

TEMA ESPECIAL EM FÍSICA DE REATORES
PREVISÃO DE CRITICALIDADE E CÁLCULO DE BARRAS DE CONTROLE

Carlos Roberto Ferreira
Hélio Yoriyaz

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN

R E S U M O

Foram calculados os problemas 1 e 2 propostos no tema especial em física de reatores, para o VIII ENFIR. Executaram-se as duas metodologias de cálculo seguintes: ETOG-3/FLANGE-II/HAMMER-TECHNION/CITATION e NJOY/AMPX-II/HAMMER-TECHNION/CITATION. Os cálculos neutrônicos de difusão foram elaborados em 2 e 4 grupos de energia, em geometria bidimensional, no código CITATION. Ambas as metodologias subestimaram os valores dos fatores efetivos de multiplicação, sendo que a segunda metodologia, mais refinada, forneceu melhores resultados.

INTRODUÇÃO

A previsão de criticalidade e o cálculo correto de barras de controle são de fundamental importância no projeto de reatores nucleares. A confiança nos resultados de simuladores computacionais (que utilizam em geral, aproximações da teoria de transporte de neutrons e os mais variados métodos numéricos), é assegurada basicamente por comparações com resultados experimentais e também, por comparações com resultados calculados provenientes de várias fontes. É com este propósito que apresentam-se os dois problemas colocados como o Tema Especial em Física de Reatores para o VIII ENFIR, conforme definidos pela Comissão Organizadora do Evento. O problema 1 consiste de uma unidade crítica de UO_2 , com revestimento de aço-inox e barras de controle de Ag-In-Cd. O problema 2 também é uma unidade crítica de UO_2 , mas com revestimento de Zircaloy e barras de controle de B₄C. Neste trabalho, ambos os problemas foram calculados com as duas metodologias descritas a seguir.

METODOLOGIA DE CÁLCULO 1

A 1a. metodologia de cálculo é representada no diagrama da Figura 1. São utilizados os programas ETOG-3 [1] e FLANGE-II [2] para elaborar, a partir da biblioteca básica de dados nucleares ENDF/B-IV, respectivamente, as bibliotecas epitérmica (54 grupos; $0.625 \text{ eV} \leq E \leq 10 \text{ MeV}$) e térmica (30 grupos; $0.00001 \text{ eV} \leq E \leq 0.625 \text{ eV}$), e os programas HELP e LITHE, para a sua formatação, para o programa de cálculos celulares HAMMER-TECHNION [1]. As seções de choque produzidas pelo HAMMER-TECHNION, para as células combustível e de controle (as constantes celulares da barra de controle são calculadas em ambos os casos via metodologia 2), são utilizadas no código de difusão de neutrons CITATION [3], em modelagem bidimensional. Os cálculos dos fatores efetivos de multiplicação de neutrons e reatividades dos sistemas em estudo, são obtidos finalmente em 2 e 4 grupos de energia.

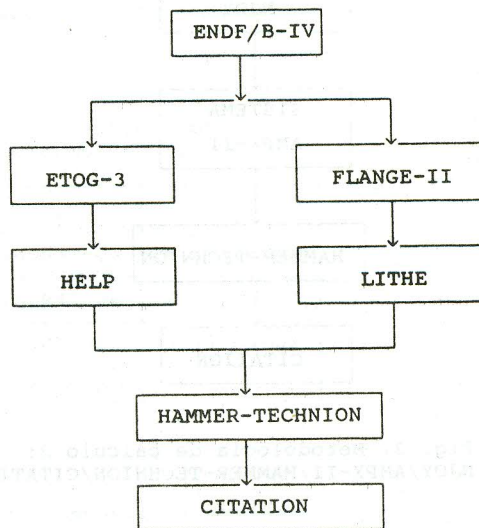


Fig. 1. Metodologia de cálculo 1: ETOG-3/FLANGE-II/HAMMER-TECHNION/CITATION.

Os cálculos de estrutura fina, finalizados com a elaboração das bibliotecas térmica e epitérmica são praticamente independentes da aplicação. O código HAMMER-TECHNION é baseado na equação integral de transporte e constitui um elo de ligação entre os dados nucleares de multigrupo independentes da aplicação e os dados homogeneizados em poucos grupos de energia, usados em cálculos de reatores térmicos. Nesta metodologia, a auto-blindagem das ressonâncias resolvidas dos actinídeos é tratada no HAMMER-TECHNION, pelo formalismo de Nordheim. Nos dois problemas em questão, utilizaram-se as duas opções de cálculo "STANDARD" e "CARLVIK", para o tratamento da região térmica no HAMMER-TECHNION; em todos os casos utilizou-se a aproximação B1.

METODOLOGIA DE CÁLCULO 2

A 2a. metodologia de cálculo é mostrada na Figura 2. O processamento de dados começa

com as bibliotecas básicas de dados nucleares ENDF/B-IV, e JENDL-2, sendo utilizado um acoplamento [4] dos sistemas NJOY [5] e AMPX-II [6], para produzir as bibliotecas térmica (30 grupos, $0.00001 \text{ eV} \leq E \leq 0.625 \text{ eV}$) e epitérmica (54 grupos; $0.625 \text{ eV} \leq E \leq 10 \text{ MeV}$) para o programa celular HAMMER-TECHNION. Este programa, gera seções de choque homogeneizadas em 2 e 4 grupos de energia para o código de difusão de neutrons CITATION, no qual são efetuados os cálculos dos fatores efetivos de multiplicação e reatividades das unidades críticas em estudo. A modelagem geométrica dos reatores no CITATION é bidimensional.

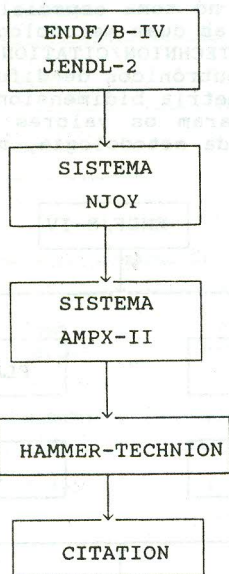


Fig. 2. Metodologia de cálculo 2: NJOY/AMPX-II/HAMMER-TECHNION/CITATION

Ambas as metodologias usam o programa HAMMER-TECHNION para o cálculo celular. Uma diferença fundamental é que, nesta metodologia, o HAMMER-TECHNION foi modificado tal que, o tratamento da auto-blindagem das ressonâncias resolvidas dos nuclídeos actíneos é feita no módulo ROLAIDS do sistema AMPX-II, o qual resolve a equação integral de transporte, considerando espalhamento isotrópico, em milhares de pontos de energia no intervalo considerado de 0.625 eV a 5530 eV (cerca de 40 mil pontos de energia). Na metodologia 1, o tratamento é feito pelo método de Nordheim no próprio HAMMER-TECHNION.

Nesta metodologia foram utilizadas as mesmas opções de cálculo no HAMMER-TECHNION usadas na metodologia 1: "STANDARD" e "CARLVIK" e aproximação B1 em todos os casos. Com referência à procedência dos dados nucleares, nota-se que: os dados provieram da biblioteca ENDF/B-IV, menos os do U-238 que provieram da JENDL-2 e os dos isótopos Ag-107, Ag-109, In-113 e In-115, os quais provieram da biblioteca de produtos de fissão da ENDF/B-V.

MODELAGEM CELULAR

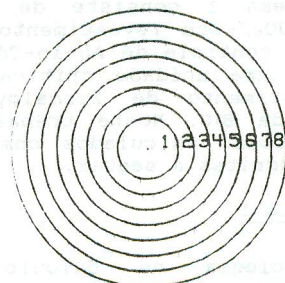
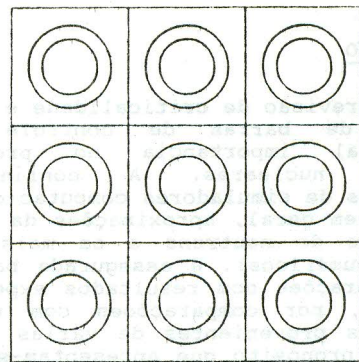
A modelagem celular para cada um dos componentes está descrita a seguir.

A célula combustível é constituída de 3 regiões cilíndricas que são: a região do UO_2 na parte central, a região do "gap" + revestimento e a região do refletor.

A supercélula da barra de controle é constituída de 8 regiões, correspondentes à vareta absorvedora na parte central envolta por 8 células de combustível, Figura 3. A supercélula de água do controle é obtida desta, substituindo-se a vareta absorvedora e o seu encamisamento por água.

O revestimento das varetas de combustível e barra de controle tiveram suas concentrações atômicas diluídas na região do "gap".

A célula de refletor é constituída de uma pequena região central de UO_2 com baixa concentração, envolta por uma região de água. Os diâmetros celulares de cada região das supercélulas foram obtidos pela equivalência de área.



| região | material |
|--------|--------------------|
| 1 | vareta absorvedora |
| 2 | revestimento |
| 3 | água |
| 4 | água |
| 5 | revestimento |
| 6 | UO_2 |
| 7 | revestimento |
| 8 | água |

Fig. 3. Supercélula da barra de controle

MODELAGEM DO NÚCLEO

O cálculo de difusão neutrônica bidimensional foi realizado pelo programa CITATION, versão utilizada no IPEN. Foram realizados cálculos em 2 e 4 grupos de energia. A malhagem normal foi feita utilizando 1 malha por célula, com tamanho de refletor de 80 cm nas laterais e buckling axial na direção z, calculado a partir das alturas críticas de água fornecidas com e sem barras de controle. Na Tabela 1 são mostrados os valores dos bucklings axiais para ambos os problemas.

Tabela 1. Valores dos bucklings axiais para os problemas 1 e 2, em cm⁻²

| CONFIGURAÇÃO | PROBLEMA 1 | PROBLEMA 2 |
|--------------|------------|------------|
| SEM BARRAS | 2.6769E-3 | 3.5496E-3 |
| COM BARRAS | 1.2168E-3 | 7.7143E-4 |

Ambos os núcleos foram modelados em simetria de 1/4 utilizando condições de contorno refletidas. No refletor foi utilizada a condição de contorno extrapolada.

RESULTADOS OBTIDOS

Foram determinados os fatores de multiplicação para cada conjunto de seções de choque fornecidos pelas metodologias apresentadas anteriormente. Para análise dos resultados a seguinte nomenclatura foi adotada, conforme a opção de cálculo no HAMMER-TECHNION:

MODELO A utilização da metodologia de cálculo 2, com a opção "CARLVIK";

MODELO B utilização da metodologia de cálculo 2, com a opção "STANDARD";

MODELO C utilização da metodologia de cálculo 1, com a opção "CARLVIK";

MODELO D utilização da metodologia de cálculo 1, com a opção "STANDARD".

Nas Tabelas de 2 a 5 estão mostradas as seções de choque do combustível geradas pelos vários modelos citados para o problema 1. Na Tabela 6 estão mostradas as seções de choque para a barra de controle (Ag-In-Cd) obtidas com o MODELO A.

Nas Tabelas de 7 a 10 estão mostradas as seções de choque do combustível para o problema 2 e, na Tabela 11, as seções de choque da barra de controle (B4C), geradas com o MODELO A.

Na Tabela 12 estão mostrados os fatores de multiplicação efetivos obtidos para o problema 1 e, na Tabela 13, os resultados obtidos para o problema 2.

Tabela 2. Seções de choque do combustível obtidas com o MODELO A para o problema 1.

| GRUPO | D | Σ_a | $\nu\Sigma_f$ | Σ_r |
|-------|------------|------------|---------------|------------|
| 1 | 1.81815+00 | 4.36158-03 | 1.00631-02 | 8.26282-02 |
| 2 | 9.56685-01 | 2.68637-03 | 9.50943-04 | 7.80405-02 |
| 3 | 5.96375-01 | 2.81246-02 | 1.36477-02 | 6.77704-02 |
| 4 | 2.71648 | 1.21749-01 | 1.78986-01 | — |

Tabela 3. Seções de choque do combustível obtidas com o MODELO B para o problema 1.

| GRUPO | D | Σ_a | $\nu\Sigma_f$ | Σ_r |
|-------|------------|------------|---------------|------------|
| 1 | 1.81816+00 | 4.36124-03 | 1.00622-02 | 8.26399-02 |
| 2 | 9.56689-01 | 2.68635-03 | 9.50926-04 | 7.80419-02 |
| 3 | 5.96382-01 | 2.81247-02 | 1.36478-02 | 6.77705-02 |
| 4 | 2.67658-01 | 1.20314-01 | 1.76035-01 | — |

Tabela 4. Seções de choque do combustível obtidas com o MODELO C para o problema 1.

| GRUPO | D | Σ_a | $\nu\Sigma_f$ | Σ_r |
|-------|------------|------------|---------------|------------|
| 1 | 1.78779+00 | 4.56686-03 | 9.52296-02 | 8.10141-02 |
| 2 | 9.68000-01 | 2.60348-03 | 9.50519-04 | 7.69439-02 |
| 3 | 6.15648-01 | 2.77282-02 | 1.42780-02 | 6.51528-02 |
| 4 | 2.69839-01 | 1.21857-01 | 1.79144-01 | — |

Tabela 5. Seções de choque do combustível obtidas com o MODELO D para o problema 1.

| GRUPO | D | Σ_a | $\nu\Sigma_f$ | Σ_r |
|-------|------------|------------|---------------|------------|
| 1 | 1.78780+00 | 4.56650-03 | 9.52213-03 | 8.10156-02 |
| 2 | 9.68008-01 | 2.60344-03 | 9.50502-04 | 7.69452-02 |
| 3 | 6.15642-01 | 2.77282-02 | 1.42781-02 | 6.51525-02 |
| 4 | 2.65853-01 | 1.20387-01 | 1.76135-01 | — |

Tabela 6. Seções de choque da barra de controle (Ag-In-Cd) obtidas com a METODOLOGIA A para o problema 1.

| GRUPO | D | Σ_a | $\nu\Sigma_f$ | Σ_r |
|-------|------------|------------|---------------|------------|
| 1 | 1.87806+00 | 1.45195-03 | — | 9.12805-02 |
| 2 | 9.62258-01 | 8.16673-03 | — | 9.80229-02 |
| 3 | 5.09863-01 | 1.37366-01 | — | 7.29797-02 |
| 4 | 1.65434-01 | 6.14069-01 | — | — |

Tabela 7. Seções de choque do combustível obtidas com o MODELO A para o problema 2.

| GRUPO | D | Σ_a | $\nu\Sigma_f$ | Σ_r |
|-------|------------|------------|---------------|------------|
| 1 | 1.83415+00 | 4.14071-03 | 9.70886-03 | 8.15017-02 |
| 2 | 9.54394-01 | 2.60693-03 | 9.17508-04 | 7.59834-02 |
| 3 | 6.63958-01 | 2.48847-02 | 1.29602-02 | 6.75682-02 |
| 4 | 2.80608-01 | 1.05090-01 | 1.72316-01 | — |

Tabela 8. Seções de choque do combustível obtidas com o MODELO B para o problema 2.

| GRUPO | D | Σ_a | $\nu\Sigma_f$ | Σ_r |
|-------|------------|------------|---------------|------------|
| 1 | 1.83415+00 | 4.14029-03 | 9.70779-02 | 8.15033-02 |
| 2 | 9.54397-01 | 2.60690-03 | 9.17485-04 | 7.59848-02 |
| 3 | 6.63957-01 | 2.48847-02 | 1.29603-02 | 6.75683-02 |
| 4 | 2.77102-01 | 1.03933-01 | 1.70009-01 | — |

Tabela 9. Seções de choque do combustível obtidas com o MODELO C para o problema 2.

| GRUPO | D | Σ_a | $\nu\Sigma_f$ | Σ_r |
|-------|------------|------------|---------------|------------|
| 1 | 1.80433+00 | 4.34497-03 | 9.19967-03 | 7.97867-02 |
| 2 | 9.64635-01 | 2.52206-03 | 9.16772-04 | 7.49866-02 |
| 3 | 6.80571-01 | 2.45959-02 | 1.35528-02 | 6.48134-02 |
| 4 | 2.78638-01 | 1.05117-01 | 1.72354-01 | — |

Tabela 10. Seções de choque do combustível obtidas com o MODELO D para o problema 2.

| GRUPO | D | Σ_a | $\nu\Sigma_f$ | Σ_r |
|-------|------------|------------|---------------|------------|
| 1 | 1.80435+00 | 4.34454-03 | 9.19867-03 | 7.97884-02 |
| 2 | 9.64637-01 | 2.52202-03 | 9.16751-04 | 7.49881-02 |
| 3 | 6.80571-01 | 2.45959-02 | 1.35529-02 | 6.48137-02 |
| 4 | 2.75165-01 | 1.03943-01 | 1.70017-01 | — |

Tabela 11. Seções de choque da barra de controle (B4C) obtidas com o MODELO A para o problema 2.

| GRUPO | D | Σ_a | $\nu\Sigma_f$ | Σ_r |
|-------|------------|------------|---------------|------------|
| 1 | 2.07698+00 | 1.61094-03 | — | 7.59707-02 |
| 2 | 1.01942+00 | 8.27534-03 | — | 8.87590-02 |
| 3 | 4.69634-01 | 2.12921-01 | — | 6.51916-02 |
| 4 | 1.58635-01 | 5.99858-01 | — | — |

Tabela 12. Fatores de multiplicação efetivos obtidos para o problema 1. Cálculo em 4 grupos de energia e 1 malha por célula.

| MODELO | SEM BARRAS | COM BARRAS |
|--------|------------|------------|
| A | 0.994941 | 0.998405 |
| B | 0.991008 | 0.994389 |
| C | 0.990103 | 0.993953 |
| D | 0.986227 | 0.989882 |

Tabela 13. Fatores de multiplicação efetivos obtidos para o problema 2. Cálculo em 4 grupos de energia e 1 malha por célula.

| MODELO | SEM BARRAS | COM BARRAS |
|--------|------------|------------|
| A | 0.999094 | 0.999917 |
| B | 0.996852 | 0.997441 |
| C | 0.991710 | 0.992506 |
| D | 0.989480 | 0.990043 |

Em ambos os problemas verifica-se que os cálculos subestimaram o valor de k_{eff} , sendo que o melhor resultado foi obtido através da metodologia 2 utilizando-se a opção "CARLVIK" (MODELO A). Verifica-se também que os melhores resultados são obtidos para a unidade crítica do problema 2, que utiliza revestimento de Zircaloy.

De modo geral nota-se, também, que os resultados obtidos pelos diferentes modelos apresentam discrepâncias razoáveis de até 1000 pcm.

A reatividade das barras de controle de Ag-In-Cd e B4C foram avaliadas e estão mostradas na Tabela 14.

Tabela 14. Reatividades das barras de controle, utilizando o MODELO A.

| BARRA | valor de barra (pcm) |
|----------|----------------------|
| Ag-In-Cd | 4204 |
| B4C | 8362 |

Alguns cálculos também foram feitos em 2 grupos de energia e utilizando 2 malhas por célula, para verificar a influência destas variações no cálculo dos fatores de multiplicação efetivos. Na Tabela 15, podem ser vistos os resultados obtidos em várias situações. Estes cálculos foram efetuados utilizando-se o MODELO A, e somente para o problema 1.

Tabela 15. Fatores de multiplicação efetivos para diferentes casos com 2 e 4 grupos de energia, e 1 e 2 malhas por célula.

| configuração | sem barras | com barras |
|-----------------------------|------------|------------|
| 1 malha/célula 2 grupos | 0.994545 | 0.999698 |
| 2 malhas/célula 4 grupos | 0.995284 | 0.997949 |

REFERÊNCIAS

- [1] Barhen, J., Rothenstein, W., and Taviv, E., "The Hammer Code System", NP-565, Electric Power Research, Palo California, October 1978.

[2] Honeck H. C., Finch D. R., "FLANGEII (Version 71-1), A Code to Process Thermal Neutron Data From ENDF/B Tape", Savannah River Laboratory report DP-1278 (ENDF-152) (1971).

[3] Fowler T. B.; Vondy, D. R. & Cunningham, G. W.; "Nuclear Reactor Core Analysis Code: CITATION", Oak Ridge, Tennessee, Oak Ridge National Laboratory, (ORNL-TM-2496, Rev. 2) July 1971.

[4] Santos, A.; Ferreira, C. R.; Lopez, E. M.; "Elaboração de Uma Interface AMPX-II/TECHNION", IPEN/CNEN-SP. 3º Encontro Geral de Energia Nuclear (3º CGEN), Rio de Janeiro, 22 a 27 de abril de 1.990.

[5] MacFarlane, R. E.; Muir, D. W.; Boicourt, R. M.; "The NJOY Nuclear Data Processing System, Vol.I: User's Manual", Los Alamos National Laboratory Report, LA-9393-M, Vol (ENDF-324), 1982.

[6] Greene, N. M.; Ford III, W. E. et alli, "AMPX-II: A Modular Code System for Generating Coupled Multigroup Neutron-Gamma Libraries from Data in ENDF Format" PSR-53, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.

SUMMARY

The problems 1 and 2, proposed for the Reactor Physics Special Theme in the VIII ENFIR, have been calculated. Two methodologies have been employed: ETOG-3/FLANGE-II/HAMMER-TECHNION/CITATION and NJOY/AMPX-II/HAMMER-TECHNION/CITATION. The bidimensional neutron diffusion calculations was made in 2 and 4 energy groups with CITATION code. Both methodologies underestimated the effective multiplication factors. The second methodology, which is more elaborated, gives better results.

| Barra | Valor de Barra |
|-------|----------------|
| 4500 | |
| 4100 | |

| Modelo | Barra | Valor de Barra |
|--------|------------|----------------|
| A | SEM BARRAS | 0.99999 |
| B | SEM BARRAS | 0.99999 |
| C | SEM BARRAS | 0.99999 |
| D | SEM BARRAS | 0.99999 |

Alguns cálculos foram feitos em 2 grupos de energia e utilizando a malha por barras para verificar a influência das variações no cálculo dos fatores de multiplicação efetivos. Na Tabela 10 podem ser vistos os resultados obtidos em várias situações. Estes cálculos foram efetuados utilizando o modelo A, a seguinte para o problema 1.

Tabela 10. Fatores de multiplicação efetivos obtidos para o problema 1. Cálculo em 2 grupos de energia e 1 malha por barras.

| Modelo | SEM BARRAS | COM BARRAS |
|--------|------------|------------|
| A | 0.99999 | 0.99999 |
| B | 0.99999 | 0.99999 |
| C | 0.99999 | 0.99999 |
| D | 0.99999 | 0.99999 |

Tabela 11. Fatores de multiplicação efetivos para diferentes casos com 2 e 4 grupos de energia e 1 e 2 malhas por barras.

| Coligação | em barras | com barras |
|-----------|-----------|------------|
| 1 grupo | 0.99999 | 0.99999 |
| 2 grupos | 0.99999 | 0.99999 |

Em ambos os problemas, verificamos que os cálculos utilizando a malha por barras dão um melhor resultado para o fator de multiplicação efetivo. A metodologia utilizada também que os melhores resultados são obtidos para a malha por barras. Este fato é devido ao fato de que a malha por barras dá um melhor resultado para o fator de multiplicação efetivo. Este fato é devido ao fato de que a malha por barras dá um melhor resultado para o fator de multiplicação efetivo.