

## CÁLCULO DA DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA EM UM REATOR NUCLEAR, UTILIZANDO SINAIS DE DETECTORES TIPO "SPD"

Yoko Hiromoto\* e Adalberto J. Soares\*\*

\*Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTM-SP)  
Av. Lineu Prestes, 2242  
05508-900, São Paulo, SP, Brasil

\*\*Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN)  
Caixa Postal 11049  
05422-970, São Paulo, SP, Brasil

### RESUMO

Neste trabalho propomos um sistema de monitoração "in core" com detectores fixos utilizando 2 tipos de SPDs ("Self Powered Detectors"). A função de mapeamento é atendida por detectores de ródio que fornece uma distribuição tridimensional do fluxo neutrônico com resolução relativamente alta. Este mapeamento é feito em poucos minutos com o reator em estado estacionário e em qualquer nível de potência. A monitoração "on line" das condições do núcleo é realizada com as medidas dos detectores de platina que são calibrados por intercomparação com os detectores de ródio.

### 1. INTRODUÇÃO

Sistemas de detecção "in core" são considerados essenciais em reatores de potência, pois é a partir deles que os operadores monitoram a densidade de potência no núcleo dos reatores, de forma a aumentar as margens de operação, melhorar o gerenciamento do combustível e assegurar que em nenhum ponto do reator a temperatura atinja valores considerados inseguros.

Os sistemas tradicionais são compostos por uma mini - câmara de fissão, introduzida em posições previamente estabelecidas do núcleo, nas quais se faz uma varredura. A análise dos dados é feita posteriormente, ou seja, "off line". Os sistemas mais modernos utilizam detectores do tipo "Self Powered Detector" (SPD), que, junto com um conjunto de termopares, são instalados em posições fixas dentro do núcleo do reator, e ao contrário dos sistemas tradicionais, permitem monitorar continuamente o núcleo do reator. Em alguns casos, inclusive, são utilizados para ações de proteção, como por exemplo, promovendo o desligamento do reator.

A monitoração "in core" tem 2 objetivos distintos: o mapeamento do fluxo neutrônico no interior do reator, e a monitoração das condições do núcleo. O objetivo do mapeamento do fluxo é fazer um acompanhamento da

distribuição tridimensional de fluxo neutrônico com uma resolução espacial relativamente alta, de modo que os resultados sejam representativos das condições neutrônicas e termohidráulicas do núcleo, formando a base para a validação do projeto e do desempenho do núcleo à medida que progride o "burn up". O mapeamento é feito com o núcleo em estado estacionário e em condições de referência.

Na sua outra função, o sistema de instrumentação "in core" realiza a monitoração contínua das condições do núcleo, fornecendo ao operador informações "on line" de modo a permitir uma rápida diagnose no caso de anomalias, e eventualmente, os sinais da instrumentação "in core" são utilizados para controle e proteção do reator.

Dependendo do material utilizado, o SPD fornece um sinal de corrente proporcional ao fluxo gama, ao fluxo de nêutrons, ou a combinação de ambos, e com o devido tratamento do sinal, é possível obter uma distribuição tridimensional da densidade de potência em todo o núcleo do reator. Para isto é necessário a utilização de um processamento matemático complexo, pois, além dos detectores ocuparem posições discretas, a razão potência/sinal depende de vários parâmetros do reator, como por exemplo o enriquecimento, o "burn-up", a temperatura do moderador, a presença de veneno

queimável, a taxa de queima dos emissores dos detetores, e outros.

Neste trabalho, propomos um programa computacional para atender estes 2 objetivos com detetores SPDs.

SPDs podem ser classificados em duas categorias: detetores de resposta lenta e detetores de resposta pronta. Os detetores de resposta lenta são bastante precisos, mas respondem lentamente à variação do fluxo de nêutrons. Os SPDs de resposta pronta, por outro lado, possuem um tempo de resposta rápida, mas necessitam ser calibrados para assegurar um sinal preciso. Alguns detetores de resposta rápida são bastante sensíveis à radiação gama, o que faz com que a dependência de seu sinal a parâmetros operacionais como a temperatura do moderador, concentração de boro e posicionamento das barras de controle, seja muito pequena [1]. Este tipo de detector possui sinal diretamente proporcional à potência, dependendo somente da taxa de queima do combustível.

Tanto os SPDs com resposta pronta e sensíveis a gama, como aqueles com resposta lenta e sensíveis a nêutrons, possuem características operacionais que os tornam atrativos para a aplicação em reatores. Entretanto, nenhum destes dois tipos de detetores possuem isoladamente todas as características para monitoração "in core". Propomos então dois conjuntos distintos de SPDs no núcleo. Um dos conjuntos é composto de detetores de Platina com resposta rápida e mais sensível à radiação gama, e o outro de ródio, mais sensível ao fluxo neutrônico e de resposta lenta.

Os detetores de ródio fornecem sinais que são convertidos em densidade de potência, num processo parametrizado em função da queima do núcleo e da queima dos emissores dos detetores. Os resultados da densidade de potência local são extrapolados com o auxílio das medidas da temperatura no topo do elemento combustível e da potência total obtida pelo balanço térmico, de forma a permitir a obtenção da distribuição tridimensional da potência em todo o núcleo do reator.

O resultado do mapeamento de potência com detetores de ródio é utilizado para a calibração dos detetores de platina que serão utilizados para a monitoração "on line" da densidade de potência.

Neste trabalho consideramos um núcleo de dimensões pequenas, onde todos os  $M$  elementos combustíveis são instrumentados. Assumimos que cada elemento combustível contém  $N$  varetas combustíveis e um tubo de instrumentação contendo  $K$  SPDs e um termopar na extremidade superior para monitorar a temperatura do refrigerante na saída do núcleo. Neste arranjo, cada SPD é identificado pelas letras  $j$  e  $k$ , onde  $j$  representa o número do elemento combustível (EC), e  $k$  a posição do SPD no  $EC_j$ .

A distribuição dos detetores deve ser definida seguindo uma simetria adequada, de modo que para cada elemento instrumentado com detetores de platina, exista pelo menos um simétrico instrumentado com detetores de ródio. Se o elemento combustível central não possuir

posições simétricas, esta deve ser instrumentada com detetores de platina e calibrada a partir dos dados dos elementos vizinhos. Para os nossos cálculos foi assumido que cada elemento combustível é instrumentado com um feixe de detetores de um só tipo.

Um diagrama em blocos simplificado do sistema é apresentado na Fig. 1.

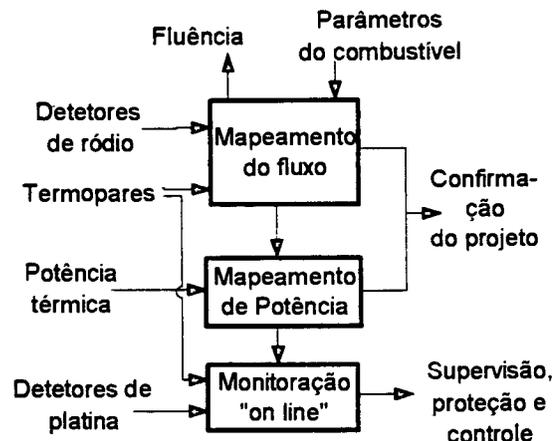


Figura 1. Diagrama em blocos do sistema.

## 2. MAPEAMENTO

A calibração e o mapeamento tridimensional de fluxo podem ser realizados a qualquer instante, desde que o reator esteja em estado estacionário, sem necessidade de redução de potência. O tempo para a execução do mapeamento e da calibração é o tempo necessário para que o sistema colete um número razoável de amostras de correntes e temperaturas para obter uma boa precisão.

### 2.1 CÁLCULO DO FLUXO

A corrente total ( $I_{total}$ ) gerada pelo SPD de ródio é a soma das contribuições de vários tipos de reações:

$$I_{total} = I_{th} + I_{ep} + I_{\gamma} \quad (1)$$

onde  $I_{th}$ ,  $I_{ep}$  e  $I_{\gamma}$  representam a parcela da corrente devido a nêutrons térmicos, epitérmicos e à radiação gama, respectivamente, e

$$I_{total} = (S_{th} + w_{ep} \cdot S_{ep} + w_{\gamma} \cdot S_{\gamma}) \cdot \Phi_{th} \quad (2)$$

onde:

-  $S_{th}$ ,  $S_{ep}$  e  $S_{\gamma}$  representam a sensibilidade do detector a nêutrons térmicos, epitérmicos e a radiação gama

-  $w_{ep}$  e  $w_\gamma$  representam as contribuições do fluxo epitérmico e de gamas no sinal do detector.

-  $\Phi_{th}$  representa o fluxo térmico na posição do detector

Embora as sensibilidades possam ser determinadas experimentalmente ou por cálculos, as contribuições do fluxo epitérmico ( $w_{ep}$ ) e de gamas ( $w_\gamma$ ) no sinal do detector devem ser estimadas por cálculos neutrônicos.

Neste trabalho consideramos  $I_{th} = 0.9 * I_{total}$  para o detector de ródio, ou seja,

$$\Phi_{th} = \frac{0.9 \cdot I_{total}}{S_{th}} \quad (3)$$

lembrando que o valor da sensibilidade do detector de ródio deve ser periodicamente atualizado devido à queima do emissor.

O programa deve computar a corrente integrada  $Q(t)$  para permitir a correção da sensibilidade, bem como a fluência total  $F(t)$  para permitir a verificação dos cálculos de "burn up" do combustível

A sensibilidade dos detectores de platina não são consideradas aqui, pois a calibração do seu sinal é feita "on line" em função da potência determinada pelos detectores de ródio, mas o seu conhecimento pode ser usado como um recurso para a validação dos sinais.

Considerando que cada elemento combustível é instrumentado com  $K$  detectores SPDs, localizados nas cotas  $z_k$ , a distribuição axial de fluxo na altura ativa  $H$  do núcleo pode ser estimada pela curva contínua  $\Phi(z)$  no intervalo  $[0, H]$  obtida pelo método "cubic spline" de interpolação.

Esta função deve obedecer as seguintes condições:

1. Nas cotas  $z_k$   $k=1,2,\dots,K$ .

$\Phi(z_k) = \Phi_k$ , onde  $\Phi_k$  é fluxo no detector da cota  $k$ .

2.  $\Phi(z)$  é contínua até a sua derivada de segunda ordem.

3. Sendo  $\Phi(z)$  uma solução da equação de difusão.

$$\Phi(-\lambda_e) = \Phi(H + \lambda_e) = 0$$

onde  $\lambda_e$  é a distância extrapolada.

Aplicando as condições acima, obtemos para cada um dos intervalos  $[z_{k-1}, z_k]$ , um polinômio de terceira ordem do tipo:

$$\Phi(z) = \Phi_k(z) = \sum_{l=0}^3 a_l^k (z_k - z)^l, \quad k = 0, 1, \dots, K+1 \quad (4)$$

Desta maneira calculamos  $M$  curvas  $\Phi_j(z)$  para os  $M$  elementos combustíveis.

Uma vez obtida as funções para o fluxo  $\Phi_j(z)$ , a sua discretização em nós, juntamente com as seções de choque

de fissão parametrizadas (a serem fornecidas por programas externos) permitem o cálculo da potência média em cada nó.

## 2.2 CÁLCULO DE POTÊNCIA

A potência média no nó  $jk$  (posição  $k$  do elemento combustível  $j$ ) é dada por

$$P_{jk} = G \int_V \int_E \Sigma_f(r, E) \Phi(r, E) dE dV \quad (5)$$

Para efeito de implementação esta expressão pode ser aproximada por

$$P_{jk} = G \cdot \Sigma_{fjk} \cdot \bar{\Phi}_{jk} \cdot V \cdot R_{jk}, \quad (6)$$

onde

- $G$  é a energia recuperável por fissão
- $\Sigma_{fjk}$  é a seção de choque macroscópica média de fissão no volume do nó para a condição de calibração
- $\bar{\Phi}_{jk}$  é o fluxo térmico médio no nó  $jk$
- $R_{jk}$  é o fator de fissão rápida no nó  $jk$
- $V$  é o volume do nó considerado

Para obtermos o fluxo térmico médio no volume, a partir do fluxo medido no tubo de instrumentação, introduzimos um fator de correção  $F$ , de modo que,

$$F = \frac{\bar{\Phi}_{jk}}{\Phi_{jk}} \quad (7)$$

$$P_{jk} = G \cdot \Sigma_{fjk} \cdot \Phi_{jk} \cdot R_{jk} \cdot F \cdot V \quad (8)$$

Lembrando que  $\Sigma_{fjk}$  e  $R_{jk}$  são calculados por códigos neutrônicos externos ao programa (atualizados para as condições de referência no instante da calibração), os fatores  $G$ ,  $F$  e  $V$  podem ser englobados em um único fator  $c$  que será normalizado com o balanço térmico.

Então, a potência no nó  $jk$  dos elementos instrumentados com ródio é dada por:

$$(P_{Rh})_{jk} = \Sigma_{fjk} \cdot \Phi_{jk} \cdot R_{jk} \cdot c \quad (9)$$

A potência total gerada no elemento combustível  $EC_j$  é dada por:

$$(P_{Rh})_j = c \cdot \sum_{k=1}^K (\Phi_{jk} \cdot \Sigma_{fjk} \cdot R_{jk}) \quad (10)$$

Para a determinação da potência nos elementos instrumentados com detectores de platina, definimos um fator de simetria  $w_s$ , baseado na potência térmica dos elementos simétricos

A potência térmica de cada elemento  $j$  pode ser calculada de acordo com a seguinte aproximação:

$$(P_{th})_j = m \cdot cp \cdot (Tf_j - Ti) \quad (11)$$

onde consideramos que

- m é a vazão mássica no elemento, constante para os elementos simétricos

- cp é o calor específico da água, constante na faixa de temperatura de interesse

- Tf<sub>j</sub> representa a temperatura do refrigerante na saída de cada elemento combustível medida pelo termopar do tubo de instrumentação

- Ti representa a temperatura do refrigerante na entrada do elemento combustível medida pelo termopar da entrada do tubo de instrumentação

O fator de simetria ws é definida como a razão entre a potência térmica de 2 elementos simétricos P<sub>j</sub> e P<sub>j'</sub>.

$$ws_{j'} = \frac{Tf_j - Ti}{Tf_{j'} - Ti} \quad (12)$$

onde

j se refere ao elemento instrumentado com Rh e

j' se refere ao elemento simétrico instrumentado com Pt.

A potência (para a função de mapeamento) num elemento instrumentado com Pt é calculada pela média ponderada das posições simétricas instrumentadas com Rh

$$(P_{Pt})_j = \frac{\sum_{j'=1}^n ws_{j'} \cdot (P_{Rh})_{j'}}{n} \quad (13)$$

onde n é o número de elementos simétricos ao EC<sub>j</sub> instrumentados com Rh.

Do mesmo modo a potência dos nós jk dos elementos instrumentados com detectores de platina é obtida por:

$$(P_{Pt})_{jk} = \frac{\sum_{j'=1}^n ws_{j'} \cdot (P_{Rh})_{j'k}}{n} \quad (14)$$

### 3. CALIBRAÇÃO

A calibração do sistema é feita juntamente com o mapeamento de fluxo e necessita do valor da potência total (Q) gerada no núcleo, obtida através do balanço térmico realizada pelo computador de processos da planta.

Como vimos, os valores de potência calculados no item anterior estão em função de uma constante  $\underline{q}$  que é determinada igualando:

$$Q = \sum_{j=1}^M P_j \quad (15)$$

onde P<sub>j</sub> é a potência de cada elemento combustível EC<sub>j</sub>, determinada através das medidas com os detectores de ródio e termopares.

A partir do valor numérico da potência, podemos determinar a densidade linear média de cada elemento j e de cada nó jk, dadas respectivamente por:

$$q_j = \frac{P_j}{N.H} \quad (16)$$

e

$$q_{jk} = \frac{P_{jk}}{N.\Delta H} \quad (17)$$

onde  $\Delta H = H/K$

Finalmente, podemos determinar o fator de calibração (fc)<sub>jk</sub>, que relaciona a corrente obtida no detector de platina (I<sub>Pt</sub>)<sub>jk</sub>, com a densidade de potência linear q<sub>jk</sub> estimada para a posição do detector:

$$(f_c)_{jk} = \frac{q_{jk}}{(I_{Pt})_{jk}} \quad (18)$$

### 4. MONITORAÇÃO "ON LINE"

Uma vez obtido o fator de calibração, o próximo passo é permitir a monitoração "on line" dos diversos parâmetros de interesse, que são:

- densidade de potência "on line" nas posições contendo o detector de platina, dada por:

$$(q_{Pt})_{jk} = (f_c)_{jk} \cdot (I_{Pt})_{jk} \quad (19)$$

- densidade de potência "on line" nos nós jk dos elementos instrumentados com ródio, dado por:

$$(q_{Rh})_{jk} = \frac{\sum_{j'=1}^n ws_{j'} \cdot (q_{Pt})_{j'k}}{n} \quad (20)$$

- densidade de potência média "on line" do reator, dada por:

$$q = \frac{\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^K q_{jk}}{M.H} \quad (21)$$

- densidade relativa em cada nó jk, dada por:

$$qr_{jk} = \frac{q_{jk}}{q} \quad (22)$$

- axial off set, dado por

$$AO = \frac{\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^{H/2} q_{jk} - \sum_{j=1}^M \sum_{k=H/2}^H q_{jk}}{M.H.q} \quad (23)$$

- e o fator de pico dado pelo valor máximo de  $qr_{jk}$

### 5. RESULTADOS

Para verificarmos os cálculos apresentados aqui, simulamos sinais de detectores SPDs no reator IEA-R1, baseado em dados do mapeamento de fluxo e cálculo da distribuição de potência apresentados nas referências [2] e [3].

Supomos que a maior parte dos elementos é instrumentada com detectores de ródio, e selecionamos algumas posições com potências próximas (de acordo com a referência [3]) para simular dados de detectores de platina. Como não temos a temperatura na saída de cada elemento, utilizamos o valor de potência calculada na referência para os diversos elementos.

Nesta simulação, o valor obtido para o fluxo médio de nêutrons térmicos no núcleo do reator foi de  $1.43 \times 10^9$  n/cm<sup>2</sup>s.

A Fig. 2 apresenta o perfil axial de fluxo em um elemento, calculado pelo método "cubic spline" a partir dos pontos simulados com detectores de ródio, a curva teórica calculada por códigos [4], e os fluxos medidos com folhas de Au [2].

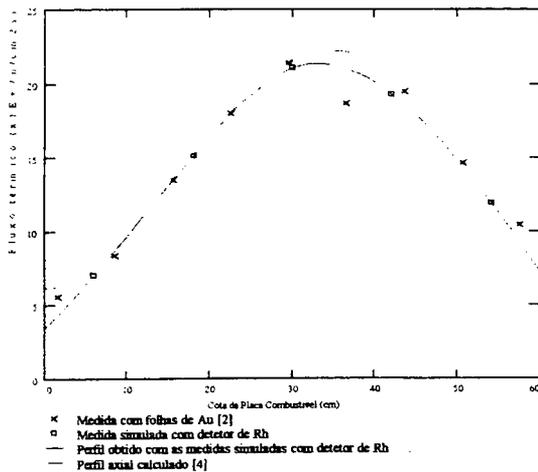


Figura 2. Fluxo de nêutrons térmicos no EC108.

A Fig. 3 apresenta os fatores de pico calculados de acordo com a referência [2], a partir da simulação dos sinais de detectores de ródio. São mostrados também os desvios destes cálculos em relação aos apresentados na referência.

0.90	1.03	1.25	1.79	1.05
9.8	12	8.7	9.8	7.1
1.08	1.37	1.24	1.67	1.07
8.0	7.9	7.8	11	7.0
1.54	Elem. de Contr.	1.56	Elem. de Contr.	1.50
9.2		4.7		10
1.56	1.71	1.37	1.65	1.39
8.3	9.6	8.7	5.1	8.6
1.47	Elem. de Contr.	1.48	Elem. de Contr.	1.78
7.3		9.6		2.9
0.91	1.68	1.87	1.52	0.90
-1.0	8.4	11	8.6	11

Fator de Pico
Desvio Percentual

Figura 3. Fator de Pico Obtido na Simulação e Desvios em relação à ref.[2]

A Fig. 4 apresenta um gráfico da distribuição de potência média no núcleo.

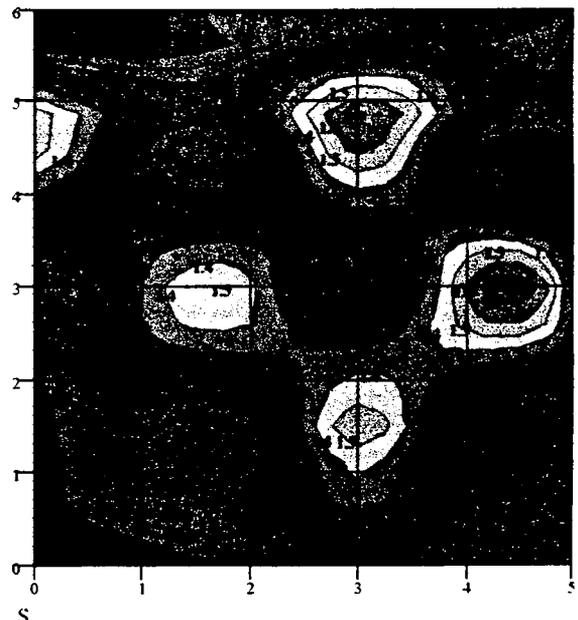


Figura 4 - Distribuição da potência média no núcleo

## 6. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados preliminares, podemos concluir de uma forma geral que a metodologia proposta apresenta um desempenho satisfatório, uma vez que consegue reproduzir o fluxo médio e os fatores de pico determinados na referência [4], com desvios de 8.4 % e inferiores a 12 % respectivamente.

Adicionalmente, existem várias posições simétricas monitoradas, de modo que a falha de um ou mais detetores não degrada o desempenho do sistema de monitoração. No entanto é importante realizar a validação dos sinais de entrada. A validação dos sinais pode ser executada levando-se em conta a simetria, as medidas da temperatura na saída de cada elemento combustível ou ainda os valores calculados por códigos neutrônicos.

Melhorias no sistema podem ser introduzidas através de acoplamentos "on line" com cálculos neutrônicos, e "speed up" da resposta dos detetores de platina para compensar os gamas atrasados

O sistema proposto permite a medida direta da fluência através da corrente integrada do detetor e a monitoração direta do fator de pico, permitindo um aumento nas margens de operação bem como melhorias na otimização do gerenciamento do núcleo, resultando em economia e segurança.

and high spatial resolution flux mapping is performed by rhodium detectors. Another set of in core detectors with platinum emitter is employed to perform continuous monitoring of core condition. The platinum signals are calibrated using the results of the flux mapping

## REFERÊNCIAS

[1] Alpelqvist, G., Andersson, T., Magnusson, L., Romslo, K., **Radcal Gamma Thermometers - Performance Experience from Swedish Light Water Reactors**. Proceedings of a Specialists' Meeting on In Core Instrumentation and Reactor Assessment held in Cadarache, France, 7th-10th June 1988.

[2] Bitelli, U. d'U., **Medida da Distribuição Espacial do Fluxo de Nêutrons Térmicos no Núcleo do Reator IEA-R1**. IX Encontro Nacional de Física de Reatores e Termo-Hidráulica, Caxambu, MG, 1993.

[3] Bitelli, U. d'U., **Calibração de Potência do Reator IEA-R1 pelo Método de Ativação de Folhas de Ouro**. IX Encontro Nacional de Física de Reatores e Termo-Hidráulica, Caxambu, MG, 1993.

[4] Pintaud, M. De F. E Santos, A., **Comparação Teoria/Experimento do Mapeamento de Fluxo do Reator IEA-R1**. IX Encontro Nacional de Física de Reatores e Termo-Hidráulica, Caxambu, MG, 1993.

## ABSTRACT

This paper presents a fixed in core detector system using two types of Self Powered Detectors (SPDs). A fast