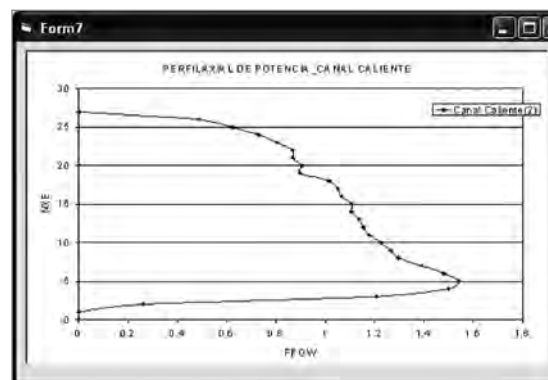


figura 13: Perfil axial de potencia para el canal más caliente

CONCLUSIONES

La conclusión principal que podemos obtener del programa LIP desarrollado es que se obtiene el parámetro significativo de la estabilidad del núcleo (razón de decaimiento) de manera automática, de forma paralela a la operación y en un breve periodo de tiempo (segundos) (ejemplo en la referencia 8). Este tipo de herramientas predictoras aumentan la disponibilidad de las plantas al facilitar y mejorar las maniobras de subida y bajada de potencia en una central BWR.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco la dedicación y paciencia de mi tutor de proyecto, en IBERINCO S.A.U., D. José Melara San Roman, así como a D. Manuel Albendea Darriba y a IBERDROLA S.A. por la ocasión brindada al participar en este proyecto y expresar a todos ellos la gran satisfacción que me causa que este proyecto haya sido galardonado con este premio.

REFERENCIAS

1. MARCH-LEUBA, J. (Junio 200): Review of the STAIF/MICROBURN-2 BWR Stability Analysis Methodology, NRC.
2. STUDSVIK/SGA-95/15. SUMULTE-3 User's Manual.
3. OTADUY, P. J y MARCH, Leuba (1995): LAPUR User's Guide. NUREG/CR-5421.
4. Escrivá Castells, A. y Muñoz Cobo González, J.L. (Julio 1998): Aplicación de LAPUR para el cálculo del margen de estabilidad en reactores BWR, Dpto. Ingeniería Química y Nuclear, Universidad Politécnica de Valencia.
5. BWROG (Junio 1991): BWR Owners Group Long-Term Stability Solutions Licensing Methodology". BWROG, EEUU.
6. BWROG (Marzo 1991): BWR Owners Group Long-Term Stability Solutions Licensing Methodology". BWROG, EEUU.
7. RAUSH, T. J. y PFEFFELERN, H. C. (1995): BWR Owners Group Thermal-Hydraulic Stability Program Review Sider, EEUU.
8. MELARA SAN ROMAN, J. y TOFIÑO GÓMEZ, Y. (Octubre 2004): "Ventajas del sistema DROP: Evaluación de los márgenes de Estabilidad en un Arranque de CN Cofrentes". Ponencia, 30a Reunión de la SNE (Alicante).



Yolanda TOFIÑO GÓMEZ es Ingeniera de Minas en la intensificación de Energía y Combustibles, por la E.T.S.I.M. de Madrid. En Marzo de 2003 se incorporó como becaria a la sección de Ingeniería de Combustible de IBERINCO S.A.U., para la realización de su Proyecto de Fin de Carrera, enmarcado dentro de los trabajos de I+D del proyecto DROP (Decay Ratio On-Line Predictor). En Diciembre de 2004 comenzó a trabajar en SEA PROPULSION S.L., colaborando con IBERINCO en distintas áreas.