

Monitoramento de parâmetros termohidráulicos do núcleo do reator de pesquisa TRIGA IPR-R1

Amir Zacarias Mesquita
amir@cdtn.br
Centro de Desenvolvimento
da Tecnologia Nuclear

Hugo Cesar Resende
her@cdtn.br
Centro de Desenvolvimento
da Tecnologia Nuclear

Andrea Vidal Ferreira
avf@cdtn.br
Centro de
Desenvolvimento da
Tecnologia Nuclear

Resumo

O reator TRIGA IPR-R1, é um reator de piscina refrigerado por circulação natural de água leve com potência máxima de 250 kW. Os canais do núcleo vão desde a placa inferior, que sustentam os elementos combustíveis, até a placa superior. A água entra nos canais pelos furos da placa inferior, passa pela região ativa removendo o calor gerado e sai do canal através do espaço existente entre o terminal do elemento combustível e o furo da placa superior. As forças de circulação provêm das diferenças de densidade do fluido devido à variação de sua temperatura ao longo do canal. Este trabalho apresenta os experimentos realizados no reator nuclear IPR-R1, onde foram monitorados alguns parâmetros termohidráulicos tais como: velocidade do refrigerante, fluxo de massa e o número de Reynold's para o canal quente do núcleo. Foram monitorados também a dilatação da água do poço e os níveis de radiação ionizante no ambiente.

Palavras-chave: Fluxo de massa. Circulação natural. Reator nuclear de pesquisa. TRIGA.

Abstract

The 250 kW IPR-R1 TRIGA research reactor is a pool type reactor cooled by light water under natural circulation. The core channels extend from the bottom grid plate to the top grid plate. The cooling water flows through the holes in the bottom grid plate, passes through the lower unheated region of the element, flows upwards through the active region, passes through the upper unheated region, and finally leaves the channel through the differential area between a triangular spacer block on the top of the fuel element and a round hole in the grid. In the natural convection the driving force is supplied by the buoyancy of the heated water in the core channels. This paper presents the experiments performed in the IPR-R1 reactor to monitoring some thermohydraulic parameters like the coolant velocity, mass flow rate and Reynolds's number for the hot channel. It also monitored the expansion of pool water and the radiation levels in the environment.

Keywords: Mass flow rate. Natural circulation. Research nuclear reactor. TRIGA.

1 Introdução

O reator nuclear de pesquisa TRIGA IPR-R1 localizado no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) é caracterizado pela sua segurança intrínseca devido, principalmente, a dois fatores relacionados à transferência de calor. O primeiro fator é o 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. O segundo fator de segurança é um sistema passivo de remoção de calor do núcleo. Como todo reator TRIGA (*Training, Research, Isotopes, General Atomic*) o núcleo está posicionado em uma piscina aberta, com o núcleo refrigerado por circulação natural de água leve. A remoção de calor por este processo é eficiente na atual potência de 250 kWth. Entretanto calor acumulado na água do poço pode, opcionalmente, ser removido por circulação forçada por um sistema de refrigeração dotado de circuito primário e secundário. Este sistema atua em oposição ao sistema de circulação natural (contracorrente), tendo como principal finalidade criar um volume de água com pouco movimento na parte superior da piscina, de modo a melhorar a blindagem biológica (nível de radiação ionizante), conforme mostrado na Fig. 1.

Os 63 elementos combustíveis e o núcleo do reator possuem configuração cilíndrica, sendo o combustível uma liga de hidreto de zircônio e urânio enriquecido a 20% em ^{235}U . Os elementos combustíveis estão fixados no núcleo e espaçados entre si por meio de duas placas de alumínio, uma superior e uma inferior. A água entra no canal pelos orifícios da placa inferior, percorre a região ativa retirando o calor do elemento combustível, sai do canal nos espaços existentes entre as cabeças dos elementos e a placa superior. No processo de convecção natural de refrigeração, as forças de circulação provêm das diferenças de densidades entre as camadas de água ao longo dos canais de refrigeração. Contra estas forças agem as perdas por expansão e contração das áreas de escoamento na entrada e saída do canal, as perdas de energia cinética e potencial e as perdas por atrito. Medidas diretas do fluxo de massa nos canais são difíceis de realizar devido às suas pequenas áreas de seção transversal.

Este trabalho descreve os experimentos realizados em março de 2009, no reator TRIGA IPR-R1, com o intuito de monitorar o fluxo de massa e a velocidade do refrigerante no canal quente do núcleo, com o sistema de refrigeração forçado desligado e ligado.

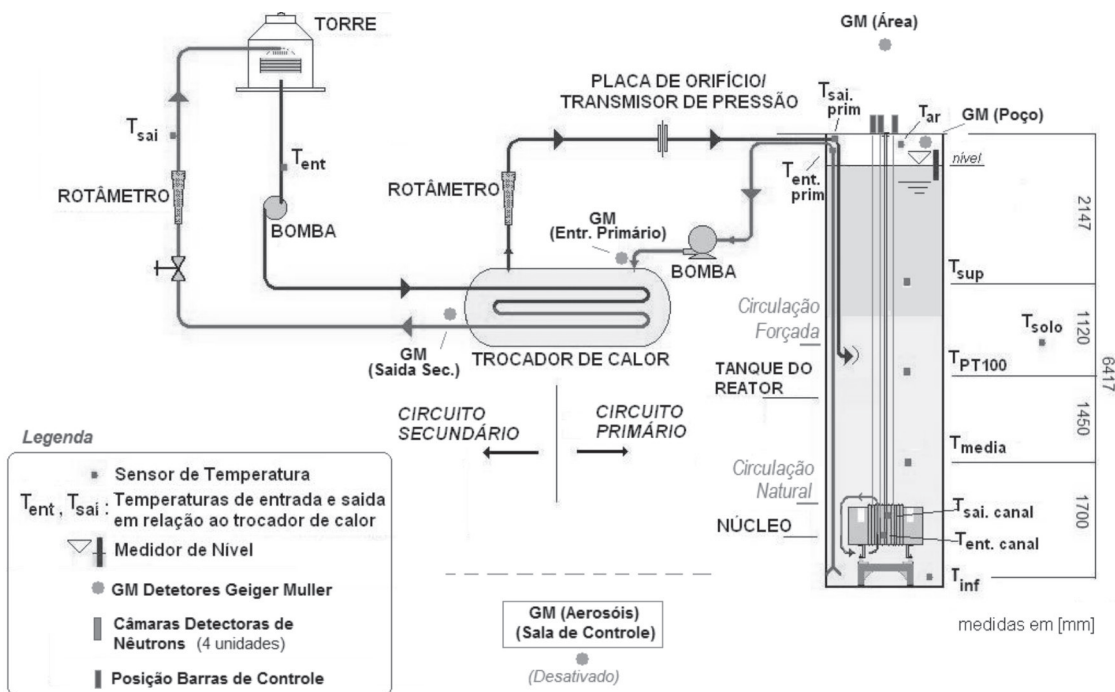


Figura 1: Circuito de refrigeração do reator TRIGA IPR-R1 e distribuição da instrumentação.

2 Metodologia

Durante os experimentos, o fluxo de massa no canal quente do núcleo foi monitorado indiretamente, através do balanço térmico, medindo-se a temperatura da água na entrada e na saída do canal, assim como avaliando-se o aquecimento, que é o resultado da soma das contribuições das potências das frações dos perímetros dos combustíveis em torno do canal. Para a medida de temperatura utilizaram-se duas sondas com termopares do tipo K. Os sinais foram monitorados, em tempo real, na tela do computador do sistema de aquisição de dados. Foram avaliadas, ainda, a expansão do volume de água do poço, devido ao aumento de sua temperatura, e a influência no nível de radiação no ambiente do reator, tanto com o sistema de refrigeração forçada desligado quanto ligado. A potência máxima do TRIGA IPR-R1 é 250 kW, estando licenciado para operar em 100 kW portanto, os experimentos foram realizados em 100 kW.

3 Resultados

3.1 Monitoramento do fluxo de massa e da velocidade do refrigerante no canal quente do núcleo

As Figuras 2 e 3 mostram o diagrama atual do núcleo do reator IPR-R1. Na Figura 4a tem-se em destaque o Canal 1', que teve sua temperatura monitorada, e o Canal 0 situado mais no centro onde se tem a maior densidade de fluxo neutrônico. Não existe furo na placa superior na direção do Canal 0, portanto não foi possível monitorar sua temperatura. Os cálculos dos fluxos de massa e das velocidades da água nos dois canais foram apresentados para efeito de comparação. As temperaturas de entrada e saída no Canal 0 serão consideradas como sendo iguais às do Canal 1'. Os dados geométricos do Canal 0 e do Canal 1 são apresentados na Tabela (1).

O aquecimento de cada canal é resultado da soma das contribuições das potências das frações dos perímetros dos combustíveis em torno do canal. A potência total do núcleo foi de 112 kW, já corrigida pelo resultado da calibração de potência. Então, tem-se uma média de 1,909 kW dissipados em cada elemento combustível com revestimento de aço inoxidável e 1,765 kW dissipados em cada elemento com revestimento de alumínio. Os valores são multiplicados pelos fatores radiais de distribuição de potência no núcleo, dado pelo cálculo neutrônico utilizando os códigos *WIMSD4* e *CITATION*, mostrados nas posições dos combustíveis na Fig. 3 (Dalle, 1999), e pelo fator de distribuição axial de potência no combustível (1,25), mostrado na Fig. 4b (General Atomic, 1970). Os produtos são multiplicados pelas frações dos perímetros de cada combustível em contato com o canal de escoamento.

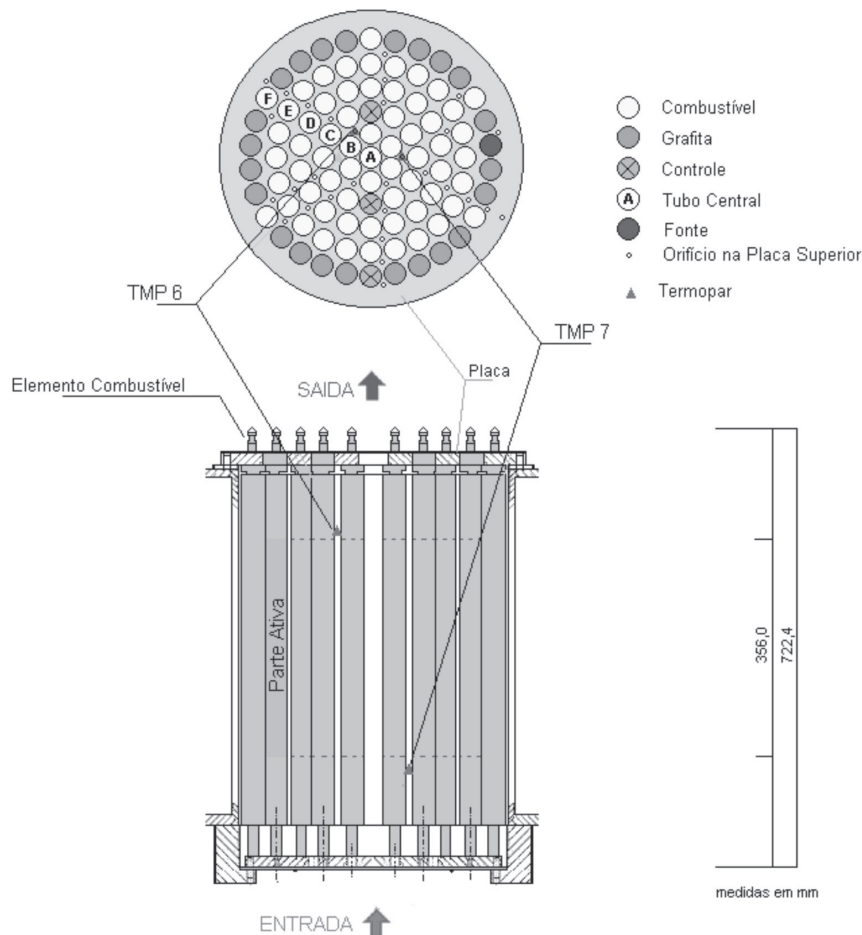


Figura 2: Diagrama do núcleo do reator IPR-R1 e locais onde foram inseridos termopares para monitoramento da temperatura dos canais.

Tabela 1: Dados do Canal 0 e do Canal 1'.

Parâmetro	Canal 0	Canal 1'	Unidade
Área (A)	1,574	8,214	cm ²
Perímetro Molhado (P_w)	5,901	17,643	cm
Perímetro Aquecido (P_h)	3,906	15,156	cm
Diâmetro Hidráulico (D_h)	1,067	1,862	cm
Diâmetro do Combustível C11 (inox.)	3,76	3,76	cm
Diâmetro dos Combustíveis B1, B6 e C12 (Al)	3,73	3,73	cm
Diâmetro da Barra de Controle C1	3,80	3,80	cm
Diâmetro do Tubo Central	3,81	3,81	cm
Potência Total do Núcleo (q_n) (112 kW)	100	100	%
Contribuição do Combustível B1 (Al)	0,54	1,11	%
Contribuição do Combustível B6 (Al)	0,46	0,94	%
Contribuição do Combustível C11 (aço)	-	0,57	%
Contribuição do Combustível C12 (Al)	-	1,08	%
Total Potência no Canal (q_c)	1,00	3,70	%

No processo de convecção natural que ocorre nos reatores TRIGA, as forças de circulação provêm das diferenças de densidades entre as camadas de água ao longo dos canais de refrigeração. Contra estas forças agem as perdas por expansão e contração das áreas de escoamento na entrada e saída do canal, as perdas de energia cinética e potencial e as perdas por atrito. A água entra no canal pelos orifícios da placa inferior, percorre uma região inferior não aquecida de grafite, passa pela região ativa retirando o calor do elemento combustível, passa por uma região superior não aquecida de grafite e sai do canal nos espaços existentes entre as cabeças dos elementos combustíveis e a placa superior.

Medidas diretas do fluxo de massa nos canais do núcleo não são possíveis, até o momento, por causa do pequeno tamanho dos canais. O fluxo de massa no canal é dado pela vazão de massa dividida pela área do canal. A vazão de massa no canal, \dot{m} em [kg/s], é dada pelo balanço térmico no canal, ou seja:

$$(1) \quad \dot{m} = \frac{q_c}{c_p \Delta T}$$

Onde: q_c é a potência fornecida ao canal em [kW], c_p é o calor específico isobárico da água em [J/kgK] e ΔT é a diferença de temperatura entre a entrada e a saída do canal em [°C]. Apesar dos canais serem abertos lateralmente não considerou-se, neste trabalho, a troca de massa entre canais adjacentes.

O gráfico da Figura 5 mostra a evolução das temperaturas na entrada e na saída do Canal 1' (Fig. 3 e Fig. 4a) e a curva de suas diferenças. Pode-se notar um maior diferencial entre eles no início da operação (até 2h), quando o sistema de refrigeração forçado da água do poço estava desligado.

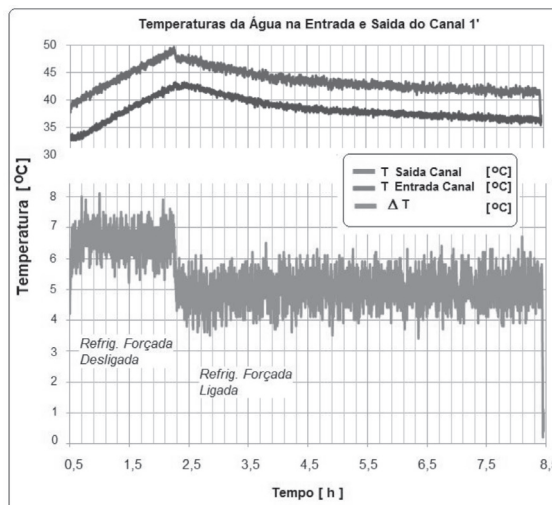


Figura 5: Evolução das temperaturas de entrada e saída da água no Canal 1' do núcleo.

Na Tabela (2) tem-se os dados do refrigerante em função da potência fornecida ao Canal 1' e ao Canal 0. Estes dados são mostrados em função das diferenças de temperaturas médias (ΔT), tanto quando a refrigeração forçada permaneceu desligada, tanto quando o sistema foi acionado. Na tabela, o fluxo de massa G é dado por: $G = \dot{m} / \text{área do canal}$. A velocidade u é dada por: $u = G/\rho$, sendo ρ a densidade da água (995 kg/m³). Os valores das propriedades termodinâmicas da água à pressão de 1,5 bar, em função da temperatura média do fluido no canal, foram estimados por interpolação a partir da tabela fornecida por Wagner e Kruse (1998). Na última coluna tem-se o número de Reynolds, dado por:

$$Re = \frac{GD_w}{\mu} \tag{2}$$

Onde G é o fluxo de massa em [kg/m²s], D_w é o diâmetro hidráulico molhado em [m] e μ é a viscosidade dinâmica em [kg/ms]. Nota-se que a vazão é turbulenta, mesmo sendo por convecção natural.

Nos gráficos mostrados na Fig. 6 e na Fig. 7 tem-se a evolução da vazão de massa e da velocidade do refrigerante no Canal 1' e no Canal 0. O Canal 0 recebe uma potência percentual menor, mas como sua área é muito menor do que a área do Canal 1', mesmo considerando-se nos cálculos as temperaturas dos dois canais como sendo as mesmas, o fluxo de calor do Canal 0 é o maior do núcleo, assim como a velocidade do refrigerante.

Tabela 2: Propriedades do refrigerante nos canais quentes do núcleo

	Potência Núcleo q_n [kW]	Potência Canal q_c [kW]	$T_{sai} - T_{entr}$ (médio) ΔT [°C]	Calor Específico c_p [kJ/kgK]	Vazão Massa m [kg/s]	Fluxo Massa G [kg/m ² s]	Velocidade u [m/s]	Viscosidade Dinâmica μ [10 ⁻³ kg/ms]	Nº Reynolds Re
Canal 1'									
Refrig. Desligada	112	4,15	6,6	4,1793	0,150	182,62	0,18	0,620	5485
Refrig. Ligada	112	4,15	5,0	4,1793	0,198	241,05	0,24	0,620	7239
Canal 0									
Refrig. Desligada	112	1,12	6,6	4,1793	0,041	340,52	0,34	0,620	5860
Refrig. Ligada	112	1,12	5,0	4,1793	0,054	343,07	0,35	0,620	5904

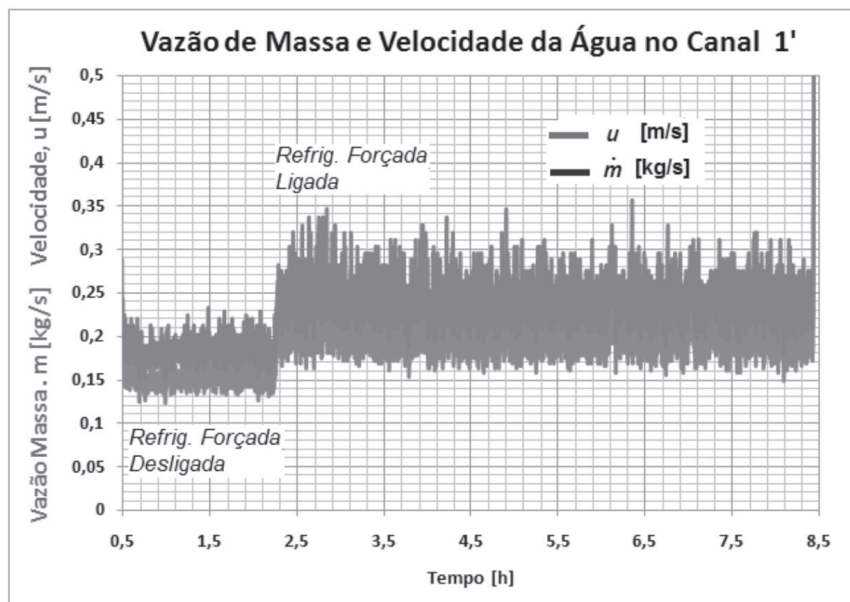


Figura 6: Evolução da vazão de massa e da velocidade da água no Canal 1'.

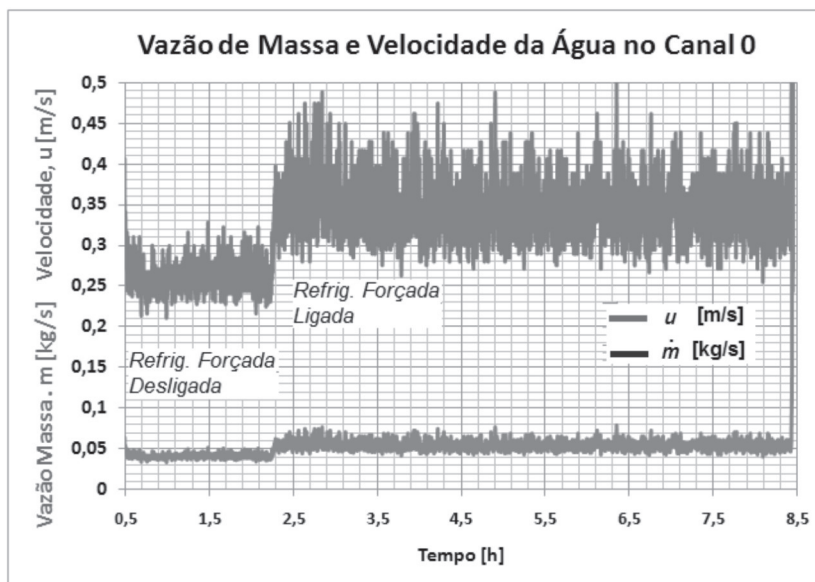


Figura 7: Evolução da vazão de massa e da velocidade da água no Canal 0

3.2 Variação do volume de água do poço durante os experimentos

O tanque do reator IPR-R1 é um cilindro com altura, segundo o projeto, de 6417 mm e largura com diâmetro de 1920 mm, sendo então seu volume de 18,58 m³. Os limites de água que podem ocupar o tanque são indicados na mesa de controle, conforme abaixo:

- máximo = 90%, que corresponde a 25 cm abaixo da borda;
- mínimo = 10%, que corresponde a 42 cm abaixo da borda.

Encontra-se, pois a seguinte relação entre a indicação em percentagem da mesa e a variação do nível da água ΔL em [cm]:

$$\Delta L = -0,2125 x + 44,125 \quad . \quad (4)$$

Sendo x a variação em percentagem [%], conforme indicação da mesa.

O nível da água do poço foi monitorado durante os experimentos. A Figura 8 mostra a variação do nível durante o tempo dos experimentos. O volume de água no início e no final dos experimentos foi de 17,36 m³ (volume mínimo), correspondentes a uma temperatura da água do poço próxima à temperatura do ambiente (cerca de 30°C). O volume máximo foi de 17,86 m³, quando a temperatura da água do poço atingiu seu valor máximo (cerca de 42°C). Este volume máximo ocorreu aproximadamente 2h após o início da operação do reator, quando acionou-se o sistema de refrigeração forçada da água do poço. A máxima expansão do volume de água foi de 0,0463 m³ (46,3 l), ou seja 0,26 % em relação ao volume mínimo.

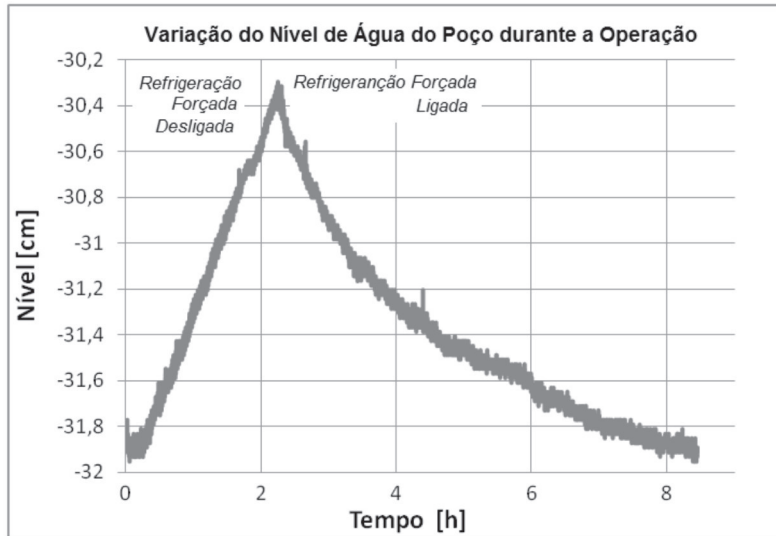


Figura 8: Variação do nível da água do poço durante o experimento.

3.3 Variação do nível de radiação na sala do reator

O gráfico da Figura 9 mostra o resultado da monitoração dos níveis de radiação de vários locais da sala do reator durante o experimento. A potência do reator ficou constante em 100 kW (indicação do canal neutrônico linear), durante toda a operação. Nas primeiras 2h o sistema de refrigeração forçada ficou desligado. Pode-se notar que o nível de radiação do “Poço” (sensor Geiger situado acima do poço e abaixo da viga central) atingiu valores médios em torno de 32 mR/h, com valores máximos de cerca de 42 mR/h. A partir de 2h de operação, acionou-se o sistema refrigeração e o nível de radiação acima do poço caiu para valores médios em torno de 22 mR/h, com valores máximos em cerca de 25 mR/h.

Nos outros locais de monitoramento de radiação, “Área” (sensor Geiger situado a cerca de 2m do poço) e “Entrada do Primário”, também tiveram seus níveis reduzidos quando foi ligada a refrigeração forçada. Ressalta-se aqui que estes parâmetros não são considerados no Relatório de Segurança do IPR-R1, como limite operacional (*OLC – Operational Limits Conditions*), portanto eles não desligam automaticamente o reator (CDTN, 2007).

Com relação à radiação, a única variável que foi considerada como limite operacional na documentação do IPR-R1 foi o nível de radiação na sala de controle (“Aerossóis”), que deveria desligar reator quando ultrapasse o valor de 2,5 mR/h, mas este monitor encontra-se desativado.

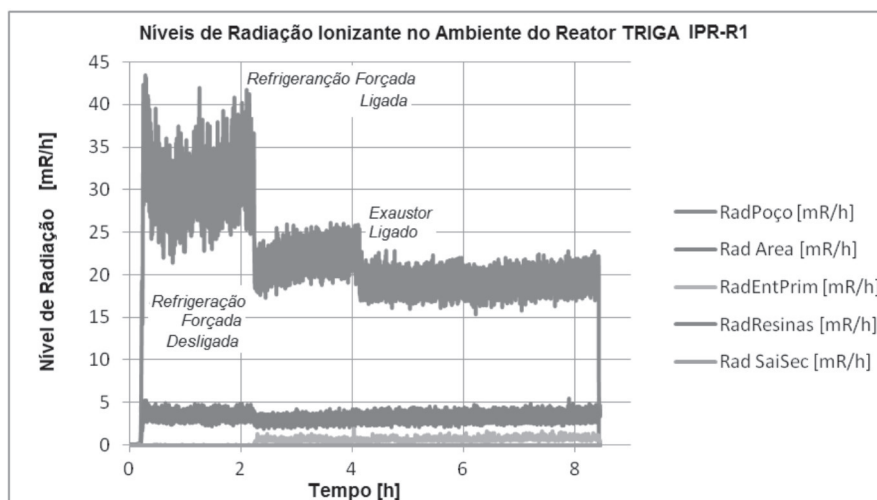


Figura 9: Evolução dos níveis de radiação na sala do reator TRIGA durante o experimento.

4 Conclusão

Pelos números de Reynolds encontrados para o canal quente conclui-se que o movimento do refrigerante é turbulento, concordando com os experimentos realizados por Mesquita (2005), que mostraram que a transferência de calor é realizada por ebulição nucleada subresfriada em operações acima de 85 kW. Pelos resultados encontrados pode-se observar um aumento no fluxo de massa e da velocidade no canal quente quando a refrigeração forçada é acionada. Apesar da refrigeração forçada ser contrária a circulação natural dentro do núcleo, ela reduz a temperatura da água do poço, diminuindo assim a temperatura na entrada dos canais. Sendo assim, aumenta o fluxo e a velocidade nos canais, melhorando a retirada de calor dos elementos combustíveis. Como era de se esperar, ocorre uma redução do volume da água do poço e dos níveis de radiação ionizante no ambiente do reator, quando o sistema de refrigeração forçada é acionado, conforme se pode observar na Fig. 8 e na Fig. 9.

Sugere-se a repetição dos experimentos aqui relatados, colocando-se um cilindro vazado acima do núcleo, com o mesmo diâmetro deste, para verificar a melhoria do fluxo nos canais causado pelo efeito chaminé. Estes experimentos ajudarão no projeto do Reator Multipropósito Brasileiro (RMB), que será um reator de piscina dotado de uma chaminé para melhoria da retirada do calor residual do núcleo (CNEN, 2008).

Agradecimentos

Os experimentos realizados fazem parte de projetos de pesquisa apoiados pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Referências

- CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR. Relatório de análise de segurança do reator TRIGA IPR-R1. Belo Horizonte, RASIN/TRIGA-IPR-R1/CDTN, 2007.
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *Reator Multipropósito Brasileiro-escopo preliminar de projeto*. Relatório Executivo Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento v. 1.0 de 23.10.2008.
- DALLE, H. M. *Cálculo neutrônico do reator TRIGA IPR-R1 utilizando WIMSD4 e CITATION*. 1999. 183 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1999.
- GENERAL ATOMIC. *Safeguards summary report for the New York University TRIGA Mark I reactor (GA-9864)*. San Diego, 1970.
- MESQUITA, A. Z. *Investigação experimental da distribuição de temperaturas no reator nuclear de pesquisa TRIGA IPR-R1*. 2005. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2005.
- WAGNER, W.; KRUSE, A. *Properties of water and steam: the industrial standard IAPWS-IF97 for the thermodynamics properties*. Berlin: Springer, 1998.

Sobre os autores

Amir Zacarias Mesquita

Engenheiro Eletricista, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Mestre em Ciências e Tecnologia Nuclear, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Doutor em Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Pesquisador Titular III do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear da Comissão Nacional de Energia Nuclear – CDTN/CNEN.

Hugo Cesar Resende

Engenheiro Mecânico, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Mestre em Ciências e Tecnologia Nuclear, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Doutorando em Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Pesquisador Titular III do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear da Comissão Nacional de Energia Nuclear – CDTN/CNEN.

Andrea Vidal Ferreira

Bacharel em Física, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Mestre em Física, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Doutora em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP. Tecnologista Pleno do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear da Comissão Nacional de Energia Nuclear – CDTN/CNEN.