

INCORPORAÇÃO DE UM MÓDULO TERMO-HIDRAULICO AO PROGRAMA
CITATION

HELIO YORIYAZ
MARCOS ROBERTO ROSSINI
MITSUO YAMAGUCHI

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES - IPEN

RESUMO

Um módulo termo-hidráulico foi incorporado ao programa CITATION para considerar os efeitos de temperatura no núcleo de um reator nuclear. Esses efeitos são considerados através da correção das seções de choque microscópicas com as temperaturas do combustível e moderador e da densidade do moderador. As correções das seções de choque são realizadas através de um módulo de interpolação linear em função das temperaturas e densidades em cada zona material. Comparações foram feitas com o programa FX2-TH em geometria R-Z, obtendo-se boa concordância entre os resultados.

INTRODUÇÃO

O código CITATION /1/ é um programa para cálculo de reator, que utiliza a teoria de difusão em multigrupos de energia em até 3 dimensões. As constantes de multigrupo são geradas com programas apropriados que em geral utiliza a teoria de transporte em uma dimensão. Para uma dada potência, são calculadas temperaturas médias do combustível, revestimento e moderador, e assim são geradas constantes de grupo.

Os parâmetros neutrônicos, quando não há realimentação termo-hidráulica, podem ser avaliados em uma unidade crítica. Mas em um reator de potência é difícil avaliar o erro que se comete nos cálculos dos parâmetros neutrônicos quando se utiliza as constantes geradas com temperaturas médias no núcleo. A correção das constantes de grupo com as temperaturas permite minimizar ou mesmo eliminar esse erro.

Neste trabalho, um modelo termo-hidráulico foi implementado no programa CITATION. As distribuições de temperatura do combustível e moderador são calculadas e corrigem-se as seções de choque. Uma nova distribuição de potência é calculada com as seções de choque corrigidas, procedendo-se assim até obter a convergência desejada. Na figura 1 está mostrado o diagrama esquemático do processo iterativo executado no CITATION.

MODELO TERMO-HIDRAULICO

A variação da energia total em um volume de controle é dada pela soma das variações da energia interna, cinética e potencial. Num sistema onde a pressão é constante e o trabalho realizado é nulo, e cujas energias cinéticas e potenciais são desprezíveis em relação a energia interna, a seguinte equação de difusão de calor pode ser escrita:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot \vec{q}'' + q''' \quad (1)$$

onde

ρ é a densidade do material,
 T é a temperatura,
 \vec{q}'' é o fluxo de calor,
 q''' é a fonte de energia e
 c_p é o calor específico.

Para o caso onde a transferência de calor é por condução utilizou-se a Lei de Fourier na forma diferencial:

$$\vec{q}'' = -k \nabla T \quad (2)$$

onde k é a condutividade térmica.

No caso onde a transferência de calor é feita por convecção natural entre uma placa e um fluido o fluxo de calor é dado pela lei de resfriamento de Newton:

$$q_v'' = h (T_{\text{placa}} - T_{\text{fluido}}) \quad (3)$$

onde

h é o coeficiente de transferência de calor,
 T_p é a temperatura na superfície da placa.

T_f é a temperatura do fluido o mais distante possível da placa.

A transferência de calor por convecção forçada é efetuada pelo movimento macroscópico do fluido e pode ser escrita como função da velocidade, tal que:

$$q_{vI}'' = v \rho c_p T \quad (4)$$

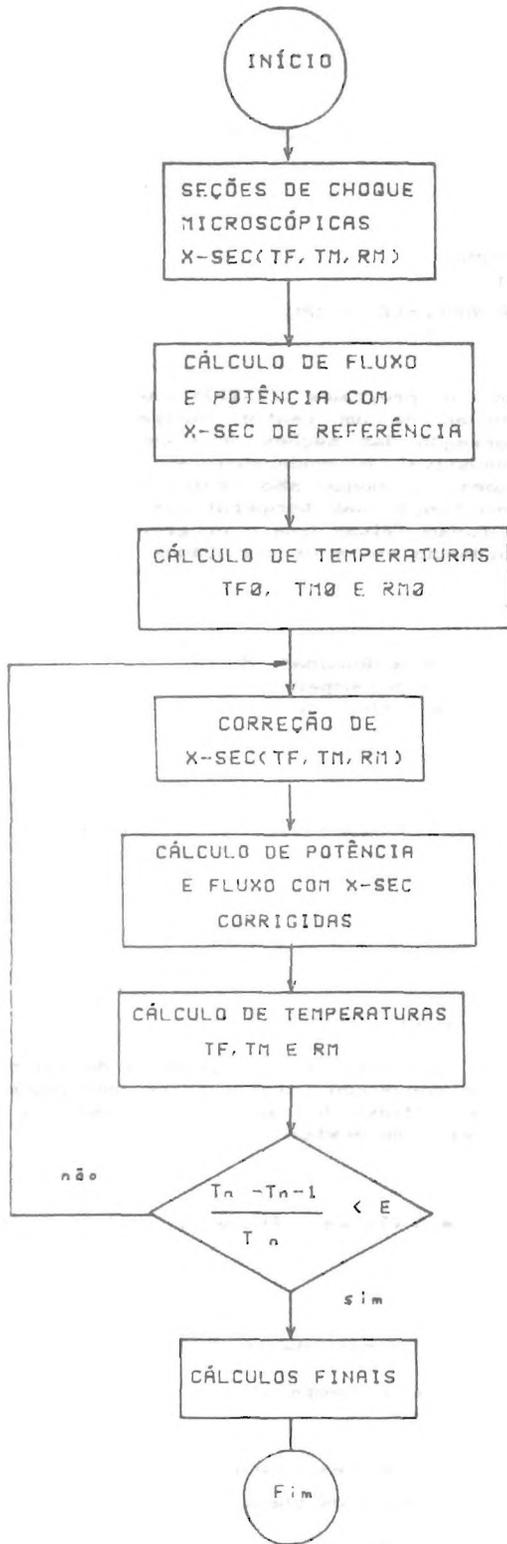


Fig. 1 Processo iterativo do módulo termo-hidráulico implementado no CITATION.

APLICAÇÃO À GEOMETRIA CILÍNDRICA

Num reator cujo núcleo é constituído de varetas combustíveis deve-se determinar a

distribuição de temperatura num sistema cilíndrico, constituído por uma vareta combustível e um canal de refrigeração (figura 2). Admite-se que o sistema está em estado estacionário. A densidade de potência gerada no canal é $q'''(r)$, sendo que a fração de energia gerada no refrigerante é igual a γ . Assume-se que a temperatura de entrada do refrigerante é conhecida e que a condução axial de calor no combustível, encamisamento e no 'gap' é desprezível.

As condições de contorno adotadas são: fluxo de calor nulo no centro do combustível, continuidade do fluxo nas interfaces e fluxo de calor nulo após o refrigerante.

No refrigerante existe convecção natural de calor proveniente da região do encamisamento e convecção forçada do fluido movimentando-se com velocidade \bar{v} na direção axial. Desta forma a equação (1) adquire a forma:

$$q_m''' = \nabla \cdot (q_c'' + \rho c_p \bar{v} T(r,z)) \quad (5)$$

onde

$$q_m''' = \frac{q}{\pi (r_m^2 - r_c^2) \Delta z} \gamma, \quad (6)$$

onde

q_m''' é a potência gerada no refrigerante,
 q_c'' é o fluxo de calor que é conduzido através do encamisamento,
 q é a potência total gerada.

Com a utilização do teorema de Gauss na equação (5) e empregando-se a lei de resfriamento de Newton, após algumas operações algébricas, chega-se que as temperaturas de saída do refrigerante e da superfície do encamisamento são:

$$T_{ms} = \frac{q}{m c_{ps}} + T_{me} \frac{c_{pe}}{c_{ps}} \quad (7)$$

e

$$T_{rc} = T_m + \frac{1}{h_m} \frac{q (1 - \gamma)}{2 \pi r_c \Delta z}, \quad (8)$$

onde

m é a vazão do canal refrigerante,
 c_{pe} é o calor específico a pressão constante para a temperatura de entrada do refrigerante,
 c_{ps} é o calor específico a pressão constante para a temperatura de saída do refrigerante,
 γ é a fração de energia gerada diretamente no refrigerante,
 h_m é o coeficiente de transferência de calor no refrigerante.

Para se estimar a temperatura média do refrigerante utilizou-se a seguinte aproximação:

$$T_m = \frac{1}{2} (T_{ms} + T_{me}) \quad (9)$$

As temperaturas na parede interna do encamisamento e na superfície externa do combustível são dadas por:

$$T_{rg} = T_{rc} + q (1-\gamma) R_c \quad (10)$$

$$T_{rf} = T_{rg} + q (1-\gamma) R_g, \quad (11)$$

onde

$$R_c = \frac{1}{2 \pi k_c \Delta z} \ln \frac{r_c}{r_g} \quad (12)$$

$$R_g = \frac{1}{2 \pi h_g \Delta z r_f} \quad (13)$$

k_c é a condutividade térmica do encamisamento e h_g é o coeficiente de transferência de calor no 'gap'.

A região do combustível foi dividida em 4 regiões de igual volume com o coeficiente de transferência de calor constante em cada região. Aplicando-se a equação (1) em estado estacionário, em cada região do combustível, tem-se que as temperaturas em cada região são dadas por:

$$T_{rf3} = T_{rf} + \frac{q (1-\gamma)}{16 \pi k_{f4} \Delta z} \quad (14)$$

$$T_{rf2} = T_{rf3} + \frac{q (1-\gamma)}{16 \pi k_{f3} \Delta z} \quad (15)$$

$$T_{rf1} = T_{rf2} + \frac{q (1-\gamma)}{16 \pi k_{f2} \Delta z} \quad (16)$$

$$T_{rfo} = T_{rf1} + \frac{q (1-\gamma)}{16 \pi k_{f1} \Delta z} \quad (17)$$

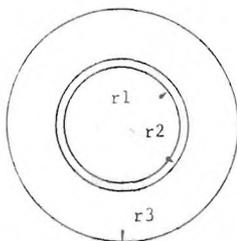


Fig. 2 Diagrama esquemático do canal termo-hidráulico.

GERAÇÃO E INTERPOLAÇÃO DAS SEÇÕES DE CHOQUE

A geração das seções de choque foi realizada pelo programa HAMMER-TECHNION /2/ para 3 valores de temperatura do combustível, moderador e densidade do moderador, formando um total de 27 conjuntos de seções de choque microscópicas. Estes dados formam a biblioteca que é utilizada pelo módulo de interpolação.

Para a dependência das seções de choque com a temperatura e densidade do moderador, utilizou-se interpolação linear. A dependência com a temperatura do combustível foi feita por uma dependência logarítmica. Uma vez determinados os valores de temperatura e densidade em cada região do núcleo, calculam-se os coeficientes de interpolação. Como exemplo sejam T_1 , T_2 e T_3 as temperaturas do refrigerante em que foi gerada a biblioteca de seções de choque, e seja T_x o valor determinado pelo módulo termo-hidráulico numa determinada região do núcleo. Inicialmente verifica-se em que intervalo se encontra T_x tal que $T_x < T_1$ ou $T_1 < T_x < T_2$ ou $T_2 < T_x < T_3$. Supondo que $T_1 < T_x < T_2$, determina-se o coeficiente da reta tal que:

$$A = \frac{\Sigma_2 - \Sigma_1}{T_2 - T_1} \quad (18)$$

onde

Σ_1 corresponde a seção de choque microscópica a temperatura T_1 e

Σ_2 corresponde a seção de choque microscópica a temperatura T_2 .

Assim a seção de choque corrigida é dada por:

$$\Sigma_x = \Sigma_1 + A (T_x - T_1) \quad (19)$$

Da mesma forma, para a dependência da seção de choque com a temperatura do combustível tem-se:

$$\Sigma_x = \Sigma_1 + B (\ln T_{fx} - \ln T_{f1}) \quad (20)$$

onde

$$B = \frac{\Sigma_2 - \Sigma_1}{\ln T_{f2} - \ln T_{f1}} \quad (21)$$

RESULTADOS NUMÉRICOS

Para os testes numéricos, modelou-se um reator de composição homogênea em geometria R-Z, com raio ativo de $r = 84$ cm, altura $h = 144$ cm e 30 cm de refletor (figura 3). O núcleo foi dividido em 7 regiões termo-hidráulicas radiais por 8 axiais. O fluxo de refrigerante entra pela parte inferior do núcleo, cuja potência nominal é de 100 MW. Na tabela 1, estão mostrados os dados termo-hidráulicos utilizados para este cálculo.

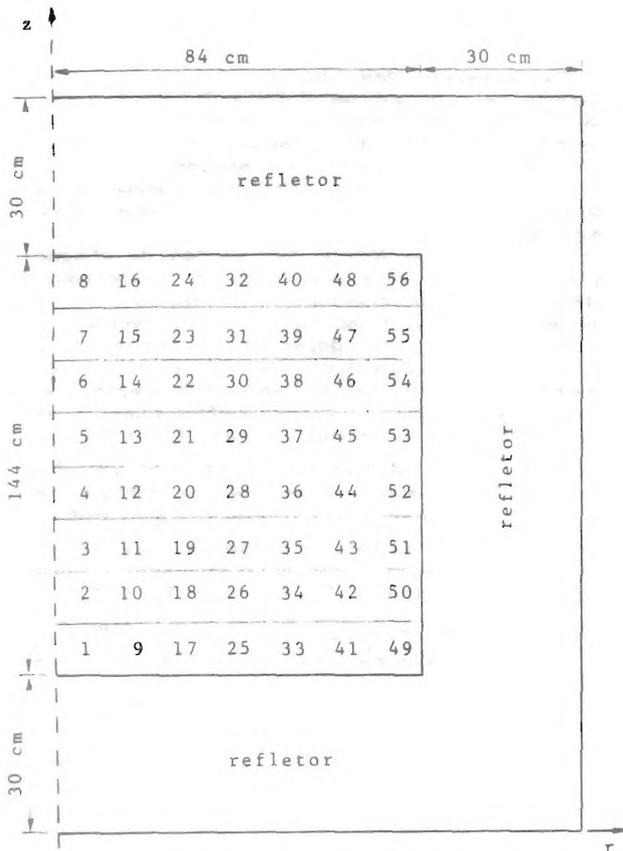


Fig. 3 Vista axial do reator em geometria R-Z.

Tabela 1. Parâmetros termo-hidráulicos

Temp. ent. refrigerante	272 C
Vazão do refrigerante	850.6 Kg/s
Raio da pastilha	0.44 cm
Raio do 'gap'	0.45 cm
Raio do revestimento	0.50 cm
Área do canal	1.758 cm ²
Pressão	138 bar

Este reator foi modelado nos programas CITATION e FX2-TH/3/, para as comparações dos resultados numéricos obtidos.

O FX2-TH é um programa já conhecido na literatura e foi desenvolvido para cálculos de cinética bidimensional, com realimentação termo-hidráulica. O modelo neutrônico usado é a teoria de difusão em multigrupos acoplado a um módulo termo-hidráulico, que utiliza um modelo explícito para a representação da vareta combustivel, revestimento e moderador.

Para comparar os modelos termo-hidráulicos, realizou-se um cálculo de temperatura sem realimentação. Na figura 4 está mostrada a distribuição de temperatura do combustivel, na região central do núcleo. Observa-se uma boa concordância entre os dois modelos em comparação. Na figura 5 está mostrada a temperatura do combustivel com realimentação termo-hidráulica. Verifica-se que o efeito das correções de seções de choque provocou uma distribuição mais próxima da real com o programa CITATION-TH. Na figura

6 está mostrado o perfil de temperatura do moderador na mesma região e na figura 7 o perfil axial de densidade de potência onde se compara os cálculos com e sem realimentação. No cálculo sem realimentação utilizou-se seções de choque geradas com temperaturas médias.

Na tabela 2 estão mostrados os fatores de multiplicação efetivos calculados com ambos os programas e também as temperaturas médias do combustivel e moderador.

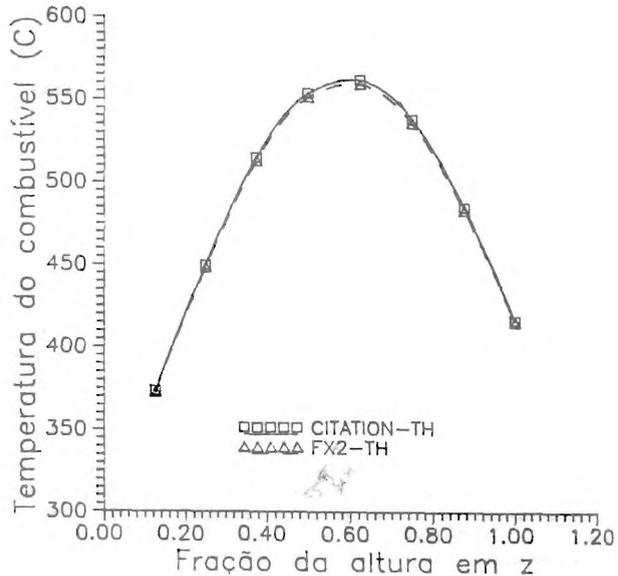


Fig. 4 Comparação de temperaturas no cálculo sem realimentação.

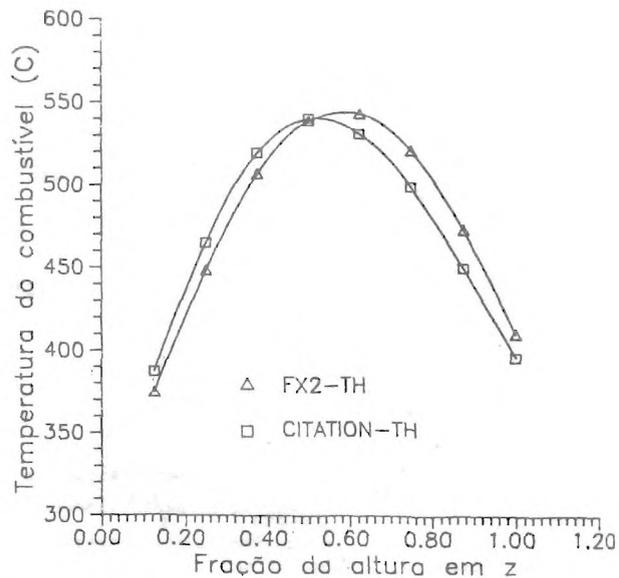


Fig. 5 Comparação de temperaturas no cálculo com realimentação.

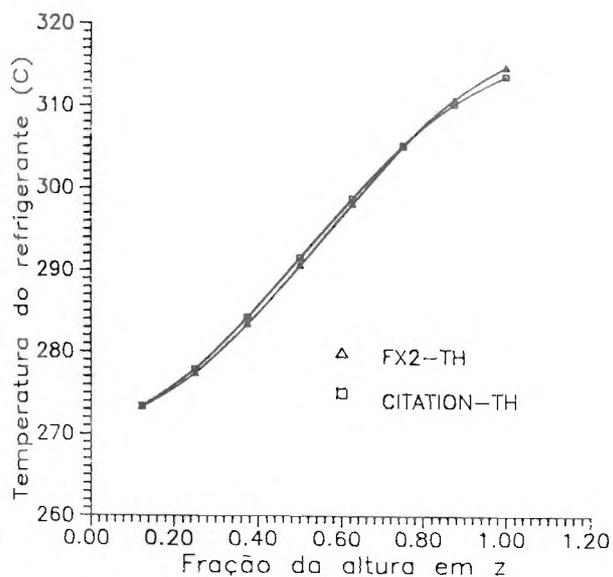


Fig. 6 Comparação de temperaturas no cálculo com realimentação.

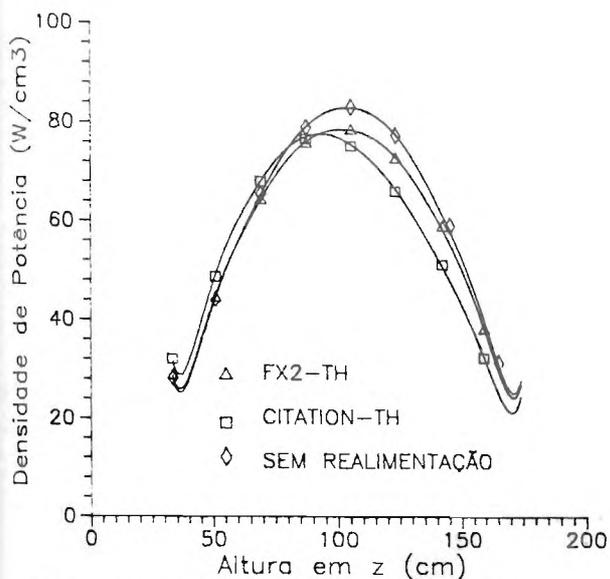


Fig. 7 Comparação das densidades de potência entre os programas FX2-TH e CITATION-TH.

Tabela 2. Fator de multiplicação efetivo e temperaturas médias.

TIPO	PROGRAMA	K-EFETIVO	TF	TM
SEM	CITATION	1.16586	382.0	284.0
T/H	FX2-TH	1.16207	385.3	284.0
T/H	CITATION	1.16398	386.5	284.5

CONCLUSÃO

Pela figura 7 observa-se que a redistribuição de potência devido a realimentação termo-hidráulica é considerável e importante para a correta análise neutrônica do núcleo. Quanto a parâmetros integrais como o fator de multiplicação efetivo o erro que se comete quando não se consideram os efeitos de temperatura é de 0.16% $\Delta k/k$. É um erro relativamente pequeno, mas que agora pode ser avaliado.

As discrepâncias observadas no perfil de temperatura do combustível devem-se principalmente aos diferentes modelos de correção das seções de choque adotados, sendo que o calculado com CITATION-TH mostrou-se mais próximo do real.

REFERENCIAS

- 1/ Fowler, T.B.; Vondy, D.R.; Cunningham, G.W. Nuclear reactor core analysis code: CITATION. Oak Ridge Tenn. Oak Ridge National Lab., Jul. 1971. (ORNL - TM- 2496-Rev.2).
- 2/ Suich, J.E. & Honneck, M.C. The HAMMER system: Heterogeneous analysis by multigroup methods of exponential and reactors. Aiken, S.C., Savannah River Lab., Jan. 1967. (DP-1064).
- 3/ Shober R.A.; Daly, T.A.; Ferguson, D.R. FX2-TH: A Two-dimensional nuclear reactor kinetics code with thermal-hydraulic feedback. Argonne National Lab. Oct. 1978. (ANL-78-97).

SUMMARY

A thermal-hydraulic module has been introduced in the CITATION to consider temperature effects in a nuclear reactor. These effects are considered through microscopic cross sections corrections with fuel and moderator temperatures and moderator density. These corrections are made by a interpolation module in each material zone. Results from FX2-TH and CITATION codes are compared and good agreement is obtained.