



22 a 27 de abril de 1990

ANAIS - PROCEEDINGS

**REMANEJAMENTO DE COMBUSTÍVEL EM REATORES PWR
COM AUXÍLIO DA
TEORIA DE PERTURBAÇÃO EM PRIMEIRA ORDEM**

**MARCOS ROBERTO ROSSINI
NANAMI KOSAKA**

**COORDENADORIA PARA PROJETOS ESPECIAIS
MINISTERIO DA MARINHA
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS NUCLEARES
DIVISÃO DE FÍSICA DE REATORES
Av. Professor Lineu Prestes 2242
CEP 05508, São Paulo, Brasil**

**COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGETICAS E NUCLEARES
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA DE REATORES
DIVISÃO DE FÍSICA DE REATORES
Caixa Postal 11049 - Pinheiros
05499 - São Paulo - Brasil**

SUMÁRIO

O gerenciamento tem desempenhado um papel muito importante nas últimas três décadas devido aos altos custos do combustível. Entre as diversas técnicas existentes para o remanejamento do combustível "in core", adotou-se aquela que emprega a Teoria de Perturbação em Primeira Ordem, porque permite que se determine rapidamente quais remanejamentos têm probabilidade de sucesso. O algoritmo de remanejamento foi incorporado ao código CITATION, apresentando duas opções: reduzir a fuga total de neutrons (através da redução do excesso inicial de reatividade), ou reduzir o fator de pico (através da redução do excesso inicial de reatividade).

ABSTRACT

The fuel management is a very important area of nuclear industry because of the high fuel price. Among the different technics of the in core fuel management, it was chosed one that uses the First Order Perturbation Theory, because it allows one to find out quickly what changes have success probability. The management algoritm was incorporated into the CITATION code, having two possibilities: (i) reduce the neutron fluence by increasing the reactivity, or (ii) reduce the peak factor by reducting the reactivity.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, com o intuito de reduzir o custo da energia elétrica produzida nos reatores nucleares, os pesquisadores na área de gerenciamento do combustível têm procurado prolongar o ciclo e a vida do reator nuclear /1, 2, 3/. A vida do reator depende basicamente da fluência no vaso de pressão, que é proporcional à fuga total de neutrons. A redução na fuga está associada com o acréscimo na reatividade, implicando no prolongamento do ciclo. Contudo, o acréscimo na reatividade leva, muito frequentemente, ao acréscimo no fator de pico (FP), de modo que não se pode aumentar demasiadamente o excesso inicial de reatividade /4, 5/.

Considerando-se estes fenômenos, elaborou-se um algoritmo que, através de trocas (remanejamentos) entre os elementos combustíveis (EC) pode reduzir a fuga (aumentando o excesso inicial de reatividade), ou pode reduzir o FP (reduzindo o excesso inicial de reatividade). Este algoritmo emprega a Teoria de Perturbação em Primeira Ordem (TPPO), em dois grupos de energia e duas dimensões, para determinar rapidamente quais trocas entre os EC têm probabilidade de sucesso. Durante o remanejamento não se preocupa com os venenos queimáveis a fim de reduzir-se o número de variáveis do problema /6/, sendo que o tratamento destes deve ser feito numa etapa posterior.

2. RELAÇÃO ENTRE A REATIVIDADE, A FUGA DE NEUTRONS E O FATOR DE PICO

O algoritmo de remanejamento está baseado na relação entre a reatividade, ρ , a fuga de neutrons, f , e o FP. O relacionamento entre f e ρ pode ser compreendido empregando-se um raciocínio bastante simples: sendo k o fator de multiplicação efetivo do reator, tem-se

$$k = \frac{p}{f + a}, \quad (1)$$

onde p é a taxa de neutrons produzidos, a a taxa de neutrons absorvidos, e f a taxa de neutrons que fogem. Definindo-se a reatividade como

$$\rho = 1 - \frac{1}{k}, \quad (2)$$

virá

$$\rho = 1 - \frac{f + a}{p}, \quad (3)$$

mostrando que a fuga total de neutrons tende a reduzir a reatividade. É claro que alterando-se a fuga também serão alteradas a produção e a absorção, mas observa-se que o aumento na fuga reduz a reatividade porque os neutrons que fogem deixam de induzir fissões.

O compromisso do FP com a reatividade parece não ser tão forte quanto aquele entre a reatividade e a fuga. Contudo é bastante frequente observar-se que o decréscimo no FP, seja devido ao remanejamento ou devido à queima, é acompanhado pela redução da reatividade. Quando a reatividade diminui devido à troca entre os EC, isto ocorre porque o EC mais reativo foi posto numa região de menor impotância neutrônica, como, por exemplo, retirando-se um EC novo da região central do núcleo e em

seu lugar pondo-se um outro que esteja queimado. Em relação à queima /7/, o FP tende a diminuir porque onde existe o pico de potência a queima é maior, e a reatividade é função decrescente dela.

3. METODOLOGIA DE REMANEJAMENTO

O número de remanejamentos possíveis no núcleo é muito grande, sendo necessário determinar-se rapidamente quais trocas entre EC têm maior probabilidade de sucesso. A TPPO permite que se saiba rapidamente quais trocas podem aumentar ou reduzir a reatividade no início do ciclo. Seu emprego exige o conhecimento prévio dos fluxos de neutrons e do fluxo adjunto, que são obtidos resolvendo-se a equação de difusão. O remanejamento em si requer um tempo de processamento desprezível se comparado com aquele requerido na solução da equação de difusão. O ideal, portanto, é ter-se um programa que determine rapidamente os fluxos, como os códigos nodais fazem. Como não se dispunha de um ferramental com esta característica, resolveu-se adotar o código CITATION /8/ para realizar os cálculos neutrônicos, visto que ele é bastante empregado na divisão de Física de Reatores do IPEN e da COPESP. Assim, o código foi modificado para realizar automaticamente o remanejamento com auxílio da TPPO, tomando-se o cuidado para não se alterar a função e a estrutura das subrotinas já existentes no código, assim como a hierarquia destas.

Um ponto foi fundamental para que a aplicação da TPPO no remanejamento fosse válida: garantir que as perturbações induzidas pelo remanejamento não fossem grandes a ponto de invalidarem os resultados fornecidos pela teoria. Em princípio não se pode prever se as trocas perturbarão fortemente o núcleo, mas descobriu-se como o problema poderia ser contornado caso isto ocorresse. Uma forma foi impondo-se o vínculo sobre o fator de multiplicação infinito do par de EC candidatos à troca: $|k_{\infty i} - k_{\infty j}| < DKMAX$, sendo DKMAX um vínculo a ser escolhido pelo usuário. A outra forma foi dividindo-se os candidatos à troca em grupos, de maneira que somente os candidatos pertencentes ao mesmo grupo pudessem ser remanejados entre si. O vínculo DKMAX impede que EC com fatores de multiplicação infinito muito diferentes sejam remanejados entre si, limitando a perturbação local (a escolha de DKMAX dependerá de cada problema e da experiência do usuário). A divisão dos EC em conjuntos tem o intuito de não permitir trocas entre EC de regiões com as importâncias neutrônicas (fluxo adjunto) muito distintas, como o centro e a periferia do núcleo. Para que estas idéias fiquem mais claras, apresenta-se um caso exemplo na próxima seção.

4. CASO EXEMPLO

Como ilustração, serão apresentados dois estudos, um no sentido de reduzir a fuga total de neutrons, e o outro no sentido de reduzir o FP. Como o objetivo é apenas apresentar os resultados obtidos com o código modificado, não serão feitas discussões sobre o comportamento do FP, da reatividade e da fuga durante o ciclo. Para o estudo com a redução na fluência, a configuração inicial do reator é apresentada na figura 1, onde os EC das zonas 3, 4, ..., 11 apresentam enriquecimento igual a 2,1%, os EC das zonas 12, 13, ..., 17 igual a 2,6%, e os EC das zonas 18, 19, ..., 23 igual a 3,1%. Nesta figura, os números superiores apresentam o índice da zona, e os inferiores a densidade de potência relativa. Na construção dos EC tomou-se as células combustíveis do reator de Angra 1, cujas seções de choque macroscópicas são apresentadas na tabela 1.

No exemplo para reduzir a fuga considerou-se que apenas os EC dos conjuntos (7, 9, 12, 13, 18, 19) e (14, 15, 16, 17, 20, 21, 22, 23) são candidatos à troca, sendo que os EC do primeiro conjunto não podem ser remanejados com os do segundo,

e vice-versa (o código permite que sejam construídos até seis conjuntos). O vínculo DKMAX foi tomado igual a 1,00, pois não ocorreram grandes perturbações, e impoz-se que o FP fosse menor que 1,6. Os resultados foram obtidos após 7 minutos e 40 segundos de processamento no computador IBM 4381, e são apresentados na tabela 2, onde $\Delta\rho_{ij}$ é a variação de reatividade prevista pela TPPO devida ao remanejamento dos EC I e J, e $\Delta\rho$ a variação real obtida pelo cálculo direto.

Tabela 1: Seções de choque macroscópicas.

Enr.	g	D_g (cm)	$\Sigma_{a g}$ (cm^{-1})	$\nu_g \Sigma_{fg}$ (cm^{-1})	$\Sigma_{s 1 2}$ (cm^{-1})
2,1%	1	1,326390	0,000969	0,005951	0,016126
	2	0,351495	0,007117	0,011108	
2,6%	1	1,331420	0,001005	0,006736	0,015680
	2	0,352134	0,008089	0,013209	
3,1%	1	1,335480	0,001042	0,007495	0,015287
	2	0,352438	0,008999	0,015270	
refl.	1	0,159997	0,000082	0,0	0,037741
	2	0,228064	0,001155	0,0	

Com base na tabela 2 pode-se observar que a fuga total de neutrons na totalidade das vezes diminuiu com o acréscimo da reatividade. Também observa-se que o FP tende a aumentar com o acréscimo da reatividade, mas existem excessões, como ocorreu nas configurações 5, 6, e 7. A redução na fuga de neutros foi bastante pequena neste exemplo, mas isto não invalida o uso do código, visto que o excesso inicial de reatividade aumentou. Na figura 2 apresenta-se a configuração número 10 da tabela 2 para que possa observar-se a nova distribuição de potência no núcleo.

O remanejamento para reduzir o FP parte da configuração representada na figura 3. Neste caso os conjuntos de candidatos à troca escolhidos foram (4, 5, 6, 7, 8, 9, 12, 13, 18, 19) e (10, 11, 14, 15, 16, 17, 20, 21, 22, 23), e DKMAX foi tomado igual a 1,0 como no estudo anterior, visto que as perturbações não foram grandes a ponto de exigirem este vínculo. Na tabela 3 estão os resultados deste remanejamento, que reduziu o FP radial de 1,822 para 1,282 em apenas 5 iterações, consumindo cerca de 2,5 minutos de CPU. Neste caso o número de remanejamentos foi bem menor porque haviam mais candidatos à troca, de modo que as trocas com maior probabilidade de sucesso foram admitidas. A configuração encontrada após o remanejamento, configuração número 5, é basicamente a configuração representada na figura 1.

Tabela 2: Resultados do remanejamento para reduzir a fuga total de neutrons.

Conf	FP	Fuga (neut./s)	I	J	$\Delta\rho_{ij}$ (p cm)	$\Delta\rho$ (p cm)
0	1,282	$8,114 \cdot 10^{16}$	16	20	244,0	230,0
1	1,415	$8,092 \cdot 10^{16}$	9	13	173,0	162,0
2	1,440	$8,076 \cdot 10^{16}$	13	19	145,0	138,0
3	1,565	$8,062 \cdot 10^{16}$	12	18	59,3	54,4
4	1,589	$8,057 \cdot 10^{16}$	18	7	33,4	30,6
5	1,532	$8,057 \cdot 10^{16}$	17	21	215,0	204,0
6	1,504	$8,037 \cdot 10^{16}$	15	22	124,0	131,0
7	1,501	$8,023 \cdot 10^{16}$	7	13	114,0	119,0
8	1,514	$8,016 \cdot 10^{16}$	23	14	20,1	13,1
9	1,531	$8,016 \cdot 10^{16}$	18	13	20,1	13,1
10	1,553	$8,014 \cdot 10^{16}$				

Tabela 3: Resultados do remanejamento para reduzir o FP radial.

Conf	FP	Fuga (neut./s)	I	J	$-\Delta\rho_{ij}$ (p cm)	$-\Delta\rho$ (p cm)
0	1,822	$7,951 \cdot 10^{16}$	21	10	707,0	783,0
1	1,536	$8,027 \cdot 10^{16}$	12	9	173,0	178,0
2	1,533	$8,045 \cdot 10^{16}$	22	11	429,0	510,0
3	1,439	$8,095 \cdot 10^{16}$	13	8	37,5	55,4
4	1,438	$8,100 \cdot 10^{16}$	23	16	134,0	142,0
5	1,282	$8,114 \cdot 10^{16}$				

3	4 1-19	5 1-19	6 1-19	7 1-14	18 1-08	19 0-62
4	8 1-19	10 1-20	11 1-20	17 1-22	23 1-00	21 0-64
5	10	9 1-21	16 1-28	15 1-10	22 0-88	
6	11	16	12 1-15	14 0-86	20 0-53	
7	17	15	14	13 0-55		
18	23	22	20			
19	23					

Figura 1: Representação de 1/4 do núcleo do reator do caso exemplo (configuração 0, simetria de 1/8). Na zona 3 a densidade de potência relativa é 1,18.

3	4 1-11	5 1-16	6 1-18	13 1-17	12 0-83	7 0-37
4	8 1-15	10 1-22	11 1-23	21 1-26	14 0-79	17 0-37
5	10	19 1-55	20 1-52	22 1-22	15 0-68	
6	11	20	18 1-38	23 0-99	16 0-48	
13	21	22	23	9 0-53		
12	14	15	16			
7	17					

Figura 2: Representação de 1/4 do núcleo do reator do caso exemplo após o remanejamento para reduzir a fuga de nêutrons (configuração 10, simetria de 1/8). A densidade de potência relativa na zona 3 é 1,09.

3	4 1.57	5 1.54	6 1.34	7 1.01	18 0.76	19 0.36
4	12 1.75	21 1.82	22 1.57	17 1.08	16 0.65	10 0.27
5	21	13 1.63	23 1.44	15 0.94	11 0.47	
6	22	23	8 0.96	14 0.68	20 0.36	
7	17	15	14	9 0.37		
18	16	11	20			
19	10					

Figura 3: Representação de 1/4 do núcleo do reator do caso exemplo para reduzir o FP (antes do remanejamento, simetria de 1/8). A densidade de potência relativa na zona 3 é 1,55.

5. CONCLUSÕES

O emprego da TPPO no remanejamento de combustível mostra-se eficiente para reduzir o fator de pico radial ou a fuga total de neutrons, sendo que o único cuidado na sua aplicação é garantir que as perturbações sejam realmente pequenas, o que é conseguido com o vínculo DKMAX e escolhendo-se os conjuntos de candidatos. Na totalidade dos estudos realizados com o código, que não se limitam ao caso exemplo aqui apresentado, observou-se que o aumento na reatividade inicial reduz a fuga total de neutrons, e tende a aumentar o FP. Um ponto negativo foi o tempo de processamento que é grande devido à lentidão do código CITATION. Para que o remanejamento seja feito mais rapidamente, futuramente deseja-se tomar um outro programa para realizar os cálculos neutrônicos.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), sem a qual não teria sido possível realizar-se este trabalho.

7. BIBLIOGRAFIA

1. Spetz, S. W.; Hannah, M. A.; Uotien, V. O.; Wingfield, R. N.- Selected topics in fuel management, 5.Extended burnup in B & M operations units - Transactions of the American Nuclear Society: 41, 118 - 120, 1982
2. Spetz, S. W.; Jones, H. M.; Holnan, P. L.- Topics in LWR and Breeder Fuels, 2.Pressure vessel fluence through low-leakage fuel management - Transactions of the American Nuclear Society: 44, 92-93, 1983
3. Downar, J. T.; Kim, Y. K.; Sesonske, A.- Optimization of core reload design for low-leakage fuel management in pressurized water reactors - Nuclear Technology: 96, 85 - 101, 1987
4. Huang, H. Y.; Levine, S. H.;- Improvments of reactor core design and fuel cycles - 3.An automated optimal multiple-cycle PWR fuel management code, 4.A new methode for optimizing core reloads - Transactions of the American Nuclear Society: 30, 338 - 341, 1978
5. Ho, Li-Wei; Roach, A. F.- Perturbation Teory in nuclear Fuel Management Optimization - Nuclear Science and Engineering: 82, 151 - 161, 1982
6. Downar, J. T.; Kim, Y. K.- A reverse depletion method for pressurized water reactor core reload design - Nuclear Technology: 73, 42 - 54, 1986
7. Haling, R. K.- Operating strategy for maintaining an optimum power distribution thowghout life optimum power - ANS Topical meeting nuclear performance of reactor cores - Sept. 26-27, 1963, San Francisco, California (Jac Tar Hotel) - TID - 7276
8. Fowler, T. B., Vondy, D. R., Cunningham, G. W.- Nuclear reactor cores analisys code: CITATION - Oak Ridge National Lab - 1971 - CORNL - Rev 1