

## MEDIDA E CÁLCULO DO "BUCKLING" DA UNIDADE CRÍTICA IPEN/MB-01 COM O MODERADOR A 20°C, 40°C, 60°C E 80°C.

Ulysses d'Utra Bitelli, Leda C. Cabelo Bernardes Fanaro

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN/CNEN-SP

Caixa Postal 11049

05499-900. São Paulo, Brasil

e-mail: ubitelli@net.ipen.br

### RESUMO

Este trabalho faz parte do esforço da Divisão de Física de Reatores do IPEN-CNEN/SP, no sentido de validar experimentalmente suas metodologias de cálculo e apresenta a medida da curvatura do fluxo de nêutrons ("Buckling") no núcleo da Unidade Crítica IPEN/MB-01 com o moderador as temperaturas de 20, 40, 60 e 80 °C. Para tal, foi medida a distribuição espacial do fluxo de nêutrons rápidos, ao longo da direção dos três eixos ortogonais do núcleo do reator, utilizando-se detectores de ativação (folhas) de Índio. Reproduzindo as condições experimentais, foi calculado, através dos códigos HAMMER-TECHNION / CITATION, o valor do Buckling às temperaturas de 20,40 e 80 °C. As comparações mostraram que o modelo de cálculo utilizado superestima em média 7,5% o "Buckling" do sistema.

### I. INTRODUÇÃO

Num núcleo de reator do tipo paralelepípedo retangular, o fluxo de nêutrons, no estado estacionário na região assintótica, considerando-se como origem dos eixos o centro do mesmo, pode ser dado pela Eq. (1) [1]:

$$\Phi = A \cdot \cos \frac{\pi \cdot x}{a} \cdot \cos \frac{\pi \cdot y}{b} \cdot \cos \frac{\pi \cdot z}{c} \quad (1)$$

onde, o parâmetro A está diretamente relacionado com a potência de operação do reator (P), V o volume do reator ( $V = a \cdot b \cdot c$ ), a energia liberada por fissão ( $\gamma$ ) e ( $\overline{\Sigma_f}$ ) a seção de choque média macroscópica de fissão. Dessa forma, A pode ser dada pela Eq.(2):

$$A = \frac{\pi^3 \cdot P}{8 \cdot V \cdot \gamma \cdot \overline{\Sigma_f}} \quad (2)$$

O parâmetro relacionado com a distribuição espacial do fluxo de nêutrons é o "Buckling" do sistema ( $B^2$ ), que nos dá uma medida da curvatura do fluxo de nêutrons.

Da Eq.(1), obtemos o "Buckling" para um núcleo de reator na forma de um paralelepípedo retangular:

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{c}\right)^2 \quad (3)$$

Sendo a e b as dimensões radiais efetivas do núcleo e c a dimensão axial efetiva.

O parâmetro neutrônico "Buckling" está diretamente relacionado com a fuga de nêutrons do sistema. Portanto, num reator hipotético cujo núcleo tivesse dimensões infinitas a curvatura do fluxo de nêutrons seria nula, e não haveria fuga de nêutrons. A medida do "Buckling" é um parâmetro básico da Física de Reatores que permite verificar se a metodologia de cálculo utilizada avalia corretamente a fuga de nêutrons do núcleo do reator.

### II. UNIDADE CRÍTICA IPEN/MB-01

A Unidade Crítica IPEN/MB-01 é uma instalação destinada ao estudo das características neutrônicas de núcleos moderados a água leve, possibilitando a verificação experimental de métodos de cálculo, estruturas celulares e malhas do reator, efetividade das barras de controle e resposta do núcleo a inserções de reatividade. Assim sendo, a unidade crítica foi concebida com a flexibilidade necessária para testar diferentes configurações do núcleo. As características da unidade crítica, estão descritas na referência [2]. Todavia, podemos salientar que as medidas do "Buckling" foram realizadas utilizando a configuração quadrada do núcleo, ou seja um arranjo de 26x26 varetas combustíveis nas direções Leste-Oeste e Norte-Sul do núcleo, como vemos na Fig. (1). Tal configuração foi

utilizada, ao invés da 28x26, por ser menos reativa, o que possibilitou minimizar os efeitos de perturbação das barras de controle na obtenção do fluxo de nêutrons assintótico.

Uma das flexibilidades operacionais da instalação Unidade Crítica IPEN/MB-01 está em permitir o aquecimento da temperatura do moderador, por intermédio de um aquecedor elétrico, instalado em série na linha de enchimento do tanque moderador, o que é particularmente interessante para se obter parâmetros experimentais como o coeficiente de reatividade de temperatura, Buckling e distribuição de fluxo neutrônico numa faixa de temperatura que vai de 20°C a 80°C.

### III. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Antes da criticalização do reator, procedeu-se ao aquecimento do moderador até as temperaturas nominais de 20°C, 40°C, 60°C, 80°C. Na monitoração da temperatura do moderador foram utilizados 3 termopares posicionados dentro do núcleo do reator, sendo um deles à meia-altura e os demais no início e fim do comprimento ativo do núcleo. Após se atingir a temperatura desejada, o reator foi criticalizado à potência de 100 watts com as barras de controle BC1 e BC2 igualmente retiradas. A temperatura foi mantida constante ao longo do tempo de irradiação, através do ajuste manual do aquecedor elétrico TC-211, a partir de leituras de registros de temperatura efetuados de 15 em 15 minutos, perfazendo um total de 162 leituras.

Foram realizadas um total de 2 operações por temperatura do moderador citada, da Unidade Crítica IPEN-MB/01 para mapeamento do fluxo de nêutrons rápidos, ao longo das direções radiais  $x$  e  $y$ , respectivamente as direções Norte-Sul e Leste-Oeste. A direção axial  $z$  foi mapeada no sentido paralelo às varetas combustíveis, ao longo do comprimento ativo do combustível, conforme podemos visualizar na Fig.(1). Todos os mapeamentos foram realizados na região central do núcleo, nas respectivas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ .

Cada mapeamento foi feito ao longo das direções, utilizando-se 9 folhas na direção axial, distantes entre si 45 mm e 9 folhas na direção radial distantes entre si 40 mm, de forma a cobrir toda a extensão da região assintótica do núcleo do reator. A extensão da região assintótica foi medida em trabalho anterior [3], para o moderador a 20°C e consistiu na medida da razão de cádmio ao longo dos três eixos ortogonais centrais do núcleo.

A espessura das folhas de In utilizadas nas medidas foram de 0,5 mm, com um diâmetro de 8 mm. As massas das folhas foram medidas numa balança Mettler H 20 (precisão de décimo de mg) e tiveram uma pequena variação decorrente da imprecisão de corte das placas de Índio. Assim, as folhas apresentaram massas na faixa de 0,20264 g a 0,20625 g. Após pesagem e limpeza, as folhas foram montadas no suporte de lucite apropriado e posteriormente irradiadas.

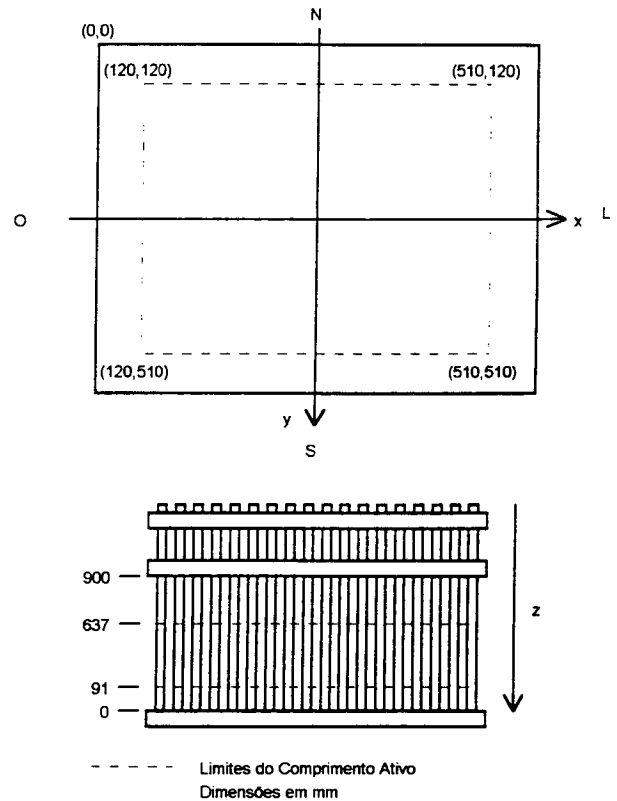


Figura 1- Núcleo do reator com as direções  $x$ ,  $y$  e  $z$  mapeadas pelas Folhas de Índio.

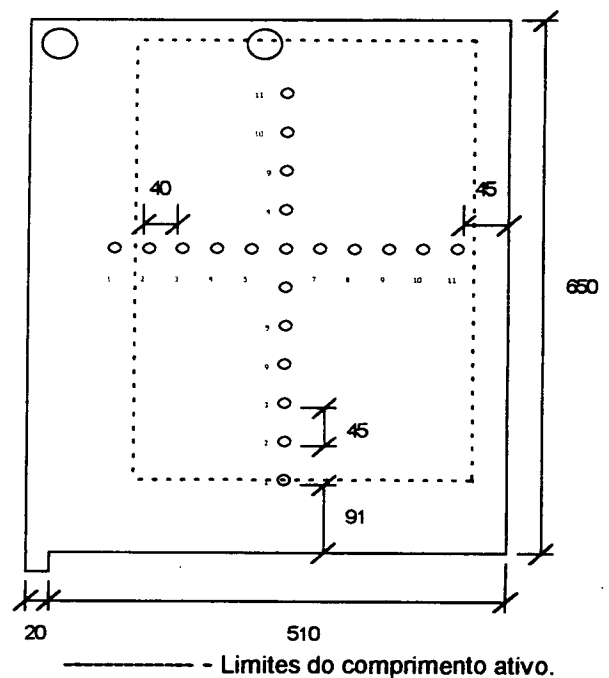


Figura 2-: Suporte das Folhas de Ativação inserido no núcleo do Reator IPEN/MB-01

Uma visualização do dispositivo de lucite (suporte das folhas), utilizado para mapeamento do fluxo de nêutrons, pode ser vista na Fig.(2).

As irradiações foram realizadas com o reator operando a um nível de potência de 100 watts, por duas horas, com as barras de controle BC1 e BC2, retiradas, o equivalente a 73% do comprimento ativo axial do núcleo do reator.

Após a irradiação, as folhas foram levadas ao laboratório, onde foram contadas numa bancada calibrada de Germânio Hiper-puro (HPGe). Basicamente, as reações monitoradas na bancada HPGe são do tipo espalhamento inelástico ( $n,n'$ ), mas precisamente a reação  $^{115}\text{In}(n,n')^{115\text{m}}\text{In}$ , com um limiar de energia para nêutrons rápidos em torno de 0,3 Mev.

#### IV. METODOLOGIA DE CÁLCULO

Os cálculos foram realizados com o programa CITATION [3] na geometria tridimensional (x,y,z) em 4 grupos de energia, sendo as seções de choque geradas com os programas NJOY/AMPEX-II/HAMMER-TECHNION. Na modelagem do reator, utilizou-se a estrutura de "overlay" para o posicionamento correto das barras de controle, que estão 73% retiradas do núcleo. A modelagem nas direções (x,y) é feita pino-a-pino, considerando-se 30 cm de refletor de cada lado do núcleo, discretizados em 46x46 intervalos espaciais. Na direção axial (z), determinou-se o tamanho do intervalo espacial de modo que o centro do intervalo coincidissem com a posição de irradiação das folhas de Índio, num total de 57 intervalos espaciais. Foram também incluídos na modelagem os refletores superiores e inferior do núcleo, as regiões de alumina das varetas combustíveis, a placa suporte do núcleo e os tampões das varetas absorvedoras de controle e de segurança.

A distribuição do fluxo em 4 grupos de energia foi gravada no arquivo FORT.36 de saída do CITATION, onde são gravados todos os valores de fluxo de cada intervalo espacial (x,y,z) da modelagem, no sistema binário. Para ter acesso aos valores de fluxo foi elaborado o programa LERFDP.FOR, que efetua as leituras dos valores de fluxo gravados no sistema binário e os transcreve em valores decimais, nas posições desejadas, no caso, ao longo dos três eixos ortogonais centrais do núcleo do reator (posições mapeadas).

Elaborou-se uma correspondência entre as posições de irradiação, e a modelagem do programa CITATION, de modo que as distribuições radiais e axiais do fluxo rápido de nêutrons (Grupo 1), coincidissem de forma a possibilitar a comparação.

#### V. RESULTADOS OBTIDOS

A condição de fluxo de nêutrons assintótico é atingida a partir da determinação experimental da razão de Cádmiu ( $R_{cd}$ ) ao longo do comprimento ativo do reator. Se a razão de Cádmiu se mantém constante (Razão entre as

atividades das folhas nuas e cobertas com Cádmiu), significa que o espectro de energia dos nêutrons se mantém constante, não sofrendo a influência das barras de controle, bem como da mudança de meio na interface núcleo-refletor, estando caracterizada a região ao longo da qual o fluxo de nêutrons mantém a sua condição assintótica [4]. Nesse caso, a distribuição do fluxo de nêutrons assintótica deverá assumir a forma senoidal, se considerarmos como origem das coordenadas do núcleo (cuja forma geométrica é um paralelepípedo), um de seus vértices.

A Razão de Cádmiu ( $R_{cd}$ ) medida através da irradiação de folhas de ouro nuas e cobertas com Cádmiu, se manteve constante ao longo das coordenadas correspondentes à posição (cota) ocupada entre as folhas 3 e 11 (Vide Fig. 2). O valor obtido, para a configuração do núcleo quadrada (26x26 varetas) foi de:

$$R_{cd} = 1,70 \pm 0,20$$

Os valores de fluxo de nêutrons experimentais e calculados, normalizados em relação ao seu valor máximo, podem ser visualizados na Fig.(3), Fig.(4) e Fig.(5), respectivamente nas direções radiais do núcleo x, y e na direção axial z, usando como ajuste por mínimos quadrados uma função senoidal do tipo:

$$y = P_1 \cdot \sin(\pi(x + P_3) / P_2) \quad (4)$$

Os valores calculados pelo código CITATION que foram levados em consideração para a determinação dos valores calculados de "Buckling" são aqueles que se encontram dentro da região assintótica experimental, sendo os demais propositalmente desconsiderados.

Abaixo estão os valores experimentais e Calculados sintetizados na Tabela 1.

Tabela 1- Valores Obtidos de "Buckling" da Unidade Crítica IPEN/MB-01.

Temperatura (°C)	Buckling Experimental (m <sup>-2</sup> )	Buckling Calculado (m <sup>-2</sup> )	Razão C/E
20°C	92,55 ± 1,08	98,93	1,069 ± 0,012
40°C	90,60 ± 2,27	98,50	1,087 ± 0,027
60°C	89,85 ± 1,12	—	— *
80°C	89,48 ± 1,35	95,55	1,068 ± 0,016

\* - Seções de choque não disponíveis a 60°C.

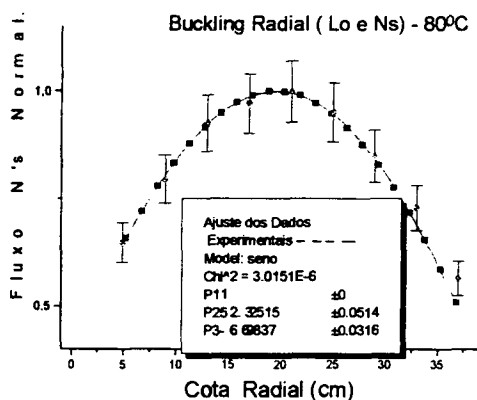


Figura.3:- Curvatura do Fluxo de Nêutrons - Direção Radial -Moderador a 80°C.

O valor do "Buckling" ( $B^2$ ) é obtido quando o fluxo de nêutrons se anula, ou seja para o valor de  $y=0$ . Isto é obtido quando  $x=P_3$  e  $x=P_2 - P_3$ , ou seja, o coeficiente  $P_2$ , obtido do ajuste por mínimos quadrados, nos fornece a distância para o qual o fluxo de nêutrons se curva até atingir o zero, ou seja o próprio valor do Buckling ( $B^2$ ), uma vez que o mesmo é dado por uma simples fórmula matemática do tipo:

$$B^2 = (\pi / P_2)^2 \quad (5)$$

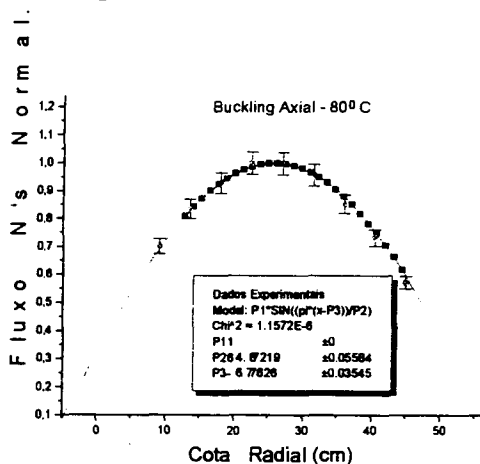


Figura.4:- Curvatura do Fluxo de Nêutrons - Direção Axial- Moderador a 80°C.

A expressão (5) é característica de um reator do tipo paralelepípedo retangular. Assim, representando graficamente, todos os valores de fluxo ao longo das respectivas direções (valores normalizados) é possível se obter para cada um dos ajustes da função senoidal (fluxo de nêutrons assintótico) os valores de  $P_1$ ,  $P_2$ , e  $P_3$ , por mínimos quadrados. O valor de  $P_1$  está relacionado com a magnitude do fluxo de nêutrons e, no nosso caso específico, não nos interessa, já o valor das constante  $P_2$  está relacionado diretamente ao valor do "Buckling" ( $B^2$ ). Os valores de  $P_2$  obtidos podem ser visualizados nos respectivos gráficos (figuras) e inseridos na Eq.(1), possibilita obter o valor do "Buckling" nas respectivas direções radiais e axial. Assim os valores de  $B^2$  obtidos, a partir da medida da distribuição espacial do fluxo de nêutrons rápidos ( experimentalmente com folhas de ativação e no grupo I no CITATION), nas duas direções radiais ( Leste-Oeste e Norte-Sul) e axial, somadas, nos dão o valor do "Buckling" para a temperatura do moderador, como podemos ver na Tab(1).

## VI. CONCLUSÃO

Os valores experimentais obtidos para a curvatura do fluxo de nêutrons ("Buckling") , com o moderador aquecido às temperatura de 20°C,40°C, 60°C e 80°C, estão bastante coerentes, ou seja são valores decrescentes, apesar de bastante próximos entre si.

Sabemos que o parâmetro "Buckling" está diretamente relacionado à fuga de nêutrons do sistema [5]. Assim, seu conhecimento experimental nos permitirá dizer se os cálculos neutrônicos estão superestimando ou subestimando, tais fugas. Resultados preliminares, obtidos a 20°C, já nos pareciam indicar que os códigos citados no trabalho, superestimavam a fuga de nêutrons do núcleo do reator [6]. De fato, isto foi confirmado, comparando-se os resultados a 40 °C e 80°C, onde os valores calculados sistematicamente estimam um "Buckling" superior ao valor medido. Observando a Tab.(1), vemos que o desvio sistemático dos valores calculados, situam-se aproximadamente na faixa dos 7 % a 9 %. Resultados da literatura, visando validar códigos computacionais, mostram discrepâncias médias de 3 a 5 % [7], entretanto levando-se em conta que o código CITATION, utiliza o método de difusão de nêutrons nos cálculos de distribuição de fluxo, em que sistematicamente os valores de fluxo calculados são menores em valor do que os obtidos experimentalmente, em até 15%, em algumas posições do interior do núcleo do reator [6] , podemos considerar a discrepância obtida como previsível.

Como proposta de trabalho futuro, sugerimos a realização de novas medidas de "Buckling", a fim de melhorarmos a estatística na obtenção do parâmetro, bem como um estudo por parte do Grupo de Neutrônica da Divisão de Física de Reatores, de possíveis mudanças na metodologia de cálculo, a fim de se obter valores calculados de "Buckling" mais próximos dos experimentais.

## REFERÊNCIAS

- [1]- LAMARSH, J.R. **Introduction to Nuclear Reactor Theory**. Reading Mass., Addison-Wesley, 1966.
- [2] SANTOS, A. & MENEZES, A. **Tema Especial de Física de Reatores e Termo-Hidráulica-IX ENFIR**, 1-4, (25-29/10/93), Caxambú, M.G.
- [3] FOWLER, T.B. ET ALII. **Nuclear Reactor Core Analysis Code Citation**. ORNL.
- [4] BITELLI, U. D'U. ET ALII. **Medida do "Buckling" da Unidade Crítica IPEN/MB-1 X Encontro Nacional de Física de Reatores e Termo-Hidráulica-X ENFIR**, Águas de Lindóia, SP, Brasil, 1995.
- [5] D'HONDT, P. ET ALII. **Benchmark Experiments in Venus: A Nuclear Data Package for LWR Pu-Recycle**. International Conference on the Physics of Reactor, Physor 96, Mito, Ibaraki, Japan, Sep. 1996.
- [6] BITELLI, ULYSSES D'U. & FANARO, LEDA C.C.B. **Mapeamento do Fluxo de nêutrons Rápidos no Reator IPEN/MB-01 - Medida e Cálculo**. Relatório Interno RELT.002.R00, Novembro de 1995.
- [7] VILLARINO, EDUARDO & LECOT, CARLOS A. **Condor v 1.3: WWER Lattice Validation**. International Conference on the Physics of Reactors, Physor 96. Mito, Ibaraki, Japan, Sep. 1996.
- [8] MIYOSHI, YOSHINORI ET ALII. **A Geometric Buckling Expression for Regular Polygons: Measurements in Low-Enriched UO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O Lattices**. Nuclear Technology, Vol. 103, Sep. 1993.

## ABSTRACT

This work presents the methodology to measure the Buckling of the Critical Facility IPEN/MB-01 with the moderator at 20°C, 40°C, 60°C e 80°C. The experimental Buckling values are compared with those calculated at 20°C, 40°C, 80°C and show an average disagreement of 7.5%. These results indicate that the codes HAMMER-TECHNION/CITATION superestimate the leakage of neutrons to out of the reactor core.