

OSCILAÇÕES DE XENÔNIO EM REATORES DE PEQUENO PORTE CONTROLADAS SOMENTE POR BARRAS DE CONTROLE

Cláudia C. G. Deccó * e João M. L. Moreira**

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

**Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo
Caixa Postal 11253
05508-900 São Paulo, SP

RESUMO

Neste trabalho é estudado o problema de oscilações espaciais de xenônio em reatores de pequeno porte para a propulsão naval, que não dispõem de sistema de boro solúvel no refrigerante para controlar a reatividade. Primeiramente são analisados, o impacto da distribuição de potência, o tipo de perturbação, e o nível de potência, em função de oscilações espaciais de Xe. Conclui-se que distribuições iniciais planas produzem oscilações de grande amplitude. Perturbações assimétricas e de alto nível de potência também favorecem a oscilações espaciais de Xe.

Comparações de resultados de transientes para reatores com alturas de 336 cm, 272 cm, 208 cm, 152 cm e 100cm são apresentados e as análises foram realizadas com o programa MID2. Os resultados mostraram que as amplitudes decrescem substancialmente com o tamanho do reator e praticamente desaparecem para o núcleo de 100 cm. Pode-se concluir que transientes de xenônio não causam oscilações espaciais de densidade de potência na direção axial em núcleos de 100 cm de altura.

INTRODUÇÃO

Oscilações de xenônio temporal e espacial constituem um importante problema no controle de reatores nucleares de grande porte. Estratégias de controle durante a operação do reator procuram minimizar a deformação na distribuição de densidade de potência tendo por base a variação da concentração de boro solúvel no refrigerante e na movimentação de barras de controle [1-4].

Em reatores de pequeno porte as oscilações espaciais tendem a ser pequenas devido ao menor tamanho do núcleo, entretanto, o problema torna-se complicado quando o controle é através de movimentação de barras de controle. A forte deformação causada pelas barras de controle na distribuição de densidade de potência tende a interagir com a realimentação de Xe para provocar maiores oscilações espaciais[5].

Em situação de equilíbrio, a concentração de xenônio tem uma distribuição semelhante à distribuição de

potência do reator. A inserção de barra de controle no núcleo do reator origina perturbações na distribuição de fluxo e na distribuição do xenônio, que oscilam espacialmente entre o topo e a base do núcleo, ou nas direções radial e azimutal. Uma consequência da oscilação é que picos de densidade de potência podem resultar ou conduzir a falhas estruturais nas varetas de combustível.

O objetivo desse trabalho é estudar o problema de oscilação espacial de Xe em reatores de pequeno porte apropriados para propulsão naval. Esses reatores se caracterizam pela pequena dimensão e por não disporem de um sistema de boro solúvel para o controle de reatividade por razões de falta de espaço físico dentro de uma embarcação para acomodar os sistemas necessários. Dessa forma o transiente de Xe deve ser controlado por meio da movimentação de barras de controle.

Foram estudados vários fatores que afetam a oscilação de Xe: tamanho do núcleo, distribuição de potência, tipo de perturbação no núcleo, densidade de potência e coeficientes de reatividade.

Foram estudados transientes de xenônio realizando um estudo comparativo entre reatores de grande, médio e pequeno porte para se definir características de estabilidade. Foram estudados reatores com alturas de 336 cm, 272 cm e 208 cm até 152 cm e 100 cm característicos de um reator para propulsão naval.

Foram consideradas distribuições de potência: a) plana correspondente a uma situação de núcleo queimado; b) senoidal, para um núcleo no início de vida com barras de controle retiradas e c) com barras de controle inseridas no núcleo. Foram consideradas perturbações permanentes e temporárias no reator, dois níveis de densidade de potência, e coeficientes de reatividade nulos, por terem um efeito estabilizador e reduzirem o fator de pico durante as oscilações espaciais de fluxo, em função do efeito Doppler.

DESCRIÇÃO DO PROGRAMA MID2

Todas as análises de transientes de xenônio foram realizadas com o programa MID2[7] desenvolvido na Universidade de Michigan que resolve a equação de difusão de neutrons em dois grupos de energia para a geometria axial unidimensional. As equações do xenônio e do iodo são acopladas com as de cálculos de temperatura no combustível e no refrigerante. As equações de difusão de neutrons e de transferência de calor são resolvidas em estado estacionário enquanto as de concentração de xenônio e iodo são resolvidas com dependência temporal. A realimentação de Xe é feita por meio de variação nas seções de choque devido a variações na concentração de Xe e de temperatura. O controle de reatividade é feito através de boro solúvel no refrigerante ou de movimentação de barras de controle. Variações de parâmetros durante o transiente como: potência do reator, temperatura de entrada do refrigerante, concentração de boro solúvel no refrigerante e posição da barra de controle permitem estudar vários transientes.

AVALIAÇÃO DOS FATORES QUE INFLUENCIAM AS OSCILAÇÕES DE XENÔNIO

Os transientes de oscilação de xenônio dependem de vários fatores. Nessa seção estuda-se os impactos da evolução de uma oscilação de xenônio na distribuição de densidade de potência inicial, do tipo de perturbação e, da magnitude da densidade de potência. Os efeitos de realimentação termo-hidráulicos são desconsiderados visando maximizar as oscilações. Para esse estudo considera-se um núcleo representativo do reator PWR Yankee com 336 cm de altura, mais susceptível a oscilações espaciais de Xe. É apresentado o efeito do tamanho do núcleo sobre oscilações espaciais de xenônio para um núcleo de 100 cm de altura.

O reator Yankee é representado unidimensionalmente por seções de choque homogêneas nas direções transversais. A Tabela 1 apresenta os dados

utilizados para a modelagem dos núcleos a diversas distribuições de potência.

TABELA 1. Dados do Reator Yankee.

potência	862,7 MW
potência específica	25,8 kW/kg UO ₂
densidade de potência	85,9 W/cm ³
espessura do refletor	40 cm
altura ativa do núcleo	336 cm
enriquecimento ²³⁵ U	4,0%
densidade UO ₂	10,5 g/cm ³
buckling radial do reator	6,41x10 ⁻⁴ cm ⁻²
temperatura média da água no núcleo	301,23°C

Impacto na Distribuição de Densidade de Potência pela Oscilação de Xenônio. Para verificar o impacto na distribuição de potência pelo desenvolvimento de uma oscilação de xenônio considerou-se três distribuições iniciais diferentes: uma plana representativa de um núcleo com acentuada queima, uma cossenoidal representativa do reator no início de vida e uma com uma barra de controle inserida na parte superior do núcleo, representativa de reatores para propulsão naval.

RESULTADOS

O primeiro transiente (T1) é iniciado pela movimentação da barra de controle a partir do topo do núcleo até a posição de inserção a ¼ da altura do núcleo. O núcleo tem inicialmente uma composição com distribuição de potência plana e simétrica. A barra permanece nesta posição durante 1 hora e é retirada do núcleo voltando a ter a composição inicial (sem envenenamento por Xe) Trata-se, portanto, de um transiente de xenônio sem a atuação de nenhum controle externo para mostrar a possibilidade de oscilação de densidade de potência e Xe. O valor integral da barra é de 3000 pcm e a potência é mantida constante no valor de 862,7 MW durante todo o transiente.

A Figura 1 mostra a evolução da distribuição de densidade de potência em vários instantes do transiente e a Figura 2 mostra a mesma informação para as alturas localizadas a 1/6 da base e no centro do núcleo do reator. As duas figuras mostram que a oscilação é levemente divergente e simétrica em relação ao centro do reator.

O segundo transiente (T2) é semelhante ao primeiro exceto pelo fato que a distribuição de densidade de potência inicial é cossenoidal, representativa de um núcleo sem queima de combustível. A barra de controle é inserida durante uma hora, e depois retirada do núcleo. As Figuras 3 e 4 mostram a distribuição de densidade de potência em vários instantes do transiente e a mesma informação nas alturas de 2/5 da base e no centro do núcleo. Nota-se que a oscilação de xenônio é bem menos

acentuada produzindo picos muito menores que o caso anterior.

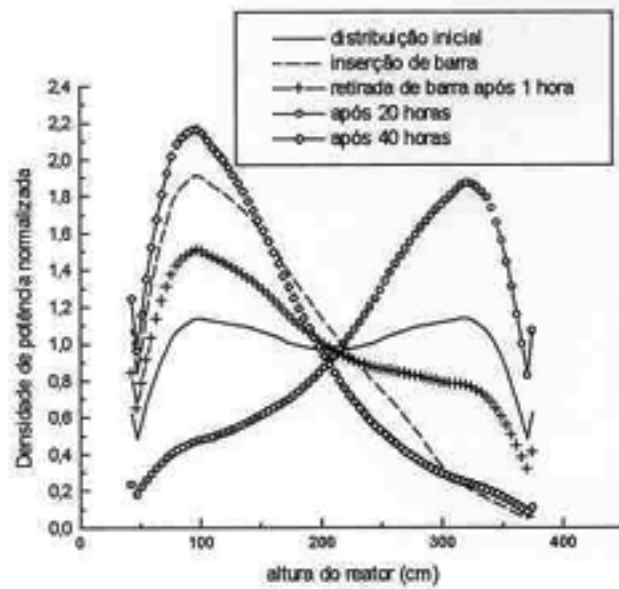


Figura 1 - Distribuição de densidade de potência em tempos posteriores à perturbação no transiente (T1).

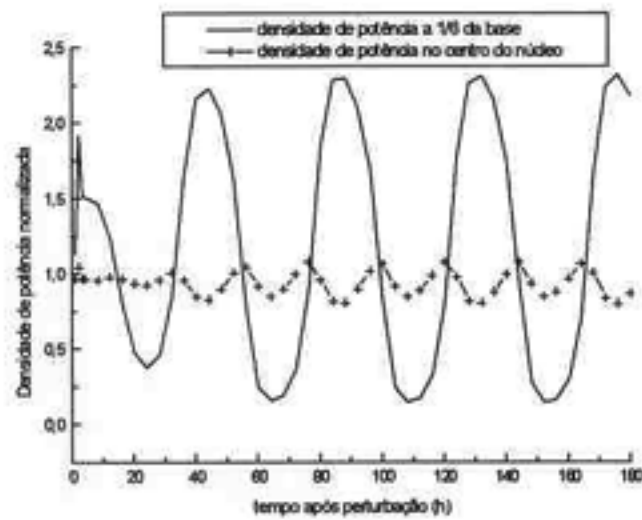


Figura 2 - Oscilação de densidade de potência nos pontos 1/6 da base e no centro do núcleo para o reator de 336 cm. Transiente (T1), perturbação temporária e oscilação divergente

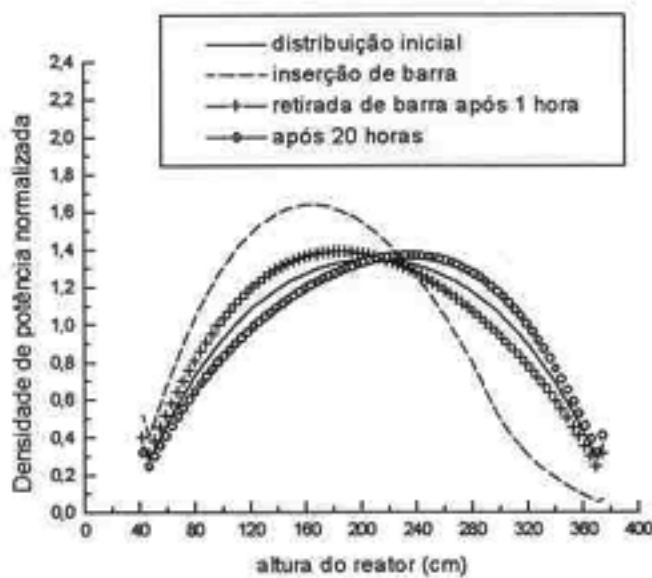


Figura 3 - Distribuição de densidade de potência para o transiente (T2) para vários instantes.

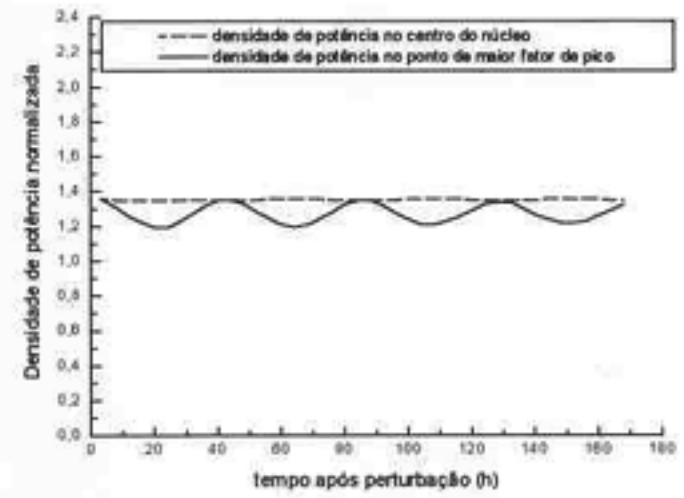


Figura 4 - Oscilação de densidade de potência nos pontos 2/5 da base e no centro do núcleo no transiente (T2).

O terceiro transiente (T3) é iniciado em um núcleo que possui barras de controle inseridas até 50% no núcleo. A barra de controle é então movimentada até a posição de 60% de inserção, permanece aí durante 1 hora e depois retorna à posição de 50% de inserção. O valor integral da barra de controle é 3000 pcm. As Figuras 5 e 6 mostram a distribuição de densidade de potência em vários instantes do transiente e a densidade de potência nas alturas 1/6 da base e no centro do núcleo.

A Figura 5 mostra que a inserção da barra na primeira hora do transiente aumenta o fator de pico na parte inferior do núcleo de 2,2 para 2,6. Após o retorno da barra à posição de 50% de inserção, a distribuição de potência retorna aos valores iniciais e praticamente não muda no restante do transiente. A Figura 6 mostra que não há oscilação espacial após o retorno da barra para a posição inicial. A presença da barra de controle inibiu totalmente as oscilações espaciais tornando o comportamento do núcleo semelhante a de um reator pequeno.

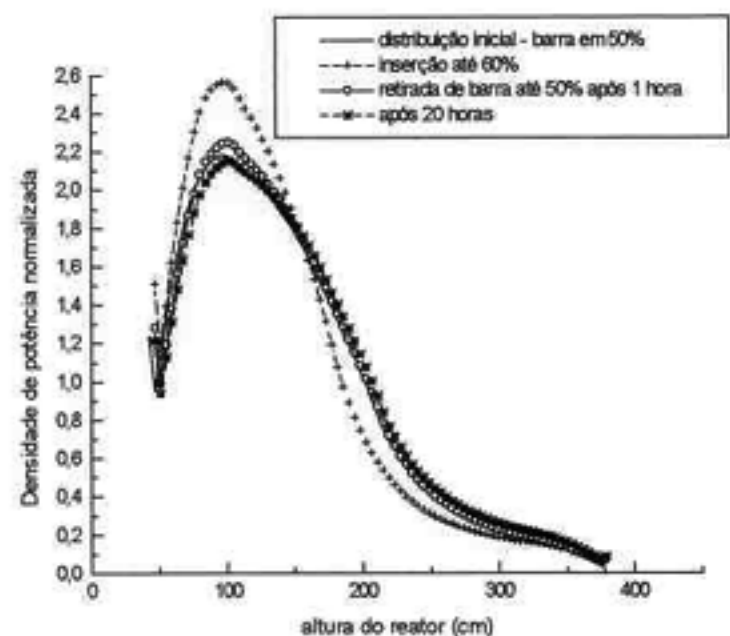


Figura 5 - Distribuição de densidade de potência no transiente (T3) para vários instantes.

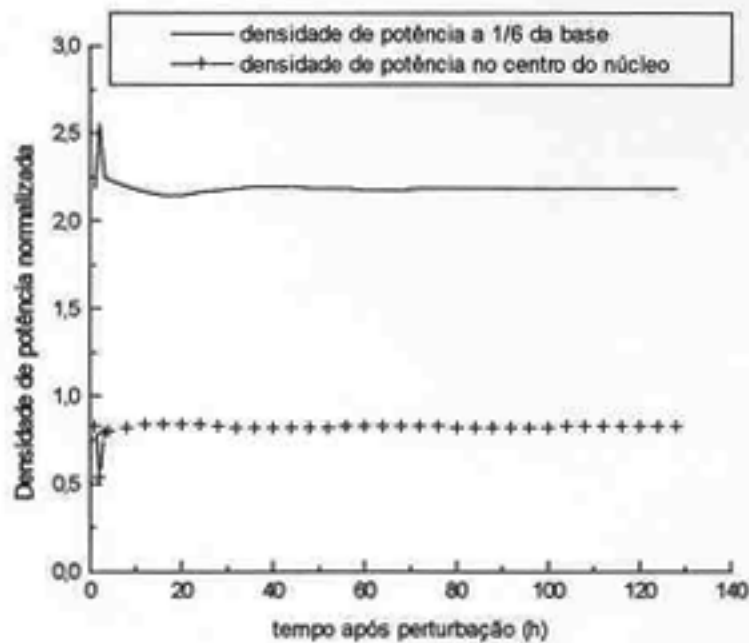


Figura 6 - Oscilação de densidade de potência nos pontos 1/6 da base e centro do núcleo ao longo do tempo no transiente (T3).

Influência do Tipo de Perturbação na Oscilação de Xenônio. As perturbações consideradas para esse estudo são causadas pela movimentação de barras de controle. O transiente (T4) é semelhante ao transiente (T1) exceto pelo fato que a barra de controle permanece no núcleo ao longo do transiente. A distribuição de potência inicial é plana e tem um transiente de xenônio sem movimentação da barra de controle. As Figuras 7 e 8 mostram as distribuições de densidade de potência em vários instantes do transiente e, da densidade de potência nas alturas de 1/6 e 1/2 do núcleo a partir da base. A distribuição de densidade de potência oscila com picos acentuados na região inferior do núcleo onde não há a presença das barras de controle. Na região que as barras estão inseridas a densidade de potência não apresenta picos.

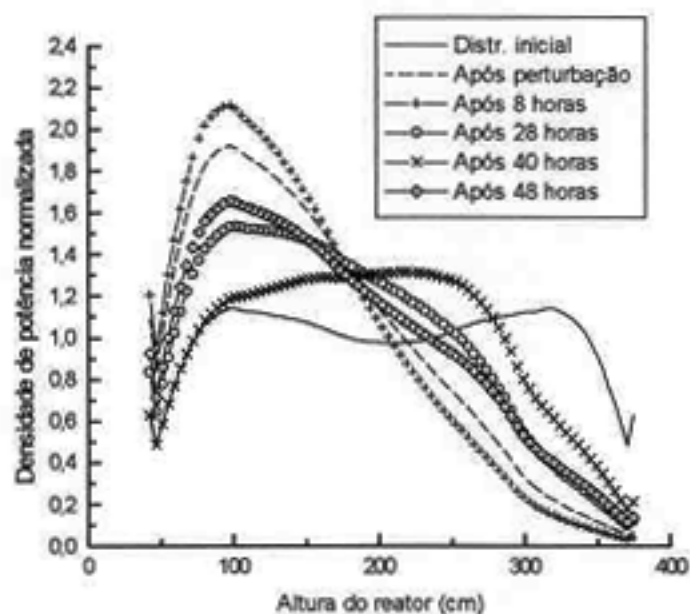


Figura 7 - Oscilação da densidade de potência em vários instantes do transiente (T4). A perturbação é de uma barra de 3% de reatividade inserida até 1/4 da altura do núcleo, e mantida.

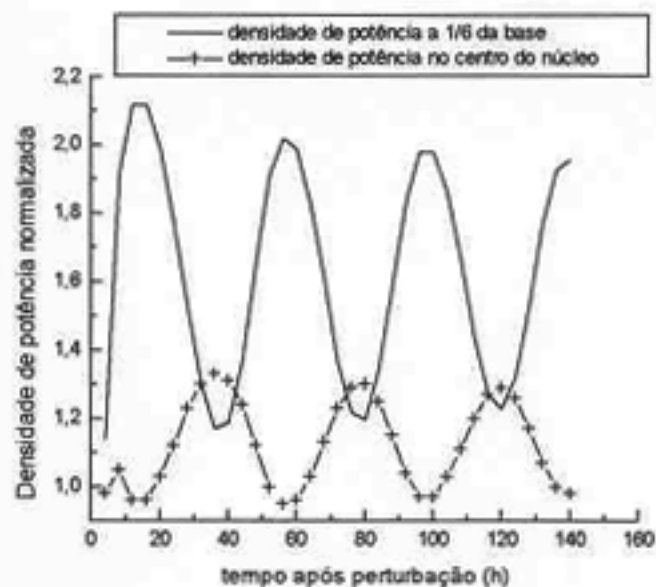


Figura 8 - Oscilação da densidade de potência nas alturas de 1/6 da base e no centro do núcleo no transiente (T4).

O resultado apresentado na Figura 7 mostra que a presença da barra de controle no topo do reator causa uma absorção de neutrons bastante grande que domina a oscilação espacial na região. Somente na parte inferior ocorre oscilações. A Figura 8 mostra que a oscilação é convergente, em contraste com o transiente (T1).

Uma comparação entre os transientes (T3) e (T4) mostra que, a presença de barras de controle estabiliza oscilações espaciais de densidade de potência, quanto mais inserida a barra no reator, menos são as oscilações espaciais, e, que o comportamento do reator se torna semelhante a de um reator de pequeno porte.

Efeito da Magnitude da Densidade de Potência na Oscilação de Xenônio. Em um reator nuclear com regime de operação que admite excursões e reduções de potência rápidas, é necessário avaliar o impacto da magnitude da densidade de potência nas oscilações de xenônio. Para esta avaliação foi analisado um transiente (T5) semelhante ao transiente (T1) mas com um nível de potência reduzido à metade. A oscilação diminuiu atingindo picos máximos de 1,26, ao passo que para o transiente (T1) tem picos máximos de 2,2.

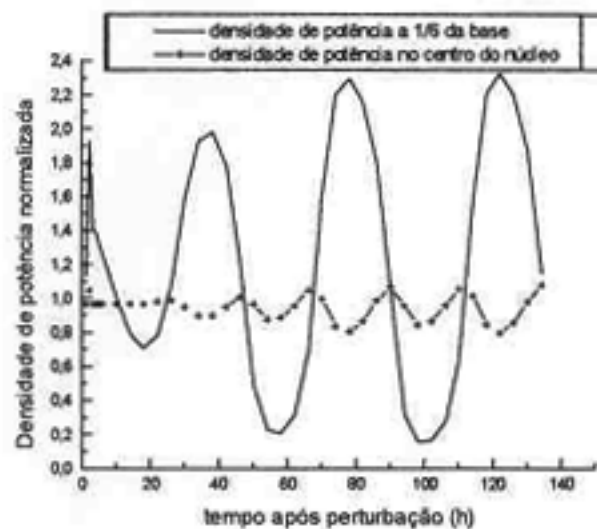


Figura 9 - Densidade de potência relativa, ao longo do tempo, para o transiente (T6). A potência inicial do reator foi de 431,35 MW. Após a elevação da potência para 862,7 MW, houve uma inserção de barra durante 1 hora semelhante ao transiente (T1).

A magnitude da densidade de potência do reator influi muito nas oscilações de xenônio. Em termos de impacto na distribuição de densidade de potência durante os transientes de xenônio, a diminuição da magnitude da densidade de potência diminui os picos de potência no núcleo durante o transiente.

Para se avaliar o que ocorre no caso da escalada de potência foi estudado outro transiente semelhante ao (T1), mostrado na Figura 9. No transiente (T6) o nível de potência inicial do reator é 431,35 MW, há uma elevação para 862,7 MW e logo após a barra é inserida no reator durante uma hora.

A comparação entre os transientes (T6) e (T1) mostra que o pico de potência inicial causado pela movimentação de barra é da mesma magnitude nos dois transientes. A evolução da oscilação espacial no transiente (T6) inicia com picos menores e após 80 horas se tornam semelhantes as do transiente (T1). Os picos menores no início do transiente são devidos à potência inicial menor. Após 80 horas o transiente praticamente se encontra dominado pelo novo nível de potência de 862,7 MW.

Esses transientes mostram que a variação temporal do nível de potência tem pouco efeito na amplitude das oscilações espaciais de Xe, que são mais dependentes do nível de potência, que de sua variação temporal.

IMPACTO DO TAMANHO DO NÚCLEO NA OSCILAÇÃO DE XENÔNIO.

Realizou-se transientes semelhantes ao (T1) para vários tamanhos de núcleo entre 336 cm e 100 cm de altura. O transiente (T1) foi escolhido por ser o tipo que apresenta oscilações de maior amplitude. A Figura 10 mostra a variação da densidade de potência na região de maior fator de pico, ao longo do transiente para núcleos com alturas de 336 cm, 272 cm, 208 cm, 152 cm e 100 cm. As oscilações decrescem com o tamanho do núcleo e quase desaparecem para os núcleos de 152 cm e 100 cm. A estabilidade também é alcançada mais rapidamente para núcleos pequenos: 20 horas para o núcleo de 100 cm, 30 horas para o núcleo de 152 cm e 50 horas para o núcleo de 208 cm. Os núcleos de 272 cm e 336 cm são instáveis com oscilações divergentes.

O tamanho do núcleo afeta a amplitude nas oscilações de Xe, conforme se vê na Figura 10. Foi verificado que a presença das barras de controle no topo do reator estabiliza as oscilações espaciais de Xe. O efeito da barra é como diminuir a altura efetiva do núcleo, restringindo-o à região sem barras.

TRANSIENTE DE XENÔNIO PARA UM NÚCLEO DE 100 CM

As Figuras 11 e 12 apresentam os resultados do transiente de xenônio realizado no reator com um núcleo

de 100 cm de altura. A barra é inserida de cima para baixo, até $\frac{1}{4}$ do topo do reator por 48 horas e, removida. Esse transiente, nas primeiras 48 horas, é semelhante ao transiente (T4) apresentado na Figura 7. Não há nenhuma oscilação espacial durante todo o transiente. Durante as 48 horas iniciais, a densidade de potência na posição 60 cm aumenta no instante do movimento da barra e depois vai decrescendo devido ao envenenamento do Xe. Após a retirada da barra, a densidade de potência cai abruptamente e, depois, aumenta gradativamente com o decaimento do xenônio sem oscilação espacial. Pode-se concluir que núcleos pequenos não tem oscilações espaciais de xenônio na direção axial.

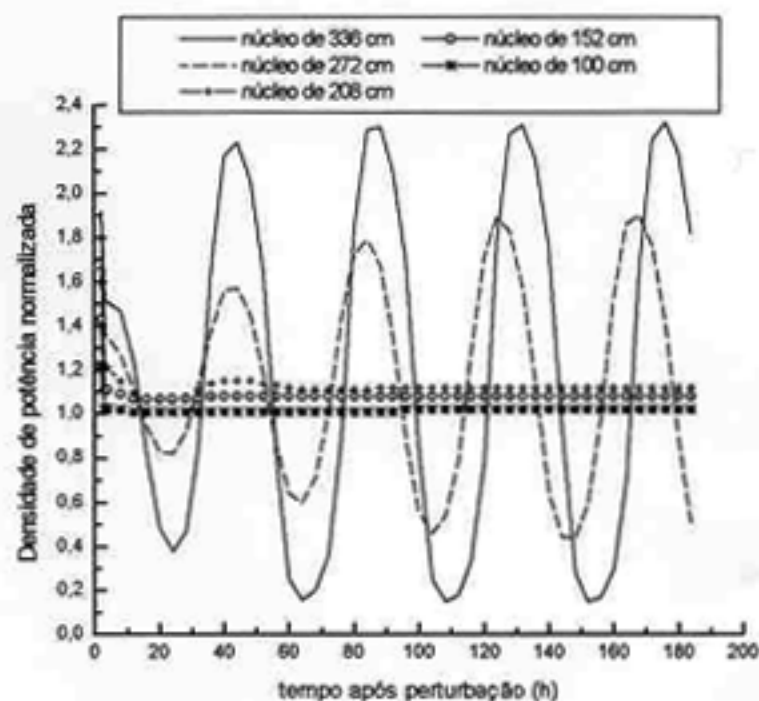


Figura 10 - Oscilação de densidade de potência nos pontos de máximo para transientes semelhantes ao (T1) para núcleos de vários tamanhos.

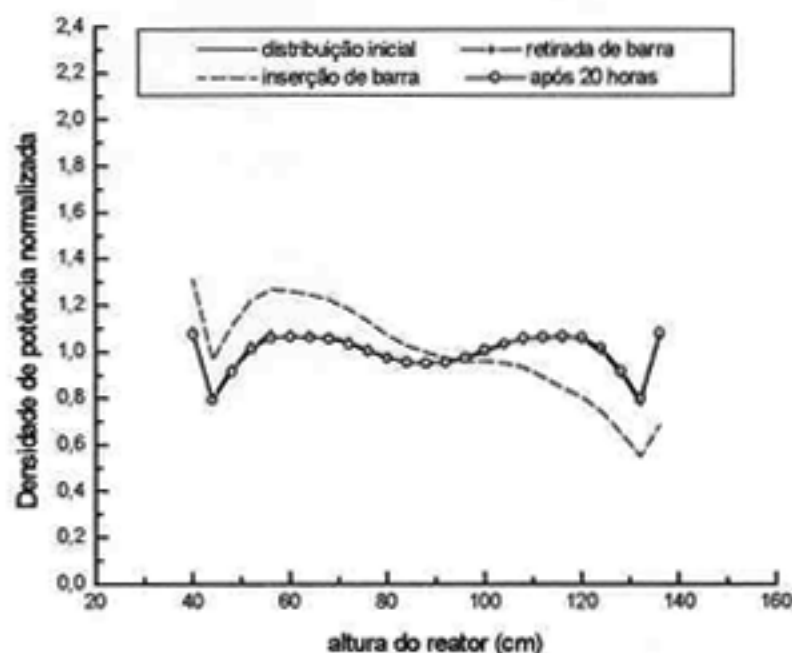


Figura 11 - Distribuição de densidade de potência para o reator de 100 cm ao longo do tempo. As curvas anterior e posterior à inserção de barra são coincidentes.

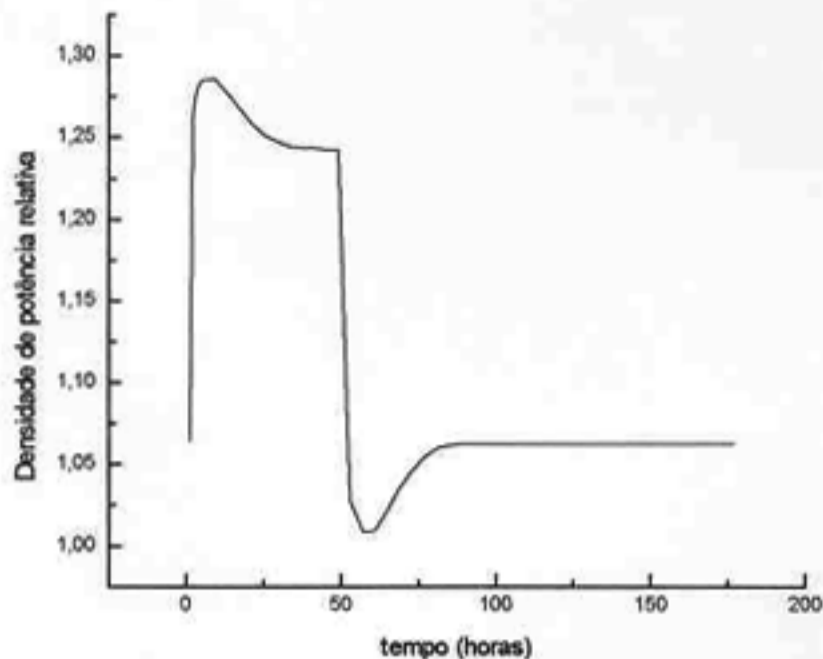


Figura 12 . Densidade de potência relativa na posição de 20 cm a partir da base do núcleo ativo de 100 cm.

CONCLUSÕES

Foram estudados os fatores determinantes que afetam as oscilações espaciais de xenônio em reatores PWR de grande porte e de pequeno porte, típicos para a propulsão naval. Mostrou-se que em reatores de grande porte a distribuição inicial de densidade de potência afeta substancialmente as oscilações de xenônio. Reatores com distribuições planas de densidade de potência tendem a ter maiores oscilações espaciais. A presença da barra de controle no núcleo faz com que este tenha uma altura efetiva menor e seja menos susceptível a oscilações de xenônio.

Transientes de xenônio foram realizados em núcleos de tamanhos entre 336 cm e 100 cm. Os resultados mostram que para os núcleos de 336 cm e 272 cm, o transiente (T1) produz oscilações espaciais instáveis e divergentes, para núcleos menores são estáveis e para o núcleo de 100 cm não ocorre nenhuma oscilação espacial.

O núcleo PWR de 100 cm, não apresenta oscilações espaciais na direção axial. A distribuição de densidade de potência é afetada basicamente pela movimentação das barras de controle. O maior fator de pico ocorre no início do transiente, quando não há envenenamento pelo xenônio. Conclui-se que transientes de xenônio não causam oscilações espaciais de densidade de potência na direção axial em reatores com núcleos de 100 cm de altura.

Pretende-se continuar este trabalho sobre oscilações de Xe em reatores de pequeno porte, estudar o comportamento da distribuição de potência na direção azimutal durante transientes de xenônio e definir procedimentos de movimentação de barra de controle durante transientes de xenônio em reatores pequenos.

REFERÊNCIAS

- [1] Bauer, D. C., Poncelet, C. G., **Practical Xenon Spatial Control**, Nuclear Technology, vol 21, March 1974.
- [2] Lin, C., Lin, Y. J., **Control of spatial xenon oscillations in pressurized water reactors via the Kalman filter**, Nuclear Science and Engineering, 118, 260, Dec 1994.
- [3] Cho, N. Z., Grossman, L. M., **Optimal control for xenon spatial oscillations in load follow of a nuclear reactor**, Nuclear Science and Engineering, 83, 136, Jan 1983.
- [4] Schulz, E. J., Lee, J. C., **Time-optimal control of spatial xenon oscillations to a generalized target**, Nuclear Science and Engineering, 73, 140, Feb 1980.
- [5] Bell, G. I. and Glasstone, S., **Nuclear Reactor Theory**, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1970.
- [6] Strawbridge, L. E., Allard, E. C., Bhalla, C. P., **Xenon Induced Core Instabilities**, Pittsburg, Pennsylvania, WCAP-3269-48, February 1965.
- [7] Lee, J. C., **Mid2 - A One Dimensional PWR Core Simulator Program**, The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, January, 1979.

ABSTRACT

This article studies the problem of spatial xenon oscillations in small reactors suitable for naval propulsion. These reactors usually have 0,5m to 1,5m of active height and do not have the soluble boron reactivity control system. Initially, it is studied the influence of the power density distribution, type of reactivity perturbation and power level on xenon spatial oscillations. It is demonstrated that flat power distributions, non-symmetric perturbations and high power levels cause greater spatial oscillations.

Several transients were studied for various heights of active core: 336 cm, 272 cm, 208 cm, 152 cm and 100 cm. The oscillation amplitudes decrease with the core size and practically disappear for the 100 cm core. The time required for power distribution stabilization also reduces substantially with the core height. One can expect that for reactor cores of 100 cm there are no spatial oscillations in the axial direction. The analyses were performed with the MID2 computer code.