

VERIFICAÇÃO DO PROGRAMA FX2-TH PARA ANÁLISE DE ACIDENTE DE INSERÇÃO DE REATIVIDADE EM REATORES TIPO PWR

Nanami Kosaka* e João Manoel Losada Moreira**

*Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, CNEN
Caixa Postal 11049
05422-970, São Paulo, Brasil

**Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo
Caixa Postal 11253
05422-970, São Paulo, Brasil

RESUMO

A viabilidade de utilização da versão do programa FX2-TH existente no CTMSP para a análise de acidentes de inserção de reatividade em PWR é apresentada no presente trabalho. Para análise estática comparou-se os resultados obtidos com o FX2-TH com os resultados do programa CITATION, obtendo-se excelente concordância para o fator efetivo de multiplicação e distribuição de densidade de potência. Para o cálculo de cinética espacial utilizou-se dois problemas padrões sendo o primeiro unidimensional e o segundo bidimensional. Para os cálculos cinéticos os parâmetros analisados foram a variação temporal da potência e reatividade. As discrepâncias encontradas para a reatividade e a potência do reator para o problema unidimensional foram 1,7 % e 7,2 %, respectivamente; para o problema bidimensional a discrepância para a potência foi de 14 % no final do transiente. Uma análise sobre as dificuldades encontradas para se fazer o exercício de "benchmark" é apresentada. Os resultados atestam a viabilidade da versão do programa FX2-TH existente no CTMSP para a análise de transientes com forte redistribuição do fluxo neutrônico.

1. INTRODUÇÃO

O Centro Tecnológico da Marinha (CTMSP) está conduzindo o projeto de um reator nuclear protótipo para propulsão nuclear. Dentro deste projeto há necessidade de se realizar uma extensa análise de acidentes que requer cálculos de cinética espacial. O CTMSP adquiriu o programa FX2-TH para a realização destas análises e a sua validação é uma das etapas que devem ser cumpridas para a sua utilização como ferramenta de projeto. O programa FX2-TH- "A two-dimensional nuclear reactor kinetics core with thermal-hydraulical feedback"[1] foi desenvolvido na década de 70 pela Argonne National Laboratory, EUA. O programa utiliza o método "improved quasi-static" para resolver as equações de cinética espacial, considerando também os efeitos de realimentação termoidráulica. O programa foi desenvolvido com objetivo de analisar problemas de cinética espacial de reatores rápidos, possibilitando a utilização de vários grupos de energia e geometria triangular para a disposição das varetas de combustível.

O modelo neutrônico usado é a teoria de difusão de nêutrons em multigrupo resolvendo a equação por diferenças finitas. As geometrias consideradas são x, r, x-y, r-z, θ -r e triangular. Nos cálculos termoidráulicos são

determinadas temperaturas no combustível e no refrigerante por meio de um modelo detalhado de um canal, consistindo de uma representação explícita de uma vareta combustível. As variações das temperaturas do combustível e do refrigerante implicam em realimentação de reatividade via efeito Doppler no combustível e de densidade e temperatura do refrigerante. O modelo termoidráulico do programa não é capaz de representar a ebulição do refrigerante, isto é, não resolve problemas de escoamento bi-fásico. Esse fato limita a sua utilização em reator térmico do tipo PWR para acidentes onde não se verifica a ebulição.

Efetuiu-se a análise do programa em duas fases: a) cálculo estático sem realimentação termoidráulica e b) cálculo de cinética espacial.

Nos cálculos estáticos os parâmetros analisados foram o fator de multiplicação efetivo, distribuição de potência e valor de barras absorvedoras. Sendo o CITATION[2] um programa qualificado e muito utilizado nos cálculos neutrônicos tomou-se como referência para os resultados estáticos. Já para os cálculos de cinética as referências para comparação foram dois problemas padrões ("benchmark") da literatura[3,4].

II. VERIFICAÇÃO DO CÁLCULO ESTÁTICO

O reator considerado para a verificação do cálculo estático constitui-se em um PWR cilíndrico de pequeno porte de 160 cm de altura e 86,7 cm de raio, incluindo núcleo e refletor. A espessura do refletor ao redor do núcleo é de 30 cm. O núcleo do reator foi modelado na geometria r-z sendo o núcleo dividido em 20 regiões como mostra a Fig. 1. Radialmente tem-se 30 divisões espaciais e 50 divisões na direção axial.

Calculou-se o fator de multiplicação efetivo e o valor da barra absorvedora para diferentes posições das barras absorvedoras dentro do núcleo. Os resultados obtidos estão listados na Tabela 1. Foram analisadas duas situações: na primeira, utilizou-se seções de choque das barras absorvedoras sem homogeneização; na segunda situação o absorvedor foi homogeneizado com o combustível, mantendo a relação volumétrica.

A diferença entre os programas FX2-TH e CITATION na estimativa do fator efetivo de multiplicação é 0,02 % e na estimativa de valor da barra é menor que 0,69 %.

Na análise da distribuição de potência pontual tomou-se dois casos: núcleo sem barras absorvedoras e núcleo com barras absorvedoras parcialmente inseridas. Para fins de comparação considerou-se duas distribuições axiais de potência: a primeira no canal central do núcleo e a segunda na região onde se verifica a maior perturbação de fluxo. No caso do núcleo sem barras absorvedoras tomou-se o canal nas vizinhanças da região do refletor radial e, no caso do núcleo com inserção parcial escolheu-se o canal próximo às barras absorvedoras inseridas. As distribuições obtidas estão ilustradas nas Fig. 2 a Fig. 5, onde observa-se boa concordância entre os dois programas com resultados quase coincidentes.

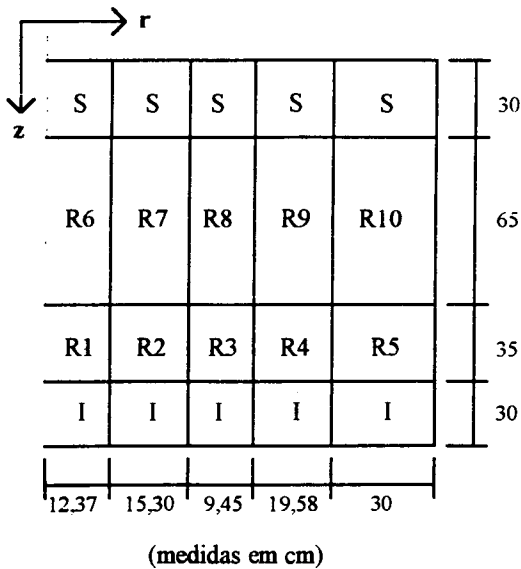


Figura 1. Seção Vertical do Núcleo

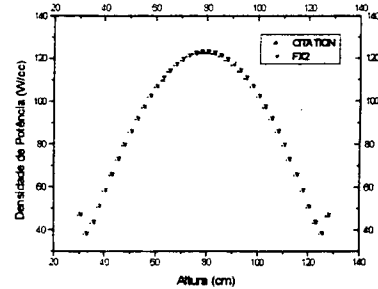


Figura 2. Distribuição Axial de Potência no Núcleo sem Barras Absorvedoras - Canal Central.

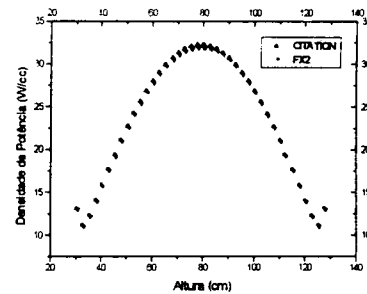


Figura 3. Distribuição Axial de Potência no Núcleo sem Barras Absorvedoras - Canal Próximo ao Refletor.

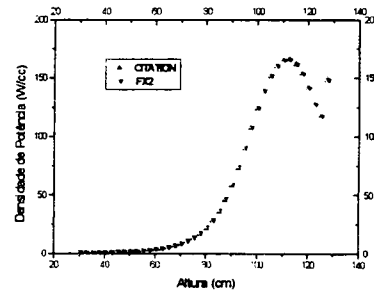


Figura 4. Distribuição Axial de Potência no Núcleo com Barras Absorvedoras - Canal Central.

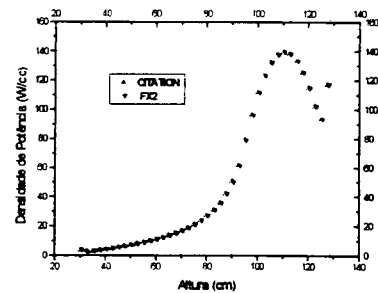


Figura 5. Distribuição Axial de Potência no Núcleo com Barras Absorvedoras - Canal Próximo às Barras Absorvedoras.

TABELA 1. Comparação dos resultados obtidos entre CITATION e FX2-TH

CASOS	CITATION		FX2-TH		Desvio para ρ (%)
	keff	ρ (pcm)	keff	ρ (pcm)	
Sem barras	1.3030252		1.3032861		
Barras R7	1.1635758	9.197	1.1640233	9.178	-0.2
Barras R7 + R2	1.0843760	15.474	1.0855543	15.389	0,55
Barras homogeneizadas					
Barras R7	1,1982871	6.708	1.1987354	6.692	-0,23
Barras R7 + R2	1.1350895	11.354	1.13629189	11,276	-0.69

III. VERIFICAÇÃO DO CÁLCULO DE CINÉTICA ESPACIAL

Para a verificação do cálculo de cinética espacial do programa FX2-TH considerou-se dois problemas com forte variação de distribuição de fluxo neutrônico durante o transiente. No primeiro a representação geométrica do reator é unidimensional cartesiana e no segundo, bidimensional polar r-z.

Problema Padrão Unidimensional[3]. Em grandes reatores de potência uma pequena perturbação local causa uma deformação na distribuição de fluxo que afeta a reatividade. Essa situação leva a necessidade de se considerar o efeito espacial nos cálculos cinéticos do reator. O problema escolhido como referência consiste de um sistema unidimensional, homogêneo representado por uma placa de 240 cm de largura, dividida em três regiões diferenciadas somente pelo "buckling". A região 1 estende de 0 a 60 cm, a região dois de 60 a 180 cm e a terceira região de 180 a 240 cm. Definiu-se um "buckling" maior na região 2 para se obter uma distribuição inicial plana de fluxo de nêutrons, como se segue:

Região 1: $B^2 = 0.01090505 \text{ cm}^{-2}$; região 2: $B^2 = 0.01199452 \text{ cm}^{-2}$ e região 3: $B^2 = 0.01088500 \text{ cm}^{-2}$

Os transientes são induzidos por um aumento linear no valor de ν (número de nêutrons emitidos por fissão) na região 1, conforme

$$\nu(t) = (1 + A.t) \nu(0) \quad (1)$$

No presente problema o valor do coeficiente A é igual a 1,50832 e a duração do transiente é de 0.011 segundos. Os cálculos são efetuados em um grupo de nêutrons atrasados, onde $\beta = 0.0064$ e $\lambda = 0,08 \text{ s}^{-1}$.

Analisou-se o comportamento temporal da reatividade e da função amplitude. A Fig. 6 extraída da Ref. 3 mostra os resultados da literatura, onde o autor compara o comportamento temporal da reatividade obtido por meio de diferentes modelos de cálculo, para o transiente provocado pela inserção de reatividade positiva na forma indicada na Eq. (1).

O resultado obtido com o programa FX2-TH encontra-se na Fig. 7. O programa FX2-TH utiliza o modelo quase-estático melhorado que deve ser comparado com a solução numérica exata apresentada na Fig. 6.

Observa-se a boa concordância entre os resultados para o comportamento temporal da reatividade. A Tabela

2 apresenta uma comparação entre os resultados exato e do programa FX2-TH para instantes diferentes do transiente. No instante 0,011 s, quando a perturbação cessa, e em 0,022 s. A discrepância para a reatividade em 0,011 s é de 1.7 % e para a função amplitude em 0,022 s é de 7.2 %. Nota-se que uma pequena discrepância na reatividade pode levar a discrepâncias sensivelmente maiores na função amplitude. Esse comportamento pode ser visto nas Fig. 8 e Fig. 9.

A dificuldade em reproduzir completamente o "benchmark" deu-se pela ausência de informações sobre as condições de contorno consideradas nos problemas. Os resultados apresentados na Tabela 2 foram obtidos dos cálculos com FX2-TH, tomando fluxo (ϕ) zero nas bordas da placa, como condição de contorno. No entanto aplicando a a condição de contorno de fluxo nulo na distância extrapolada, obtém-se valores de reatividades e de função amplitude maiores. O programa FX2-TH define a expressão abaixo para a condição de contorno de distância extrapolada.

$$\phi + \frac{K}{D} * \phi = 0 \quad (2)$$

Fez-se uma análise da sensibilidade variando-se a constante K e os resultados estão apresentados nas Fig.8 e Fig. 9.

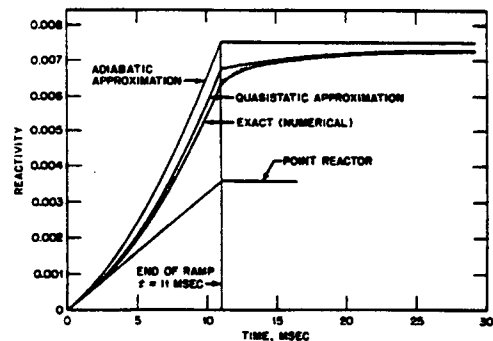


Figura 6. Variação Temporal da Reatividade com a Térmico, para Diferentes Modelos de Cálculo.

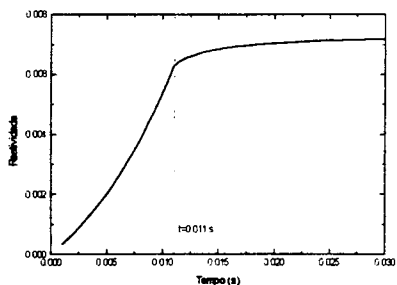


Figura 7. Variação da Reatividade com o Tempo no Transiente devido a Inserção de Reatividade em Rampa [3].

TABELA 2. Valores de reatividade e função amplitude para instantes diferentes do transiente da Ref. 3.

Parâmetro	Cálculo Exato	FX2-TH	Discrepância (%)
Reatividade em 0,011 s	0,0064	0,006293	1,7
Função Amplitude em 0,022 s	14,92	13,92	7,2

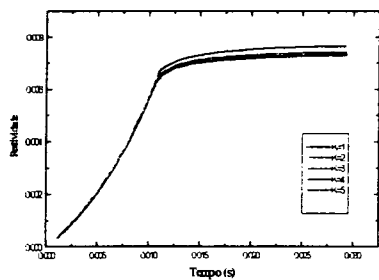


Figura 8. Variação Temporal da Reatividade para Diferentes Valores para a Constante K, da Condição de Contorno.

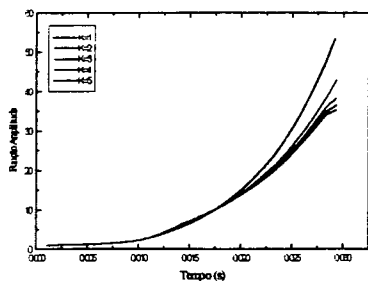


Figura 9. Variação da Função Amplitude com o Tempo, para Diferentes Valores do Fator K da Condição de Contorno.

Problema Padrão Bidimensional[4]. Este problema consiste de um transiente com forte variação na distribuição de fluxo de nêutrons em um reator de 240 cm de raio, 525 cm de altura, refletores superior e inferior de espessura de 75 cm, núcleo de altura de 375 cm e sem refletor radial. O transiente é causado variando-se temporalmente a seção de choque de absorção do grupo térmico na parte central do núcleo. Este problema faz parte do "Benchmark Book" do Argonne National Laboratory.

O reator foi modelado em geometria cilíndrica, bi-dimensional (r-z) composto de 16 regiões homogêneas. A divisão espacial do núcleo é feita em espaçamento constante, $\Delta r = 8$ cm (30 intervalos) e $\Delta z = 18,75$ cm (28 intervalos). A Fig. 10 mostra a seção axial do núcleo com respectivas dimensões de cada região em que o reator foi dividido. As regiões perturbadas são as regiões 3, 7 e 11, onde a seção de choque de absorção do grupo térmico varia linearmente com o tempo, como segue:

- nas regiões 3 e 7

$$\frac{\Sigma_2(t)}{\Sigma_2(0)} = \begin{cases} 1 + 0,03.t & t \leq 1 \\ 1,03 & t > 1 \end{cases}$$

- na região 11

$$\frac{\Sigma_2(t)}{\Sigma_2(0)} = \begin{cases} 1 - 0,03.t & t \leq 1 \\ 0,97 & t > 1 \end{cases}$$

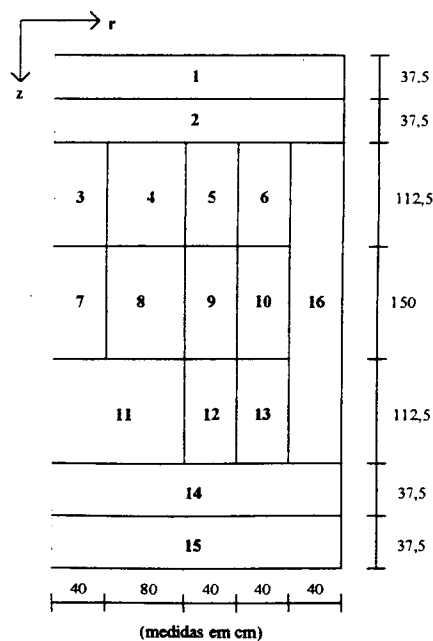


Figura 10. Seção Vertical do Reator do "Benchmark"

O reator não tem fonte externa de nêutrons. A Tabela 3 lista as seções de choque e a Tabela 4 lista os parâmetros cinéticos fornecidos pela Ref. 4.

TABELA 3. Seções de Choque Macroscópicas em Dois Grupos /4/

Região	D (cm)	Σ_{c1} (cm ⁻¹)	$\nu\Sigma_n$ (cm ⁻¹)	$\Sigma_{1,2}$ (cm ⁻¹)
1, 15	1,0684E+00 0,3205E+00	2,8000E-02 3,3000E-03	0,0 0,0	2,6200E-02 -
2, 14	1,3495E+00 8,7032E-01	1,2010E-02 1,9000E-02	0,0 0,0	1,2000E-02 -
3, 4, 11	1,3052E+00 8,8857E-01	1,0475E-02 1,3063E-02	1,1776E-03 1,3268E-02	8,0351E-03 -
5, 12	1,3052E+00 8,8857E-01	1,0475E-02 1,2623E-02	1,1776E-03 1,3268E-02	8,0351E-03 -
6, 13	1,3052E+00 8,8857E-01	1,0475E-02 1,2183E-02	1,1776E-03 1,3268E-02	8,0351E-03 -
7, 8	1,3052E+00 8,8857E-01	1,0475E-02 1,3453E-02	1,1776E-03 1,3268E-02	8,0351E-03 -
9	1,3052E+00 8,8857E-01	1,0475E-02 1,2973E-02	1,1776E-03 1,3268E-02	8,0351E-03 -
10	1,3052E+00 8,8857E-01	1,0475E-02 1,2933E-02	1,1776E-03 1,3268E-02	8,0351E-03 -
16	1,2997E+01 8,7951E-01	1,0475E-02 1,3065E-02	1,2875E-03 1,4246E-02	7,9061E-03 -
ν_1		1,0E+07 cm/s		
ν_2		2,2E+05 cm/s		

* $\Sigma_1 = \Sigma_{c1} + \Sigma_n + \Sigma_{1,2}$ e $\Sigma_2 = \Sigma_{c2} + \Sigma_{12}$

TABELA 4. Dados dos Nêutrons Atrasados /4/

Grupo	β	λ (sec ⁻¹)
1	2,470E-04	1,27E-02
2	1,394E-03	3,17E-02
3	1,222E-03	1,15E-01
4	2,645E-03	3,11E-01
5	8,320E-04	1,40E+00
6	1,690E-04	3,87E+00

Os resultados dos cálculos com o programa FX2-TH se encontram nas Fig. 11 à 14. Inicialmente os valores do fator efetivo de multiplicação para o instante $t=0$ s fornecidos pelo programa FX2-TH e Ref. 4 são 0,868768 e 0,867053, respectivamente. A discrepância entre os dois é 0,2 %. Na Fig. 11 estão colocadas curvas do comportamento da potência total com o tempo, comparando o resultado obtido nos cálculos com o da Ref. 4. Verifica-se que o programa FX2-TH tende a superestimar a potência chegando a 14 % a diferença após 4 segundos.

A Fig. 12 mostra o comportamento da reatividade, verificando um aumento durante o transiente após cessar a perturbação ocasionado pela acomodação da distribuição de precursores de nêutrons atrasados. Decorridas algumas meias vidas dos precursores de nêutrons atrasados, a distribuição de fluxo de nêutrons se estabiliza e também a reatividade.

Nas Fig. 13 e Fig. 14 encontram-se as distribuições radial e axial da densidade de potência

absoluta fornecidas pelo programa FX2-TH e Ref. 4. Para $t=0$ s verifica-se uma concordância boa entre as curvas, ficando a do FX2-TH levemente inferior na parte central do núcleo. Para $t=4$ s, as distribuições são bastante semelhantes, entretanto, em termos de magnitude, os valores do FX2-TH superam aos da Ref. 4 em cerca de 14 % (valor da discrepância da potência).

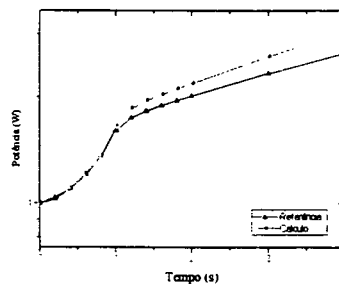


Figura 11. Evolução da Potência com Tempo

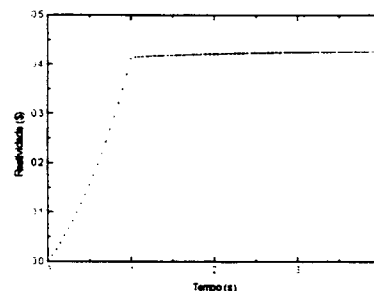


Figura 12. Evolução Temporal da Reatividade

Ao se analisar as distribuições de potência no instante inicial nota-se que uma possível causa da discrepância pode ser a condição de contorno na direção radial, pois o reator não tem refletor radial. A condição de contorno de vácuo pode ser representada numericamente como o fluxo neutrônico nulo na periferia do reator ou nulo na distância extrapolada. O valor da distância extrapolada pode fazer variar a distribuição de densidade de potência de forma a causar a discrepância apresentada nas Figuras 11 e 12. Pelas informações existentes na Ref. 4 não foi possível identificar como foi definida a condição de contorno. Nos cálculos com o programa FX2-TH foi utilizado fluxo nulo na distância extrapolada, para $K=0,476$.

Uma pequena discrepância na distribuição de potência pode introduzir diferenças na reatividade inserida no reator e, conseqüentemente, produzir discrepâncias como as apresentadas no instante $t=4$ s. Como foi mostrado na discussão sobre os resultados do problema padrão unidimensional, pequenas variações de reatividade podem produzir valores de potência com sensíveis discrepâncias. Com as informações fornecidas na Ref. 4

não foi possível, com justificativas técnicas, melhorar os resultados fornecidos pelo programa FX2-TH.

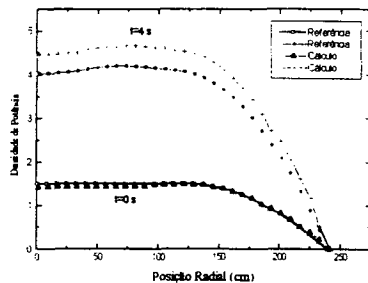


Figura 13. Distribuição Radial da Densidade de Potência.

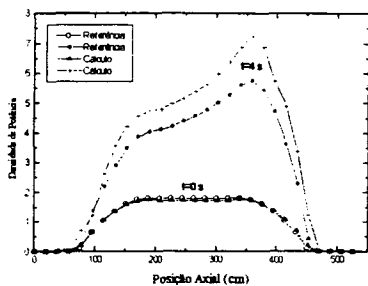


Figura 14. Distribuição Axial da Densidade de Potência.

IV. CONCLUSÕES

Com os testes realizados com o programa FX2-TH verificou-se que para os cálculos estáticos o programa apresenta resultados semelhantes ao programa CITATION com discrepâncias em estimativa de fator efetivo de multiplicação de 0.02 %.

Os resultados dos problemas de cinética com os problemas padrões unidimensional e bidimensional mostram que uma pequena diferença no valor da reatividade leva a um desvio maior na função amplitude. Por exemplo, no problema padrão unidimensional no instante 0.022 s verifica-se uma diferença de 1.39 % na reatividade resultando em um desvio de 6.7% na função amplitude. No problema bidimensional a discrepância na potência ao final do transiente foi de 14 %.

As análises dos problemas mostraram que os resultados são muito dependentes da distribuição de fluxo neutrônico uma vez que trata-se de verificação de problema de cinética espacial. Notou-se que para os dois problemas uma possível razão da discrepância final do resultado de potência seja a consideração ou não da distância extrapolada na condição de contorno de vácuo. As referências não informam como foi representada a condição de contorno de vácuo.

Baseando-se nas análises efetuadas neste trabalho conclui-se que o programa FX2-TH pode ser utilizado nos cálculos de transientes de inserção de reatividade em reatores térmicos. As variações da distribuição de fluxo neutrônico e de densidade de potência, durante transientes que requerem para sua análise cinética espacial, foram estimadas com boa precisão.

REFERÊNCIAS

- [1] SHOBER, R. A., DALY, T. A. and FERGUSON, D. R., **FX2-TH: A Two-dimensional Nuclear Reactor Kinetics Code with Thermal-Hydraulic Feedback**, ANL-78-97, October 1978.
- [2] FOWLER, T. B.; VONDI, D. R., **Nuclear Core Analysis Code: CITATION**, ORNL-TM-2496, July 1969.
- [3] OTT, K. O. and MENELEY, D. A., **Accuracy of the Quasistatic Treatment of Spatial Reactor Kinetics**, Nuclear Science and Engineering, vol. 36, p 402-411, 1969.
- [4] **Benchmark Source, Identification 8**, Argonne Code Center: Benchmark Problem Book, June 1977.

ABSTRACT

The accuracy of the FX2-TH code version which is used in the CTMSP has been verified against typical PWR benchmark problems for spatial reactor kinetics. The static calculations for neutron flux distribution and effective multiplication factor have been compared against the CITATION code results with very good accuracy. The kinetics calculation have been verified against one- and bi-dimensional problems. The perturbations considered were caused by the motion of control rods. The parameters which were verified are the reactor power or amplitude function and reactivity as a function of time. For the one-dimensional problem it has been found discrepancies of 1.7 % and 6.7 % for reactivity and amplitude function, respectively. For the bi-dimensional problem it has been found a discrepancy of 14 % for the reactor power. An analysis about the difficulties encountered for performing the benchmark calculations is presented. It is concluded that the current version of the FX2-TH code can be used for analyzing actual transients with strong neutron flux redistribution.