

IMPLEMENTAÇÃO DE QUEIMA NO CÓDIGO NODAL FERM

Hélio Yoriyaz (IPEN/CNEN-SP)
Horácio Nakata (IPEN/CNEN-SP)

RESUMO

Neste trabalho foi implementado um esquema de cálculo de queima e efeitos de realimentação no programa nodal FERM [1] ("Finite Element Response Matrix"). A dependência espacial dos parâmetros neutrônicos foi considerada em três níveis: cálculo por zona material, cálculo por elemento e cálculo puntual.

A distribuição de fluxo e potência bem como o fator de multiplicação obtidos foram comparados com os fornecidos pelo programa em diferenças finitas CITATION [2]. Observou-se que o tempo de processamento é centenas de vezes menor no programa FERM e os resultados não apresentaram diferenças significativas.

ABSTRACT

In this work a spatial burnup scheme and feedback effects has been implemented into the FERM [1] ("Finite Element Response Matrix") program. The spatially dependent neutronic parameters have been considered in three levels: zonewise calculation, assemblywise calculation and pointwise calculation.

The results have been compared with the results obtained by CITATION [2] program and showed that the processing time in the FERM code has been hundred of times shorter and no significant difference has been observed in the assembly average power distribution.

INTRODUÇÃO

A importância do desenvolvimento de códigos nucleares eficientes, tanto do ponto de vista computacional como do ponto de vista de simulação de performance do núcleo, baseia-se na necessidade de se obter soluções rápidas e precisas de forma não dispendiosa em projetos de reatores. Muitas técnicas foram desenvolvidas, cobrindo uma longa faixa de aproximações que se estendem desde esquemas de correção empírica de diferenças finitas, até sofisticados métodos de elementos finitos [3].

O programa FERM ("Finite Element Response Matrix"), utilizado no presente trabalho está baseado no Método de Elementos Finitos e Matriz Resposta. Em linhas gerais, o método consiste em dividir o reator em malhas grossas, de ordem do tamanho de um elemento combustível e construir para cada uma, dois tipos de matrizes respostas, aplicando o método de elementos finitos na solução da equação de difusão. A primeira matriz resposta fornece a corrente parcial emergente devido a difusão da corrente incidente, e a segunda matriz resposta fornece a corrente emergente devido a fontes em cada malha.

As matrizes respostas construídas são a seguir projetadas sobre funções base globais no reator e a solução é obtida por método iterativo, acelerado por Método de polinômios de Chebyshev. Desta forma, o tempo computacional é reduzido em centenas de vezes em comparação com programas convencionais baseados em diferenças finitas, sem comprometimento na qualidade da solução obtida.

Neste trabalho desenvolveu-se um modelo de cálculo de queima incluindo efeitos de realimentação dentro do programa FERM. No tratamento puntual a dependência espacial foi explicitamente levada em consideração, e para cada ponto da malha do reator tem-se um valor distinto para os parâmetros nucleares. No tratamento por elemento, considera-se valores médios constantes para cada elemento combustível. E no tratamento por zonas materiais, estes valores médios são estendidos sobre elementos de mesmo material e enriquecimento.

METODOLOGIA

Queima de combustível

Os efeitos de queima de combustível são avaliados, calculando-se a distribuição de potência em vários intervalos de tempo durante o ciclo.

A primeira etapa consiste em se determinar a distribuição de potência no núcleo, o qual é utilizado para determinar a queima de cada elemento (MWD/T), no fim do intervalo considerado como segue:

$$\Delta Bu_1(\underline{r}, t_i) = \frac{w}{\rho} \left[\sum_{f_1}^{(t_{i-1})}(\underline{r}) \cdot \phi_1^{(t_{i-1})}(\underline{r}) + \sum_{f_2}^{(t_{i-1})}(\underline{r}) \cdot \phi_2^{(t_{i-1})}(\underline{r}) \right] \cdot \Delta t_i \quad (1)$$

onde : w é a energia liberada por fissão
 ρ é a densidade do combustível

Desta forma, o valor da queima em cada posição do reator $Bu(\underline{r}, t)$ em um instante qualquer t , é obtido por um processo cumulativo, somando-se os valores de queima em cada intervalo de tempo até o instante, t , considerado.

A variação das seções de choque com a queima foi considerada através do Método de Interpolação de Newton, utilizando um polinômio de 3º grau.

Correção na concentração de xenônio média

A variação de concentração de xenônio local ao longo do processo de queima foi considerada através de uma correção feita em relação a concentração média pela equação aproximada de concentração no equilíbrio dado por [4]:

$$X = \frac{(\gamma_I + \gamma_{xe})}{(\lambda_{xe} + \sigma_{a_{xe}} \cdot \phi_2)} \cdot \sum_{g=1}^2 \Sigma_f^g \cdot \phi_g, \quad (2)$$

onde : γ_I e γ_{xe} são as frações de produção de I e Xe ;

λ_{xe} é a constante de decaimento do xenônio;

ϕ_2 é o fluxo térmico; e

$\sigma_{a_{xe}}$ é a seção de choque microscópica do xenônio

A variação de seção de choque macroscópica do xenônio, é dada, portanto, por :

$$\Delta \Sigma_{xe} = \left[\frac{\sum_{g=1}^2 \Sigma_f^g \cdot \phi_g^L}{\sum_{g=1}^2 \Sigma_f^g \cdot \phi_g} \cdot \frac{(\lambda_{xe} + \sigma_{a_{xe}} \phi_2)}{(\lambda_{xe} + \sigma_{a_{xe}} \phi_2^L)} - 1 \right] \cdot \Sigma_{xe} \quad (3)$$

Esse termo é então somado a seção de choque de absorção térmica.

Variação das seções de choque com o espectro de nêutrons ϕ_1/ϕ_2

Esta variação nas seções de choque macroscópica surge pela diferença de espectro ϕ_1/ϕ_2 , no cálculo celular (geração das seções de choque macroscópica) e no cálculo de reator.

O efeito predominante é a alteração na produção de Plutônio-239, seguido por uma diferença significativa nas seções de choque de absorção e fissão térmicas.

A concentração de U-238, foi considerada, para efeitos práticos, praticamente constante durante um ciclo do reator. A equação aproximada para o Pu-239 é dada por :

$$\frac{dN^9}{dt} = -\sigma_{a_2}^9 N^9 \phi_2 + \sigma_{\gamma_1}^8 N^8 \phi_1 + \sigma_{\gamma_2}^8 N^8 \phi_2, \quad (4)$$

onde : N^9 é a concentração de Pu-239

$\sigma_{a_2}^9$ é a seção de choque de absorção térmica do Pu-239

$\sigma_{\gamma_1}^8$ é a seção de choque de captura do grupo rápido do U-238

$\sigma_{\gamma_2}^8$ é a seção de choque de captura do grupo térmico do U-238

N^8 é a concentração do U-238.

Considerando a diferença na concentração de Pu-239 obtido no cálculo celular e de reator obtém-se a seguinte correção na seção de choque de absorção e

fissão térmicas :

$$\Delta \Sigma a_2 = \left\{ A \left[(\phi_1/\phi_2)^{\text{reat}} - (\phi_1/\phi_2)^{\text{cel}} \right] - \alpha_A \Delta N^g \right\} \cdot \Delta \text{Bu} \quad (5)$$

$$\Delta \Sigma f_2 = \left\{ F \left[(\phi_1/\phi_2)^{\text{reat}} - (\phi_1/\phi_2)^{\text{cel}} \right] - \alpha_F \Delta N^g \right\} \cdot \Delta \text{Bu} \quad (6)$$

onde :

$$A = \frac{\sigma_{a_2}^g \sigma_{\gamma_1}^g N^g}{K} ; \alpha_A = - \left(\frac{\sigma_{a_2}^g - \sigma_{a_2}^0}{K} \right) \cdot \sigma_{a_2}^g ;$$

$$F = \frac{\sigma_{f_2}^g \sigma_{\gamma_1}^g N^g}{K} ; \alpha_F = - \frac{\sigma_{f_2}^g \sigma_{a_2}^g}{K}$$

K é uma constante.

Variação das seções de choque com a temperatura do combustível

A dependência das seções de choque macroscópicas com a temperatura do combustível apresenta um comportamento linear com a raiz quadrada de temperatura absoluta, de maneira que a correção destes parâmetros foi feita através do coeficiente angular de cada reta que representa o comportamento dos parâmetros macroscópicos em função da raiz quadrada de temperatura.

A expressão utilizada para esta correção é dada por :

$$\Sigma_{m,i}^g(\underline{r}) = \Sigma_{o,m,i}^g(\underline{r}) + \alpha_{m,i}^g \cdot (\sqrt{T_F} - \sqrt{T_{F_0}}), \quad (7)$$

onde : $\alpha_{m,i}^g$ corresponde aos coeficientes angulares das retas para cada parâmetro macroscópico considerado e para cada grupo de energia, e $\Sigma_{o,m,i}^g$ corresponde aos parâmetros iniciais correspondente a temperatura de referência na qual foram geradas.

RESULTADOS

As constantes de difusão foram introduzidas no FERM em forma tabular em função dos parâmetros considerados de realimentação, efetuando-se cálculos de célula com o programa CITATION, utilizando seção de choque geradas pelo programa HAMMER [5].

Os resultados obtidos com o programa FERM no cálculo por zona material e por elemento, foram comparados com os obtidos pelo programa CITATION. A Figura 1 mostra a distribuição de potência média por elemento para queima de 11261 MWD/T, com um desvio máximo de 2,44%, no cálculo por zona material. A Tabela 1 mostra os principais resultados obtidos pelo cálculo por elemento, e a Figura 2 mostra o resultado comparativo de potência média e do fator de multiplicação obtidos no cálculo por elemento e o cálculo puntual, observando-se um desvio considerável na potência no final do primeiro ciclo, da ordem de 2,85%.

A Figura 3 mostra a distribuição de potência para início de vida, 104 MWD/T, considerando-se o cálculo com e sem correção de seção de choque com a temperatura do combustível, sendo que a Tabela 3 mostra um quadro comparativo dos tempos de execução para os vários tipos de cálculo efetuados neste trabalho.

CONCLUSÃO

Nos cálculos efetuados, a dependência espacial dos parâmetros macroscópicos foi considerada em três níveis: cálculo por zona material, por elemento e cálculo puntual. Notou-se uma diferença significativa na potência média por elemento para estes três modelos, principalmente ao se comparar os resultados obtidos pelo cálculo puntual e por elemento, com diferenças da ordem de 3,0%. Isto mostra a importância do detalhamento espacial dos parâmetros macroscópicos.

Foi verificada também, a influência dos efeitos de realimentação nos resultados. Como exemplo, pode-se citar o caso da correção da seção de choque de absorção térmica, devido a variação da concentração de xenônio local em relação a concentração média. Constatou-se uma variação de 3,0% no valor da potência em alguns elementos combustíveis.

Outro fator que se mostrou bastante relevante nos cálculos é a correção das seções de choque devido a variação da temperatura do combustível. Esta correção provocou desvios de potência da ordem de 6% em algumas regiões do reator, indicando a importância de se levar em conta este tipo de efeito em cálculos mais refinados.

2,44 100,920 103,387	2,20 104,325 106,622	1,84 110,803 112,841	0,91 124,258 125,385	0,50 107,041 107,571	0,61 101,041 100,460	1,59 78,691 77,439	
	2,11 107,500 109,769	1,37 124,354 126,058	1,09 113,780 115,023	0,00 118,606 118,604	0,70 98,266 97,576	1,62 73,707 72,513	
		1,28 115,970 117,545	0,25 128,289 128,616	0,08 109,237 109,152	1,18 108,876 107,590		
			0,04 117,682 117,724	1,01 131,669 130,343	1,49 91,302 89,938		
				1,25 108,983 107,537			

$\frac{\Delta P}{P} \%$
FERM
CITATION

Figura 1. Distribuição de Potência Média por Elemento para Queima de 11261 MWD/T no Cálculo por Zona Material

Tabela 1. Discrepâncias Máximas e Médias na Potência entre os Programas CITATION e FERM, no Cálculo por Elemento.

QUEIMA (MWD/T)	K - efetivo		$\Delta K/K(\%)$	$\Delta P/P \text{ máx}(\%)$	$\Delta P/P(\%)$
	CITATION	FERM			
104	1,16779	1,16804	0,02	1,69	0,83
1490	1,14837	1,14591	0,21	4,73	2,20
2890	1,12826	1,12655	0,15	2,20	0,82
4288	1,10819	1,10735	0,08	3,77	1,22
5683	1,09015	1,08894	0,11	3,89	1,35
7077	1,07239	1,07152	0,08	4,25	1,46
8472	1,05543	1,05534	0,01	4,24	1,66
9866	1,039	1,03963	0,03	4,97	2,00

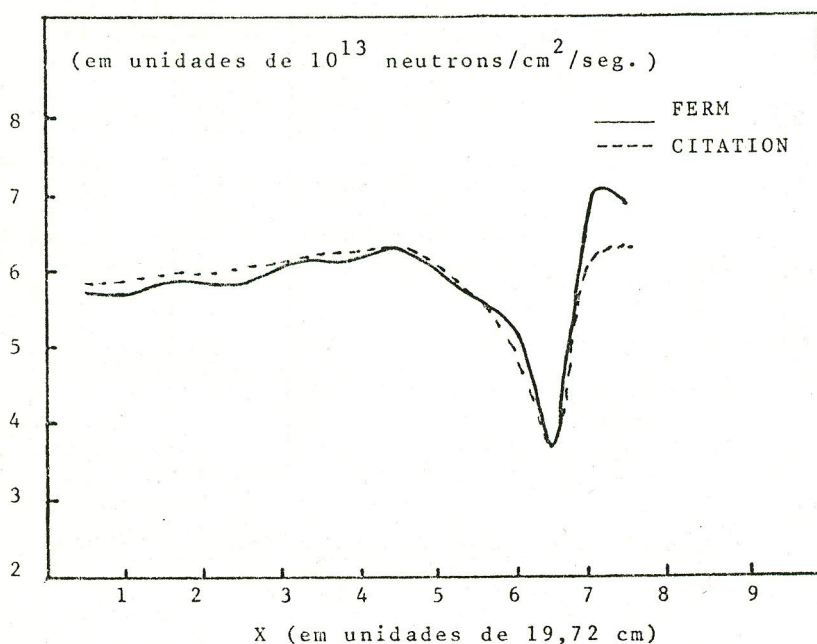


Figura 2. Comportamento do Fluxo Térmico para Queima de 9866 MWD/T

Tabela 2. Resultado Comparativo da Potência e do Fator de Multiplicação entre o Cálculo por Elemento e o Cálculo Puntual.

BU MWD/T	FERM ELEMENTO	FERM PUNTUAL	$\Delta K/K(\%)$	$\Delta P/P(\%)_{\text{máx}}$	$\Delta P/P(\%)_{\text{médio}}$
104	1,16804	1,16835	0,03	0,18	0,06
1490	1,14591	1,14690	0,09	1,39	0,65
2890	1,12655	1,12745	0,08	1,07	0,38
4288	1,10735	1,10819	0,08	0,95	0,54
5683	1,08894	1,08971	0,07	1,01	0,38
7077	1,07152	1,07236	0,08	1,43	0,45
8472	1,05534	1,05629	0,09	1,88	0,50
9866	1,02431	1,02542	0,11	2,85	0,77

Tabela 3. Comparação do Tempo de CPU entre os Cálculos de Diferenças Finitas (CITATION) e Cálculo Nodal com FERM, no Início de Ciclo. (CPU no Computador IBM 4341-MG 12)

Programa	CPU(segundos)	$\Delta P/P_{\text{máx}}(\%)$
Citation 8malhas/elemento	360	4,16
Citation 12 malhas/elemento	1440	2,08
Citation 16 malhas/elemento	2140	1,34
Citation extrapolado	-	referência
Ferm 1 malha/elemento	9,0	1,69

5,78 134,296 126,139	5,47 136,538 129,459	4,41 138,374 132,524	0,84 146,742 145,524	0,97 116,533 117,657	3,34 99,528 102,997	5,63 64,102 67,927
	5,17 137,791 131,139	4,16 152,873 146,788	3,51 123,303 127,790	0,69 125,280 126,151	3,43 92,997 96,300	5,46 58,717 62,111
		2,87 134,219 130,477	0,91 136,673 135,436	2,57 101,972 104,660	3,73 86,857 90,225	
			0,90 109,656 110,650	2,73 101,936 104,799	4,29 64,182 67,061	
				3,85 74,795 77,792		

$\Delta P/P(\%)$ FERM CITATION	
--------------------------------------	--

Figura 3. Distribuição de Potência ao Longo do Reator para Início de Vida, considerando o Cálculo com e sem Correção da Seção de Choque com a Temperatura do Combustível.

REFERÊNCIAS

- [1] NAKATA, H. & MARTIN, W.R., The Finite Element Response Matrix Method, Nuclear Science and Engineering, 85, 289-305, Nov., 1983.
- [2] FOWLER, T.B.. et, al .; Nuclear Reactor Core Analysis Code-CITATION. Oak Ridge National Lab., 1971 (ORNL-TN-2496 Rev.2).
- [3] WAGNER, M.R. Current Trends in Multidimensional Static Reactor Calculations Proc. Conf. Computational Methods in Nuclear Energy, Conf., 750415-V. II, p.I.1, U.S. ERDA (1975).
- [4] DUDERSTADT, J.J. & HAMILTON, L.J. Nuclear reactor analysis. New York, John Wiley, 1976.
- [5] SUICHI, J.E. & HONECK, H.C.; The HAMMER System: Heterogeneous Analysis by Multigroup Methods of Exponential and Reactors. Aiken, S.C. Savannah Lab., Jan. 1967 (DP-1064).