



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DA POTÊNCIA DE UM REATOR NUCLEAR DE PESQUISA PELO BALANÇO TÉRMICO

Amir Zacarias Mesquita, amir@cdtn.br¹
Hugo Cesar Rezende, hcr@cdtn.br¹

¹Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear/Comissão Nacional de Energia Nuclear (CDTN/CNEN), CEP: 31.270-901 Campus da UFMG – Pampulha, Belo Horizonte – MG.

***Resumo:** Em 2004 foi implantado um sistema de aquisição de dados no reator nuclear de pesquisa TRIGA IPR-R1, localizado em Belo Horizonte, para monitoramento e registro de seus parâmetros operacionais. Atualmente todas as operações deste reator são registradas pelo sistema. Estes registros têm sido utilizados para análise e cálculos da evolução dos vários parâmetros neutrônicos e termo-hidráulicos envolvidos na operação do reator. O padrão de calibração de potência deste reator é o método do balanço térmico, em estado estacionário, do sistema primário de refrigeração. Este trabalho faz uma análise de duas operações recentes e de longa duração efetuados no TRIGA IPR-R1 e compara os resultados do monitoramento das potências dissipadas no primário, com a os resultados da calibração da potência realizadas em março de 2009. Os resultados mostraram que o valor da potência térmica está dentro da margem de incerteza da metodologia utilizada que é de $\pm 6\%$.*

***Palavras-chave:** potência térmica, reator nuclear de pesquisa, balanço térmico, transferência de calor*

1. INTRODUÇÃO

Passados vários anos desde que os primeiros reatores nucleares de pesquisa TRIGA foram construídos, diversas metodologias foram utilizadas para o monitoramento 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 (²³⁵U). 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. A partir do desenvolvimento do sistema de aquisição de dados no reator TRIGA IPR-R1, tornou-se fácil a análise dos vários parâmetros envolvidos na operação deste reator, entre eles a potência dissipada no trocador de calor. Após algumas horas de operação do reator, a potência dissipada no primário corresponde a praticamente toda a potência fornecida pelo núcleo. Este trabalho faz uma análise de duas operações de longa duração efetuadas no TRIGA IPR-R1 e compara os resultados do monitoramento da potência dissipada no primário com os resultados da calibração da potência realizada em março de 2009.

Nos dias 03.07.2009 e 13.08.2009, foram irradiados amostras no reator TRIGA IPR-R1 por cerca de 12 horas, em cada operação, à potência de 100 kW. As irradiações iniciaram-se no período da tarde, sendo a maior parte das operações realizadas à noite. O objetivo das operações foi uma prestação de serviço de irradiação de amostras de Na₂CO₃/Na-24 para a Eletronuclear, para serem injetados nos geradores de vapor da Usina de Angra I. Como as operações foram de grande duração e realizadas à noite, quando são menores às flutuações da temperatura ambiente, as condições mostraram-se ideais para avaliação a potência térmica do núcleo, pelo balanço de energia dissipada no circuito primário de refrigeração. O método do balanço térmico, que é o padrão de calibração de potência para o IPR-R1, consiste no balanço térmico do circuito primário de refrigeração em estado estacionário. Apesar do objetivo da operação não ter sido a realização da calibração da potência do reator, os principais parâmetros operacionais foram monitorados e arquivados pelo Sistema de Aquisição de Dados desenvolvido para o reator. Atualmente, todas as operações do IPR-R1 são registradas por este sistema supervisorio, conforme determinação do Relatório de Análise de Acidentes do TRIGA IPR-R1 (CDTN/CNEN, 2008). Estes registros têm sido utilizados para análise e cálculos da evolução das variáveis neutrônicas e termohidráulicas envolvidos na operação do reator. Os valores de potência obtidos nas duas irradiações, enquanto prevaleceu o estado estacionário, foram comparados com os resultados da calibração da potência realizada em março deste ano e apresentaram resultados coincidentes desta calibração, dentro da margem de incerteza da metodologia utilizada ($\pm 6\%$).

2. POTÊNCIA PELO MÉTODO DO BALANÇO TÉRMICO

A metodologia de medida da potência pelo balanço térmico consiste na medida da potência dissipada no circuito primário de refrigeração, adicionada 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 temperatura da água do poço estiver da temperatura ambiente. 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 (Mesquita et. al., 2007).

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

$$q = \dot{m} c_p \Delta T \quad . \quad (1)$$

Onde \dot{m} é a vazão de massa do refrigerante no primário, c_p é o 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 (Miller, 1989).

2.1. Perdas de Calor entre o Poço e o Meio Ambiente

O reator TRIGA IPR-R1 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 encontra-se 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. Nos experimentos específicos que são realizados para a calibração da potência dissipada pelo núcleo, as equações de transferência de calor por condução são inseridas no programa do sistema de aquisição de dados. Estas equações calculam as perdas em função dos valores de temperatura da água do poço, do ar e do solo, e consideram 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.

Nas irradiações normais do IPR-R1 não são monitoradas a temperatura e a umidade relativa do ar da sala do reator, assim como a temperatura do solo em torno do poço. Portanto, o programa de aquisição de dados não realiza os cálculos conforme descrito no parágrafo anterior. Nestas operações, a perda de calor para o ambiente é então estimada em 1,25% da potência térmica, que é o valor médio obtido nos experimentos específicos de calibração. Este valor é baixo devido ao fato de ser obtido em regime estacionário e com a temperatura do poço ajustada o mais próximo possível da temperatura ambiente, para que as perdas de calor sejam minimizadas.

3. INSTRUMENTAÇÃO

A Figura (1) mostra o diagrama do circuito de refrigeração e a distribuição da instrumentação do IPR-R1. Um termopar está posicionado perto da superfície da água do poço. Dois termoresistores (PT-100) estão 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 em fevereiro de 2009, para a realização da calibração anual da potência, e as equações de correção obtidas foram adicionadas ao programa do sistema de aquisição de dados. Para a medida da potência dissipada no secundário, utilizaram-se também dois termoresistores e a vazão foi mantida constante e lida por um rotâmetro.

A instrumentação que monitorou os demais parâmetros durante a operação também pode ser vista no diagrama da Fig. (1). Dentre estes parâmetros podem-se citar: níveis de radiação no ambiente do reator, nível da água do poço, potências medidas pelas câmaras detectoras de nêutrons e posição das barras de controle.

Os sinais dos sensores são enviados a uma placa eletrônica amplificadora/multiplexadora que faz ainda a compensação das temperaturas dos termopares (junta fria). Em seguida, os sinais são direcionados à uma placa de aquisição de dados, instalada em um computador, que faz a conversão analógico/digital permitindo a visualização e o registro dos dados. Todos os parâmetros são obtidos fazendo-se uma média de 120 leituras à uma taxa de 1 Hz. Os desvios padrões das médias também são calculados (Mesquita e Rezende, 2004).

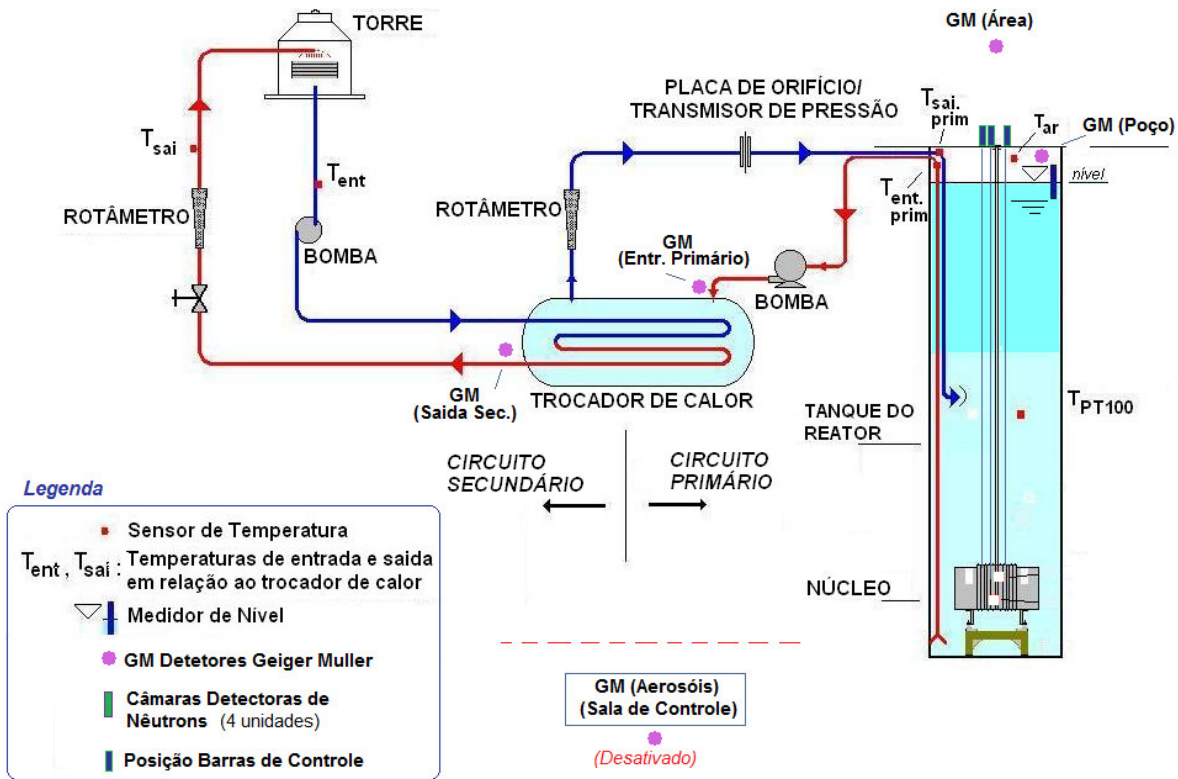


Figura 1. Circuito de refrigeração do reator TRIGA IPR-R1 e distribuição da instrumentação.

4. RESULTADOS

4.1. Monitoramento da Potência na Irradiação do Dia 03.07.2009

O reator operou por um período de aproximadamente 13 horas. As potências dissipadas nos circuitos primário e secundário foram monitoradas pelo sistema de aquisição de dados que só foi acionado após o reator ter ficado crítico. Considerou-se o melhor período de equilíbrio térmico (estado estacionário) entre 11 e 12 horas após o início da irradiação (cerca de 4h da manhã). A Figura (2) mostra a evolução dos seguintes parâmetros: potências dissipadas nos circuito primário e secundário e a potência do canal neutrônico linear. O período que se considerou como o de melhor equilíbrio térmico (últimos 74 min) é destacado no gráfico. A Figura (3) mostra a evolução das temperaturas da água do poço e do ambiente durante todo o período de duração dos experimentos. Na primeira linha da Tabela (1) são apresentados alguns parâmetros registrados durante o estado estacionário. A potência obtida na irradiação do dia 03.07.2009 pelo balanço térmico no primário foi de 104,1 kW ($\pm 6,2$ kW).

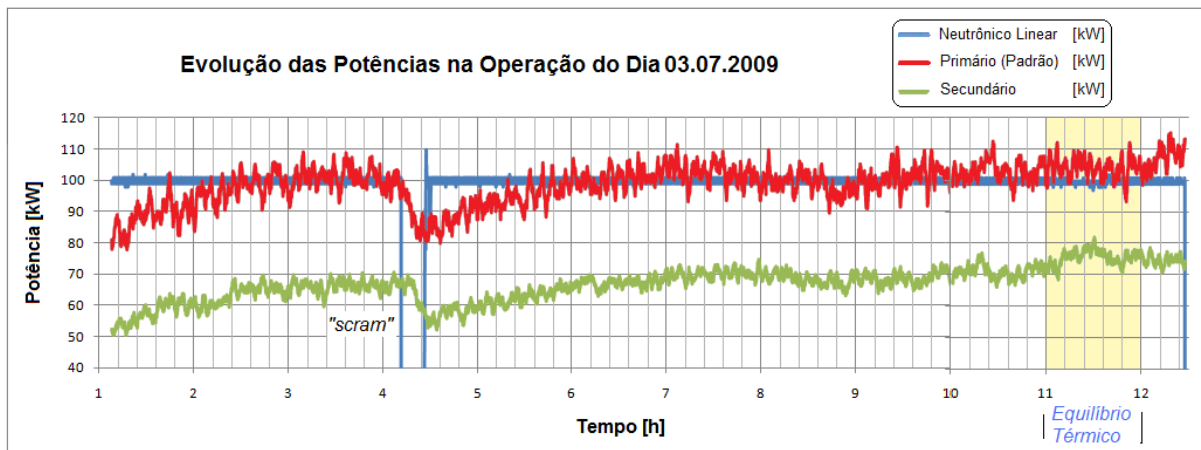


Figura 2 – Registros da Potência pelo Canal Neutrônico Linear e pelo Primário e Secundário do Sistema Forçado de Refrigeração na Operação do dia 03.07.2009.

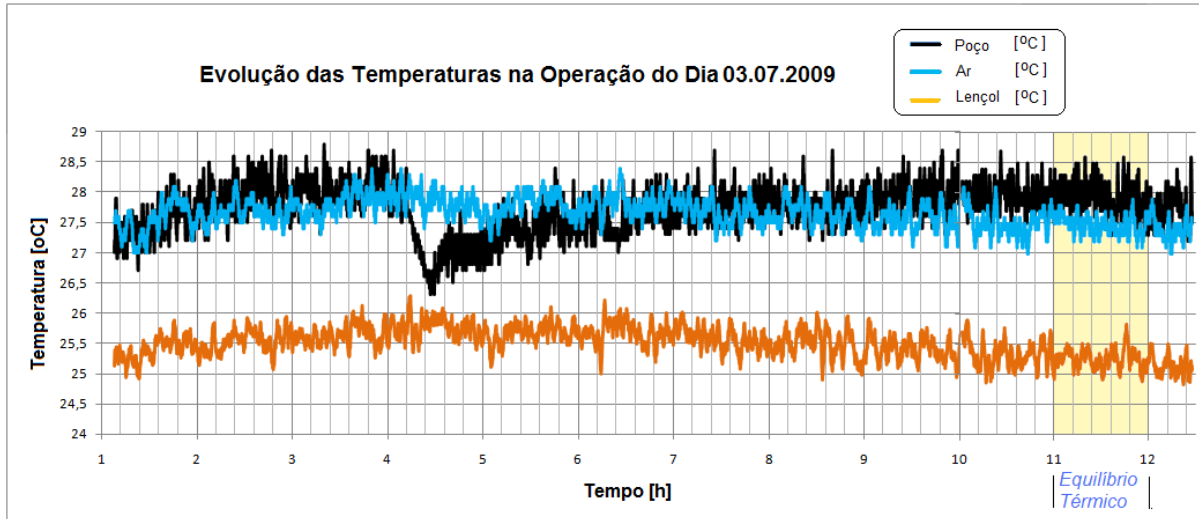


Figura 3 – Registros das Temperaturas do Poço e do Ambiente durante a Operação do dia 03.07.2009.

4.2. Monitoramento da Potência na Irradiação do Dia 13.08.2009

Nesta operação o reator irradiou amostras por um período de 12 horas. Considerou-se o melhor período de estabilidade de 10 a 12 horas após o início da operação, que terminou por volta das 4h da manhã. Na Figura (4) tem-se a evolução das potências durante toda a operação, destacando-se o período que foi considerado como o de melhor estabilidade. A Figura (5) mostra a evolução das temperaturas durante todo o período de duração dos experimentos. Alguns dados coletados na irradiação deste dia são mostrados na segunda linha da Tabela (1). A potência obtida foi de 107,3 kW ($\pm 6,4$ kW).

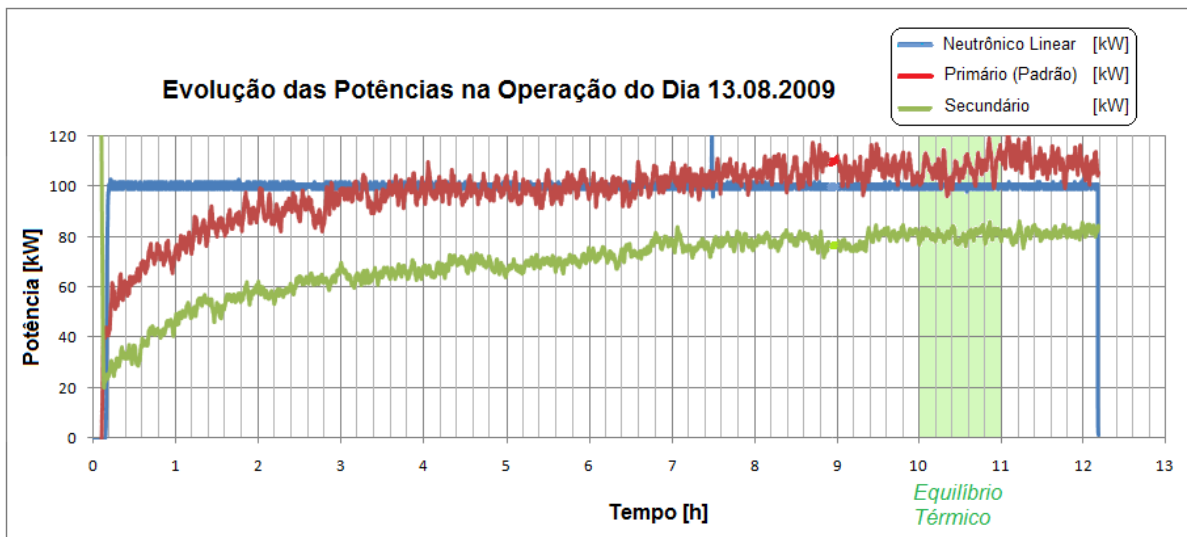


Figura 4 – Registros da Potência pelo Canal Neutrônico Linear e pelo Primário e Secundário do Sistema Forçado de Refrigeração na Operação do dia 13.08.2009.

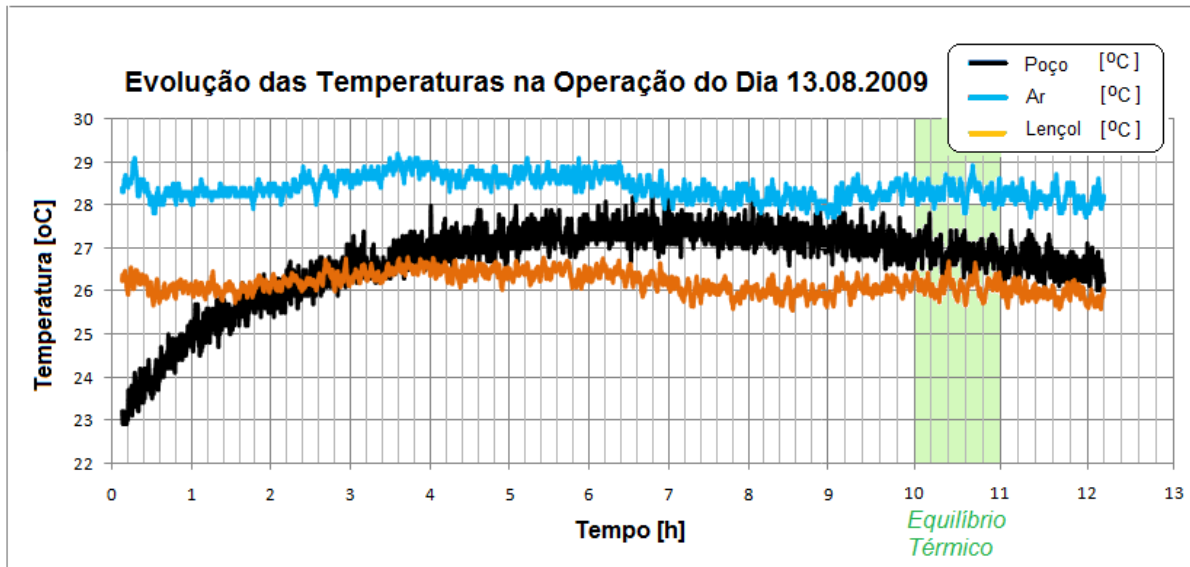


Figura 5 – Registros das Temperaturas do Poço e do Ambiente durante a Operação do dia 13.08.2009.

4.3. Monitoramento da Potência na Calibração Térmica realizada em Dia 05.03.2009

No dia 5 de março de 2009 foi realizada a calibração anual da potência do reator TRIGA, conforme determinação do seu Relatório de Análise de Segurança e de seu Manual de Operação (CDTN/CNEN, 2008 e 2007). O reator foi mantido crítico à potência de 100 kW (indicação do canal neutrônico linear) por um período de cerca de 8,5 horas. Inicialmente o reator operou por um período de cerca de 2 horas, com o circuito de refrigeração forçada desligado, realizando-se um experimento para avaliação da potência pelo método calorimétrico (Mesquita et al., 2009). Após a realização do experimento pelo método calorimétrico, o reator foi mantido crítico à potência de 100 kW, 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 o experimento de calibração da potência pelo método do balanço térmico nos circuitos primário e secundário de refrigeração.

Após 7 horas de operação, as várias temperaturas permaneceram em estado estacionário por 74 min (de 22:00 h até as 23:24 h). A Figura (6) mostra as potências dissipadas no circuito primário e secundário, a partir do acionamento do sistema de refrigeração forçada. O gráfico mostra, também, a potência monitorada pelo canal neutrônico linear (mantido em 100 kW). A Figura (7) mostra a evolução das temperaturas durante todo o período de duração dos experimentos (método calorimétrico e método do balanço térmico). Na última linha da Tabela (1) são apresentados alguns parâmetros registrados durante o período de estabilidade. A potência obtida pelo balanço térmico no primário foi de 112 kW ($\pm 5,9\%$).

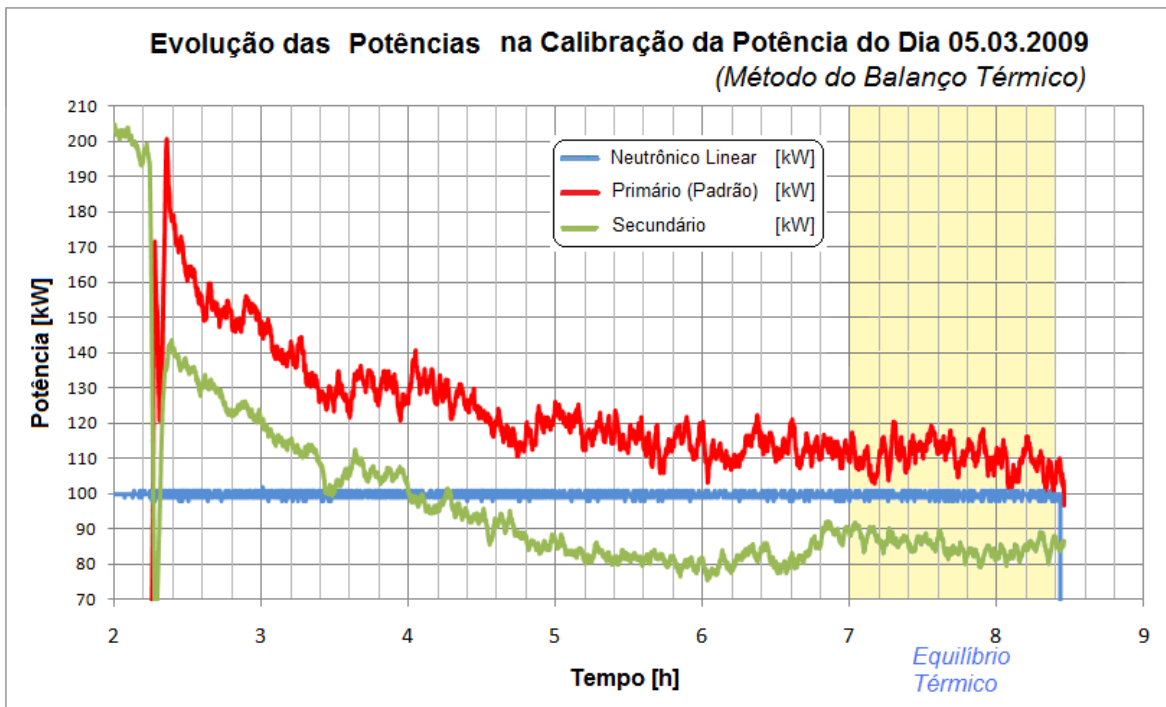


Figura 6 – Evolução das Potências durante a Calibração Térmica do dia 05.03.2009.

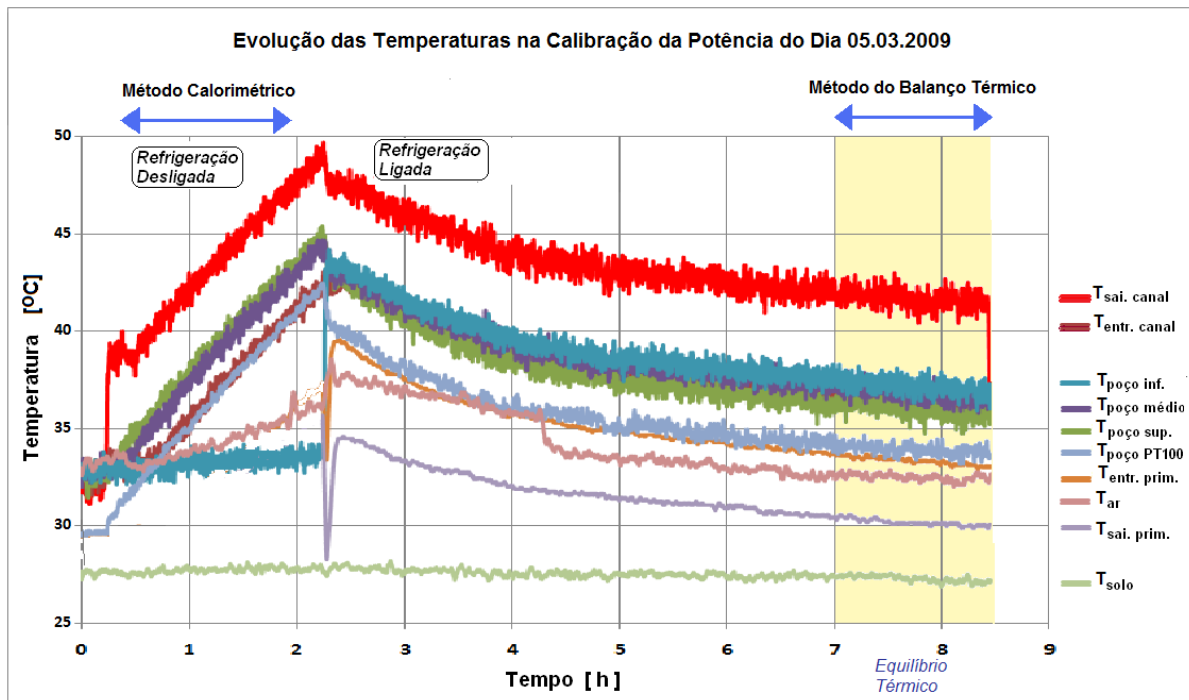


Figura 7 – Evolução da Temperaturas durante a Calibração Térmica do dia 05.03.2009.

A Tabela (1) mostra os resultados consolidados das três operações, ou sejam: as irradiações do dia 03.07.2009 e do dia 13.08.2009 e os resultados do experimento realizado em março para a calibração anual do potência do TRIGA IPR-R1. As perdas térmicas da água do poço em todos os testes foi de aproximadamente: 1,4 kW o que corresponde a cerca de 1,25% da potência total.

Tabela 1. Parâmetros e resultados do monitoramento da potência pelo método do balanço térmico.

Data e Duração	Vazão Média Primário [m ³ /h]	Temperatura Média na Entrada do Primário [°C]	Temperatura Média na Saída do Primário [°C]	Potência Primário [kW]	Desvio Padrão Potência Primário [kW]	Potência Secundário ⁽¹⁾ [kW]	Potência ⁽²⁾ Reator [kW]
03.07.2009 13h	30,27	27,4	24,4	102,8	±3,2	75,8	104,1
13.08.2009 12h	30,81	26,3	23,3	106,0	±4,2	80,9	107,3
05.03.2009 8:30 h	30,09	33,4	30,2	110,6	± 4,0	85,2	112,0 ⁽³⁾

⁽¹⁾ Medida apenas como referência.

⁽²⁾ Potência incluindo as perdas térmicas.

⁽³⁾ Valor padrão atual

5. CONCLUSÕES

Os dois parâmetros mais importantes de um reator nuclear, tanto de pesquisa quanto de produção de energia, são a potência térmica fornecida pelas fissões de ²³⁵U no núcleo e a temperatura provocada por estas fissões nos combustíveis. Sendo assim, as agências internacionais e os órgãos reguladores ligados a energia nuclear recomendam a adoção destes dois parâmetros como sendo os principais limites operacionais (*OLC- Operational Limit Conditions*) de um reator (IAEA, 2008 e 2005, ANSI/ANS, 1990 e 1996). Particularmente para reatores nucleares de pesquisa, a calibração de potência térmica é importante para a segurança operacional do reator, para o conhecimento preciso do fluxo de nêutrons utilizado nos experimentos por irradiação e para o cálculo da quantidade combustível (²³⁵U) 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.

O Relatório de Análise de Segurança e o Manual de Operação do TRIGA IPR-R1 determinam que seja realizada a calibração da potência dissipada pelo núcleo pelo menos em vez por ano (CDTN/CNEN, 2008 e 2007). O último experimento específico para calibração da potência do IPR-R1 foi realizado em março de 2009 (Mesquita et al., 2009). Neste experimento as cadeias de medição de temperatura e de vazão do refrigerante são calibradas e as equações de correção são adicionadas ao programa do sistema de aquisição de dados. Além disto, existe mais rigor no monitoramento das condições ambientais, principalmente para o cálculo das perdas de calor da água do poço. O método de cálculo de potência pelo balanço térmico no circuito primário é o padrão de calibração da potência do reator nuclear 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 (Mesquita e Rezende, 2009), (Mesquita e Souza, 2008 e 2009). A evolução dos parâmetros é visualizada em tempo real e os valores registrados automaticamente.

Nos dias 03.07.2009 e 13.08.2009, foram realizadas duas irradiações de longa duração no TRIGA IPR-R1. Apesar destas operações não terem como objetivo a calibração da potência, foram operações realizadas à noite e atingiu-se um bom equilíbrio térmico com o meio ambiente. Como a potência dissipada no trocador de calor é monitorada atualmente em todas as operações, os valores registrados foram comparados com o experimento de calibração da potência realizada em março/2009. O valor da potência obtido pelo método do balanço térmico foi de $(112 \pm 6,6)$ kW. Concluiu-se que a potência fornecida pelo núcleo mantém-se dentro da margem de incerteza calculada para a metodologia adotada. O valor da incerteza obtida é da ordem de grandeza de experimentos semelhantes realizados em outros reatores de pesquisa (Zagar et al., 1999, Cárdenas e Rodrigues, 2000 e Breymesser et al., 1995).

6. AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos à FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais e ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio financeiro.

7. REFERÊNCIAS

ANSI/ANS – American National Standard/American Nuclear Society, 1996, “Format and Content for Safety Analysis Reports for Research Reactors”. ANSI/ANS-15.21, Illinois.

- ANSI/ANS – American National Standard/American Nuclear Society, 1990, “The Development of Technical Specifications for Research Reactors”. ANSI/ANS-15.1, Illinois.
- Bremmner, A. et al., 1995, “Thermal power calibration of the TRIGA reactor Wien”, Proceedings of the 2ND Regional Meeting: Nuclear Energy In Central Europe, Nuclear Society of Slovenia, Portoroz, p. 44-47.
- Cárdenas, J.P.N. and Rodrigues, V.G., 2000, “Continuous Thermal Balance Monitoring for IEA-R1 Reactor Power Determination”, Progress Reporter IPEN, São Paulo, pp 84-85.
- CDTN/CNEN, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear/Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2007, “Manual de Operação do Reator TRIGA IPR-R1”. Belo Horizonte: CDTN, MO/TRIGA-IPR-R1/CDTN.
- CDTN/CNEN, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear/Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2008, “Relatório de Análise de Acidentes do Reator TRIGA IPR-R1”. Belo Horizonte, RASIN/TRIGA-IPR-R1/CDTN.
- Figliola, R.S. and Beasley, D.E., 1991, “Theory and Design for Mechanical Measurements”, John Wiley & Sons, New York.
- Holman, J.P., 1998, “Experimental Methods for Engineers”, 7th ed. McGraw-Hill Book Company, Boston.
- IAEA - International Atomic Energy Agency, 2008, “Operational Limits and Conditions and Operating Procedures for Research Reactors”. Safety Guide no. NS-G-4.4, Vienna.
- IAEA - International Atomic Energy Agency, 2005, “Safety of Research Reactors”, IAEA Safety Standard Series No. NS-R-4 Safety Requirements, Vienna.
- 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.
- Mesquita, A.Z.; Rezende, H.C.; Souza, R.M.G.P., 2009, “Thermal Power Calibrations of the IPR-R1 TRIGA Nuclear Reactor. CDTN/CNEN, Proceedings of the 20th International Congress of Mechanical Engineering - COBEM 2009, Vol. 1, Gramado-RS, Brazil, pp. 41-44.
- Mesquita, A.Z.; Rezende, H.C., 2009, “Thermal Methods for On-Line Power Monitoring of the IPR-R1 TRIGA Reactor”, Progress in Nuclear Energy, Elsevier Ltd. DOI: 10.1016/J.PNUCENE.2009.05.006.
- Mesquita, A.Z.; Rezende, H.C.; Tambourgi, E.B., 2007, “Power Calibration of the TRIGA Mark I Nuclear Research Reactor”. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v. XXIX, p. 240-245. (DOI: 10.1590/S1678-58782007000300002).
- Mesquita, A.Z. and Rezende, H.C., 2004, “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.
- Mesquita, A.Z.; Souza, R.M.G.P., 2009, “On-Line Monitoring of the IPR-R1 TRIGA Reactor Neutronic Parameters”. Progress in Nuclear Energy, Elsevier Ltd. DOI: 10.1016/j.pnucene.2009.05.006.
- Mesquita, A.Z.; Souza, R.M.P.G., 2008, “The Operational Parameter Electronic Database of the IPR-R1 TRIGA Research Reactor”, Proceedings of 4th World TRIGA Users Conference, 08.9.-10.9.2008 Lyon, France/EU.
- Miller, R.W., 1989, “Flow Measurement Engineering Handbook”, 2nd. Ed. New York, McGraw-Hill Publishing Company. p. E19-E21.
- Zagar, T; Ravnik and M; Persic, A. 1999, “Analysis of Reactor Thermal Power Calibration Method”. In International Conference Nuclear Energy Central Europe’99, Portoroz, Slovenia. pp. 91-98.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

REAL TIME POWER MONITORING OF A NUCLEAR RESEARCH REACTOR BY THERMAL BALANCE

Amir Zacarias Mesquita, amir@cdtn.br¹
Hugo Cesar Rezende, hcr@cdtn.br¹

¹Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear/Comissão Nacional de Energia Nuclear (CDTN/CNEN), CEP: 31.270-901 Campus da UFMG – Pampulha, Belo Horizonte – MG.

***Abstract.** A data acquisition system for monitoring and recording the operational parameters was developed in 2004 for the IPR-R1 TRIGA nuclear reactor, which is located in Belo Horizonte. All operations of this reactor are recorded now by this system. These records have been used for analysis and calculations of the evolution of several neutronics and thermal-hydraulics parameters involved in the reactor operation. The standard thermal power calibration methodology of this reactor is the steady state heat balance in the primary cooling system. This paper analyzes two recent operations of the TRIGA IPR-R1 and compares the recorded results for the power dissipated through the primary cooling loop with the results of the power calibration held in March 2009. The results agreed with the results of the thermal power calibration within the uncertainty of this methodology ($\pm 6\%$).*

Keywords: thermal power, research nuclear reactor, thermal balance, heat transfer