

AMPLIACIÓN Y MEJORA DE LAS ESTIMACIONES DEL SISTEMA DE MAPAS DE FLUJO
(FLUX MAPPING) DE LA CENTRAL NUCLEAR DE EMBALSE

G. García - J. Fink

C.N.E.A. - Dirección de Centrales Nucleares.

En la Central de Embalse, existe un sistema de computación digital que opera en línea y cumple, básicamente, dos funciones:

- controlar la planta, y
- presentar al operador información sobre los procesos.

Entre los varios programas que se ejecutan en dicho sistema existe uno, llamado "Flux Mapping", que produce información sobre la distribución de flujo térmico en el reactor, a partir de las lecturas de 102 detectores de vanadio, distribuidos convenientemente en el núcleo. Esta información se usa para el control de la planta o para conocimiento del operador. Flux Mapping se ejecuta una vez cada dos minutos.

La idea central del algoritmo de cálculo (ref. 1), es aproximar el flujo como combinación lineal de un conjunto reducido de modos fijos y conocidos de antemano, $\Phi_j(r)$:

$$\Phi(r) \approx \sum_{j=1}^s \Psi_j(r) A_j, \quad 15 \leq s \leq 22, \quad (1)$$

donde : $\Phi(r)$ = flujo térmico en el punto r,

s = número de modos en la base,

$\Psi_j(r)$ = valor del modo j en el punto r, y

A_j = amplitud del modo j.

$\Psi_j(r)$ se denomina coeficiente de acoplamiento del modo j en el punto r.

Se encuentra que, para obtener un error aceptablemente pequeño en el desarrollo con un número reducido de modos, una buena elección es la siguiente:

- distribución de flujo para combustible en equilibrio de quemado y la configuración de mecanismos de reactividad de operación normal (condición nominal);
- soluciones armónicas superiores de la ecuación de difusión para el reactor nominal (las primeras 13);
- modos perturbados (distribuciones de flujo del núcleo inicial y para configuraciones de mecanismos de reactividad distintas de la nominal).

Las distribuciones de flujo fueron calculadas en Canadá con programas de difusión tridimensionales y las soluciones armónicas superiores con un programa especialmente preparado, también de difusión tridimensional. Hay, en total, 28 modos, agrupados en 4 conjuntos o bases, que corresponden a distintas configuraciones de mecanismos de reactividad, que aparecen durante la operación. La base más pequeña tiene 15 modos y la más grande 22. Con esta elección de modos, se puede reproducir satisfactoriamente la forma de la distribución de flujo, aunque no perturbaciones muy localizadas que no estén ya contenidas en alguno de los modos.

Escribiendo (1) para las posiciones de los 102 detectores, se obtiene el sistema (2), que contiene toda la información disponible del proceso, es decir las 102 lecturas :

$$D_i \approx \sum_{j=1}^s \psi_j(r_{d,i}) A_j, \quad i = 1, 2, \dots, 102, \quad (2)$$

donde : D_i = lectura del i -ésimo detector, y

$\psi_j(r_{d,i})$ = coeficiente del modo j para el i -ésimo detector.

Este sistema está sobredeterminado, por lo que sólo existen soluciones aproximadas. Por solución, se entiende el conjunto de amplitudes

$$\{A_j, j = 1, 2, \dots, s\}.$$

Se adopta aquella solución que hace mínimo el error cuadrático sobre los 102 detectores :

$$E^2 = \sum_{i=1}^{102} \left(\sum_{j=1}^s \psi_j(r_{d,i}) A_j - D_i \right)^2 \quad (3)$$

Puede demostrarse que, con este requisito, las amplitudes se obtienen, simplemente, como :

$$A_j = \sum_{i=1}^{102} H_{ji} D_i, \quad j = 1, 2, \dots, s \quad (4)$$

donde :

$$H = (M^t M)^{-1} M^t, \text{ y}$$

M_{ij} = valor del modo j en el punto $r_{d,i}$.

Claramente, H es una matriz que no depende de las lecturas, aunque sí de la base. Fue calculada en Canadá, obteniéndose el valor de los modos en los detectores por interpolación parabólica tridimensional.

Una vez que se tienen las amplitudes, el flujo en los puntos de interés puede estimarse como :

$$F_i = \sum_{j=1}^s N_{ij} A_j, \quad (5)$$

donde :

F_i = flujo estimado en el punto $r_i \approx \phi(r_i)$, y

N_{ij} = coeficiente del modo j en el punto r_i .

De ahora en adelante, F_i se denominará flujo mapeado. Si se requieren estimaciones en más puntos, simplemente se agregan a N los coeficientes correspondientes.

Son destacables la sencillez y elegancia formal del método : para obtener un mapa de flujo basta hacer dos multiplicaciones matriciales

$$A = H D, \text{ y}$$

$$F = N A.$$

En Embalse, se calculan en línea valores para los 102 detectores de vanadio, 500 manojos combustibles preseleccionados y 34 detectores de seguridad, e integrales para los 380 canales y las 14 regiones asociadas a las zonas líquidas de control en que se divide el reactor. Parte de esta información se destina al control, fundamentalmente a través de dos vías :

- los flujos de zona se usan para calibrar los detectores de control espacial asociados a las mismas, para que sus lecturas representen promedios de zona, más que valores puntuales;

- si el máximo flujo de manojos supera un valor preestablecido, se inicia una bajada de potencia en rampa;

otra parte de la información se destina a conocimiento del operador; por

ejemplo : las integrales de flujo en los canales, normalizadas a la potencia térmica total, dan valores aproximados de las potencias de canal.

Por limitaciones de memoria y tiempo de procesamiento de la computadora de control, se procura que el número de puntos en los que se estima el flujo sea reducido. Fuera de línea, en cambio, no existen estos problemas.

Este trabajo presenta la ampliación y mejora de las predicciones del sistema de mapas de flujo, por medio del programa FMP4 (fuera de línea), que permite obtener estimaciones de :

- flujo normalizado a potencia en todos los 4560 manojos de combustible;
- potencias de manajo (de mayor interés que el flujo para el operador), calculadas teniendo en cuenta que la relación flujo/potencia no es constante; se debe especificar la irradiación de cada manajo y, en la etapa inicial de la operación del reactor, los números de los canales que contienen manojos de uranio deprimido;
- además, como facilidades accesorias, permite :
 - estudiar la propagación de las imprecisiones de los detectores al mapa, superponiendo a las lecturas errores tomados de una distribución gaussiana;
 - comparar la distribución mapeada (F_i) con la original ($\Phi(r_i)$).

Las etapas de trabajo fueron las siguientes:

- Puesta en marcha de los programas INTREPA e INTREPB (transferidos por AECL), que se utilizaron para el cálculo de los coeficientes.
- Generación de los coeficientes de los 4560 manojos para los 28 modos.
- Programación de FMP4.
- Comparaciones con distribuciones de flujo y potencia, provenientes de cálculos de gestión de combustible, pero con la configuración normal de mecanismos de reactividad.

Descripción de INTREPA e INTREPB

Dados un reticulado de representación del reactor, una distribución de flujo sobre el mismo (proveniente de un cálculo de difusión tridimensional) y un conjunto de puntos de interés, INTREPA calcula el flujo en éstos, por interpolación parabólica tridimensional entre las ternas de puntos del reticulado más próximos según cada una de las tres direcciones. A partir de la salida de INTREPA, INTREPB calcula los 1030 coeficientes (102 detectores de vanadio, 500 manojos, 34 detectores de seguridad, 380 canales y 14 zonas líquidas) para uso en línea (CEL) y los 4560 coeficientes de los manojos destinados al uso fuera de línea (CFL).

Cálculo de los coeficientes

Las distribuciones detalladas de flujo correspondientes a todos los modos fueron transferidas por AECL en cinta magnética. A partir de ellas, utilizando INTREPA e INTREPB se calcularon, para cada uno de los 28 modos, los CEL y los CFL. Los CEL se compararon con los hallados en Canadá para verificar, por este procedimiento indirecto, los CFL, que no se habían calculado previamente. Hubo que superar algunas dificultades, debidas a que los códigos transferidos estaban en FORTRAN-CDC y se con-

virtieron a FORTRAN-IBM. Con todo, el error cuadrático porcentual relativo de los coeficientes con respecto a los hallados previamente en Canadá, oscila entre $\sim .005\%$ y $\sim .025\%$, mientras que el error típico de un código de difusión, o sea el error de los modos en sí, es de $\sim 5\%$.

Comprobaciones de FMP4

Se verificó la bondad de las predicciones de FMP4, para la configuración nominal de los mecanismos de reactividad y distintos estados de quemado del núcleo, de la siguiente manera. A partir de distribuciones detalladas de flujo, correspondientes a algunos estados de una simulación de la gestión de combustible para los primeros 400 días a plena potencia, se obtuvieron con INTREPA las lecturas que darían los detectores si el reactor tuviera esa forma de flujo. Con esas lecturas y FMP4 se produjo un mapa. El mapa se comparó con las distribuciones de flujo y potencia de referencia provenientes del código de gestión de combustible. Se hicieron comparaciones de cuatro tipos: 1) potencia mapeada con potencia de referencia, 2) flujo normalizado a potencia con potencia de referencia, 3) flujo mapeado con flujo de referencia y 4) potencia mapeada con potencia de referencia (lecturas de los detectores con errores). Para cada uno de estos tipos, de entre todos los casos disponibles se seleccionaron los correspondientes a 0, 30, 60, 90, 150, 200, 240, 320 y 400 días de plena potencia como representativos.

Al comparar la potencia mapeada con la de referencia, se encontraron errores rms y máximo de $\sim 4\%$ y $\sim 12\%$ de la potencia media de manojo, y $\sim 2\%$ y $\sim 5\%$ de la potencia media de canal. Estos valores son satisfactorios. Comparando el flujo normalizado a potencia con la potencia de referencia se obtuvieron errores marcadamente mayores. Pero, mientras que los errores rms aumentan $\sim 40\%$, el máximo error de manejo sube $\sim 118\%$ y el de canal $\sim 46\%$. Se ve que el error máximo sube de manera desproporcionada al rms. Esto se debe a la presencia de manojos con uranio deprimido, al comienzo de la operación, y en menor grado a la introducción de manojos frescos luego de los 100 días de plena potencia, momento en que comienza el recambio de elementos combustibles. En estos dos casos, el factor de proporcionalidad flujo/potencia cambia, y se producen depresiones o picos de potencia, mientras que la forma de flujo es afectada en menor medida. El acuerdo potencia mapeada - potencia de referencia es muy parecido al acuerdo flujo mapeado - flujo de referencia resultado que era de esperar, ya que el algoritmo de conversión de flujo a potencia es el mismo para FMP4 que para el código de gestión de combustible. Para estudiar el efecto de las imprecisiones propias de los detectores sobre la calidad del mapa, se superpusieron a las lecturas errores porcentuales relativos, tomados de una distribución gaussiana con promedio cero y desviación estándar 5% , según la fórmula:

$$D_i = D_i (1 + E_i / 100);$$

con estas lecturas, se produjeron los mapas, siguiendo el procedimiento antes indicado. El error RMS de los manojos se incrementa en 3.6 KW, que es aproximadamente $.8\%$ de la potencia media de manojo. En los canales,

tenemos un incremento de 33 KW ,que es aproximadamente .6 % de la potencia media de canal. En cuanto a los máximos de manojo y canal,sus aumentos son 11.6 KW y 88.3 KW,que representan 1.3 % y 1.2 % de los máximos de manojo y canal,respectivamente. Se ve que el algoritmo de síntesis de los modos presenta la propiedad de recuperación de errores aleatorios,es decir que,dentro de ciertos límites,es capaz de filtrar el ruido,o imprecisiones propias de los instrumentos de medición y,en definitiva,la calidad del mapa,en este sentido,es superior a la de las lecturas individuales. Finalmente,los resultados de la comparación entre la potencia mapeada y la de referencia,en las posiciones del manojo y el canal más calientes de referencia,para distintos estados del reactor, que cubren la simulación de la gestión de combustible de los primeros 400 días de operación a plena potencia,dan para los manojos valores absolutos de los errores relativos porcentuales que van hasta 6 %,con promedio 3.7 %. Para los canales,van hasta 4.8 %, con promedio 1.8 %.*Como era de esperar,las potencias de canal se predicen sensiblemente mejor que las de manojo,porque la distribución de potencias de canal es más suave que la de potencias de manojo.

Como conclusión,podemos decir que se han ampliado y mejorado las predicciones del sistema de mapas de flujo de la Central de Embalse, por medio de un programa fuera de línea. La ampliación consiste en que los mapas cubren todos los 4560 manojos del núcleo,en vez de los 500 del sistema que opera en línea. La mejora consiste en que se ha implementado el cálculo de las potencias de manojo,teniendo en cuenta la irradiación de los mismos y si contienen uranio natural o deprimido. La calidad de las predicciones se ha comprobado para la configuración nominal de mecanismos de reactividad,con una cantidad de distribuciones de flujo y potencia producidas por códigos de reactor tridimensionales con modelos detallados,encontrándose que es satisfactoria.-