



COMPARACIÓN ENTRE UN MODELO DE DIFERENCIAS FINITAS (PUMA) Y UNO DE ELEMENTOS FINITOS (DELFIN) PARA LA SIMULACIÓN DEL REACTOR DE LA CNA-I

Carlos R. GRANT

Sector: "Estudios de Reactores y Centrales"

Unidad de Actividades: "Reactores y Centrales Nucleares"

Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) - Argentina

1.- INTRODUCCIÓN

El código PUMA (Referencia 1), desarrollado en CNEA, simula el funcionamiento de reactores nucleares discretizando el espacio en diferencias finitas. Actualmente se emplea para la CNA-I para la gestión de combustible, simulación de accidentes y diseño de estrategias de recambio con Uranio Levemente Enriquecido.

La representación de núcleo se realiza mediante una red cilíndrica a fin de poder simular correctamente el contorno externo, pero como los canales están dispuestos según un reticulado hexagonal, fue necesario representarlo mediante coberturas volumétricas sobre la red original. Este hecho hace que las secciones eficaces, que se distribuyen sobre la red cilíndrica, se diluyan entre canales vecinos.

Como las barras de control se representan por medio de secciones eficaces incrementales en los trozos axiales de los canales, éstas también se diluyen provocando una sobreestimación del valor de reactividad de las mismas. Este hecho fue corregido efectuando ajustes con las experiencias a potencia cero.

Además, como el método homogéneo no trata correctamente la continuidad de flujos y corrientes en la interfase núcleo - reflector, se produce una sobreestimación sistemática de los valores de las potencias de los canales periféricos de hasta 9 por ciento.

Sin embargo, comparaciones con el código heterogéneo TRISIC (referencia 2) demostraron que estos problemas no invalidaban el empleo de PUMA para la gestión de combustible de la CNA-I, pues las diferencias entre las distribuciones de flujo y potencia halladas por ambos programas eran aceptables. En la periferia, donde las diferencias eran mayores, los flujos tenían valores bajos, por lo que le restaba importancia al problema. Además, PUMA podía representar el reactor entero con una simulación realista de las barras de control y TRISIC estaba obligado a hacerlo en simetría 3, lo cual falseaba considerablemente la realidad.

Ultimamente, como consecuencia de que se está estudiando la posibilidad de cambiar el diseño introduciendo elementos con Uranio levemente enriquecido y además, el hecho de que en la operación de la central se han dado situaciones atípicas, el modelo homogéneo de diferencias finitas empleado en PUMA puede no ser el más adecuado.

El código DELFIN (Referencia 3), desarrollado en CNEA, trata el problema de la simulación del funcionamiento de reactores nucleares para macroceldas y reactores, tanto en cálculos de cinética espacial como ciclos de potencia o gestión de combustible, discretizando las dimensiones espaciales por medio del método de elementos finitos y tratando las heterogeneidades internas de dichos elementos y la continuidad de los flujos y corrientes con los vecinos.

Últimamente se ha convalidado dicho código para la simulación de reactores de agua pesada con comparaciones con resultados obtenidos con PUMA en gestión de combustible, con códigos canadienses y PUMA para cinética espacial, experiencias en macroceldas para reactores tipo CANDÚ, y los valores de reactividad de las barras de control medidos en las experiencias a potencia cero realizadas en la central nuclear de Atucha I (Referencia 4).

En este último caso se obtuvo una excelente correspondencia entre valores medidos y calculados, de tal manera que el modelo actual empleado en PUMA para la gestión de combustible y otros cálculos de diseño ha sido ajustado para obtener los mismos resultados que DELFIN.

2.- Cálculos Realizados

Se compararon los resultados obtenidos por DELFIN y PUMA en tres casos:

- a) Para una típica distribución de quemado en equilibrio con Uranio Natural en la operación normal del reactor.
- b) Para una hipotética distribución instantánea de quemado con Uranio Levemente Enriquecido (ULE) al 0.85% obtenida a partir de un cálculo promediado.
- c) Para un caso en que faltan 50 elementos combustibles, que correspondió a una situación real en la que se podría haber operado el reactor.

En cada uno de estos casos se calculó la distribución de flujo y potencia y la reactividad con DELFIN y PUMA para una inserción de las barras de control de 310 cm para las barras grises y 90 para el banco R2.

3.- Resultados Obtenidos

Para cada uno de los casos enumerados más arriba se obtuvieron los siguientes valores de los parámetros globales:

| | | DELFIN | PUMA |
|-----------|---------------|--------|------|
| U Natural | Reactividad | -268 | -321 |
| | Fact de forma | 1.91 | 1.90 |
| U L E | Reactividad | -34 | -153 |
| | Fact de forma | 1.76 | 1.73 |
| 50 Vacíos | Reactividad | -1038 | -942 |
| | Fact de forma | 2.55 | 2.42 |

Se nota aquí que los valores obtenidos para el caso de Uranio Natural no difieren demasiado, pero para U L E las diferencias se hacen algo más apreciables. En el caso anormal de los 50 canales vacíos ya las discrepancias se hacen muy notorias.

Debe observarse además que en el caso de U L E el factor de forma toma un valor considerablemente más bajo, lo que da a los canales periféricos una importancia mucho mayor que en el caso de Uranio Natural.

Para las distribuciones de potencia por canal se hicieron los mapas de diferencias que se pueden ver en las figuras 1, 2 y 3. Los valores globales de estas diferencias son:

| | | |
|-----------|----------------------|--------|
| U Natural | Dif Cuadrática Media | 2.2 ‰ |
| | Dif Máxima | 9.0 ‰ |
| U L E | Dif Cuadrática Media | 2.7 ‰ |
| | Dif Máxima | 9.7 ‰ |
| 50 Vacíos | Dif Cuadrática Media | 11.6 ‰ |
| | Dif Máxima | 29.3 ‰ |

Para Uranio Natural las diferencias obtenidas son las esperadas, menores en el centro y mayores en los elementos periféricos.

Aunque parece que las diferencias globales cuando se pasa de uranio natural a U L E no parecen aumentar demasiado, la comparación entre las figuras 1 y 2 muestran que en el primer caso en los canales de más peso las discrepancias entre ambos modelos no pasa casi nunca del dos por ciento y los mayores valores están en la periferia, siendo estos canales de una menor importancia relativa.

Para Uranio Levemente Enriquecido las diferencias crecieron en todas las zonas, sobre todo en las periféricas, en donde llegan a valores de 3 al 7 por ciento o más. Éstas pasan a tener una importancia muchísimo mayor a causa del achatamiento notorio de la distribución de potencia. Por ejemplo, podrían alcanzarse las potencias en las que se llega al flujo calórico crítico, lo que no ocurre en el caso de Uranio Natural.

Se realizaron también cálculos de distribuciones de potencia los bancos R1 y R3 insertados unos 310 cm y R2 y G en sus valores habituales que no incluimos en este informe por falta de espacio. En estos casos, tanto para Uranio Natural como para U L E las diferencias entre ambos modelos pasan a ser más notorias.

Para el caso en que se trabaja con 50 canales vacíos las diferencias son enormes debido a que por la heterogeneidad extrema del núcleo el modelo homogéneo de PUMA carece de toda validez, tal como lo muestra la figura 3.

4.- Conclusiones

- Para Uranio Natural en condiciones normales de operación creemos que no hay objeción en a seguir empleando PUMA, pues las zonas periféricas no son importantes.
- Si se tiene en cuenta que para el U L E adquieren una importancia mucho mayor los elementos combustibles de las zonas externas, resulta muy importante evaluar correctamente las potencias en dichas zonas, pues se podrían alcanzar los valores máximos permitidos en algunos canales. En este caso lo más conveniente es emplear DELFIN.
- También si se calcula con Uranio Natural o Enriquecido en situaciones anormales de operación las discrepancias entre DELFIN y PUMA también se hacen mayores.
- Debe tenerse en cuenta que el reactor de la CNA-I no tiene suficiente instrumentación para poder realizar ajustes experimentales a los modelos de simulación del núcleo. Es por eso que es de primordial importancia emplear el mejor modelo posible desde el punto de vista teórico y experimental. Además, DELFIN ha sido empleado como código de referencia para ajustar los modelos de las barras de control usados actualmente en PUMA para la gestión de combustible y consume el aproximadamente el mismo tiempo de procesamiento.
- Se concluye que si se desea hacer modificaciones importantes al diseño del reactor de la CNA-I es conveniente emplear el método de elementos finitos (DELFIN), pues es el más confiable desde el punto de vista físico matemático, está probado por medio de la experiencia y en el caso de los nuevos diseños propuestos actualmente provee resultados bastante diferentes al de diferencias finitas homogéneo (PUMA).

REFERENCIAS

- 1) PUMA, Sistema para la Simulación del Funcionamiento de Reactores Nucleares.
C. GRANT, CNEA, Re 163 1980
- 2) TRISIC, Tridimensional Simulation Code.
C. GRANT, H. MOLDASCHL, R. SOLANILLA
KWU, Erlangen 1971
- 3) Sistema DELFIN . Uso del programa
C. GRANT, en preparación.
- 4) Convalidación del Código DELFIN por medio de las Experiencias a Potencia Cero de la Central Nuclear de Atucha I
C. GRANT, AATN, Buenos Aires 1996

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|--|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | | | |
| A | | | | | | | | | | 20 | 73 | 30 | 30 | 66 | 20 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B | | | | | | 0 | 43 | 15 | 10 | -18 | 3 | 11 | 34 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| C | | | | | | -6 | 0 | 60 | 0 | -21 | -14 | -14 | -16 | -12 | -16 | -3 | 34 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| D | | | | | | 19 | 90 | 50 | -24 | -9 | -10 | -12 | -2 | -13 | -8 | -13 | -21 | 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| E | | | | | | 65 | 43 | 10 | -7 | -8 | -10 | -5 | 0 | 10 | -12 | -2 | -6 | -23 | 6 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| F | | | | | | 30 | 37 | -16 | -14 | -17 | -8 | -3 | 3 | 5 | 18 | 17 | -8 | -7 | -20 | -24 | | | | | | | | | | | | | | | |
| G | | | | | | 29 | 77 | 10 | -14 | -7 | 7 | -5 | 5 | 5 | 17 | 6 | -3 | -13 | -9 | -15 | -3 | | | | | | | | | | | | | | |
| H | | | | | | 63 | 21 | 19 | -18 | -2 | -12 | 2 | 0 | -3 | 12 | 22 | 3 | -3 | 5 | -17 | -23 | 10 | | | | | | | | | | | | | |
| J | | | | | | 13 | 38 | -14 | -2 | -4 | 3 | 5 | 0 | 12 | 14 | -1 | -1 | -3 | -11 | -13 | -13 | | | | | | | | | | | | | | |
| K | | | | | | 29 | 0 | 3 | -5 | 12 | 34 | 13 | 12 | 9 | 9 | 8 | -4 | 3 | -6 | -10 | -13 | -9 | | | | | | | | | | | | | |
| L | | | | | | -11 | 39 | -9 | 2 | 0 | 21 | 11 | 8 | 0 | 16 | 11 | 2 | 0 | -15 | -6 | -25 | | | | | | | | | | | | | | |
| M | | | | | | 33 | 22 | 8 | -5 | -8 | 2 | 3 | 3 | -6 | -3 | 20 | 12 | 2 | -2 | -19 | -11 | 14 | | | | | | | | | | | | | |
| N | | | | | | 13 | 72 | 7 | -14 | -4 | 5 | 0 | 0 | -1 | 0 | 16 | 13 | 0 | -7 | -17 | 0 | | | | | | | | | | | | | | |
| O | | | | | | 64 | 32 | -19 | -16 | -20 | -8 | -8 | -9 | -6 | -3 | 13 | -15 | -17 | -20 | -23 | | | | | | | | | | | | | | | |
| P | | | | | | 30 | 26 | 3 | -19 | -15 | -15 | -14 | -2 | -18 | -10 | -7 | -11 | -14 | 3 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Q | | | | | | 30 | 67 | 11 | -28 | -13 | -13 | -20 | -12 | -12 | -9 | -17 | -10 | 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| R | | | | | | 65 | 6 | 25 | -12 | -38 | -25 | -17 | -22 | -25 | -22 | -6 | 29 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| S | | | | | | 13 | -11 | 28 | 14 | 0 | -26 | 3 | 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| T | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33

Figura 1 - Diferencias DELFIN-PUMA para U NAT en por mil

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | |
| A | | | | | | | | | | 26 | 76 | 4 | 13 | 77 | 20 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B | | | | | | 6 | 40 | -39 | 10 | -33 | 6 | -38 | 35 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| C | | | | | | -6 | 0 | 63 | -19 | 14 | -29 | -8 | -31 | -34 | 5 | -27 | 35 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| D | | | | | | 20 | 97 | 9 | 14 | -21 | -19 | -2 | 6 | -7 | -21 | -34 | 5 | -42 | | | | | | | | | | | | | | | |
| E | | | | | | 75 | 22 | 17 | -11 | -29 | -7 | -22 | -3 | -8 | -17 | -19 | -22 | -25 | 6 | | | | | | | | | | | | | | |
| F | | | | | | 4 | 18 | -30 | -24 | -2 | -21 | 15 | 14 | 6 | 22 | 26 | -36 | -11 | -23 | -38 | | | | | | | | | | | | | |
| G | | | | | | 13 | 82 | 18 | -15 | 12 | -11 | 2 | -2 | 5 | 23 | 20 | 6 | -10 | 6 | -33 | 3 | | | | | | | | | | | | |
| H | | | | | | 78 | 30 | -30 | -16 | 0 | -3 | 2 | 17 | 16 | 6 | 32 | -2 | -4 | -17 | -7 | -21 | -33 | | | | | | | | | | | |
| J | | | | | | 20 | 45 | 22 | -12 | -25 | 14 | 3 | 14 | 16 | 19 | 11 | 13 | -3 | -25 | -34 | 5 | | | | | | | | | | | | |
| K | | | | | | 32 | 0 | -16 | -18 | 4 | 49 | 32 | 26 | 18 | 10 | 14 | 13 | -6 | 14 | -8 | -27 | -25 | | | | | | | | | | | |
| L | | | | | | -6 | 41 | 16 | 2 | 2 | 32 | 24 | 8 | 9 | 23 | 9 | 6 | 14 | -32 | -11 | 9 | | | | | | | | | | | | |
| M | | | | | | 37 | 30 | -27 | -26 | 6 | 0 | 14 | 13 | 20 | 15 | 39 | 26 | 10 | -3 | -9 | -18 | -38 | | | | | | | | | | | |
| N | | | | | | 21 | 82 | 15 | -22 | 17 | 12 | 20 | 2 | 17 | 3 | 26 | 25 | -5 | 10 | -9 | 10 | | | | | | | | | | | | |
| O | | | | | | 75 | 19 | -26 | -2 | -6 | -18 | 18 | 3 | 2 | 10 | 31 | -11 | -4 | -28 | -30 | | | | | | | | | | | | | |
| P | | | | | | 4 | 14 | 14 | -25 | -19 | -4 | -20 | -11 | -6 | -30 | -13 | -17 | -32 | 10 | | | | | | | | | | | | | | |
| Q | | | | | | 13 | 78 | -37 | 12 | -22 | -31 | -2 | 10 | -6 | -18 | -30 | 6 | -34 | | | | | | | | | | | | | | | |
| R | | | | | | 81 | 29 | 38 | -21 | 9 | -16 | -29 | -21 | -20 | 11 | -26 | 38 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| S | | | | | | | | | | 28 | 0 | 38 | -29 | 7 | -32 | 14 | -35 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| T | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33

Figura 2 - Diferencias DELFIN-PUMA para ULE en por mil

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|--|--|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | | | |
| A | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| C | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| D | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| E | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| F | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| G | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| H-121 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| J | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| K-19 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| L | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| M 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| O | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| P | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Q | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| R | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| S | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| T | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33

Figura 3 - Diferencias DELFIN-PUMA para 50 canales vacíos