



8º CONGRESO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECANICA

Cusco, 23 a 25 de Outubro de 2007

CANAIS DE MEDIDA DE POTÊNCIA DO REATOR NUCLEAR DE PESQUISA TRIGA IPR-R1 POR PROCESSOS TÉRMICOS

Amir Zacarias Mesquita*, Hugo Cesar Rezende**

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN/CNEN, Belo Horizonte – Brasil, Caixa Postal 941

*amir@cdtn.br, **hcr@cdtn.br

RESUMO

O Reator Nuclear de Pesquisa TRIGA IPR-R1 do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, está localizado em Belo Horizonte (Brasil). Como todo reator TRIGA, seu núcleo está posicionado em uma piscina e os elementos combustíveis são refrigerados por circulação natural de água leve. A remoção de calor por este processo é eficiente na atual potência de 250 kW. Entretanto, existe um sistema forçado de remoção de calor da água do poço utilizado, principalmente, para reduzir o nível de radiação na sala do reator. A água é bombeada através de um trocador de calor, onde o calor é transferido do circuito primário para o circuito secundário. A monitoração de potência dos reatores nucleares é sempre realizada por instrumentos que medem o fluxo de nêutrons. No Reator IPR-R1 a potência é medida por quatro canais nucleares, cujos sensores primários são três câmaras de ionização e uma câmara de fissão. Este trabalho apresenta os resultados e a metodologia desenvolvida para monitoração, em tempo real, da potência do reator IPR-R1, por meios térmicos. Um dos métodos é a monitoração das temperaturas do elemento combustível e do poço. Outros dois métodos consistem no balanço térmico, em estado estacionário, dos circuitos primário e secundário de refrigeração forçada do reator.

PALAVRAS CHAVE: Potência, combustível nuclear instrumentado, reator nuclear TRIGA, termopares.

CÓDIGO: 61

INTRODUÇÃO

O Reator Nuclear TRIGA IPR-R1, do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN, é um modelo *Mark I*, fabricado pela *General Atomic* de San Diego – Califórnia, refrigerado por água leve desmineralizada e tendo como combustível urânio enriquecido a 20% em ^{235}U . Foi projetado para treinamento, pesquisa e ativação neutrônica de materiais e produção de radioisótopos. Os reatores TRIGA (*Training, Research, Isotopes, General Atomic*) são caracterizados pela sua segurança intrínseca devido, principalmente, ao grande coeficiente negativo de temperatura/reactividade. Isto significa que um aumento da potência leva a um conseqüente aumento da temperatura da mistura combustível-moderador, causando o aparecimento de uma reatividade negativa que amortece gradualmente a taxa de aumento de potência e esta tende a se estabilizar. Outra característica de segurança dos reatores TRIGA é a alta retenção dos produtos de fissão no combustível, mesmo que o revestimento venha a sofrer falha, e um sistema passivo de remoção de calor no núcleo durante as operações.

O IPR-R1 é um reator nuclear de pesquisa do tipo piscina, refrigerado por circulação natural. Existe, entretanto, um sistema de refrigeração forçada do poço dotado de circuito primário e circuito secundário, que é utilizado para reduzir a temperatura do poço e, principalmente, para diminuir o nível de radiação ionizante na sala do reator. A Figura 1 mostra duas fotografias do poço e do núcleo do reator e a Figura 2 mostra um diagrama em corte do poço e a configuração do núcleo.

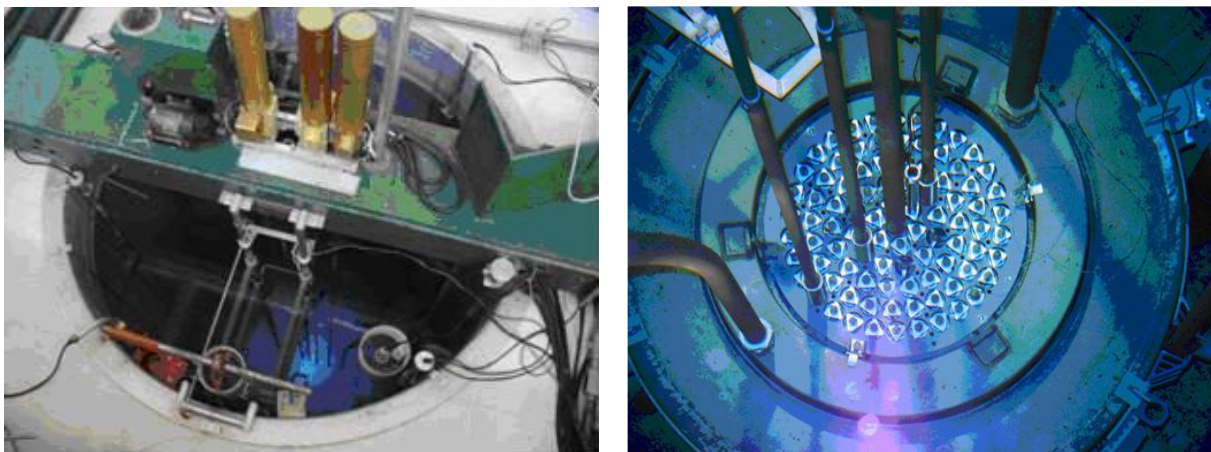


Fig. 1: Poço e núcleo do Reator Nuclear de Pesquisa TRIGA IPR-R1.

O núcleo do reator encontra-se atualmente carregado com 59 combustíveis com revestimento em alumínio e 5 combustíveis com revestimento em aço inoxidável. Um dos combustíveis com revestimento de aço possui em seu eixo central três termopares do tipo K (cromel/alumel). Este combustível instrumentado foi colocado no núcleo para possibilitar a realização de testes termohidráulicos, com o intuito de avaliar a performance do Reator IPR-R1 em operações em estado estacionário na nova potência máxima de 250 kW [1] Realizaram-se várias medidas de temperaturas com o combustível instrumentado posicionado nos vários anéis do núcleo e em diferentes níveis de potências. Como resultado dos experimentos três novos processos de medida de potência por meios térmicos foram desenvolvidos, possibilitando o acompanhamento em tempo real da potência fornecida pelo núcleo.

CANAIS DE MEDIDA DE POTÊNCIA UTILIZANDO MÉTODOS NEUTRÔNICOS

A monitoração da potência dos reatores nucleares é sempre feita por meio de detectores nucleares os quais são calibrados por meios térmicos. No Reator IPR-R1 existem quatro câmaras sensíveis aos nêutrons posicionadas em torno do núcleo para medidas de fluxo neutrônico. O tipo de câmara usada e sua posição com relação ao núcleo determina a faixa de fluxos de nêutrons medidos, conforme descrito a seguir:

- Canal de partida; consiste de uma câmara de fissão (^{235}U) com um amplificador de pulso que alimenta um circuito com indicador logarítmico, monitorando a evolução da taxa de nêutrons na partida do reator desde o nível da fonte até uns poucos watts (corresponde a uma taxa de contagem de 1 a 10^5 cps).
- Canal logarítmico; consiste de uma câmara de ionização compensada que alimenta um amplificador logarítmico. O sinal vai para os medidores de potência que indicam desde aproximadamente 0,1 W até a potência máxima em escala

logarítmica cobrindo nove décadas (de 10^{-3} a 10^6 W). As indicações da velocidade do crescimento neutrônico (período) e a reatividade do sistema também provêm deste canal.

- Canal linear; consiste de uma câmara de ionização compensada que alimenta um amplificador linear. O sinal vai para comutador de escalas (10^{-3} a 10^5 W) onde se pode alterar a sensibilidade da medida, permitindo medir com precisão desde o nível da fonte até o nível de potência máxima.

- Canal percentual, consiste de uma câmara de ionização não-compensada que envia o sinal aos indicadores de potência calibrados em porcentagem (0 a 120%) da potência máxima.

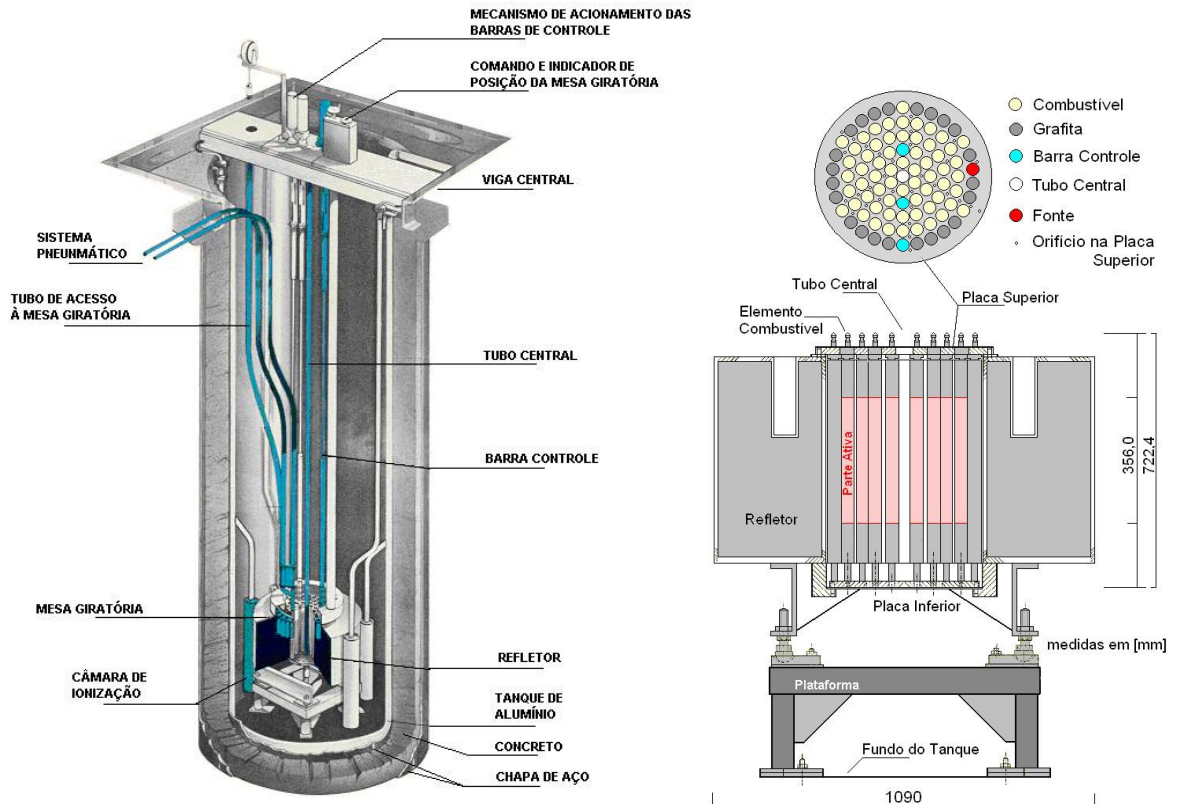


Fig. 2: Vista em corte do poço e diagrama do núcleo do Reator TRIGA IPR-R1.

A instrumentação nuclear é utilizada para detectar os nêutrons na partida do reator (multiplicação subcrítica) e após alcançar a criticalidade monitorando a variação do fluxo neutrônico para permitir o controle automático da reatividade e manter a potência estável.

Infelizmente as câmaras de ionização detectam o fluxo de nêutrons termalizados apenas em sua vizinhança. Este sinal nem sempre é proporcional ao fluxo integral no núcleo e consequentemente à potência gerada. Além disso a resposta de cada detector nuclear é sensível a mudança na configuração do núcleo e, principalmente, na posição das barras de controle. Isto é importante nos reatores TRIGA por não terem um absorvedor de reatividade distribuído na água do núcleo e o controle da reatividade e a manutenção da criticalidade é feita pela inserção de barras de controle [2].

CANAIS DE MEDIDA DE POTÊNCIA UTILIZANDO PROCESSOS TÉRMICOS

Medida de potência pelo balanço térmico

O núcleo do reator é refrigerado pela convecção natural da água desmineralizada do poço. O calor é removido da água do poço e liberado para o ambiente por meio de um circuito de refrigeração dotado de circuito primário, circuito secundário e torre de refrigeração (Fig. 3). A temperatura da água do poço depende da potência de operação do reator assim como da temperatura ambiente, devido à dissipação de calor na torre de refrigeração. A potência total dissipada é determinada fazendo-se o balanço térmico do refrigerante nas entradas e saídas dos circuitos primário e

secundário e avaliando as fugas de calor. Esta perdas de calor representam uma pequena fração da potência total (cerca de 1,5% da potência total), conforme descrito em na referência [3].

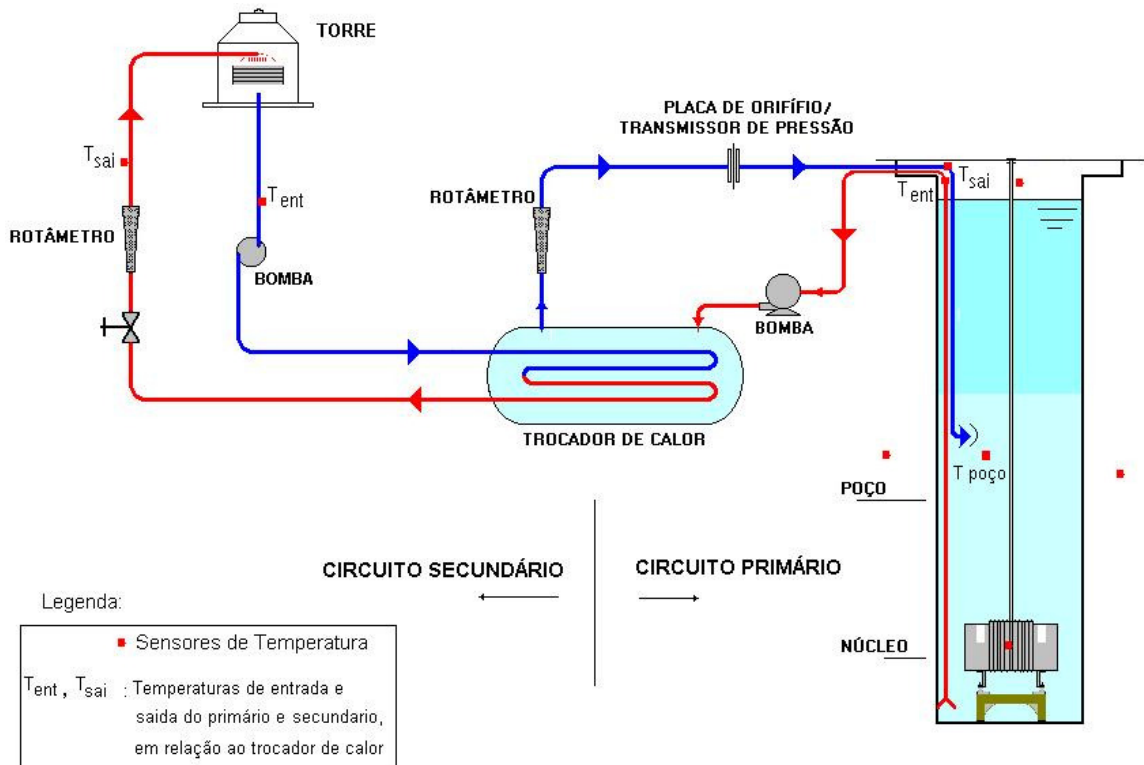


Fig. 3: Circuito de refrigeração forçada do Reator TRIGA IPR-R1.

As temperaturas de entrada e saída do refrigerante são medidas por quatro termoresistores de platina (PT-100), posicionados na entrada e saída das tubulações dos circuitos primário e secundário. A vazão da água do primário é medida pela queda de pressão em uma placa de orifício acoplado a um transmissor diferencial de pressão. No circuito secundário a vazão é medida por um rotâmetro. O transmissor de pressão foi calibrado e a equação de ajuste obtida foi adicionada ao programa do sistema de aquisição de dados. As linhas de medidas de temperatura foram calibradas como um todo, incluindo sensores, cabos, cartões de aquisição de dados e computador. As equações ajustadas também foram adicionadas ao programa de aquisição de dados.

A potência dissipada no circuito de refrigeração será o mais próximo da potência do reator, quanto mais próximo a temperatura da água do poço estiver da temperatura do meio ambiente. O estado estacionário é alcançado depois de algumas horas de operação do reator, quando então a potência dissipada no circuito de refrigeração adicionada às perdas, será igual a potência do núcleo.

A incerteza na medida de potência considera a propagação das incertezas de todos os parâmetros primários, conforme a metodologia descrita na referência [4]. A incerteza é calculada somente para a potência dissipada no circuito primário pois esta é atualmente o método padrão de medida de potência para o Reator TRIGA IPR-R1 [5].

A potência térmica dissipada nos circuitos primário e secundário são obtidas através do balanço térmico dado pela equação:

$$q_{refr} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (1)$$

Onde q_{refr} é a potência dissipada em cada circuito de refrigeração, \dot{m} é a vazão do refrigerante nos circuitos, c_p é o calor específico do refrigerante (água), e ΔT a diferença entre as temperaturas de entrada e saída nos circuitos.

O programa do sistema de aquisição de dados calcula as potências dissipadas nos circuitos primário e secundário com os parâmetros coletados utilizados na Equação (1), com os valores de \dot{m} and c_p corrigidos em função da temperatura do refrigerante [6].

Para o cálculo das fugas de calor, utiliza-se uma termoresistor (PT-100) posicionado no centro do poço para a medida da temperatura média da água. Um termopar tipo K foi posicionado a cerca de 20 cm acima da superfície do poço

para a medida da temperatura do ar na sala do reator. Dois termopares do tipo K foram distribuídos a 3 m de profundidade em torno do poço através de furos existentes no pisos, para a medida da temperatura do solo. O núcleo do Reator IPR-R1 situa-se no fundo de um poço cilíndrico com 6,625 m de profundidade e 1,92 m de diâmetro. A superfície do poço situa-se a 25 cm abaixo do piso da sala. A água do poço do reator transfere calor para o meio ambiente por condução para solo através das paredes laterais e do fundo do poço e por convecção e evaporação para o ar da sala através da superfície da água. Todas estas perdas são calculadas pelo programa de aquisição de dados conforme descrito na referência [3].

A Figura 4 mostra a evolução da potência nos circuitos primário e secundário durante uma operação do reator. A Tabela 1 apresenta os resultados do balanço térmica desta operação e alguns dados experimentais.

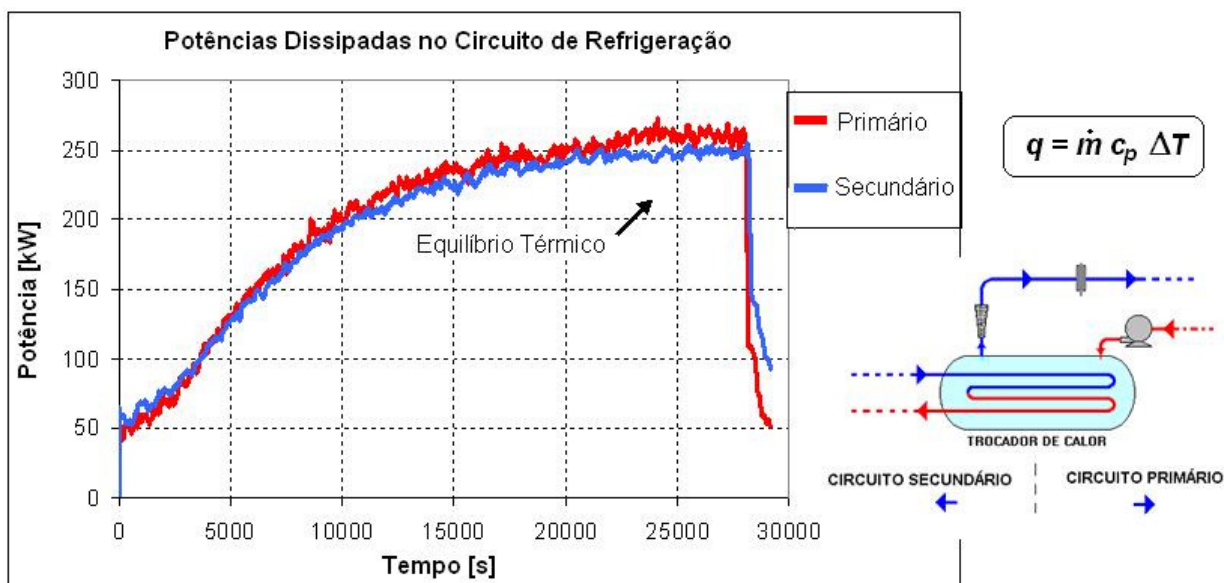


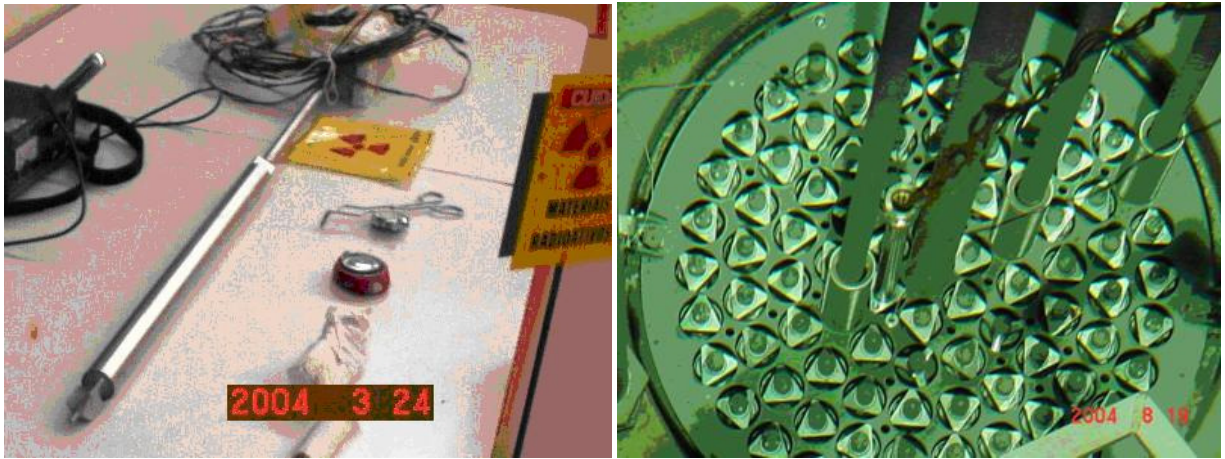
Fig. 4: Evolução das potências dissipadas nos circuitos de refrigeração primário e secundário.

Tabela 1: Balanço térmico do Reator TRIGA IPR-R1

Vazão média do refrigerante no circuito primário	$32,7 \pm 0,4$ m ³ /h
Temperatura média do refrigerante na entrada do primário	$41,7 \pm 0,3$ °C
Temperatura média do refrigerante na saída do primário	$34,8 \pm 0,3$ °C
Potência dissipada no circuito primário	261 kW
Perdas térmicas na piscina do reator	3,8 kW
Potência térmica do reator	265 kW
Desvio padrão	3,7 kW
Incerteza na medida da potência térmica	± 19 kW ($\pm 7,2\%$)
Potência dissipada no circuito secundário	248 kW

Medida de potência pela medida da temperatura do combustível e do poço

Um combustível instrumentado foi colocado no núcleo para experimentos termohidráulicos de avaliação da performance do Reator IPR-R1 [1]. O combustível instrumentado é igual ao combustível com revestimento de inox mas é equipado com três termopares de chromel-alumel fixados em seu eixo central de zircônio. As juntas quentes dos termopares estão localizadas no centro e espaçadas longitudinalmente em 25,4 mm entre si. A Figura 5 mostra em a) o elemento combustível instrumentado antes de ser posicionado no núcleo e em b) pode-se ver o elemento combustível instrumentado posicionado no anel B do núcleo. Na Figura 6 tem-se um diagrama e um desenho do combustível instrumentado. Na Tabela 2 encontram-se alguns dados deste elemento combustível [7].



a)

b)

Fig. 5: a) Elemento combustível instrumentado. b) Vista superior do núcleo com o elemento combustível instrumentado posicionado no anel B.

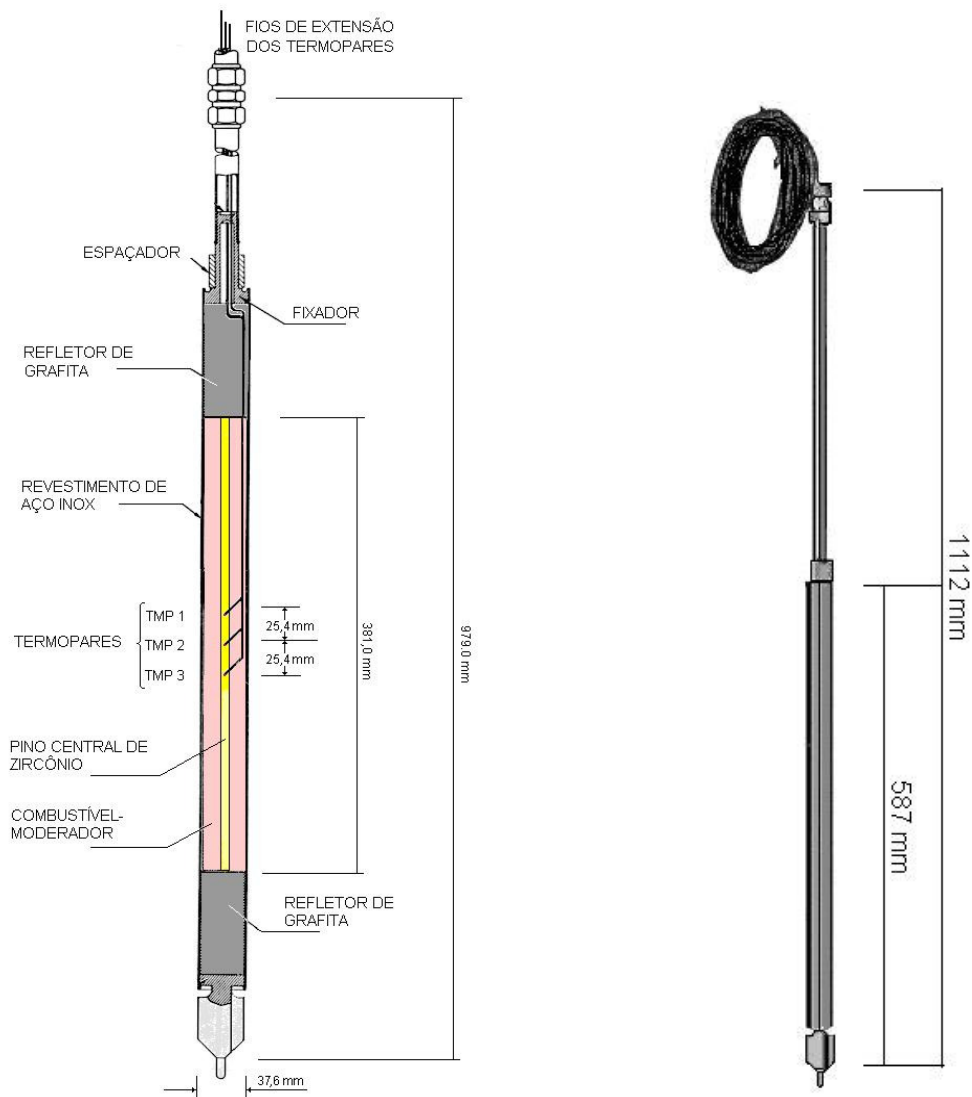


Fig. 6: Elemento combustível instrumentado.

Tabela 2: Dados do elemento combustível instrumentado

Parâmetro	Valor
Comprimento aquecido	38,1 cm
Diâmetro externo	3,76 cm
Área externa ativa do elemento combustível	450,05 cm ²
Área externa ativa do combustível (U-ZrH _{1,6})	434,49 cm ²
Volume ativo do elemento combustível	423,05 cm ³
Volume do combustível (U-ZrH _{1,6})	394,30 cm ³
Potência (total no núcleo = 265 kW)	4,518 kW

Durante os experimentos termohidráulicos observou-se que a diferença entre a temperatura do elemento combustível e a água da piscina abaixo do núcleo do reator (temperatura de entrada do circuito primário de refrigeração, Fig. 3) mantinha-se constante, como pode ser observado na Fig. 7 para a potência de 265 kW.

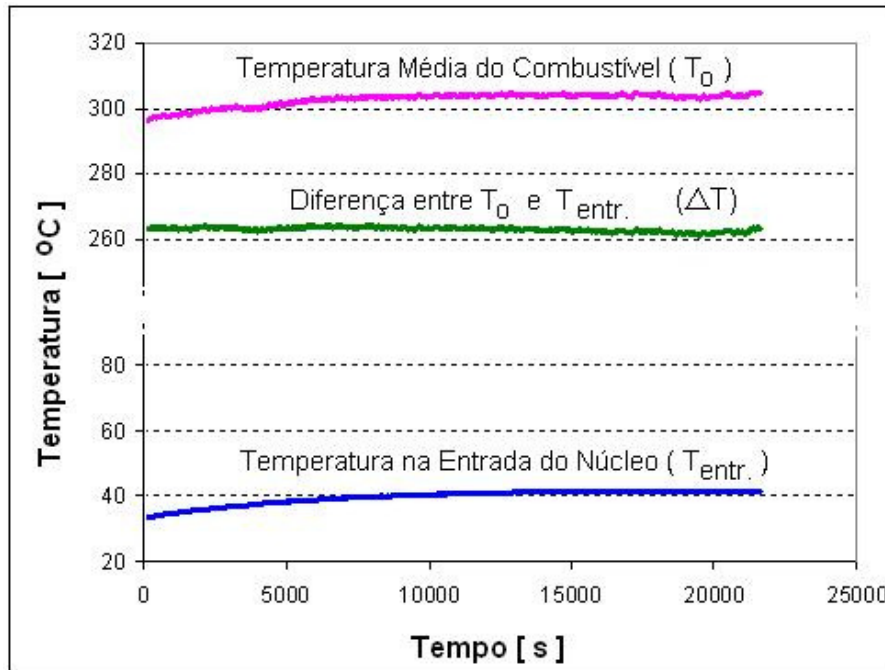


Fig. 7: Evolução das temperaturas do combustível e da água abaixo do núcleo na potência de 265 kW.

Com o elemento combustível instrumentado posicionado na posição B1 do núcleo, a potência medida pelo canal neutrônico linear (com a indicação corrigida pela calibração de potência realizada) foi plotada em função da diferença de temperatura entre o combustível (média dos três termopares) e a temperatura de entrada do primário. Encontrou-se o seguinte polinômio relacionando os dois valores:

$$q = 2 \cdot 10^{-5} (\Delta T)^3 - 0,0045(\Delta T)^2 + 0,7666 \Delta T - 2,4475 \quad , \quad (2)$$

onde:

q é a potência térmica calibrada do reator em [kW] e ΔT é diferença entre a temperatura média fornecida pelos termopares do combustível instrumentado e a temperatura de entrada do primário, em [°C].

O coeficiente de determinação obtido foi um ($R^2 = 1$). A Equação (2) foi incluída no programa de aquisição de dados e este novo canal de medida de potência encontra-se disponível atualmente no Reator TRIGA IPR-R1. Após os experimentos o elemento combustível instrumentado foi mantido na posição B1 do núcleo e monitora a potência do reator e a temperatura do combustível em todas as operações. A Figura 8 compara um resultado da medida de potência utilizando o canal neutrônico linear e utilizando o canal de medida de potência pelo método da temperatura do combustível. Pode-se notar no gráfico um atraso na resposta no segundo canal devido a inércia térmica.

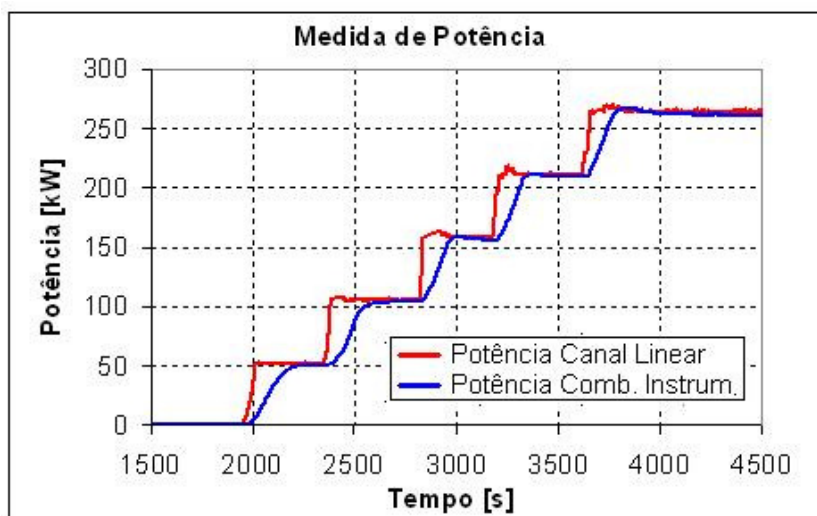


Fig. 8: Medida da potência pelo canal neutrônico linear e pelo canal de temperatura do combustível.

O limite de temperatura em estado estacionário, definido no Relatório de Análise Acidentes do Reator TRIGA IPR-R1 [5], é de 550 °C. Baseando-se apenas neste limite operacional encontra-se, utilizando a Eq. (2), uma potência acima de 1 MW para o reator alcançar esta temperatura no combustível.

Na Figura 9 tem-se uma das interfaces gráficas que podem ser visualizadas no monitor de vídeo do sistema de aquisição de dados do Reator TRIGA IPR-R1 [8]. Esta tela consolida, em tempo real, as informações dos canais de medida de potência do reator, ou sejam, os canais neutrônicos e os três novos canais que utilizam processos térmicos.

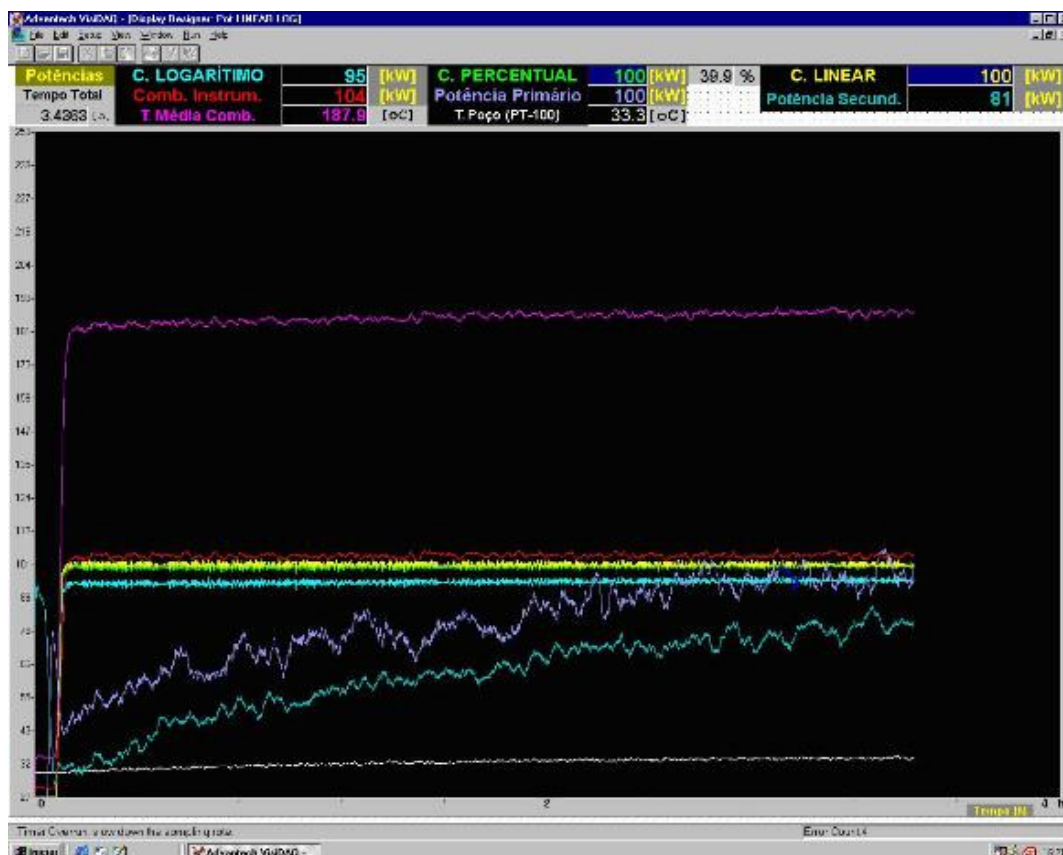


Figure 9. Monitoração em tempo real da potência do reator pelo sistema de aquisição de dados.

CONCLUSÃO

O conhecimento da potência térmica fornecida pelo núcleo de um reator nuclear é fundamental para o cálculo preciso do fluxo neutrônico e estimativa da queima do elemento combustível. A queima depende linearmente da potência térmica do reator, portanto a medida da potência com a menor incerteza possível é importante para caracterização do combustível queimado, ou seja, a determinação da massa de ^{235}U , dos produtos de fissão, da atividade do elemento combustível, do calor do decaimento radioativo e da radiotoxicidade. A metodologia de cálculo da potência pelo balanço térmico aqui apresentado, é atualmente método padrão utilizado para a calibração anual da potência do Reator TRIGA IPR-R1 [5]. O valor da incerteza encontrada não difere significativamente dos outros métodos de calibração térmica descritos na literatura técnica [2].

Os métodos de medida de potência pelo balanço térmico e pela medida da temperatura do combustível são bastante precisos, mas não podem ser utilizados para monitorar os transitórios de potência. Para os transientes o monitoramento é feito pelos detectores neutrônicos, sendo estes calibrados pelo método do balanço térmico. Por outro lado, a resposta de cada detector nuclear é sensível às mudanças na configuração do núcleo, principalmente na posição das barras de controle. Os reatores de pesquisa não tem um absorvedor de nêutrons distribuídos na água de refrigeração para o controle da reatividade e o modo normal de obtenção e manutenção da criticalidade é pela inserção das barras de controle, que deixa o fluxo de nêutrons deformado no núcleo. No método de medida de potência pela temperatura do combustível, o aquecimento dos termopares devido à radiação gama pode ser desprezado devido a sua pequena massa e ao bom equilíbrio térmico entre os termopares e o combustível em sua volta.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos operadores do Reator de Pesquisa TRIGA IPR-R1 pela ajuda durante os experimentos.

REFERÊNCIAS

1. A.Z. Mesquita, Investigação Experimental da Distribuição de Temperaturas no Reator Nuclear de Pesquisa TRIGA IPR-R1, Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2005
2. T. Zagar; M. Ravnik and A. Persic, Analysis of Reactor Thermal Power Calibration Method. *Proceedings of the International Conference Nuclear Energy in Central Europe '99*, Portoroz, Slovenia. pp 91-98, 1999.
3. A.Z. Mesquita; H.C. Rezende and E.B. Tambourgi, Power Calibration of the IPR-R1 TRIGA Reactor. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*. Madrid, España. Vol. 7 N.º 1, Marzo, 2005.
4. H.C. Coleman and W.G. Steele, *Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers*. 2nd. Ed. John Wiley & Sons, Inc. New York. 275p. 1999.
5. CDTN/CNEN, *Relatório de Análise de Segurança do Reator TRIGA IPR-R1*, Belo Horizonte, Brazil, 321p. 2007.
6. R.W. Miller, *Flow Measurement Engineering Handbook*, 2nd. Ed. New York, McGraw-Hill Publishing Company. p. E19-E21, 1989.
7. Gulf General Atomic, *15" SST Fuel Element Assembly Instrumented Core*. San Diego, CA.. Drawing Number TOS210J220. 1972.
8. A.Z. Mesquita and H.C. Rezende, Data Acquisition System for TRIGA Mark I Nuclear Research Reactor of CDTN. *Proceedings of the America Nuclear Energy Symposium (ANES 2004)*, Miami Beach, Flórida. America Nuclear Energy, 2004.

UNIDADES E NOMENCLATURA

c_p	calor específico à pressão constante (kJ/kg K)
ent	entrada (adimensional)
\dot{m}	vazão de massa (kg/s)
o	centro do combustível (adimensional)
q	potência, taxa de transferência de calor (W)
R^2	coeficiente de determinação (adimensional)
$refr$	refrigeração (adimensional)
sai	saída (adimensional)
T	temperatura (°C, K)
Δ	diferença (adimensional)