

## MEDIDAS DOS PARÂMETROS INTEGRAIS EM FÍSICA DE REATORES NUCLEARES USANDO REATOR TIPO PISCINA DE 2 MW

Márcia Aparecida Picchi Alves\*, Ulysses d'Utra Bitelli\*\*,  
Aucyone Augusto da Silva\*\*, Paulo Sérgio Brasko Ferreira\*\*,  
Paulo Rogério Pinto Coelho\*\*

\*Coordenadoria Para Projetos Especiais—COPESP  
\*\*Instituto Pesquisas Energéticas e Nucleares—IPEN

### RESUMO

Este trabalho apresenta um resumo dos experimentos realizados pela Seção de Medidas de Parâmetros Nucleares da Divisão de Física de Reatores no reator de pesquisa IEA-R1, localizado no IPEN-CNEN/SP, com uma potência normal de operação de 2 MW.

### INTRODUÇÃO

Este trabalho descreve experimentos realizados no Reator de Pesquisa tipo piscina IEA-R1. Este reator nuclear está localizado no Centro de Pesquisas IPEN-CNEN/SP, com potência normal de operação de 2 MW. A forma geométrica do núcleo é a de um paralelepípedo, onde os elementos combustíveis e refletores são encaixados verticalmente na matriz suporte do núcleo. Ele é composto por 30 elementos arranjados numa matriz de 6 X 5 elementos. Quatro elementos desta matriz são usados como barras de controle e segurança. O elemento combustível do IEA-R1 é do tipo MTR composto por 18 placas paralelas, com encamisamento de alumínio. A seguir são descritos os experimentos abaixo relacionados:

- 1) Aproximação da Massa Crítica;
- 2) Calibração de Potência;
- 3) Métodos de Calibração de Barras de Controle e Segurança;
- 4) Coeficiente de Reatividade de Temperatura do Moderador e de Vazio;
- 5) Determinação da Constante Alfa-Rossi;
- 6) Mapeamento do Fluxo de Nêutrons pela técnica de Análise por Ativação;
- 7) Medida de Espectro de Energia de Nêutrons pela Técnica de Ativação de Folhas;
- 8) Mapeamento de Fluxo de Nêutrons e Medida de Espectro de Energia de Nêutrons no Canal de Irradiação ("beam-hole").

### APROXIMAÇÃO DA MASSA CRÍTICA 41.24

A massa crítica de um reator, para uma dada configuração estabelecida, é determinada através de um experimento com o qual se obtém a criticidade de forma segura e controlada, evitando que esta seja inesperada.

A aproximação da criticidade é feita inserindo-se material fissil no núcleo do reator, e a previsão da massa crítica é feita através da extrapolação do inverso da multiplicação de nêutrons ( $1/k$ ). A multiplicação de nêutrons pode ser conseguida através dos sinais de detectores de nêutrons instalados próximos ao núcleo do reator. No caso do reator IEA-R1 foram utilizados dois detectores tipo câmara de fissão, mas em geral utilizam-se detectores do tipo pulso devido ao baixo fluxo de nêutrons no reator durante a realização do experimento.

Prevê-se a criticidade do reator para duas situações: i) massa crítica e ii) posicionamento das barras de controle.

### CALIBRAÇÃO DOS CANAIS DE POTÊNCIA 434

Utilizou-se a técnica de Análise por Ativação de Folhas, em níveis de potência do reator inferiores a 2 kW para mapeamento do fluxo de nêutrons no interior do elemento combustível, e posteriormente obteve-se o fluxo médio de nêutrons térmicos. O fluxo médio foi obtido através de ajuste polinomial dos fluxos de nêutrons térmicos nas direções axial e radial ao elemento combustível. A potência dissipada em cada elemento combustível é proporcional ao fluxo médio de nêutrons. A potência total é a soma das potências dissipadas por cada elemento combustível. Para níveis de potência da ordem de 2 MW, a determinação da potência do reator pode ser conseguida através da técnica do balanço térmico, onde se verifica a variação de temperatura sofrida pela água refrigerante ao circular pelo núcleo do reator.

### CALIBRAÇÃO DAS BARRAS DE CONTROLE E SEGURANÇA 444

A calibração das barras de controle e segurança é feita compondo-se as curvas de reatividade diferencial e integral de cada barra do reator.

Basicamente, o método consiste em realizar uma perturbação no sistema através da retirada de uma barra absorvedora de sua posição crítica. A reatividade gerada em consequência dessa perturbação é obtida utilizando-se a técnica do período estável (Equação Inhour) e a técnica da cinética inversa (reatímetro). Após a determinação da reatividade introduzida no reator, uma segunda barra absorvedora é inserida no núcleo para compensar o excesso de reatividade. Através da razão entre a reatividade introduzida e a variação do posicionamento da barra retirada, obtém-se as curvas de reatividade reatividade diferencial e integral. Também pode-se determinar a reatividade integral de barras através da técnica de Queda de Barra ("Rod Drop"), onde o reator é criticalizado inicialmente com uma das barras totalmente retirada do núcleo e posteriormente inserida rapidamente (scram de barra). Acompanhando-se o transiente de potência pode-se obter a reatividade integral de barra (via técnica do período estável e cinética inversa). As figuras 1, 2, 3, 4 e 5 apresentam as curvas de reatividade integral e diferencial, respectivamente, das barras do reator IEA-R1.

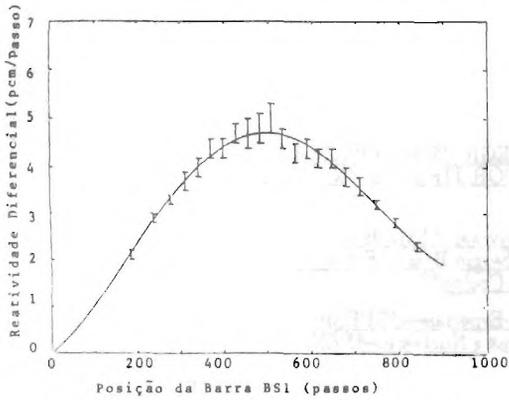


Figura 1- Reatividade Diferencial da Barra da Segurança BS1.

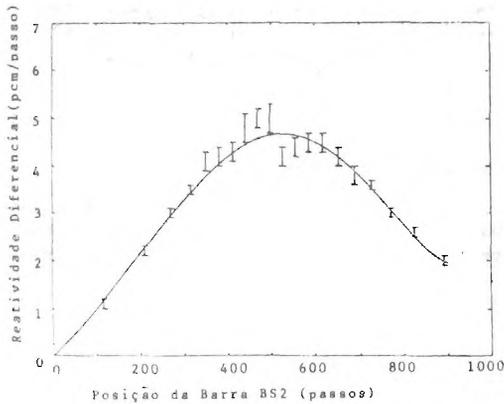


Figura 2- Reatividade Diferencial da Barra de Segurança BS2.

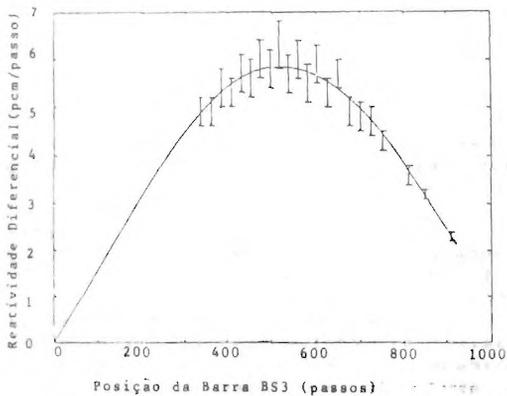


Figura 3- Reatividade Diferencial da Barra de Segurança BS3.

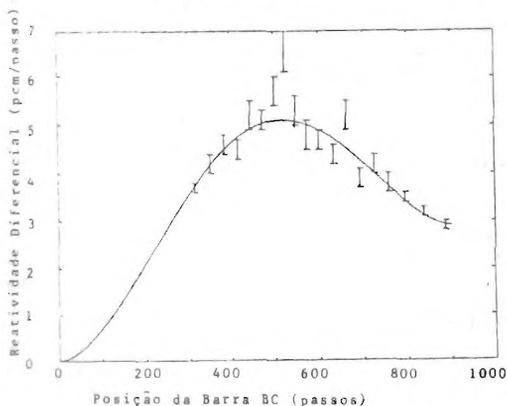


Figura 4- Reatividade Diferencial da Barra de Controle BC.

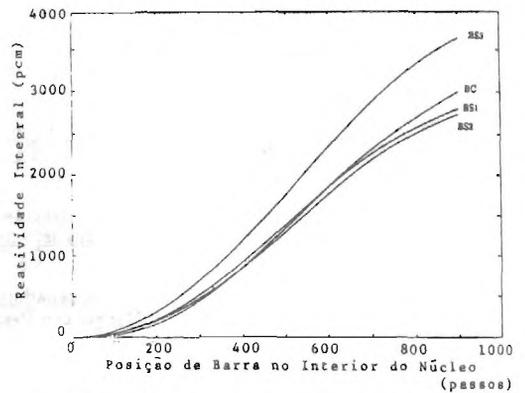


Figura 5- Reatividade Integral das Barras do Reator IEA-R1.

### COEFICIENTE DE REATIVIDADE DE TEMPERATURA DO MODERADOR/47

O coeficiente de reatividade de temperatura do moderador consiste na variação de reatividade introduzida no sistema devido a variações de temperatura da água moderadora. Em consequência do Reator IEA-R1 não possuir sistema de aquecimento externo, inicialmente realizou-se o aquecimento da água da piscina do reator. A variação de temperatura na água foi feita desligando o circuito secundário de refrigeração com o reator operando a 2 MW. Como o reator estava operando em sua potência nominal (2MW) durante a etapa de aquecimento, a produção de Xenônio e outros venenos poderiam interferir no valor experimental do coeficiente de reatividade de temperatura do moderador. Para evitar a contribuição desse problema, não foi feita tomada de dados durante o aquecimento da água da piscina. Esta foi aquecida até o limite máximo de 40°C (permitido pela operação). Cobriu-se a superfície da piscina com o auxílio de um plástico e depois de dois dias de espera para decaimento do Xe e outros elementos, o reator foi criticalizado em um nível de potência da ordem de 100 W. Em seguida foi iniciado o resfriamento da água da piscina através da utilização do circuito secundário. Durante a variação de temperatura, a criticalidade do reator era mantida movimentando-se a barra de controle. A reatividade inserida era obtida a partir da curva de calibração de barras. As variações de temperatura foram medidas utilizando termopares dentro do núcleo. Os valores obtidos encontram-se na Tabela 1.

$\Delta T_m (^{\circ}C)$	$\Delta \rho (pcm)$	$\Delta T_m (^{\circ}C)$	$\Delta \rho (pcm)$
- 1,35	17,5 $\pm$ 4,2	- 0,83	8,8 $\pm$ 1,2
- 0,68	8,8 $\pm$ 1,2	- 0,36	8,9 $\pm$ 1,1
- 0,57	4,4 $\pm$ 1,1	- 0,56	13,4 $\pm$ 2,2
- 0,49	4,5 $\pm$ 1,1	- 0,34	4,5 $\pm$ 1,1
- 0,58	9,0 $\pm$ 1,4	- 0,39	4,5 $\pm$ 1,1
- 0,37	9,0 $\pm$ 1,4	- 0,68	4,5 $\pm$ 1,1
- 0,61	9,1 $\pm$ 1,4	- 0,93	4,6 $\pm$ 1,2

Tabela 1- Variações de Temperatura e de Reatividade.

## COEFICIENTE DE REATIVIDADE DE VAZIO 44

O coeficiente de reatividade de vazio é a variação de reatividade do sistema em relação à inserção de um volume vazio no núcleo. Entende-se por volume vazio, um objeto que a seção de choque de absorção de nêutrons térmicos seja desprezível. O material utilizado para simulação de volume vazio foi o alumínio. Para a determinação do coeficiente de reatividade de vazio do Reator IEA-R1, introduziram-se duas placas de alumínio nos canais de refrigeração dos elementos combustíveis. Conhecendo-se o volume vazio gerado pelas duas placas e a reatividade inserida no núcleo, obtém-se o coeficiente de reatividade de vazio. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 2.

As reatividades eram obtidas através de um Reatímetro Digital do IPEN. Após criticalização do reator com as placas de alumínio inseridas em um EC eram retiradas lentamente e a reatividade do reator era medida após total retirada das placas. Através de simulações computacionais estimava-se que a inserção de reatividade positiva causada pela retirada das placas não acionaria o mecanismo de scram das barras de Controle/Segurança.

Em alguns EC não se tinha o acesso para introdução das placas de alumínio, por isso não se colocou as placas em todos os EC do reator. Na Tabela 2 tem-se os elementos combustíveis onde foi possível a inserção.

Número do Elemento	Variação de Reatividade (pcr)
86	41,5 ± 6,0
89	33,3 ± 4,7
93	29,8 ± 4,8
94	62,7 ± 2,4
95	47,6 ± 4,0
96	25,1 ± 5,5
98	22,6 ± 0,4
99	27,7 ± 5,1
101	20,8 ± 5,6
104	30,3 ± 3,0
105	31,1 ± 3,0
108	56,5 ± 4,0
114	60,3 ± 4,0
125	77,3 ± 5,3
126	60,7 ± 6,0

TABELA 2 - VARIAÇÕES DE REATIVIDADE OBTIDAS.

## DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE $\alpha$ -ROSSI 45

A determinação da constante  $\alpha$ -Rossi foi feita através da utilização da técnica de Análise de Ruído. Para esse experimento utilizou-se o método da correlação cruzada de dois detectores de nêutrons em-core. Utilizando um Analisador Fourier para obtenção do espectro de frequências dos sinais dos detectores e de um programa de ajuste de mínimo quadrados, ajustou-se aos dados experimentais o modelo teórico derivado a partir da técnica de Análise de Ruído.

## MEDIDA DA DISTRIBUIÇÃO DO FLUXO DE NÊUTRONS TÉRMICOS E RÁPIDOS 43

A distribuição do fluxo de nêutrons térmicos e rápidos do Reator IEA-R1 foi obtido através da técnica de análise por ativação. O mapeamento do fluxo de nêutrons foi conseguido ativando-se folhas no interior dos canais de refrigeração em vários elementos

combustíveis. As folhas de ativação utilizadas foram de ouro e índio. As folhas de ouro foram utilizadas para determinação do fluxo de nêutrons térmicos e epitérmicos. As folhas de índio foram utilizadas para determinação do fluxo de nêutrons rápidos. Foi utilizada a técnica da razão de cádmio para discriminação de nêutrons térmicos de epitérmicos. As figuras 6 e 7 apresentam as curvas de fluxo térmico e rápido no interior de um elemento combustível do Reator IEA-R1.

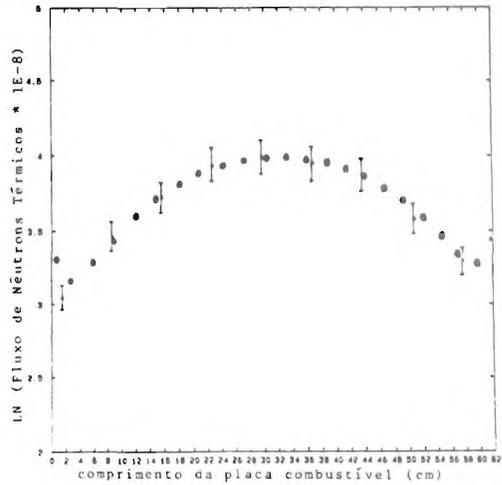


Figura 6- Fluxo de Nêutrons Térmicos Medido (I) e Calculado (●) no EC108.

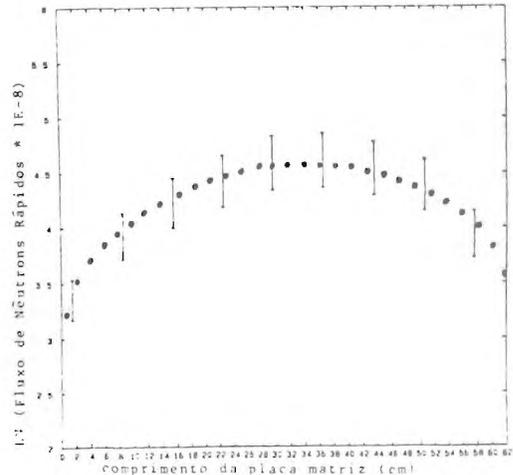


Figura 7- Fluxo de Nêutrons Rápidos Medido (I) e calculado (●) no EC94.

## MEDIDA DE ESPECTRO DE NÊUTRONS 43

O espectro de nêutrons dentro de elementos combustíveis e em posições de irradiação do núcleo de reator foi conseguido através da técnica de folhas de ativação. Foram empregados vários tipos de folhas de ativação para o levantamento de espectro. O espectro de nêutrons foi obtido a partir da utilização do código de desdobramento de espectro SAND-II. A figura 8 apresenta o espectro de energia dos nêutrons medido no moderador de um elemento combustível.

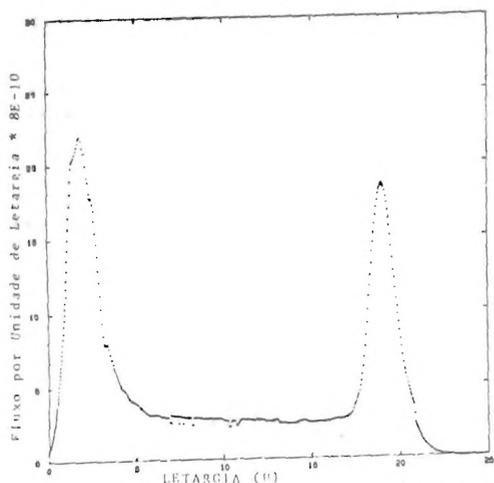


Figura 8- Espectro de Energia dos Nêutrons Medido no Moderador do EC-94 à potência de 4310 W.

#### SUMMARY

This paper describes the experiments that usually are made in the Swimming Pool Research Reactor IEA-R1. This Nuclear Reactor is sited in the IPEN-CNEN/SP Research Center (São Paulo-Brasil) and has a normal operation power of 2 MW. The following experiments are described in this paper: 1-The Critical Mass Approximation; 2-The Power Channel Calibration; 3-Control and Safety Rods Calibration Methods; 4- The Moderator Temperature and Void Reactivities Coefficient Experiments; 5- Alpha-Rossi Constant Determination; 6- Thermal and Fast Spatial Neutron Flux by Activation Techniques; 7- Neutron Energy Spectrum In Core by Activation Technique; 8- Beam-Hole Neutron Flux Distribution and Neutron Energy Spectrum.

#### MAPEAMENTO DE FLUXO DE NÊUTRONS E MEDIDA DE ESPECTRO DE ENERGIA DE NÊUTRONS NO CANAL DE IRRADIAÇÃO DO REATOR IEA-R1 /6/

O mapeamento de fluxo de nêutrons foi realizado no interior do canal de irradiação do Reator IEA-R1, a uma potência de operação de 200 kw, utilizando folhas de ouro nuas e cobertas com cádmio.

O espectro de energia de nêutrons foi obtido em duas posições: à entrada e à saída do canal de irradiação número 8. Foram irradiados vários detectores de ativação de diferentes materiais e obteve-se o espectro de nêutrons a partir da utilização do código de desdobramento de espectro SAND-II e foi possível uma comparação com valores calculados pelo código DOT 3.5.

#### REFERÊNCIAS

- /1/ P.R.P.Coelho et alii., "Determinação da Massa crítica e Aproximação da Criticalidade do Reator IPEN/MB-01", Anais do VII ENFIR, Encontro Nacional de Física de Reatores e Termohidráulica, Vol. I, Recife-PE, Brasil, 1989.
- /2/ Curso de Medidas de Parâmetros Nucleares em Reatores, Prof.Dr.João Manoel Moreira, 1985.
- /3/ Bitelli, U.U., "Medida e Cálculo da Distribuição Espacial e Energética de Nêutrons no Núcleo do Reator IEA-R1", Msc. Thesis, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, SP, Brasil, 1988.
- /4/ Ferreira, P.S.B., "Medida e Cálculo de Parâmetros de Reatividade no Reator IEA-R1", Msc. Thesis, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, SP, Brasil, 1988.
- /5/ Martins, F.R.; Moreira, J.M., "Medida da razão e Calibração de Potência do Reator IPEN/MB-01 utilizando a técnica de análise de ruído", Anais do VII ENFIR, Encontro Nacional de Física de Reatores e Termohidráulica, Recife-PE, Brasil, 1989.
- /6/ Bitelli, U.U., Alves, M.A.P., Damy, M.A., Coelho, P.R.P., "Mapeamento de Fluxo de Nêutrons Térmicos no Canal de Irradiação B do Reator IEA-R1", Anais do VIII ENFIR, Encontro Nacional de Física de Reatores e Termohidráulica, Atibaia, SP, Brasil, 1991.