

METODOLOGIA PARA REMANEJAMENTO DE COMBUSTIVEL DE REATORES PWR

LUIZ ANTONIO MAI

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
IPEN/CNEN-SP

RESUMO

O presente trabalho propõe um sistema de cálculo que processa a recarga automática de elementos combustíveis para núcleos de reatores tipo PWR incorporado ao programa MCRAC. Esse carregamento visa minimizar o fator de pico de potência no início de cada ciclo através de remanejamento dos combustíveis e introdução de combustíveis novos, mantendo a disposição inicial do núcleo. O sistema é adequado para ser usado no gerenciamento de reatores PWR.

INTRODUÇÃO

Num reator nuclear, para minimizar o custo da energia gerada, entre outras coisas, é necessário um programa ótimo de administração do combustível. Dentro deste particular o sistema de recarga do núcleo, ao longo de sua vida, é de fundamental importância.

Para se obter um sistema ideal de recarregamento, pode-se substituir a função objetiva a ser minimizada, representada pelo custo do combustível, por parâmetros físicos diretamente relacionados com ele, tais como: extensão do ciclo de queima, distribuição uniforme da densidade de potência gerada, diminuição de fugas de nêutrons, etc. Esses parâmetros não são independentes entre si, de modo que pode-se escolher um deles como função objetiva do problema de recarga. Ainda mais, há vínculos a serem respeitados como por exemplo: fator de pico de potência, limites de enriquecimento, fluência no vaso de pressão, concentração de venenos queimáveis, etc.

Percebe-se, pelo exposto, que o problema de recarregamento ótimo do núcleo de um reator nuclear, ao longo de toda sua vida útil, não é uma tarefa fácil principalmente devido à grande quantidade de variáveis envolvidas.

Devido à sua importância, vários trabalhos de otimização de recarga têm sido apresentados utilizando-se de diversas técnicas. Wall/1/ e Stout/2/ utilizaram-se da Programação Dinâmica, Tzanos/3/ e Kim/4/ fizeram uso da Programação Linear, vários outros autores como Terney/5/, Golschmidt/6/ e Downar/7/ utilizaram-se de técnicas de otimização adaptadas tais como: Princípio Máximo de Pontryagin, Queima de Haling, Métodos Variacionais clássicos, Métodos Gráficos, etc.

ESQUEMAS DE CARREGAMENTO INICIAL

Segundo classificação da Westinghouse/8/, existem 3 conceitos distintos de carregamento inicial de núcleos

de reatores PWR:

a) Carregamento Simples

É o esquema mais simples e o mais antigo de carregamento de um núcleo de reator. Consiste numa carga simples de combustível com o mesmo enriquecimento e uniformemente distribuído, com uma distribuição também uniforme de veneno de controle. A substituição do núcleo, ao fim de vida, é completa.

b) Carregamento Concêntrico

Consiste em distribuir zonas concêntricas com enriquecimento diferenciado, sendo que a zona de menor enriquecimento é a central. A medida que a zona se torna mais periférica, aumenta-se o enriquecimento. Com um carregamento assim, a distribuição da densidade de potência é mais uniforme, propiciando uma queima mais homogênea do combustível.

c) Carregamento de Baixa Fuga

Para minimizar o problema de fuga de nêutrons característica do carregamento concêntrico, sem os inúmeros inconvenientes do carregamento simples, introduziu-se um esquema de baixa fuga, colocando-se, na região mais periférica do núcleo do reator, elementos combustíveis menos reativos que a média do núcleo (menos enriquecidos). Esses elementos combustíveis menos reativos tem a função de "blindar" os nêutrons que, em outras situações, escapariam do sistema.

ESQUEMAS DE RECARREGAMENTO

De nada adianta ter-se um bom carregamento inicial se as futuras recargas comprometem a economia inicial. Dessa maneira o ideal é atingido quando se dispõe do melhor esquema inicial de carregamento que permita a melhor estratégia de recarga ao longo da vida útil do reator.

a) Recarregamento Por Lotes

Nesse esquema de recarregamento o núcleo, que inicialmente foi carregado de forma uniforme, à medida que a queima produz

zonas onde os elementos combustíveis estão mais queimados, essas zonas vão sendo substituídas. Por exemplo, no primeiro ciclo a zona central é a que mais queima, então no fim desse ciclo é esta zona que vai ser substituída por elementos combustíveis novos. No segundo ciclo, provavelmente a zona que envolve a zona central é que vai apresentar maior queima e será esta a ser substituída por elementos novos. Dessa maneira vão se sucedendo os ciclos.

b) Recarregamento Disperso

No carregamento por lotes há formação de picos de fluxo e potência que pode ser minimizado através do recarregamento disperso. Esse carregamento consta em dividir o reator em N grupos contendo cada grupo 3, 4 ou 5 elementos combustíveis.

Na primeira recarga um elemento combustível da posição 1 de cada grupo é substituído por combustível novo. Na segunda recarga, são substituídos os elementos das posições 2 de cada grupo, na terceira recarga são substituídos os elementos das posições 3 e assim por diante. Dessa forma, quando atingido um ciclo de equilíbrio, cada grupo de elementos combustíveis conterá um elemento que foi irradiado por um ciclo, um elemento que foi irradiado por dois ciclos, um elemento irradiado por três ciclos e assim por diante.

c) Recarregamento "Out-In"

Foi idealizado especialmente para "achatar" o fluxo e a densidade de potência na região mais central do reator. Neste tipo de recarregamento, o combustível é dividido como no carregamento concêntrico com zonas de igual volume. Ao fim do primeiro ciclo o combustível da zona mais interna, o mais intensamente queimado, é removido do reator, o combustível da zona imediatamente vizinha é movido para o centro, a zona vizinha a esta última toma o seu lugar e assim por diante. Na zona mais periférica é colocado combustível novo. Ao fim de cada ciclo, esta sequência de operações é repetida. Assim cada lote de combustível fica um número de ciclos igual ao número de zonas.

d) Recarregamento Disperso Modificado

Para reatores de grande porte, atualmente se utiliza de uma estratégia de recarga que combina aspectos do recarregamento "out-in" e do disperso. O reator é dividido em zonas, sendo a mais externa constituída de elementos combustíveis novos. As zonas internas (2, 3 ou 4) são formadas como no recarregamento disperso. Em cada recarregamento, o elemento combustível mais intensamente queimado em cada grupo é removido das zonas internas e substituído por elemento combustível da zona exterior, que é removido integralmente para as zonas interiores. O combustível novo é então carregado na zona exterior.

O PROGRAMA MCRAC/9/

O programa MCRAC é um código bidimensional de difusão em dois grupos energéticos baseado no código EXTERMINATOR-II/10/. Foi desenvolvido inicialmente na Universidade da Pennsylvania e adaptado para uso em micro computadores,

com algumas modificações e implementações, pelo Instituto Ruder Boskovic (Yugoslavia). O código MCRAC realiza, além de cálculos neutrons, análise econômica de PWR para vários ciclos consecutivos. O código requer seções de choque na forma de coeficientes de polinômio como função da queima e da concentração de boro solúvel. Essas seções de choque são geradas nesse formato pelo código PSU-LEOPARD/11/.

METODO DE RECARREGAMENTO UTILIZANDO MCRAC

A evolução das técnicas de gerenciamento do combustível é no sentido de maximizar a queima. Todos os esforços para o desenvolvimento de combustíveis objetivam aumentar a queima de descarga que é hoje aproximadamente 35.000 MWD/T passando para além de 45.000 MWD/T. É uma preocupação atual também, além da redução do fator de pico, a redução das fugas de nêutrons. Antagonicamente, a redução das fugas de nêutrons implica no aumento do fator de pico e esse fato acentua a importância do veneno queimável.

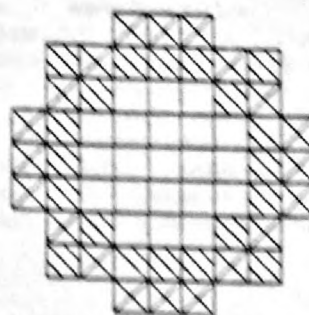
Levando-se em conta as observações acima, propõe-se, para o módulo de remanejamento a ser incorporado ao programa MCRAC, as seguintes características:

a) a otimização das recargas é no sentido de minimizar o fator de pico de potência.

b) a configuração inicial será dada e surgirá através de pesquisa prévia tendo-se em conta, por exemplo, minimizar as fugas de nêutrons. Essa disposição inicial será mantida ao longo das recargas.

c) o processo de otimização não leva em conta a concentração crítica de boro nem o gerenciamento da movimentação das barras de controle.

O método adotado de otimização das recargas, devido às características do programa MCRAC, foi a troca simples. Logicamente várias restrições foram feitas pois as possibilidades de troca são enormes. Para se ter uma idéia do tamanho do problema, toma-se como exemplo uma disposição simples como a da figura 1:



□ > □ medio □ <

Fig. 1 Núcleo do Reator-Exemplo

Em geometria de um quarto de reator, tem-se, para esse caso, 20 elementos combustíveis (11 completos, 8 metades e 1 um quarto). Se fosse executado a permuta de cada

um dos elementos combustíveis inteiros, o total de possibilidades P seria:

$$P = 11! \approx 4 \cdot 10^7 \text{ possibilidades}$$

Esse numero de possibilidades é absolutamente inviável, considerando-se também o pequeno tamanho do reator.

Para se restringir as possibilidades, perdendo o mínimo de opções válidas, é necessário impor certas restrições:

a) cada zona manterá a proporção de numeros de elementos da disposição inicial dada. Essa restrição coincide com a característica proposta de se manter a disposição inicial do reator.

b) as posições inicialmente ocupadas pelos elementos combustíveis de maior enriquecimento, serão sempre as que irão receber elementos combustíveis novos. Assim essas posições já estarão definidas durante as trocas. As permutas serão feitas, portanto, entre os elementos que estiverem com pelo menos 1 ciclo no reator.

c) as trocas só serão feitas entre elementos que estão fora dos eixos do quadrante e do seu eixo de simetria.

Considerando-se essas 3 restrições, o número de possibilidades de troca para o reator da figura 1 fica:

$$P = 3 \text{ possibilidades}$$

O reator, com essas restrições fica reduzido então ao mostrado na figura 2:

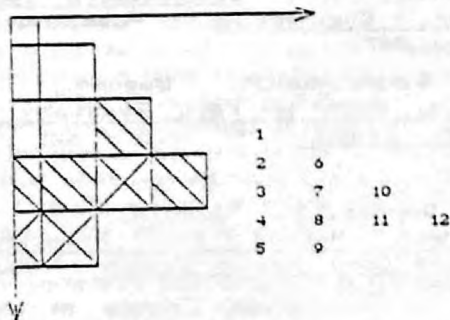


Fig. 2 Redução do Reator-Exemplo

As trocas nos eixos do quadrante e no seu eixo de simetria são feitas entre si, com exceção do elemento central que não é trocado. Dessa forma o numero total de possibilidades passa a ser:

$$P = 3 + 2(4) + 2 = 13 \text{ possibilidades}$$

Como já visto, as trocas de elementos combustíveis de ciclo para ciclo, mantem o numero de zonas e o numero de elementos por zona da disposição inicial dada. Para este exemplo apresentado, com 61 elementos combustíveis e 3 zonas de enriquecimento, tem-se 13 possibilidades de troca.

Descrição do Sistema. O esquema escolhido para se executar o remanejamento dos elementos combustíveis, conforme descrito acima, utilizando-se do código MCRAC está apresentado na figura 3:

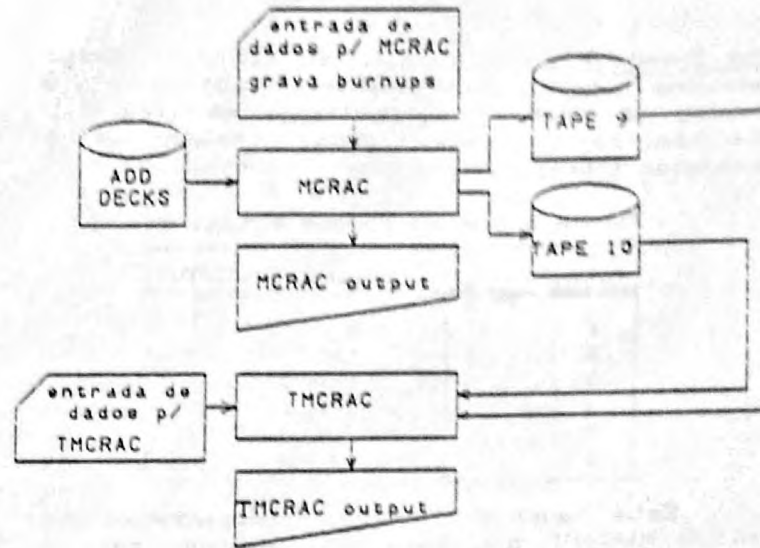


Fig. 3 Esquema Geral de Cálculo Para Remanejamento de Combustível

O programa TMCRC executa os vários testes necessários seguindo as regras explicitadas acima, buscando minimizar o fator de pico radial de potência. Para isso, manipula convenientemente os valores de "burnup", identificação da biblioteca ADD (arquivo de coeficientes de polinômios relacionados com as constantes nucleares) e identificação das regiões do reator, para um cálculo estático com o MCRAC simplificado. Esta simplificação do programa MCRAC está como subrotina para cálculo do fator de pico radial de potência de cada teste e consta do próprio MCRAC sem várias de suas subrotinas que são desnecessárias para o cálculo estático.

A figura 4 a seguir mostra o esquema de cálculo do programa TMCRC.

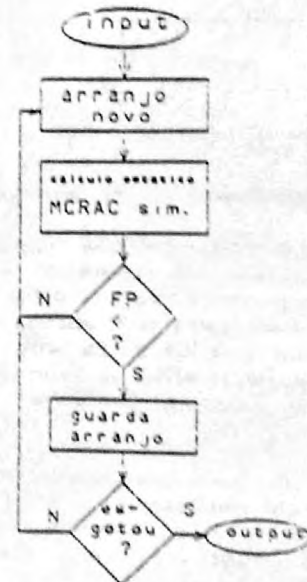


Fig. 4 Esquema de Cálculo do Programa TMCRC

Por razões de tempo de processamento, não é conveniente inicializar-se um novo ciclo de queima automaticamente depois da determinação do carregamento para início de novo ciclo. Se se desejar queimar este novo ciclo, monta-se um novo arquivo de entrada de dados com os resultados apresentados e processa-se a queima.

Um Exemplo- Como exemplo de aplicação deste sistema de remanejamento, utilizou-se o núcleo de reator esquematizado na figura 1. Executou-se a queima desse reator em 6 estágios ("steps") conforme a tabela 1:

Tabela 1. Queima Para 6 Estágios

estágio	queima (MWD/TU)
1	0
2	126,5
3	1084,0
4	2710,2
5	3252,6
6	3252,6

Esta queima totaliza aproximadamente 10.500 MWD/TU que, para este exemplo será a queima de descarga do núcleo.

Quando da execução desta queima, são gravados os 2 arquivos mostrados na figura 3. O primeiro referente ao conjunto de entrada de dados para o programa MCRAC simplificado (tape 9) que tem a mesma formatação da entrada de dados do programa MCRAC, com exceção de alguns cartões. O segundo é um arquivo com as queimas por elemento combustível para o último estágio de queima (tape 10).

Resultado. O resultado do remanejamento buscando a minimização do fator de pico é apresentado na figura 5:

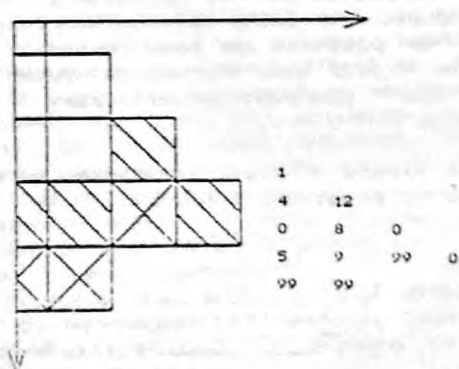


Fig. 5 Resultado do Remanejamento

Na figura 5 nota-se que alguns elementos combustíveis contêm o número 99, que é a designação convencional para elementos novos. Quando não existe número de elementos suficientes numa região para entrar em outra região, há o aparecimento de zeros em algumas posições, como também pode-se observar na figura.

O tempo de processamento deste exemplo foi de aproximadamente 3 minutos no computador CDC/CYBER 180/830 disponível à Divisão de Física de Reatores do IPEN-CNEN-SP.

CONCLUSÕES

A implantação do sistema de remanejamento de combustível no programa MCRAC foi feito sem modificações significativas no programa original. De fato foram apenas retiradas subrotinas e comandos não utilizados e adaptadas as variáveis compartilhadas entre o sistema de remanejamento e o programa MCRAC.

Os resultados obtidos, para o caso exemplo calculado, foram os esperados pois, sendo um caso simples, já se sabia aproximadamente de antemão qual deveria ser o resultado.

Esse sistema de remanejamento não leva necessariamente à disposição ótima dos elementos combustíveis, mas à uma disposição viável sob o ponto de vista econômico, neutrônico e de segurança, além de requerer um tempo de processamento razoável.

Neste sistema, como se pode observar pelo exemplo apresentado, o elemento central é mantido sem troca. Também são dadas indicações sobre se a disposição encontrada satisfaz ou não o requisito de reatividade inicial e o fator de pico máximo permitido.

REFERÊNCIAS

- [1] Wall, J.; Frenech, H. - The Application of Dynamic Programming to Fuel Management Optimization. Nucl. Sci. Eng., 22:285-97, 1965
- [2] Stout, R.B.; Robinson, A.H. - Determination of Optimum Fuel Loading in Pressurized Water Reactors Using Dynamic Programming. Nucl. Tech., 20:86-102, 1973.
- [3] Tzanos, C.P. & outros - Optimization of Material Distributions in Fast Reactors Cores. Nucl. Sci. Eng., 52:94, 1973
- [4] Kim, Y.J. & outros - Optimization of Core Reload Design for Low-Lakage Fuel Management in Pressurized Water Reactors. Nucl. Sci. Eng., 96:85-101, 1987.
- [5] Terney, W.B. - Optimization Techniques in Nuclear Engineering. Massachusetts; PhD. Thesis, 1967.
- [6] Goldschmidt, P.; Quenon, J. - Minimum Critical Mass in Fast Reactors With Bonded Power Density - Nucl. Sci. Eng., 39:311-9, 1970.
- [7] Downar, T.J.; Kim, J.K. - A Reverse Depletion Method For Pressurized Water Reactor Core Reload Design - Nucl. Sci. Tech., 73:42-54, 1986.
- [8] Fuel Cycle Core Reduction Though Westinghouse Fuel Design on Core Management - prospecto.
- [9] Petrovic, B.G.; Pevec, D.; Levine, S.H. - MCRAC - RBI version 89.4 Input Manual. Zagreb, Yugoslavia - 1990.
- [10] Fowler, T.B.; Tobias, M.L.; Vondy, D.R. - "EXTERMINATOR-II". A FORTRAN Code for Solving Multigroup Diffusion Equation in Two Dimensions. ORNL-4078, Oak Ridge National Laboratory - 1967.
- [11] Pevec, D. - PSU-LEOPARD- Manual do Usuario - RBI PG-version 89.4, Zagreb, Yugoslavia - 1990.

SUMMARY

This paper presents a system to process the automatic fuel elements reload in PWR reactors type. The main goal is to minimize the power peak-factor at the begin of the life, by using fuel element shuffle, fresh elements and keeping initial lay-out. It has been found that the system is adequate for PWR management.