

# ESPECTROMETRIA GAMA DAS VARETAS COMBUSTÍVEIS PARA DETERMINAR AS DENSIDADES DE POTÊNCIA RELATIVAS E A POTÊNCIA DO REATOR IPEN/MB-01

Leda C. C. B. Fanaro, Adimir dos Santos e Graciete S. Andrade e Silva

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN / CNEN - SP)  
Av. Professor Lineu Prestes 2242  
05508-000 São Paulo, SP  
lcfanaro@ipen.br

## RESUMO

A técnica de varredura gama de varetas combustíveis consiste em medir a radiação gama emitida pelos produtos de fissão e de captura no comprimento ativo, traçando um perfil de distribuição. A contagem é corrigida para o decaimento e a densidade de potência relativa é normalizada pela vareta central (M14) na posição de referência (220 mm). Usando uma folha de urânio enriquecida, na posição de referência determina-se a densidade de potência absoluta. As medidas foram realizadas em  $\frac{1}{4}$  das varetas combustíveis do núcleo. A precisão da medida da potência do reator é muito importante para uma boa avaliação do parâmetro  $\beta_{\text{eff}}$ . Os valores calculados com os programas CITATION e TORT são comparados com os resultados experimentais.

## 1. INTRODUÇÃO

A espectrometria gama de varetas combustíveis foi estabelecida no reator IPEN/MB-01, em 1996 [1]. A técnica de varredura gama, ou "scanning" de varetas combustíveis consiste em medir a radiação gama, emitida pelos produtos de fissão e de captura, ao longo da região ativa do combustível, traçando um perfil da distribuição. A importância desse tipo de medida para a área de física de reatores é o estabelecimento de padrões experimentais para a verificação da aplicabilidade de vários programas de cálculo de distribuição de potência e biblioteca de dados nucleares correlatos. A distribuição de potência é uma grandeza fundamental no projeto de operação de reatores. O fator de pico, um parâmetro relacionado à segurança de reatores, é determinado a partir da distribuição de potência do reator. Com isso, estabelece-se o procedimento para a operação do reator de tal forma que o fluxo de calor no elemento combustível esteja abaixo do limiar crítico.

O objetivo deste trabalho é medir as densidades de potências relativas e a potência do reator IPEN/MB-01 através da técnica de varredura gama de varetas combustíveis. A medida precisa da potência do reator é fundamental para uma boa avaliação do parâmetro  $\beta_{\text{eff}}$ , medido através da técnica de análise de ruído [2], além de ser uma nova técnica para a determinação da potência do reator, anteriormente utilizava-se a técnica de ativação com folhas de ouro.

Inicialmente as medidas foram realizadas utilizando-se um detector de iodeto de sódio ativado com tálio (NaI(Tl)) e toda a instrumentação nuclear associada. Esta técnica consiste em medir a radiação gama com energia superior a 0,6 MeV ao longo da região ativa do combustível, traçando um perfil de distribuição. A atividade gama emitida pelo decaimento

radioativo dos produtos de fissão é proporcional à densidade de potência, conforme demonstrado na referência [1].

Outra metodologia empregada foi a da varredura da vareta combustível através da espectrometria gama do fotopico do produto de fissão Ce-143 (293,4 KeV), com um detector de HPGe e a instrumentação associada. A contagem obtida no fotopico do  $^{143}\text{Ce}$  no término da irradiação, é proporcional à densidade de fissão na vareta combustível.

Os valores de distribuição de potência relativa, calculados com os programas CITATION [3] e TORT [4] são comparados com os obtidos experimentalmente.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 2.1. Descrição do Arranjo Experimental

A Figura 1 mostra as varetas combustíveis analisadas pelas duas técnicas, com o detector de NaI e o detector de HPGe. Salienta-se que inicialmente foi realizado um estudo para a comparação entre os dois métodos re-avaliando a densidade de potência relativa para cerca de 20 varetas combustíveis escolhidas de modo que fossem analisadas posições desde a periferia do núcleo até a região central, passando próximo de vareta de controle e de tubo guia. Os resultados mostraram que os métodos possuem boa concordância.

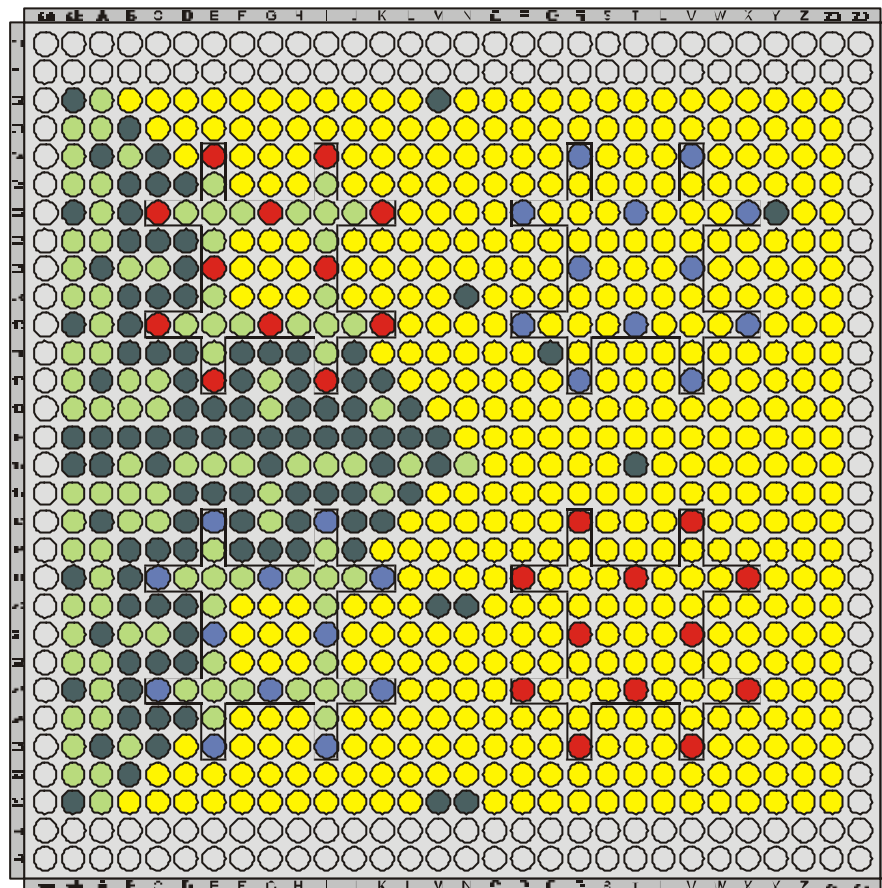
As contagens são corrigidas para o decaimento sofrido durante o tempo de espera, e normalizadas pelo valor máximo da vareta central (M14) na quota 220 mm (posição de referência).

O valor absoluto da densidade de potência é determinado através da irradiação de uma folha de urânio altamente enriquecido, na posição de referência, e mede-se a taxa de fissão do  $^{143}\text{Ce}$ . Assim, a potência da vareta combustível é determinada multiplicando-se a densidade de potência na pastilha, obtida através da folha de urânio enriquecida, pela densidade de potência integrada e pela área da seção transversal da vareta combustível.

Para determinar a potência do reator somam-se as potências das varetas combustíveis uma a uma estabelecendo-se a relação entre valores calculados e medidos. A razão entre a potência calculada e a potência medida é dada por:

$$\frac{P_c}{P_m} = \frac{PR_c \sum_{i=1}^n DP_c(V_i)}{PR_m \sum_{i=1}^n DP_m(V_i)}, \quad (1)$$

onde os índices **c** e **m** representam os parâmetros calculados e medidos respectivamente, **PR** é a potência da vareta referência e  $DP(V_i)$  é a densidade de potência relativa da *i*-ésima vareta.



**LEGENDA:**

- Vareta Combustível
- Varetas Medidas com NaI
- Varetas Medidas com HPGe
- Vareta Absorvedora de Controle
- Vareta Absorvedora de Segurança

**Figura 1. Núcleo do Reator IPEN/MB-01 – Configuração Retangular.**

**2.2. Espectrometria Gama das Varetas Combustíveis**

Inicialmente a medida foi realizada com um detector de NaI(Tl) e toda instrumentação nuclear associada. As medidas foram realizadas com duas varetas experimentais com as mesmas especificações técnicas das varetas originais do núcleo. Inicialmente, efetua-se a varredura para medir a radiação de fundo, o BG, da vareta, a seguir retira-se a vareta combustível da posição desejada e insere-se a vareta experimental e irradia-se durante 2 horas com o reator na potência de 1W. A varredura da vareta combustível é feita através de um dispositivo especial de movimentação e de posicionamento da vareta combustível, dotado de colimadores e blindagens associados ao detector, em passos de 20 mm por toda a altura ativa da vareta combustível. Cada irradiação possibilita no máximo a varredura de 2 varetas combustíveis, sendo que a contagem da primeira vareta combustível deve-se iniciar 5 minutos após o desligamento do reator e a contagem da segunda vareta combustível deve-se

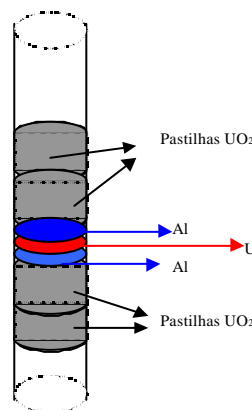
iniciar 45 minutos após o desligamento do reator. Este fato inviabiliza a medida das varetas combustíveis em baixo da aranha de sustentação das varetas absorvedoras de controle e de segurança, porque é necessário muito tempo para remover a aranha e sacar as varetas combustíveis.

Outra técnica empregada foi a da espectrometria gama das varetas combustíveis com um detector HPGe. As medidas foram realizadas com as varetas combustíveis do próprio núcleo do reator. Inicialmente irradia-se as varetas a uma potência de 100 W por um período de 2 h. Após aproximadamente 60 h de decaimento efetua-se a espectrometria gama do fotopico do produto de fissão Ce-143, com um detector HPGe e sua instrumentação associada, como na técnica anterior. As contagens são corrigidas para o decaimento sofrido durante o tempo de espera, e normalizadas pelo valor máximo na posição de referência. Este procedimento permite a espectrometria de cerca de 20 varetas combustíveis por irradiação, realizados durante 3 dias de contagem.

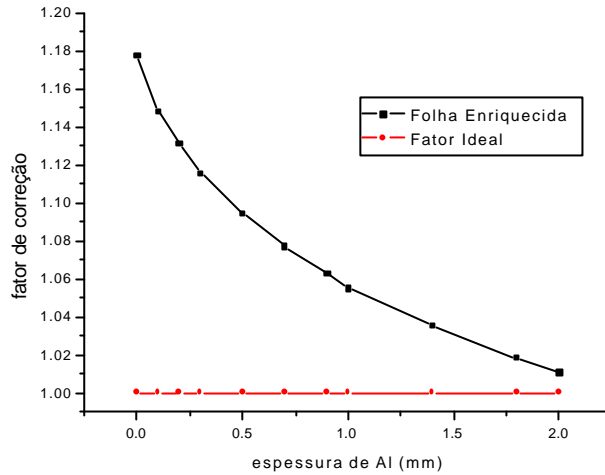
### 2.3 Determinação Experimental da Potência do Reator

Para determinar o valor absoluto da densidade de potência irradia-se uma folha de urânio altamente enriquecido, na posição de referência, e mede-se a taxa de fissão do  $^{143}\text{Ce}$  (293,4 KeV). A folha de urânio é irradiada em uma vareta combustível experimental desmontável, na potência de 100 W durante 1 h. Após 24 h de decaimento a vareta é desmontada novamente para a retirada da folha de urânio que é encaminhada para o Laboratório de Metrologia Nuclear do Centro do Reator de Pesquisas do IPEN, onde é determinada sua atividade absoluta no instante do desligamento do reator e também sua massa. A Figura 2 ilustra um diagrama esquemático do arranjo experimental na vareta combustível.

O fator de correção para a perturbação causada pela folha de urânio inserida na vareta combustível é calculado com o código MCNP-4C [5], que é um código de transporte de partículas que utiliza o método de monte Carlo. A Figura 3 mostra o comportamento dos fatores de correção devido à perturbação do sistema, com a variação da espessura das folhas de alumínio.



**Figura 2. Diagrama Esquemático da Vareta Combustível com Folha de Urânio.**



**Figura 3. Fatores de Correção da Perturbação da Folha de Urânio**

### 3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E COMPARAÇÃO CÁLCULO/MEDIDA

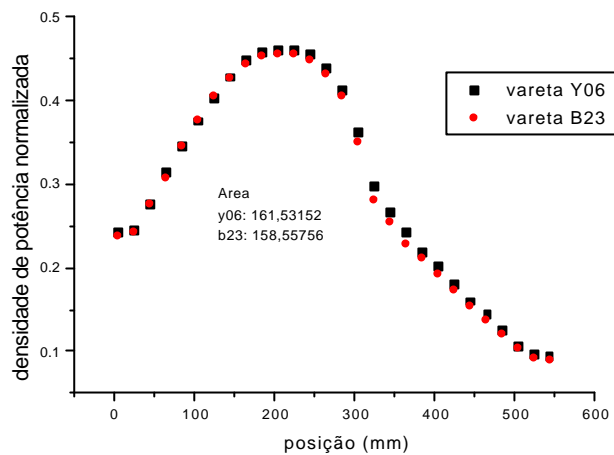
A simetria entre as varetas combustíveis no núcleo do reator IPEN/MB-01 é de fundamental importância para se determinar a potência do reator, através da técnica de espectrometria gama das varetas combustíveis. Com a comprovação deste fato necessita-se analisar somente ¼ das varetas do núcleo. Foram escolhidas posições aleatórias, contudo procurou-se averiguar posições de varetas próximas: ao refletor, ao absorvedor e na região mais central do núcleo reator. Desse modo comprova-se também que o núcleo é simétrico em todas as posições medidas. A Figura 4 ilustra as posições simétricas próximas a absorvedores.

A incerteza na medida da densidade de potência relativa da vareta combustível é da ordem de 0,2 % e é devido somente à estatística de contagens. A análise de propagação das incertezas é realizada aplicando-se a técnica apresentada por Zijp[6], onde a variância de uma razão entre duas grandezas ( $x \pm \sigma_x$ ) e ( $y \pm \sigma_y$ ) é dada por:

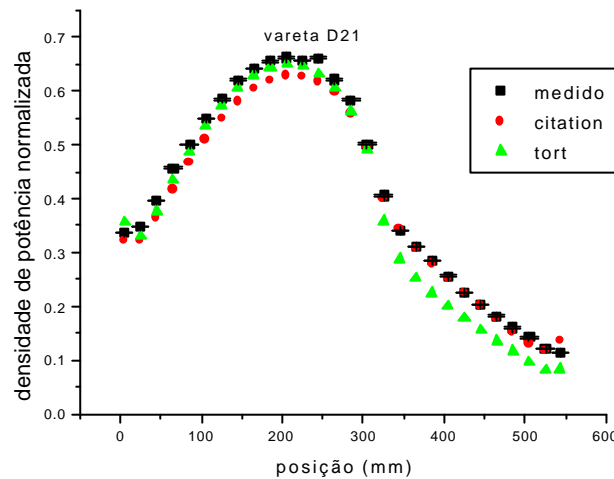
$$\text{var}\left(\frac{x}{y}\right) = \frac{x^2}{y^2} \left| \frac{\text{var}(x)}{x^2} + \frac{\text{var}(y)}{y^2} - \frac{2 \text{cov}(x, y)}{x \cdot y} \right|, \quad (2)$$

onde  $\text{var}(x) = (\sigma_x)^2$  e  $\text{cov}(x,y) = \sigma_x \sigma_y$ .

Os resultados de densidade de potência relativa, obtidos com o código: CITATION que utiliza a teoria de difusão de nêutrons, com seções de choque geradas pelo programa HAMMER-TECHNION [7], e o código TORT com a biblioteca ENDF/B-VI.8, foram comparados com os resultados experimentais. Dessa forma atinge-se um dos objetivos do trabalho que é estabelecer padrões experimentais e também determinar a potência do reator. A Figura 5 ilustra as comparações entre os valores calculados e medidos, para a posição D21, ao lado de uma vareta absorvedora.



**Figura 4. Distribuição da Densidade de Potência nas Posições Y06 e B23.**



**Figura 5. Distribuição da Densidade de Potência Relativa da Vareta D21.**

Salienta-se que o código CITATION apesar de usar a teoria de difusão, apresenta boa concordância na forma da distribuição axial da densidade de potência para qualquer posição do núcleo do reator. O desvio que é muito pequeno na região central aumenta quando se aproxima da interface do núcleo com o refletor e pode-se observar inclusive a distorção causada pela presença da barra de controle. O código TORT que utiliza a teoria de transporte apresenta sistematicamente bons resultados na interface do núcleo com o refletor e observa-se que as barras de controle estão mais absorvedoras devido à maior depressão do fluxo de nêutrons na região superior da barra. Observa-se também um desvio menor na região central da vareta combustível e também para varetas mais ao centro do núcleo do reator. Salienta-se que os resultados obtidos com o programa TORT independem das bibliotecas de dados nucleares [8].

A Potência da vareta combustível é determinada multiplicando-se a densidade de potência na pastilha (DP), obtida através da folha de urânio enriquecida, pela densidade de potência integrada (que corresponde à área sob a curva da distribuição de densidade de potência normalizada  $A_v$ ) e pela área da seção transversal da vareta combustível ( $A_p$ ).

$$P \text{ (watts)} = DP \left( \frac{\text{watts}}{\text{cm}^3} \right) \times A_v \text{ (cm)} \times A_p \text{ (cm}^2\text{)}. \quad (3)$$

A Tabela 1 mostra os valores das potências calculadas e medidas corrigidas pelos respectivos fatores de correção, devido à perturbação das folhas de alumínio e de urânio no interior da vareta combustível.

**Tabela 1. Valores Experimentais Corrigidos pela Perturbação**

Medida (W)	CITATION (W)	TORT (W)
$0,2287 \pm 0,0058$	0,221	0,218

A relação entre o valor calculado e medido da potência da vareta M14 é muito próxima para os programas CITATION e TORT, contudo a comparação dos perfis de distribuição de densidades de potências normalizadas mostrou que o código TORT apresenta uma tendência sistemática na comparação, desse modo os resultados produzidos com o código TORT serão utilizados para a extrapolação da potência do reator. Para determinar a potência do reator foram consideradas 196 varetas combustíveis. As potências das varetas combustíveis foram somadas uma a uma e estabeleceu-se a relação entre os valores calculados e medidos. A razão entre a potência calculada e a potência medida é dada pela Equação 1.

Para as 196 varetas combustíveis analisadas a relação entre as potências é igual a  $\frac{P_c}{P_m} = 0,9199$ . Considerando que esta relação permaneça constante para as 680 varetas do núcleo do reator, para a potência nominal utilizada nos cálculos de 100 W, que é a potência registrada na mesa de controle do reator, corresponde a potência medida igual a  $108,71 \text{ W} \pm 2,52 \%$ .

#### 4. CONCLUSÕES

A distribuição das varetas combustíveis do reator IPEN/MB-01 para o arranjo retangular 28x26 é simétrica. A forma, das distribuições axiais das densidades de potências relativas das varetas combustíveis, apresenta boa concordância quando comparadas com os programas CITATION e TORT. Finalmente a determinação da potência do reator através da técnica de espectrometria gama das varetas combustíveis é mais eficiente quanto maior for o número de varetas combustíveis analisadas. Para as 196 varetas combustíveis, que correspondem a  $\frac{1}{4}$  do núcleo o desvio é de 2,52 %.

## AGRADECIMENTOS

À FAPESP pelo financiamento do projeto de pesquisa 2001/14450-0 que possibilitou a compra do detector HPGe e de módulos eletrônicos para a automação do sistema de movimentação das varetas combustíveis.

## REFERÊNCIAS

1. A.L.G. Carneiro, “Medida da Distribuição da Densidade de Potência Relativa do Núcleo do Reator IPEN/MB-01, pela Técnica de Varredura Gama da Vareta Combustível”, *Dissertação de Mestrado*, IPEN/CNEN-SP, (1996).
2. A. Santos, R. Diniz, L.C.C.B. Fanaro, and R. Jerez, “The Experimental Determination of the Effective Delayed Neutron Parameters:  $\beta_{\text{eff}}$ ,  $\beta_{\text{eff}}/\Lambda$  and  $\Lambda$  of the IPEN/MB-01 Reactor”. *PHYSOR 2004 – The Physics of Fuel Cycles and Advanced Nuclear Systems: Global Developments*, Chicago, Illinois, pp. 25-29, on CD Rom, *American Nuclear Society*, Lagrange Park, IL, (April 2004)
3. T.B. Fowler, D.R. Vondy, G.W. Cunningham, “Nuclear Reactor Core Analysis Code: CITATION”, *Oak Ridge, Oak Ridge National Laboratory*, ORNL-TM-2496, Rev. 2, (1972).
4. W.A. Rhoades, D.B. Simpson, “The TORT Three Dimensional Discrete Ordinates Neutron- Photon Transport Code”, *Oak Ridge, Oak Ridge National Laboratory*, ORNL-TM-13221, (1991).
5. “MCNP4C - Monte Carlo N-Particle Transport Code System”, *RSICC Computer Code Collection*, Oak Ridge National Laboratory, CCC-70 MCNP4C, (March 2001).
6. W.L. Zijp,. “Treatment of Measurement Uncertainties”, *Netherlands Energy Research Foundation*, ECN, (January, 1987).
7. J. Barhen, W. Rhotenstein, and E. Taviv, “The HAMMER Code System Technion”, *Israel Institute of Technology*, Haifa, Israel, NP-565, (1978).
8. A. Santos, G.S. Andrade e Silva, A.G. Mendonça, A.Y. Abe, and R. Fuga, “The Inversion Point of the Isothermal Reactivity Coefficient of the IPEN/MB-01 Reactor – 2: Theoretical Procedure”. *Approved for Publication in Nucl. Sci. Eng.*, (2005).