



COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO CALORIMÉTRICO E O MÉTODO DO BALANÇO TÉRMICO NA CALIBRAÇÃO DE POTÊNCIA DO REATOR NUCLEAR DE PESQUISA TRIGA IPR-R1

AMIR ZACARIAS MESQUITA, HUGO CÉSAR REZENDE, ROSE MARY GOMES DO PRADO

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
Comissão Nacional de Energia Nuclear - CDTN/CNEN
Caixa Postal 941, Campus da UFMG, Pampulha. CEP: 30 123 970, Belo Horizonte, MG, Brasil

(Recibido 20 de abril de 2010, para publicación 6 de agosto de 2010)

Resumo – Passados vários anos desde que os primeiros reatores nucleares de pesquisa TRIGA foram construídos, diversas metodologias foram utilizadas para calibração da potência térmica fornecida pelo núcleo. Nas operações normais a potência dos reatores nucleares é monitorada por meio de instrumentos que medem o fluxo de nêutrons. A calibração destes instrumentos é sempre feita por procedimentos térmicos. A medição mais exata possível do valor da potência é importante para o conhecimento do fluxo de nêutrons e para o cálculo da quantidade de combustível queimado (^{235}U). A queima é linearmente dependente da potência térmica e sua determinação com precisão é importante também no cálculo dos produtos de fissão, da atividade dos combustíveis, do calor gerado no decaimento e na radiotoxicidade. O propósito deste artigo é apresentar os resultados da calibração da potência térmica realizada em 05 de março de 2009 no reator TRIGA IPR-R1 do CDTN localizado em Belo Horizonte (Brasil). Foram utilizados dois procedimentos: o calorimétrico e o de balanço de calor no sistema de refrigeração. O método calorimétrico foi realizado com o reator operando na potência de 100 kW (indicação do canal neutrônico linear) e com o sistema de refrigeração forçado desligado. A taxa de aumento da temperatura da água foi registrada e a potência foi calculada em função deste aumento de temperatura e da capacidade térmica do sistema. O método do balanço térmico consiste no balanço em estado estacionário no sistema primário de refrigeração. Neste método as temperaturas de entrada e saída e a vazão da água no primário são monitoradas. Ao calor transferido através do primário são adicionadas as fugas de calor do poço do reator.

Palavras chave – Reator nuclear de pesquisa, TRIGA, calorimétrico, balanço térmico, temperatura.

1. INTRODUÇÃO

O reator TRIGA IPR-R1 do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN é um reator de pesquisa do tipo piscina (Fig. 1). Foi projetado para pesquisa, treinamento e produção de radioisótopos. Os elementos combustíveis de seu núcleo são refrigerados por circulação natural de água. Este tipo de refrigeração é suficiente na atual configuração de potência máxima de 250 kW [1]. Entretanto o reator possui um sistema de circulação forçada para resfriamento da água do poço. Antes da primeira criticidade do reator, a água da piscina foi aquecida por resistores elétricos de potência conhecida, resultando assim em um aumento na temperatura da água em um determinado intervalo de tempo, que pode ser medido com precisão. Posteriormente, o reator foi ligado e sua potência ajustada para fornecer a mesma taxa de aumento da temperatura da água. Nestes experimentos, o sistema de refrigeração forçada ficou desligado. Assim, a potência térmica de operação do reator pode ser facilmente calculada. Depois que os reatores nucleares entram em operação rotineira, a calibração da potência térmica utilizando resistores elétricos, torna-se difícil de ser realizada. Sendo assim foram desenvolvidos vários métodos para sua calibração [2]. Na operação normal de um reator nuclear sua potência é medida por detectores de nêutrons. Mas a calibração destes detectores é sempre realizada por meios térmicos. No reator TRIGA IPR-R1 quatro câmaras sensíveis ao fluxo de nêutrons são montadas em torno do núcleo, são os canais neutrônicos de medida da potência. Estes canais são ajustados em função do resultado da calibração (balanço térmico) descrita neste trabalho.

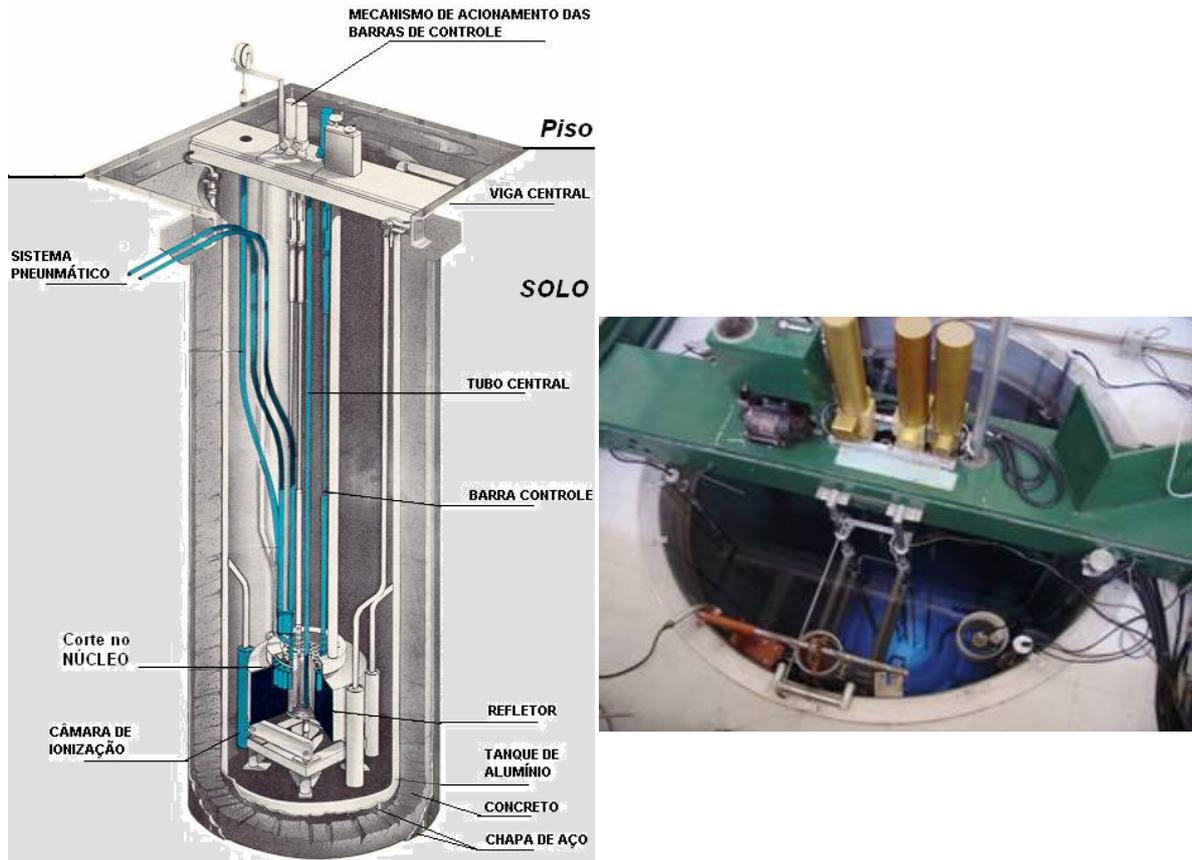


Fig. 1. Reator nuclear de pesquisa TRIGA IPR-R1.

2. O MÉTODO CALORIMÉTRICO

O método calorimétrico é basicamente igual à metodologia de aquecimento do núcleo por energia elétrica, a não ser que o calor é proveniente do próprio combustível nuclear. O reator é colocado em operação a uma potência constante, com o circuito de refrigeração forçada desligado. Conhecendo-se a capacidade térmica do sistema e monitorando-se a taxa de aumento de temperatura da água do poço ($\Delta T/\Delta t$), pode-se calcular a potência dissipada. Para melhorar o isolamento térmico o topo do tanque do reator é fechado. As temperaturas do ar e do solo são também monitoradas. A fórmula básica é a seguinte [3]:

$$q = K \, dT/dt \quad (1)$$

onde q é a potência e K é uma constante dada pela capacidade térmica do sistema, ou seja:

$$K = \rho \, V_w \cdot c_p, \quad (2)$$

onde ρ é densidade da água, V_w é o seu volume e c_p é o calor específico isobárico. Todos os itens são referentes à água, devido ao seu grande volume e capacidade térmica, comparados aos outros componentes do poço, que são basicamente metais.

3. O MÉTODO DO BALANÇO TÉRMICO

A metodologia de calibração da potência pelo balanço térmico consiste na medida da potência dissipada no circuito primário de refrigeração, adicionadas às perdas de calor do poço. A potência dissipada no circuito primário será a mais próxima da potência fornecida pelo núcleo, quanto mais próxima a tempera-

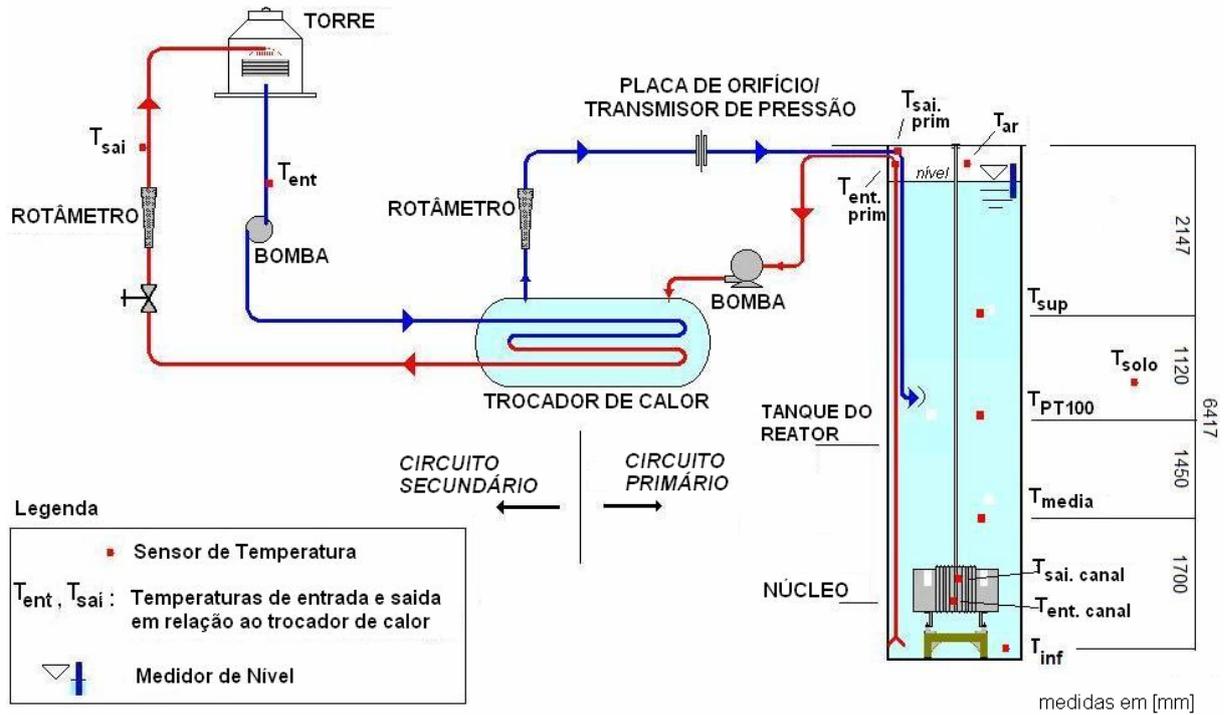


Fig. 2. Circuito de refrigeração forçada do reator TRIGA IPR-R1 e distribuição da instrumentação.

tura da água do poço estiver da temperatura ambiente [4]. Estas condições de estabilidade térmica são obtidas depois de várias horas de operação, principalmente à noite, quando são menores as influências da variação da temperatura ambiente na torre de refrigeração, conforme pode ser visto na Fig. 2.

A potência dissipada no sistema primário é calculada pelo balanço térmico medindo-se as diferenças entre as temperaturas de entrada e saída da água no circuito e sua vazão. A potência (q) é obtida pela expressão:

$$q = \dot{m} c_p \Delta T, \quad (3)$$

onde \dot{m} é a vazão de massa do refrigerante no primário, c_p é calor específico isobárico e ΔT é a diferença entre as temperaturas de entrada e saída do circuito primário de refrigeração. A potência do reator é obtida somando-se as perdas térmicas. Estas perdas representam uma pequena fração da potência total. O sistema de aquisição de dados calcula a potência dissipada, com os valores de \dot{m} e c_p corrigidos em função da temperatura do refrigerante [5].

4. PERDAS DE CALOR ENTRE O POÇO E O MEIO AMBIENTE

O Reator TRIGA IPR-R1 (Fig. 1) tem o núcleo situado abaixo do piso da sala, no fundo de um poço cilíndrico de 6,625 m de profundidade e 1,92 m de diâmetro, cujo topo se encontra 25 cm abaixo do nível da sala. O poço do reator é formado por cinco cilindros coaxiais: dois cilindros de chapa de aço separados por uma camada de 20 cm de concreto, e um cilindro interno de liga especial de alumínio AA-5052-H34, separado do cilindro de aço por uma camada de 7,1 cm também de concreto. A troca de calor entre o poço do reator e o meio ambiente compõe-se da troca por condução com o solo, pelas paredes laterais e pelo fundo do poço, e da troca com o ar atmosférico por convecção e evaporação, pela superfície superior. As equações de transferência de calor por condução considerando as resistências térmicas dos componentes da parede do tanque, a troca de calor devido à evaporação na superfície e a troca de calor por convecção térmica na superfície do reator, foram inseridas no programa de aquisição de dados que realiza os cálculos em função dos valores de temperaturas da água do poço, do ar e do solo [6].

5. INSTRUMENTAÇÃO

Na Fig. 2, mostrada anteriormente, pode-se observar a distribuição da instrumentação. Três termopares do tipo K e um termoresistor (PT-100) foram posicionados em diferentes alturas dentro do poço. Dois termopares do tipo K foram colocados na entrada e na saída da água no canal mais quente do núcleo. Um termopar foi colocado acima da superfície da água do poço e outro termopar foi posicionado em um furo ao lado do tanque do reator a uma profundidade de 3m. Dois termoresistores (PT-100) foram posicionados na tubulação, de modo a medirem a temperatura da água na entrada e na saída do circuito primário de refrigeração. A vazão do primário é medida por um conjunto composto por uma placa de orifício e um transmissor de pressão diferencial. Todas as cadeias de medição foram calibradas e as equações de correção encontradas foram adicionadas ao programa do sistema de aquisição de dados. Para a medida da potência dissipada no secundário utilizou-se também dois termoresistores e a vazão foi mantida constante. Todos os sinais são enviados a uma placa eletrônica amplificadora/multiplexadora que faz ainda a compensação das temperaturas dos termopares (junta fria). Os sinais são enviados em seguida a uma placa de aquisição de dados, instalada em um computador, que faz a conversão analógico/digital além de visualizar e registrar os dados. Todos os parâmetros são obtidos fazendo-se uma média de 120 leituras a uma taxa de 1 Hz. Os desvios padrões das médias também são calculados [7].

6. RESULTADOS

6.1. Calibração da potência pelo método calorimétrico

O reator operou por um período de cerca de 2,5 horas, com o circuito de refrigeração forçada desligado com indicação de 100 kW no canal neutrônico linear situado na mesa de controle. O volume médio de água no poço [V_w] durante o experimento foi de 17,7 m³ e a capacidade térmica calculada [K] foi de 20,35 kWh/°C. Os valores das propriedades termo-físicas da água utilizadas nos cálculos foram obtidos para uma temperatura de 38 °C. Os valores encontrados neste experimento estão bem próximos dos resultados obtidos para o reator TRIGA de Ljubljana, $K = 20,4$ kWh/K ($V_w = 17,6$ m³), e para o reator TRIGA de Viena, $K = 19,1$ kWh/K ($V_w = 16,5$ m³) [3]. A Fig. 3 mostra a taxa de aumento das temperaturas de todos os sensores localizados no poço durante o experimento. A taxa de aumento da temperatura média da água e a equação encontrada por regressão são mostradas na Fig. 4. Na Tabela 1 têm-se alguns resultados da calibração pelo método calorimétrico, a potência térmica obtida foi 102 kW (± 21 %).

Tabela 1. Resultados da calibração da potência pelo método calorimétrico.

Parâmetro	Valor
Taxa de aumento médio da temperatura da água do poço ($\Delta T/\Delta t$)	4,84 [°C/h]
Aumento médio da temperatura da água	34°C para 41 °C
Dilatação no volume da água	17,36 m ³ para 17,86 m ³
Volume médio da água	17,7 m ³
Potência dissipada	99 [kW]
Perda térmicas do poço	3 [kW]
Potência total do reator	102 kW
Incerteza	± 21 kW (± 21 %)

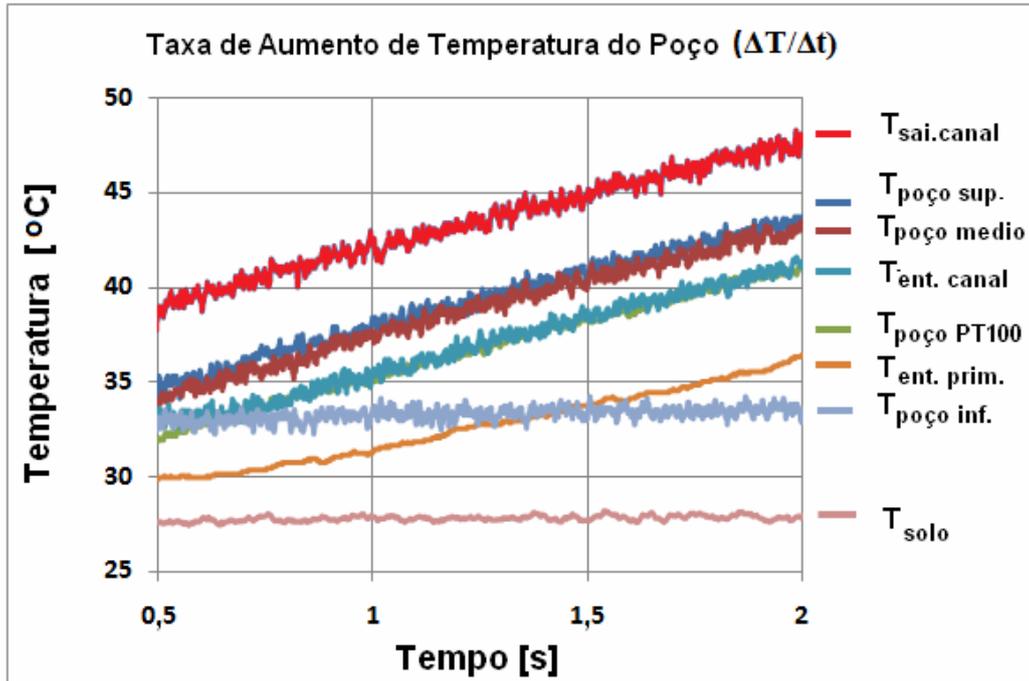


Fig. 3. Taxa de aumento das temperaturas do poço durante a calibração da potência pelo método calorimétrico.

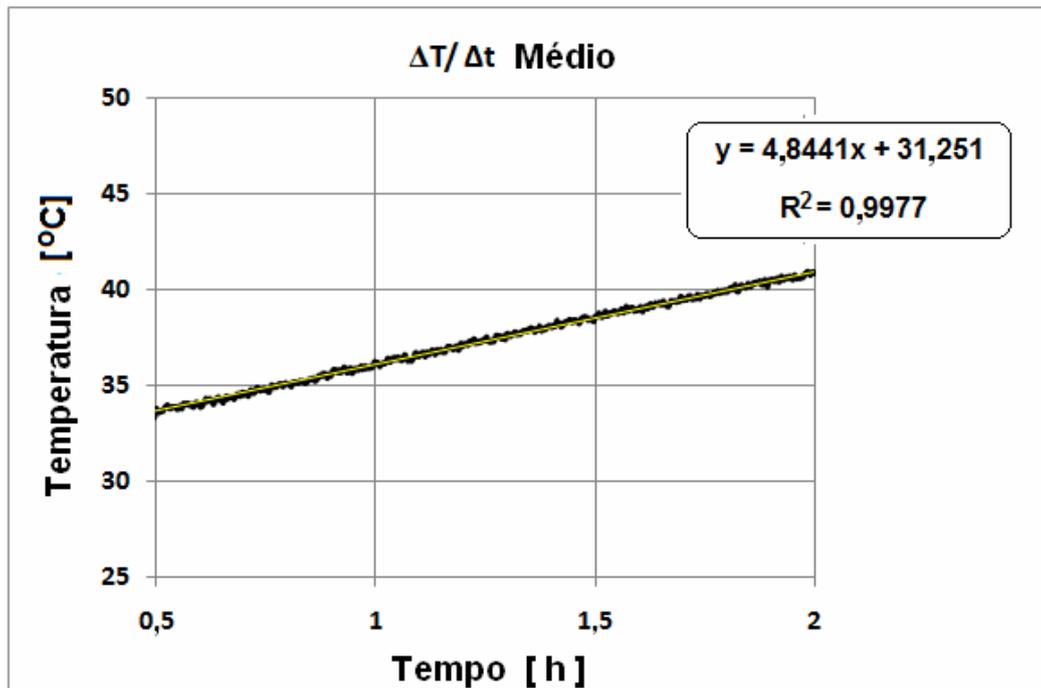


Fig. 4. Taxa de aumento médio da temperatura da água do poço durante a calibração pelo método calorimétrico.

6.2. Calibração da potência pelo método do balanço térmico

Após a realização da calibração pelo método calorimétrico, o reator foi mantido crítico à potência de 100 kW (indicação do canal neutrônico linear). Retirou-se o isolamento térmico que cobria o topo do poço e ligou-se o sistema de refrigeração forçada, iniciando-se assim a coleta de dados para a o experimento de calibração da potência pelo método do balanço térmico nos circuitos primário e secundário de refrigeração. O reator operou por um período de cerca de 7 horas. No final deste tempo as várias temperaturas permaneceram em estado estacionário por 74 min (de 22:00 h até as 23:24 h). As potências dissipadas nos circuitos primário e secundário foram monitoradas durante todo o período do teste. A Fig. 5 mostra a evolução das temperaturas durante os experimentos (método calorimétrico e método do balanço térmico). Na Fig. 6 tem-se a evolução, durante o estado estacionário (últimos 74 min), dos seguintes parâmetros: potências dissipadas nos circuitos primário e secundário, potência do canal neutrônico linear e as temperaturas nos vários pontos do sistema. Na Tabela 2 são apresentados alguns parâmetros registrados durante o período de estabilidade. A potência obtida pelo balanço térmico no primário foi de 112 kW ($\pm 5,9\%$).

6.3. Incerteza no valor da potência pelo método calorimétrico

No cálculo do valor da incerteza da potência pelo método calorimétrico consideram-se as incertezas relativas aos parâmetros característicos da água, presentes nas Eq. (1) e Eq. (2), ou sejam: a densidade (ρ), o volume (V_w), o calor específico (c_p), a taxa de aumento de temperatura (ΔT) e o tempo (Δt). Os três primeiros parâmetros são função da temperatura. A equação diferencial que leva em consideração as incertezas consolidadas das variáveis primárias foi inserida no programa de aquisição de dados, que realiza os cálculos dando o valor da incerteza da potência pelo método calorimétrico [8, 9]. As medidas pontuais das temperaturas, assim como do tempo são realizadas com bastante precisão. A principal fonte de erros é a determinação da capacidade térmico do sistema. As maiores incertezas provêm do cálculo do volume da água do tanque e principalmente da não homogeneização de sua temperatura. Com o sistema de refrigeração forçado desligado e sem provocar agitação da água, uma coluna de água mais aquecida se forma acima do núcleo sendo mais fria no fundo do poço. Portanto o resultado do experimento depende dos locais onde estão localizados os sensores de temperatura [1]. A incerteza encontrada no cálculo da potência pelo método calorimétrico foi de $\pm 21\%$.

6.4. Incerteza no valor da potência pelo método do balanço térmico

No valor da incerteza da potência pelo balanço térmico consideram-se as incertezas relativas aos seguintes parâmetros relacionados à água, os quais compõem a Eq. (3): a vazão de massa (\dot{m}) [10], as temperaturas de entrada e saída do refrigerante no primário ($T_{ent. prim.} - T_{sai prim.}$) e o calor específico (c_p) em função da temperatura. A equação diferencial que leva em consideração as incertezas consolidadas das variáveis primárias foi inserida no programa de aquisição de dados, que realiza os cálculos dando o valor da incerteza da potência pelo método do balanço térmico no primário [8,9]. O desvio padrão das leituras do valor médio da potência foi também adicionado no cálculo da incerteza total. Conforme mostrado na Tabela 2 a incerteza encontrada por este método foi de $\pm 5,9\%$.

Tabela 2. Resultados da calibração da potência pelo método do balanço térmico.

Parâmetro	Valor
Vazão de massa média no circuito primário	30,09 \pm 0,02 m ³ /h
Temperatura média na entrada do primário	33,4 \pm 0,2 °C
Temperatura média na saída do primário	30,2 \pm 0,2 °C
Potência dissipada no primário	111 kW
Perdas térmicas do poço	1,4 kW
Potência total do reator	112 kW
Desvio padrão das leituras	\pm 4,0 kW
Incerteza	6,6 kW ($\pm 5,9\%$)
Potência dissipada no secundário ^(*)	85 kW

^(*) Monitorado apenas como referência

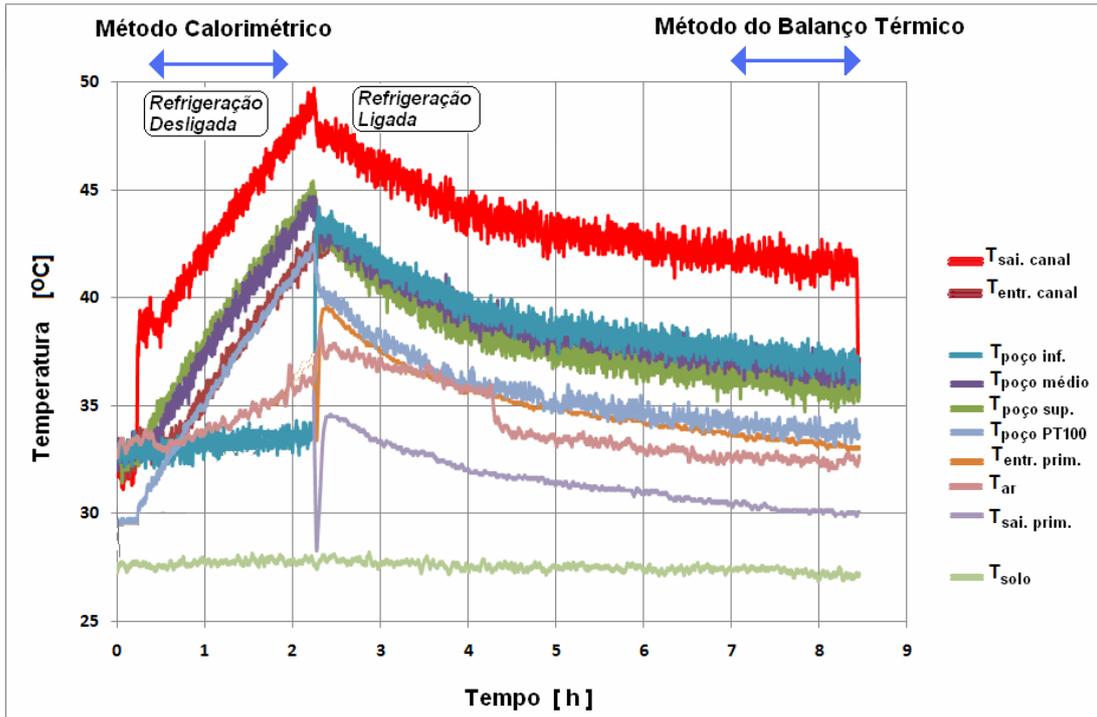


Fig. 5. Evolução das temperaturas durante os experimentos de calibração da potência por meios térmicos.

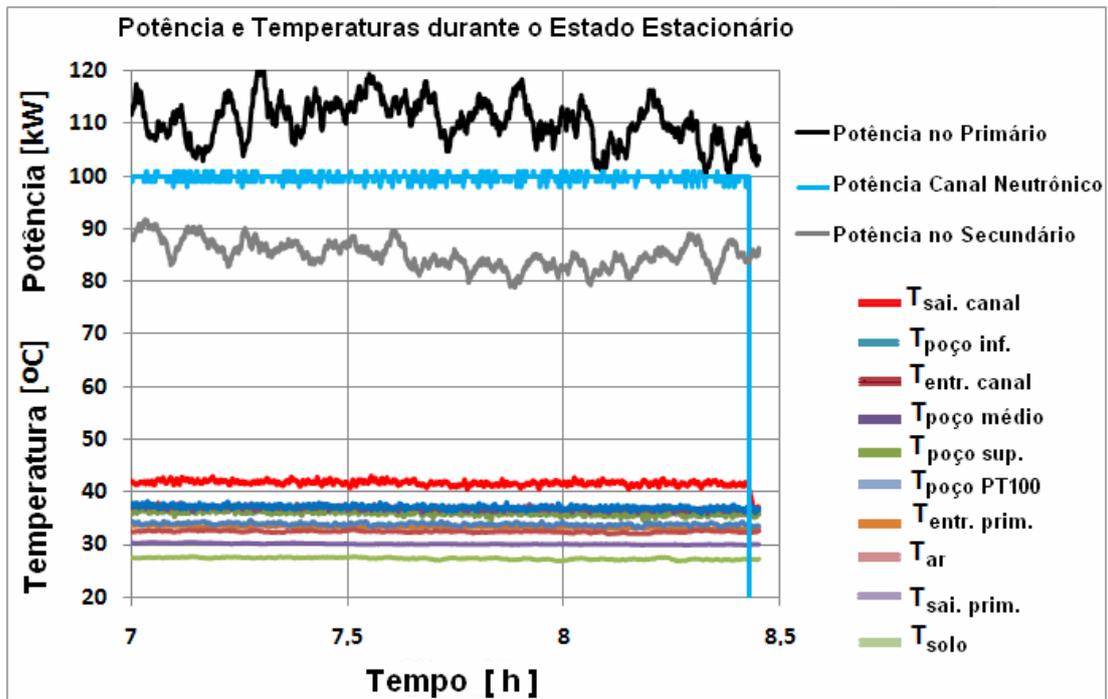


Fig. 6. Evolução das potências e das temperaturas durante o estado estacionário (últimas 1,4h), na calibração pelo método do balanço térmico.

7. CONCLUSÕES

A calibração de potência dos reatores nucleares de pesquisa é importante para o conhecimento preciso do fluxo de nêutrons utilizado nos experimentos por irradiação e para o cálculo da quantidade combustível (^{235}U) queimado. A queima é linearmente dependente da potência térmica do reator e a sua precisão é importante também para a determinação dos produtos de fissão, atividade dos elementos combustíveis, calor de decaimento gerado e radiotoxicidade.

A calibração da potência pelo método calorimétrico apresentou uma grande incerteza. A principal fonte de erros esta na determinação da capacidade térmica do sistema, devido à incerteza do exato volume de água do poço e devido à falta de homogeneização de sua temperatura. Nos experimentos utilizando este método recomenda-se utilizar um agitador, movido por motor elétrico, para a realização da mistura da água do poço, melhorando assim a monitoração do seu valor médio. O valor da potência obtido pelo método calorimétrico foi de (102 ± 21) kW.

O método de cálculo de potência pelo balanço térmico no circuito primário, descrito neste trabalho, é o padrão de calibração da potência do reator nuclear TRIGA IPR-R1. Para se ter uma monitoração contínua da potência por este processo, a instrumentação para medida das temperaturas e da vazão foi incorporada ao sistema de aquisição de dados desenvolvido para o reator [11]. A evolução dos parâmetros é visualizada, em tempo real, e os valores registrados. O valor da potência obtida pelo método do balanço térmico foi de $(112\pm 6,6)$ kW. O valor da incerteza calculada é da ordem de grandeza de experimentos semelhantes realizados em outros reatores nucleares [3,12,13].

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] Mesquita, A.Z., “Investigação Experimental da Distribuição de Temperaturas no Reator Nuclear de Pesquisa TRIGA IPR-R1”, Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brazil (2005)
- [2] Whittemore, W.L., Razvi, J., Shoptaugh, J.R., “Power Calibrations for TRIGA Reactors”, *Proceedings of the Eleventh Biennial U. S. TRIGA User’s Conference*, Gulf General Atomic, Washington, 10-13 April, 4-114, 4-138 (1988)
- [3] Zagar, T., Ravnik, M., Persic, A., “Analysis of Reactor Thermal Power Calibration Method”, *Proceedings of the International Conference Nuclear Energy In Central Europe’99*, Slovenia, Portoroz, 6–9 September, 91-98 (1999)
- [4] Mesquita, A.Z., Rezende, H.C., Tambourgi, E.B., “Power Calibration of the TRIGA Mark I Nuclear Research Reactor”, *RBCM- Journal of the Brazilian Society Mechanical Sciences and Engineering*, **29**(3), 240-245 (2007)
- [5] Miller, R.W., *Flow Measurement Engineering Handbook*, Second Edition, New York, McGraw-Hill Publishing Company, p. E19-E21 (1989)
- [6] Holman, J.P., *Heat Transfer*, 9th ed. McGraw-Hill Book Company, New York (2002)
- [7] Mesquita, A.Z., Rezende, H.C., “Data Acquisition System for TRIGA Mark I Nuclear Research Reactor of CDTN”. *Proceedings of the America Nuclear Energy Symposium (ANES 2004)*, Miami Beach, Flórida, USA. America Nuclear Energy (2004)
- [8] Holman, J.P., *Experimental Methods for Engineers*, 7th ed. McGraw-Hill Book Company, Boston (1998)
- [9] Figliola, R.S., Beasley, D.E., *Theory and Design for Mechanical Measurements*, John Wiley&Sons, New York (1991)

- [10] ISO - International Organization For Standardization, ISO 5167, 1980 (E), Measurement of Fluid Flow by Means of Orifice Plates, Nozzles and Venturi Tubes inserted in Circular Cross-Section Conduits running full, Switzerland (1980)
- [11] Mesquita, A.Z., Souza, R.M.G., “The Operational Parameter Electronic Database of the IPR-R1 TRIGA Research Reactor”, *Proceedings of 4th World TRIGA Users Conference*, Lyon, France (2008)
- [12] Cárdenas, J.P.N., Rodrigues, V.G., “Continuous Thermal Balance Monitoring for IEA-R1 Reactor Power Determination”, Progress Reporter IPEN, São Paulo, 84-85 (2000)
- [13] Breymesser, A. *et al.*, “Thermal Power Calibration of the TRIGA Reactor Wien”, *Proceedings of the 2ND Regional Meeting: Nuclear Energy In Central Europe*, Nuclear Society of Slovenia, Portoroz, 44-47 (1995)

COMPARATION BETWEEN THE CALORIMETRIC AND THE HEAT BALANCE METHODS IN THE THERMAL POWER CALIBRATIONS OF THE IPR-R1 TRIGA NUCLEAR RESEARCH REACTOR

Abstract – Since the first nuclear reactor was built, a number of methodological variations have been evolved for the calibration of the reactor thermal power. Power monitoring of reactors is done by means of neutronic instruments, but its calibration is always done by thermal procedures. The purpose of this paper is to present the results of the thermal power calibration carried out on March 5th, 2009 in the IPR-R TRIGA reactor. It was used two procedures: the calorimetric and heat balance methods. The calorimetric procedure was done with the reactor operating at a constant power, with primary cooling system switched off. The rate of temperature rise of the water was recorded. The reactor power is calculate as a function of the temperature-rise rate and the system heat capacity constant. The heat balance procedure consists in the steady-state energy balance of the primary cooling loop of the reactor. For this balance, the inlet and outlet temperatures and the water flow in the primary cooling loop were measured. The heat transferred through the primary loop was added to the heat leakage from the reactor pool. The calorimetric method calibration presented a large uncertainty. The main source of error was the determination of the heat content of the system, due to a large uncertainty in the volume of the water in the system and a lack of homogenization of the water temperature. The heat balance calibration in the primary loop is the standard procedure for calibrating the power of the IPR-R1 TRIGA nuclear reactor.

Keywords – TRIGA, Research nuclear reactor, Calorimetric, Heat balance, Temperature.

