

# CALIBRAÇÃO DE POTÊNCIA DO REATOR IPEN/MB-01 ATRAVÉS DO MAPEAMENTO DO FLUXO DE NÊUTRONS TÉRMICOS POR DETETORES DE ATIVAÇÃO

Ulysses d'Utra Bitelli  
Rogério Jerez  
Mitsuo Yamaguchi

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP  
Travessa R, N° 400  
CEP 05508-900, São Paulo, SP

## RESUMO

O reator IPEN/MB-01 é um conjunto crítico projetado para simular em escala real parâmetros neutrônicos, a baixos níveis de potência. Para tal, efetuou-se a calibração de seus canais de instrumentação nucleares, através do mapeamento do fluxo de nêutrons térmicos no núcleo do reator, com a inserção e irradiação de 210 folhas de ouro, sendo metade delas cobertas com Cádmiio. O fluxo médio de nêutrons térmicos no núcleo do reator é de  $1,32 \times 10^7$  n/cm<sup>2</sup>.s correspondendo a uma potência de  $2,76 \pm 0,36$  watts e a uma corrente de  $1,9 \times 10^{-7}$  A no canal 5 da instrumentação nuclear.

## INTRODUÇÃO

A distribuição espacial do fluxo de nêutrons térmicos no núcleo de um reator de potência é de fundamental interesse, pois do seu conhecimento podemos estimar o consumo do combustível nuclear (queima) e em consequência estimar o tempo de vida de uma dada configuração do núcleo. Além disso, tal conhecimento é importante por aspectos ligados à segurança, pois assim podemos conhecer os fatores de pico em cada elemento combustível.

A obtenção experimental numa unidade crítica é particularmente importante, pois apesar da queima de combustível ser desprezível, permite conhecer a precisão da metodologia de cálculo utilizada, em projetos de núcleos de reatores, além de permitir a obtenção do fluxo médio de nêutrons térmicos no núcleo e a correspondente potência gerada no mesmo.

Assim é necessária a utilização de um tipo de detector capaz de realizar medidas absolutas do fluxo neutrônico com boa precisão.

O detector utilizado e espalhado ao longo do núcleo é o detector de ativação, que nada mais é do que uma diminuta folha metálica de ouro de alta pureza. No caso utilizamos folhas de ouro de diâmetro de 8 mm, espessura de 0,0125 mm e pureza de 99,999 %.

Essas folhas de ouro são fixadas em suportes de acrílico (apresenta mesmo comportamento neutrônico que a água) e inseridas dentro de canais entre varetas combustíveis do núcleo do reator.

A metodologia utilizada para análise dos dados é a da técnica da razão de cádmio que consiste na irradiação, sob idênticas condições (tempo de irradiação, potência, posicionamento de barras de controle, etc.) no núcleo do reator [1].

A potência gerada no núcleo de um reator nuclear (P) pode ser obtida através da expressão [2]:

$$P = G \cdot \sum_f \bar{\Phi}_{xyz} \cdot F \cdot R \cdot V \quad (1)$$

O valor da energia recuperável por fissão (G) é de  $3,2 \times 10^{-11}$  J.

A seção de choque macroscópica de fissão  $\Sigma_f$  no combustível é calculada através do código celular HAMMER-TECHNION, sendo que o valor obtido para o mesmo foi de  $0,3494$  cm<sup>-1</sup>.

O fator de correção F nos dá a razão entre os fluxos no combustível e no moderador. Tal fator é importante, tendo em vista serem as medidas de distribuição de fluxo neutrônico realizadas no moderador e não no combustível que é onde se processa a geração de potência. O fator F obtido para a célula representativa do Reator IPEN/MB-01 é de 0,769.

O fator R leva em conta a parcela de fissões que ocorrem com nêutrons rápidos. O valor obtido para a célula representativa do reator é de 1,155.

O volume total de combustível (V) no núcleo do reator é de  $21019$  cm<sup>3</sup>.

O fluxo médio de nêutrons térmicos no moderador do núcleo do reator ( $\bar{\Phi}_{xyz}$ ) é obtido através da integração de todos os perfis de fluxo neutrônico medidos ao longo das direções radiais e axial do núcleo [3].

O fluxo de nêutrons térmicos em cada ponto do reator mapeado é obtido a partir da diferença das taxas de reação induzidas nas folhas irradiadas de ouro nuas (ativação devido a nêutrons térmicos e epitérmicos) em relação as folhas de ouro cobertas com cádmio (ativação devido a nêutrons epitérmicos), seguindo metodologia amplamente utilizada [1,4,5].

## DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

Foram irradiadas 210 folhas de ouro inseridas ao longo do comprimento ativo do núcleo do reator, em sete cotas axiais às varetas combustíveis, de tal forma a possibilitar o mapeamento de metade do núcleo do reator. Na Figura 1 podemos visualizar as cotas mapeadas (direção axial).

Para tal, foram inseridas na direção radial (sentido Leste-Oeste) em cada uma das cotas axiais citadas, duas placas, uma contendo cinco (5) folhas de Au nuas e a outra cinco (5) folhas de Au cobertas com cádmio (Figura 2).

Para garantir a condição de simetria da distribuição espacial do fluxo de nêutrons térmicos procurou-se manter fixas as posições das barras de controle do reator durante a irradiação das folhas nos diversos níveis de potência em que as

mesmas foram irradiadas. Assim, as barras de controle 1 e 2 (BC1e BC2) foram retiradas 59% do comprimento ativo axial do núcleo do reator.

O mapeamento completo do núcleo foi realizado com os canais 5 e 6 da instrumentação nuclear (câmaras de ionização não compensadas) indicando respectivamente, correntes de  $0,19 \times 10^{-7}$  A e  $0,21 \times 10^{-7}$  A. Assim, para se completar o mapeamento do núcleo, foram realizadas um total de 42 operações de irradiação. Também foram realizadas operações em outros níveis de corrente para se obter a curva de calibração de potência, bem como verificar a linearidade da mesma. Nestas condições, procedeu-se um mapeamento apenas parcial no canal de irradiação central do núcleo do reator na cota de 364 mm (ver Figuras 1 e 2), nos seguintes níveis de corrente do canal 5 da instrumentação nuclear:  $1,9 \times 10^{-9}$  A,  $1,9 \times 10^{-6}$  A e  $1,9 \times 10^{-8}$  A.

As folhas de ativação foram irradiadas por 2 horas e posteriormente contadas numa bancada de Iodeto de Sódio (NaI), devidamente calibrada em energia para a contagem do fotopico do radionuclídeo formado ( $^{198}\text{Au}$ ) na reação de captura radioativa  $^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$ . (energia de 411,8044 keV). A calibração em energia da bancada de NaI se deu a partir da contagem de folhas de Au na mesma e posterior medição da Atividade Absoluta no sistema de contagem absoluta  $4\pi\beta\gamma$  do Laboratório de Metrologia Nuclear do IPEN (NPI).

## RESULTADOS OBTIDOS

A atividade de saturação da folha ( $A^\infty$ ) é obtida através da expressão [1]:

$$A^\infty = \frac{\lambda \cdot C \cdot e^{t_c}}{E \cdot I (1 - e^{-t_i}) \cdot (1 - e^{-t_c})} \quad (2)$$

sendo

- $\lambda$  a constante de decaimento do radionuclídeo contado,
- C a contagem líquida do fotopico,
- $t_e$  tempo de espera para contagem,
- $t_i$  tempo de irradiação,
- $t_c$  tempo de contagem,
- E eficiência global de contagem para o fotopico considerado,
- I a abundância gama do fotopico.

Obtida a atividade de saturação de cada folha nua e coberta com Cádmio, obtemos o fluxo de nêutrons térmicos em cada ponto mapeado, através da expressão [1]:

$$\Phi = \frac{A_{nua}^\infty \cdot (1 - \frac{R_{cd}}{R_{ca}}) \cdot P_a}{6.023 \cdot 10^{23} \cdot m \cdot \sigma_{unv} \cdot FP} \quad (3)$$

A Razão de cádmio ( $R_{Cd}$ ) é obtida a partir da razão da taxa de reação induzida nas folhas de Au nuas e cobertas.

Na expressão (3)  $P_a$  é o peso atômico do ouro, m a massa da folha nua medida em balança de alta precisão ( $10^{-5}$  g), FP o fator que leva em conta a perturbação do fluxo neutrônico devido aos efeitos de depressão de fluxo e auto-blindagem na folha [1].

A seção de choque média de ativação da folha de ouro no espectro térmico é obtida através de cálculos celulares para a célula representativa do Reator IPEN/MB-01. Para tal, foi processado o módulo XSDRNPM do AMPX-II pelo grupo de neutrônica da Supervisão de Tecnologia do Núcleo (RTF) do IPEN/CNEN/SP, sendo o valor obtido de 73,64 barns [6].

Os valores do fluxo de nêutrons térmicos obtidos em cada um dos pontos mapeados pode ser visualizado na Tabela 1. Um dos perfis de fluxo de nêutrons térmicos obtido na posição central do núcleo do reator pode ser visualizado na Figura 3.

Tabela 1- Valores medidos do fluxo de nêutrons térmicos ( $\times 10^6$ ) o núcleo do reator IPEN/MB-01. A incerteza associada aos valores de fluxo são de 5% ao nível de confiança estatística de 95%.

POS	COTA AXIAL (Z)- MM						
	91	182	273	364	455	546	637
A	8,86	11,9	13,9	15,4	12,2	8,21	5,32
B	9,11	10,2	14,5	13,3	11,1	9,30	5,51
C	9,83	12,3	18,4	15,5	9,78	3,42	5,95
D	7,44	11,1	15,8	13,4	7,22	1,61	3,29
E	5,68	8,81	14,0	11,0	7,45	2,09	3,11
F	13,8	18,0	27,6	23,9	19,7	11,1	5,98
G	16,7	15,3	16,6	19,9	17,2	8,72	5,38
H	17,9	16,5	22,5	17,0	18,2	10,1	6,00
I	14,3	15,0	23,2	16,2	7,97	3,26	2,37
J	9,01	12,4	12,4	15,3	11,9	7,92	4,22
K	13,9	17,5	25,4	26,8	21,8	12,7	7,03
L	13,2	14,9	21,9	20,5	13,5	9,97	6,44
M	14,1	17,9	24,3	22,7	16,7	11,7	9,26
N	12,7	14,8	15,7	18,2	12,0	10,9	8,42
O	10,2	19,8	20,0	22,3	16,0	9,79	6,26

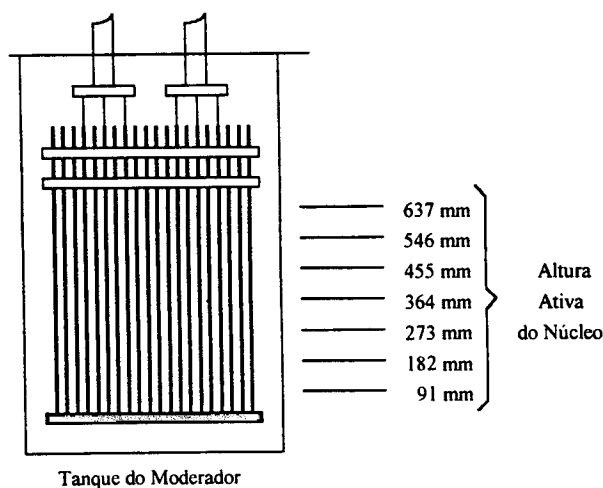


Figura 1- Posicionamento das placas de lucite contendo as folhas de ouro na direção axial (Z) ao núcleo do reator IPEN/MB-01.

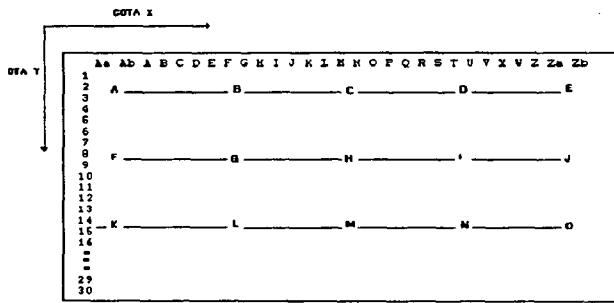


Figura 2: Posicionamento das folhas de ouro em cada um dos planos (cotas) na direção radial.

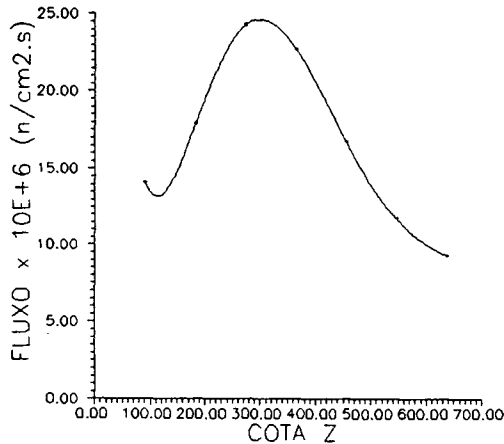


Figura 3 - Distribuição espacial do fluxo de nêutrons térmicos na direção axial central do núcleo posição M, cota 364, corrente no canal 5:  $1,9 \times 10^{-7}$  A.

Basicamente o procedimento adotado pelo grupo de medidas de parâmetros nucleares na obtenção do fluxo médio de nêutrons térmicos foi baseado em trabalho análogo realizado em um reator de pesquisa holandês tipo MTR [3]. Tal procedimento é descrito a seguir:

1. Para cada linha axial às varetas combustíveis, ajusta-se sobre o perfil de fluxo neutrônico medido, um polinômio de grau 4, conforme pode-se ver na Figura 3 dos anexos;
2. Calcula-se o fluxo médio de nêutrons térmicos ao longo da direção axial Z ( $\overline{\Phi_z}$ ), a partir da integração do polinômio citado no item 1. Esse procedimento é utilizado ao longo das 15 linhas axiais mapeadas (vide Figuras 1 e 2);
3. O fluxo médio de nêutrons térmicos nas linhas (canais de irradiação - vide Figura 2) KO, FJ e AE ao longo da direção x é obtido a partir do ajuste de um polinômio aos valores de  $\overline{\Phi_z}$ , obtidos para cada um dos pontos da linha e a consequente integração do mesmo ao longo do comprimento ativo do combustível na direção x;
4. O fluxo médio de nêutrons térmicos no núcleo do reator ( $\overline{\Phi_{xyz}}$ ) é obtido a partir da integração dos valores de fluxo médio no plano xz ( $\overline{\Phi_{xz}}$ ) ao longo da direção y.

Assim, o valor obtido do fluxo médio de nêutrons térmicos no núcleo do reator correspondente a corrente de  $0,19 \times 10^{-6}$  A no canal 5 da instrumentação nuclear é dado a seguir:

$$\overline{\Phi_{xyz}} = (1,32 \pm 0,13) \cdot 10^7 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$$

Aplicando-se a expressão (1), podemos então determinar o nível de potência de operação do reator IPEN/MB-01 ao nível de corrente no canal 5, anteriormente citado. Assim, o valor de potência é dado a seguir:

$$P = (2,76 \pm 0,36) \text{ watts}$$

As incertezas associadas ao fluxo médio de nêutrons térmicos e a potência gerada no núcleo do reator IPEN/MB-01 foram obtidas para um nível de confiança estatística de 95%.

A razão entre o fluxo médio de nêutrons térmicos no núcleo do reator e o fluxo de nêutrons térmicos no centro do reator (posição M, cota 363) foi obtida e seu valor é dado a seguir:

$$\frac{\overline{\Phi_{xyz}}}{\Phi_c} = (0,581 \pm 0,064)$$

Esta relação é válida para todas as irradiações efetuadas nos diversos níveis de potência do reator (correntes do canal 5), tendo em vista que o mesmo posicionamento das barras de controle BC1 e BC2 foi observado em todas as operações de irradiação. Assim, nas demais operações a níveis diferentes de potência, mediu-se apenas o fluxo de nêutrons no centro do núcleo ( $\overline{\Phi_c}$ ) correlacionando-o aos demais níveis de corrente no canal 5 da instrumentação nuclear e consequentemente a partir da relação experimental entre fluxos acima citada, ao fluxo médio de nêutrons térmicos no núcleo do reator. Através da expressão (1) podemos então obter o nível de potência de operação do reator IPEN/MB-01. Os valores obtidos podem ser visualizados na Tabela 2.

Tabela 2- Relação obtida entre os sinais de corrente nos canais de potência 5 e 6 e a potência de operação do Reator IPEN/MB-01. O nível de incerteza associado a potência é de 13% a um nível de confiança estatística de 95%.

Corrente (A)		Fluxo de Nêutrons Térmicos		Potência (watts)
canal 5	canal 6	$\Phi_{xz}$	$\Phi_c$	P
$1,9 \cdot 10^{-9}$	$2,1 \cdot 10^{-9}$	$1,42 \cdot 10^5$	$2,45 \cdot 10^5$	$2,96 \cdot 10^{-2}$
$1,9 \cdot 10^{-8}$	$2,1 \cdot 10^{-8}$	$1,31 \cdot 10^6$	$2,26 \cdot 10^6$	$2,73 \cdot 10^{-1}$
$1,9 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^{-7}$	$1,32 \cdot 10^7$	$2,27 \cdot 10^7$	2,76
$1,9 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$1,31 \cdot 10^8$	$2,25 \cdot 10^8$	27,34

A principal fonte de incerteza na obtenção da potência está na avaliação da seção de choque de fissão a ser utilizada na expressão (1). O grupo de neutrônica avalia a incerteza de tal parâmetro em 10% ao nível de confiança estatística de 95% [6].

## CONCLUSÃO

Os resultados obtidos permitem operar o Reator IPEN/MB-01 com segurança dentro dos limites de potência estabelecidos em projeto e licenciamento, através da calibração de seus canais de potência 5 e 6.

Através da Tabela 2, pudemos obter, graficando-se os seus valores (potência x corrente no canal), as retas de calibração de potência nos respectivos canais.

Assim, a reta de calibração de potência do canal 5, obtida através de um ajuste dos valores experimentais é dada a seguir:

$$P_5(\text{watts}) = A \cdot I(A) + B$$

Sendo I (A) a corrente em amperes.

Os coeficientes do ajuste A e B são dados a seguir, bem como a incerteza a eles associadas ( $2\sigma$ ).

$$A = (1,44 \pm 0,11) \times 10^7$$

$$B = (2,24 \pm 4,50) \times 10^{-3}$$

A reta de calibração de potência do canal 5 da instrumentação nuclear (canal de potência), pode ser visualizada através do gráfico da Figura 4.

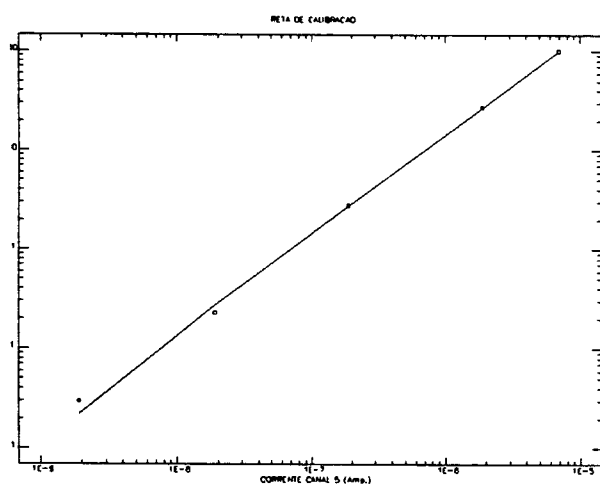


Figura 4: Reta de calibração de potência do Reator IPEN/MB-01. (Potência em watts x corrente do canal 5 em Ampère).

Finalmente, cumpre salientar que a potência obtida via técnica de análise por ativação obteve ótima concordância com a técnica de calibração de potência, recentemente utilizada e em fase de testes, de análise por ruído neutrônico [7]. Além disso, mostrou que os valores estimados de potência via cálculo se encontravam subestimados, pois previam uma potência no reator de 1,9 watts com o canal 5 a um nível de corrente de  $1,9 \times 10^{-7}$  A [8].

Cumpre também destacar, embora o objetivo deste trabalho seja apenas o de apresentar a metodologia empregada na obtenção da potência, a discrepância encontrada entre o fluxo médio de nêutrons térmicos no núcleo medido e o calculado, utilizando os programas computacionais da Supervisão de Tecnologia do Núcleo do IPEN/CNEN-SP (antiga Divisão de Física de Reatores) [9,10]. A discrepância encontrada entre o valor medido e o calculado foi de 3,6 %, o que pode ser considerado um bom resultado, tendo em vista que a especificação técnica para o projeto nuclear da Unidade Crítica avalia os erros nos cálculos de fluxo neutrônicos em 10% [8].

## REFERÊNCIAS

- [1] BITELLI, U. D'U. Medida da Distribuição Espacial do Fluxo de Nêutrons Térmicos no Núcleo do Reator IEA-R1. Anais do IX Encontro Nacional de Física de Reatores e Termo-Hidráulica. (Caxambu, MG, Brasil, 25-29 de Outubro de 1993).
- [2] Nuclear Merchantship Reactor Project, BAW-1203, 1-15, 1961.
- [3] BRANDT, P. ET ALLI. Flux-Power-and Burnup Determination for Pool-Type Reactors Interuniversitais Reactor Instituut, Delft, The Netherlands, 1971 (IRI 130/131-71-01).
- [4] BECKURTS, K. H & WIRTZ, K. Neutron Physics. New York, N. Y. , Springer, 1964.
- [5] ADOLPH, J. Estudio para la Determination Experimental de la Distribution de Densidad de Flujo Neutronico - en los Reactores de Investigacion FRG1 y FRJ2. Geesthacht-Tesperhude, Gesellschaft fuer Kernenergieverwertung in Schiffbau und Schifffahrt m. b. H., 1984 (GKSS-84/E/34).
- [6] SANTOS, A. Comunicação Pessoal. Pesquisador do grupo de neutrônica da Supervisão de Tecnologia do Núcleo do IPEN/CNEN-SP.
- [7] SILVA, A. A. ET ALLI. Calibração de Potência por Ruído-UCRI. Relatório interno da Divisão de Física de Reatores do IPEN/CNEN-SP Dezembro de 1991. (RP23004100984414).
- [8] YORIYAZ H. Especificação Técnica para o Projeto da Unidade Crítica. Relatório interno da Divisão de Física de Reatores do IPEN/CNEN-SP Agosto de 1988. (R10-IP3-213R-4EN-001, rev.3).
- [9] BARHEN, J ET ALLI. The HAMMER-TECHNION, 1978. (EPRI-NP-565).
- [10] FOWLER, T. B. ET ALLI. Nuclear Reactor Core Analysis Code: CITATION, 1971. (ORNL-TN-2496, rev.2).

## ABSTRACT

This work presents the procedure used to obtain the calibration power for the IPEN/MB-01 Reactor.

Ratios among average thermal neutron flux in-core, thermal neutron flux in center of core, and ionization chamber signal (number five), were determined to obtain the equation power calibration.