

CALIBRAÇÃO DE POTÊNCIA DO REATOR IEA-R1 PELO MÉTODO DO BALANÇO TÉRMICO

Yoko Hiromoto* e Hertz Pasqualetto**

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

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

RESUMO

Neste trabalho são apresentados os resultados da calibração dos canais de potência, linear e N16, do reator IEA-R1, realizada pelo método do balanço térmico. As variáveis utilizadas no balanço térmico são a vazão do circuito primário e as temperaturas da água na entrada e saída do núcleo. Devido a pequena diferença entre essas duas temperaturas, foi necessário uma escolha adequada dos pontos de medida bem como uma cuidadosa calibração dos sensores e instrumentos de medida das temperaturas.

I. INTRODUÇÃO

Para obter o valor de potência prontamente, o reator IEA-R1 utiliza detectores de neutrons localizados próximos ao núcleo, e com alguns segundos de atraso, o detector da atividade do N¹⁶ localizado na tubulação do circuito primário. O canal linear que utiliza uma câmara de ionização compensada fornece o sinal para o controle do reator. A indicação desta câmara é afetada por flutuações locais de fluxo de neutrons térmicos devido à movimentação das barras de controle e de segurança, configuração dos dispositivos de irradiação, configuração do núcleo e queima do elemento combustível. Todos estes fatores implicam na necessidade de uma calibração periódica do canal. Do mesmo modo, para o acompanhamento da potência do núcleo deve ser utilizada uma variável que não seja influenciada por estes fatores, como por exemplo a medida da atividade do N¹⁶, indicada pelo canal N16 [1]. Embora a potência térmica possa ser obtida pelo balanço térmico, esta exige uma condição de estabilização térmica que demanda algum tempo para ser atingido. Portanto, o balanço térmico é utilizado apenas para a calibração dos canais nucleares e do N16 e não para o acompanhamento da potência.

Para baixas potências, onde não é possível realizar o balanço térmico, a calibração deve ser feita com detectores (folhas ou fios) de ativação [2, 3]. Na faixa intermediária, onde não é viável a calibração por balanço térmico ou por detectores de ativação, a curva de calibração do canal N16 poderá ser extrapolada para o acompanhamento da potência.

Este trabalho apresenta a metodologia e os resultados obtidos na calibração de potência por balanço térmico e pela extrapolação do sinal do detector de N¹⁶. Antes da operação para a calibração dos canais de potência do reator, os equipamentos envolvidos foram calibrados e foi verificada a operacionalidade do canal N16.

Devido a pequena diferença (menor que 3° C), entre as temperaturas da água na entrada e na saída do núcleo, foi necessário uma escolha adequada dos pontos de medida, bem como uma cuidadosa calibração dos sensores e instrumentos de medida das temperaturas.

II. BALANÇO TÉRMICO

O balanço térmico foi utilizado para a obtenção da potência térmica do reator. Para a calibração dos canais nucleares do IEA-R1 selecionamos como volume de

controle apenas o núcleo do reator, diminuindo assim os problemas devido à instabilidade da instalação, bem como às incertezas envolvidas. O núcleo é composto por elementos combustíveis, refletores e de irradiação e água de refrigeração.

O balanço térmico foi efetuado, igualando-se a potência gerada neste volume à potência transferida para o refrigerante [4, 5].

$$P = m \cdot c_p \cdot (T_{\text{saída}} - T_{\text{entrada}}), \quad (1)$$

onde:

- m é a vazão mássica no volume de controle
- c_p é o calor específico da água nas condições de operação
- T_{entrada} é a temperatura da água na entrada do volume de controle
- $T_{\text{saída}}$ é a temperatura da água na saída de volume de controle.

Utilizando o valor de $c_p = 4.176 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$, e convertendo a vazão para a unidade utilizada no IEA-R1, a expressão para a potência será dada por:

$$P = 262.1 \cdot 10^{-6} \cdot \text{Vazão} \cdot (T_{\text{saída}} - T_{\text{entrada}}), \quad (2)$$

onde a potência é dada em MW, a vazão em gpm e as temperaturas em $^\circ\text{C}$.

2.1. MEDIDA DE VAZÃO

A massa de água do processo é representado pela vazão do circuito primário de refrigeração do reator, e corresponde à somatória da vazão da água que passa pelos elementos combustíveis (núcleo ativo), da vazão que passa pelos demais canais existentes no núcleo (elementos de irradiação de materiais) e que passa pelas estruturas.

A vazão de água é medida indiretamente por meio de um bocal instalado na tubulação do circuito primário de refrigeração e pelo transmissor que fornece um sinal de corrente proporcional à vazão.

Para a calibração da potência, o transmissor foi aferido e os cálculos da vazão x perda de carga para o bocal foram conferidos.

2.2. MEDIDA DE TEMPERATURA

Pelo fato da água da piscina ser succionada através dos elementos combustíveis, elementos de irradiação e suportes estruturais do núcleo do reator, foi necessário realizar um estudo da distribuição de temperatura da água da piscina nas regiões sujeitas à sucção pelo circuito primário.

Ficou demonstrado que após aproximadamente 2 horas de operação em potência constante sem alterações

nas condições operacionais dos ventiladores das torres de refrigeração, a temperatura da água da piscina é praticamente igual nas regiões sujeitas à sucção pelo circuito primário.

Com base nestes resultados, decidiu-se que a temperatura de entrada será tomada a 20 cm acima do topo do núcleo, com o suporte do termopar fixado na treliça de sustentação do mesmo.

A temperatura de saída do núcleo é medida em um poço para termopar existente na tubulação do circuito primário a alguns metros da saída do núcleo do reator. Pelo fato do fluxo ser turbulento, consideramos que a temperatura da água neste ponto seja homogênea, e que no trajeto do núcleo até este ponto, as perdas de calor para o ambiente sejam desprezíveis.

Para a medida das temperaturas de entrada e de saída foram utilizados 2 termopares tipo K com 12 metros de extensão, encapsulados em tubo de aço inoxidável e multímetros digitais de 5 dígitos. As temperaturas de interesse foram medidas em relação a 0°C (obtidas com a mistura água/gelo picado).

Rigor especial foi dado na aferição dos instrumentos, uma vez que os valores de temperatura envolvidos são muito pequenos. O conjunto termopar / junta fria / multímetro foi calibrado num banho térmico de precisão na faixa de 25 a 35°C . As medidas foram realizadas com a temperatura estabilizada no ponto, mas durante 2 subidas e 2 descidas da temperatura.

III- CANAL N16

O canal N16 do reator IEA-R1 é constituído de uma câmara de ionização para radiação gama construído no IPEN/TED, instalada junto à tubulação do circuito primário, uma fonte de alta tensão, um picoamperímetro, um indicador analógico e um registrador instalados na Sala de Controle

Devido à grande instabilidade existente no canal, principalmente em baixas potências, utilizamos um eletrômetro Keithley 617. Para a verificação do bom funcionamento do detetor, foram realizadas algumas medidas sem retirar o detetor do local:

- foi obtida a curva de saturação do detetor, apresentada na figura 1. O patamar se situa entre 300 e 900 V com inclinação de $0.5\% / 100\text{V}$.

- foram registradas várias amostras do sinal do detetor N16 e verificamos que para estados estacionários, o sinal é bem estável. Na amostragem de 50 minutos, o desvio padrão encontrado foi de 1.1%, o valor máximo foi de 4% acima do valor médio e o mínimo, 2.5% abaixo do valor médio, que correspondem à flutuação da vazão do circuito primário.

- durante diferentes dias da semana foi feita uma monitoração do canal N16 com o circuito primário ligado após o SCRAM do reator. Os dados estão apresentados na figura 2. As medidas mostram que não são detectadas elementos de vida longa que vão se acumulando durante a

semana, e possam influir no sinal. A indicação do canal corresponde ao nível de potência do reator ocorrido a aproximadamente 13 segundos antes, quando o segmento de água medido se achava no núcleo do reator. A corrente do detector cai rapidamente após a indicação do SCRAM para níveis menores que 1% do sinal, indicando que este canal está medindo essencialmente o que foi ativado imediatamente antes, isto é, elementos de meia vida curtíssima (o N^{16} tem meia vida de 7.37 segundos), e portanto proporcional à potência.

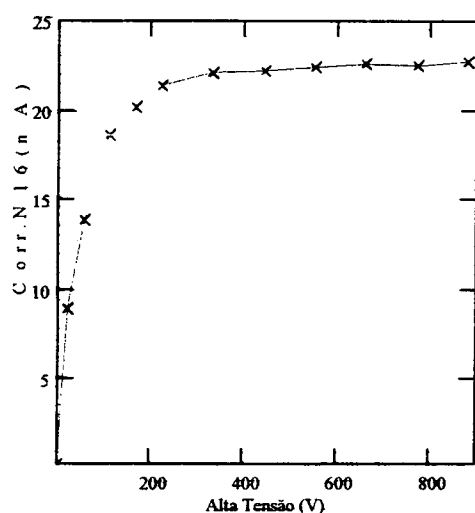


Figura 1 - Sinal do detector de N^{16} em função da alta tensão

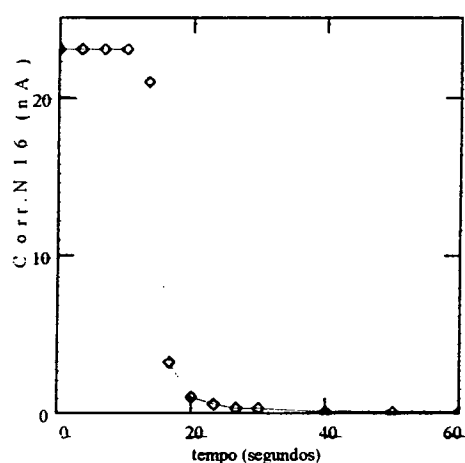


Figura 2 - Sinal do canal N^{16} após o SCRAM

$$\text{Vazão} = 244 - 314.6 * I \quad (+/- 4.5 \%), \quad (3)$$

onde:

- a vazão é dada em gpm, e

- I é a corrente fornecida pelo transmissor de pressão do circuito primário em mA.

$$T_{\text{entrada}} = 24.54 * V_{\text{entrada}} + 0.5 \quad (+/- 0.4\%) \quad (4)$$

onde V_{entrada} é a tensão fornecida pelo termopar localizado no topo do núcleo.

$$T_{\text{saída}} = 24.53 * V_{\text{saída}} + 0.5 \quad (+/- 0.4\%) \quad (5)$$

onde $V_{\text{saída}}$ é a tensão fornecida pelo termopar localizado na saída do núcleo

A operação de calibração foi realizada estabilizando o reator por 20 minutos em cada nível de potência, registrando as medidas dos vários canais e determinando a potência por balanço térmico. Os resultados das medidas e do cálculo da potência por balanço térmico estão apresentadas na tabela 1. As figuras 3 e 4 mostram os valores da potência térmica obtida em função da corrente do canal linear e em função da corrente do detector de N^{16} .

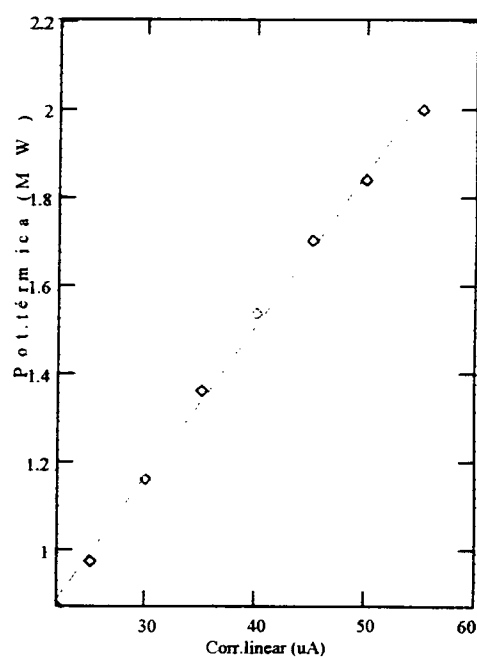


Figura 3 - Potência térmica em função da corrente do canal linear

IV. RESULTADOS

Através das aferições, foram obtidas as seguintes equações de calibração para os instrumentos:

Tabela I. Valores Medidos e Potências Calculadas

$T_{\text{entrada}} (^{\circ}\text{C}) = 24.535 \times V_{\text{entrada}} + 0.504$
$T_{\text{saída}} (^{\circ}\text{C}) = 24.532 \times V_{\text{saída}} + 0.488$
$V_{\text{vazão}} (\text{gpm}) = 244.742 \times I + 314,554$
$I = 9.3 \text{ mA}$ $V_{\text{vazão}} = 2.591\text{E}3 \text{ gpm}$
$P_{\text{potência}} = 262.149\text{E}-6 \times 2.591\text{E}3 \times (T_{\text{saída}} - T_{\text{entrada}})$

Hora	Pos. BS-1	Corr.Linear (Ampère)	Corr.Média N16 (Amp)	V_entr. (mV)	V_saída (mV)	T_entr. (°C)	T_saída (°C)	Delta_T (°C)	Potência (MW)
11:15	789	2,50E-06	1,19E-09						
11:30	789	6,26E-06	2,97E-09						
11:51	788	9,38E-06	4,39E-09						
12:12	790	1,25E-05	5,84E-09						
12:27	794	1,56E-05	7,29E-09						
12:44	799	1,87E-05	8,73E-09						
13:05	800	2,20E-05	1,02E-08	999	1.052	25,01	26,30	1,28	0,870
13:10	800	2,50E-05	1,14E-08	1.007	1.067	25,21	26,66	1,45	0,987
				1.003	1.062	25,11	26,54	1,43	0,970
13:25				1.009	1.069	25,26	26,71	1,45	0,987
13:35	817	3,00E-05	1,37E-08	1.016	1.086	25,43	27,13	1,70	1,153
				1.022	1.093	25,58	27,30	1,72	1,170
13:45	827	3,50E-05	1,57E-08	1.033	1.116	25,85	27,87	2,02	1,370
				1.040	1.122	26,02	28,01	1,99	1,353
14:00	838	4,00E-05	1,78E-08	1.049	1.140	26,24	28,45	2,21	1,503
				1.048	1.143	26,22	28,53	2,31	1,570
14:15	845	4,00E-05		1.050	1.146	26,27	28,60	2,34	1,587
				1.060	1.150	26,51	28,70	2,19	1,487
14:35	857	4,50E-05	1,96E-08	1.069	1.172	26,73	29,24	2,51	1,703
				1.072	1.175	26,81	29,31	2,51	1,703
14:45	863	4,50E-05		1.081	1.183	27,03	29,51	2,48	1,687
				1.084	1.187	27,10	29,61	2,51	1,703
14:55	876	5,00E-05	2,12E-08	1.088	1.203	27,20	30,00	2,80	1,903
				1.098	1.206	27,44	30,07	2,63	1,786
15:00	880	5,00E-05		1.096	1.208	27,39	30,12	2,73	1,853
				1.100	1.210	27,49	30,17	2,68	1,820
15:30				1.126	1.237	28,13	30,83	2,70	1,836
15:35		5,50E-05	2,30E-08	1.133	1.253	28,30	31,23	2,92	1,986
				1.138	1.259	28,42	31,37	2,95	2,003

Nesta operação de calibração, válida somente para a configuração utilizada, a relação entre a potência térmica e o canal linear é dada por:

$$P = 3.44 * 10^4 * I_{\text{linear}} + 0.131 \quad (+/- 5\%) \quad (6)$$

A relação entre a potência térmica e o canal N16 é dada por:

$$P = 8.76 * 10^7 * I_{\text{N16}} - 0.023 \quad (7)$$

onde P é a potência em MW,

I_{linear} e I_{N16} são respectivamente a corrente do canal linear e do detector de N^{16} medidos em Ampères.

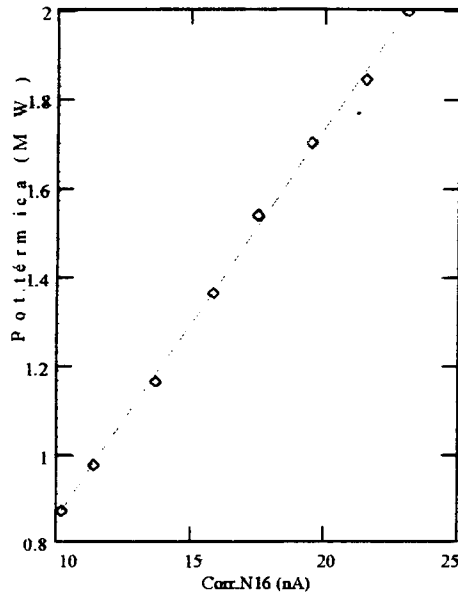


Figura 4 - Potência térmica em função da corrente do canal N16

Abaixo de 0.8 MW, não foi possível determinar a potência por balanço térmico, no entanto, foi observado a linearidade entre o sinal do canal N16 e do canal linear (conforme figura 5). Se considerarmos a relação Potência x I_{N16} , válida para todo o range de potência, podemos extrapolar o valor da potência térmica para potências menores (até 0.1 MW), usando a relação I_{N16} x I_{linear} , como mostrado na figura 6.

V. CONCLUSÕES

As medidas realizadas indicam que é possível executar a calibração pelo balanço térmico para potências acima de 0.8 MW. Utilizando o valor da potência medida

pelo canal N16, podemos extrapolar a calibração para potências inferiores a essa.

O balanço térmico necessita de condições e equipamentos especiais. Para se obter valores de potência em caso de necessidade de mudanças de arranjo experimentais ou configurações de barras, deve ser usado o canal N16.

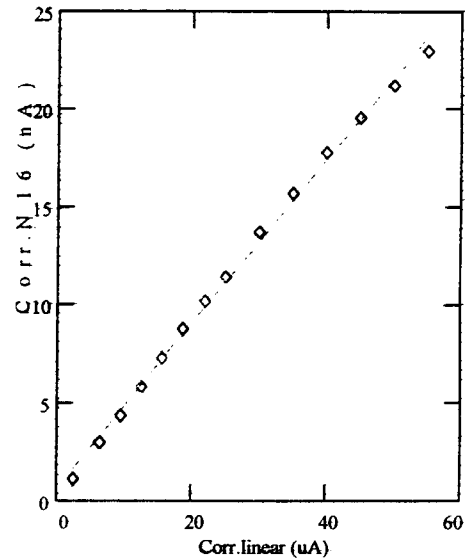


Figura 5 - Correlação entre os sinais do canal N16 e do canal linear

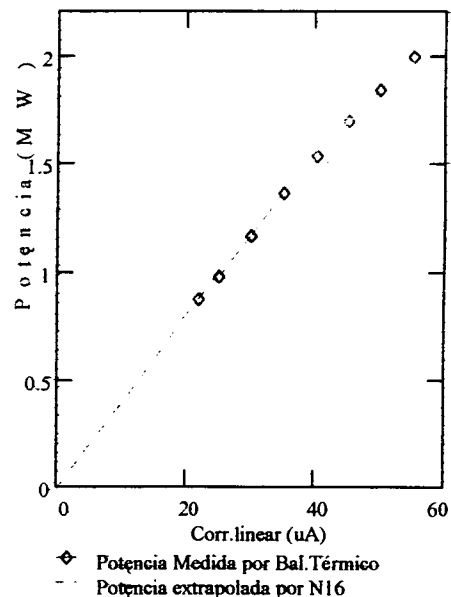


Figura 6 - Potência térmica extrapolada a partir do detector de N^{16}

REFERÊNCIAS

[1] Souza, J. A. de. **Sobre a Monitoração da Potência do Reator Nuclear IEAR-1 pela Atividade do N¹⁶**, São Paulo, 1970. Dissertação (mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

[2] 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.

[3] Brand, P., Van Dam, H., Duin, G. J., Kleijn, H. R., Rijks, H. J., Vries, J. W. de. **Flux, Power and Burnup Determination for Pool-Type Reactors**, Edited by Reactor Division - Interuniversitair Reactor Instituut, Delft, The Netherlands, 1971.

[4] Meem, J. L., Johnson, E. B., **Determination of the Power of the Shield - Testing Reactor, Part III**. Oak Ridge, TN, USA, 1954. (ORNL - 1537).

[5] Balderrama, H., Rodriguez, A., Parkanky, D., **Determinacion de la Potencia del RA-3**, CNEA, - Re166, Chile. 1980.

AGRADECIMENTOS

Aos pesquisadores T. Madi F. e E. Mapeliam pelo auxílio na definição do experimento.

ABSTRACT

This paper presents the power calibration of IEA-R1 linear and N16 channels, by calorimetric means. The variables involved are primary coolant flow and core inlet and outlet temperatures. Due to small difference between these 2 temperatures, a careful calibration of the sensors and instruments were necessary.