

OPERAÇÃO EXPERIMENTAL DO REATOR IEA-R1 A 5 MW

Hertz Pasqualetto e Roberto Frajndlich

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, CNEN/SP
Caixa Postal 11.049
05508-900, São Paulo, Brasil

ABSTRACT

O reator IEA-R1 é um reator nuclear de pesquisa localizado no Campus da Universidade de São Paulo. A partir de 1957 vem operando a uma potência máxima de 2 MW, tendo em vista principalmente a realização de experimentos e a irradiação de amostras. Com o aumento da demanda de radioisótopos no Brasil e a necessidade de um fluxo de nêutrons maior para a produção de novos radiofármacos usados pelo mercado, uma das metas do IPEN e da Diretoria de Reatores tem sido a de elevar a potência deste reator para 5 MW e elevar o ritmo de operação de 64 horas contínuas atuais para 120 horas contínuas.

I. INTRODUÇÃO

Entre os dias 10 a 14 de junho de 1996, foi realizada uma operação experimental no Reator IEA-R1 a 5 MW por 48 horas contínuas. Este experimento teve por objetivo a obtenção de parâmetros neutrônicos e operacionais necessários para a avaliação do desempenho do reator e dos sistemas associados nesta potência.

Para a realização deste experimento foi solicitada uma autorização especial à Superintendência de Licenciamento e Controle - SLC/CNEN. Com esta finalidade, foram emitidos e enviados à SLC/CNEN, para análise, os seguintes documentos, específicos para a operação experimental em potência de 5MW: [1], [2], [3], [4].

Este trabalho descreve as etapas operacionais realizadas e apresenta os principais resultados obtidos no experimento.

II. CONDIÇÕES INICIAIS PARA A OPERAÇÃO

Para a operação experimental a 5MW foram realizadas as seguintes modificações em relação às condições utilizadas para as operações a 2 MW:

1. vazão do Circuito Primário: 2.600 gpm (2MW) para 3.000 gpm (5MW) - alteração necessária em função da Análise Termohidráulica [4];

2. reajuste do sinal de desligamento do reator por alta temperatura da água na saída do núcleo: 40°C (2MW), para 48°C (5MW) - alteração realizada por não ser conhecida a temperatura de equilíbrio da água da piscina do reator em operação contínua a 5 MW.

Os demais ajustes de alarmes e os intertravamentos da "Mesa de Controle" e do "Sistema de Monitoração de Radiação" não sofreram alterações.

Os limites de reatividade descritos nas Especificações Técnicas do Reator IEA-R1 a 2 MW também foram mantidos, ou sejam:

- máximo excesso de reatividade do núcleo: 4.800 pcm;
- máxima taxa de inserção de reatividade: 35 pcm/s.

III. MUDANÇA DE CONFIGURAÇÃO E MEDIDAS DE REATIVIDADE

No dia 10/06/96, foi realizada uma mudança da configuração do núcleo do reator para a obtenção do excesso de reatividade necessário para a operação experimental de 48 horas contínuas a 5 MW.

Nesta mudança, foram substituídos dois elementos combustíveis usados por dois novos, além de alguns remanejamentos, visando a obtenção do máximo ganho de reatividade.

Com a obtenção das curvas de calibração e posições das barras absorvedoras (uma barra de controle, BC e três de segurança, BS#1, BS#2 e BS#3) para a condição de criticalidade em baixa potência, obteve-se os seguintes valores:

- excesso de reatividade do núcleo: 4065 pcm;
- reatividade do Xenônio (5 Mw) = -3110 pcm;
- reatividade relativa ao Defeito de Potência = -169 pcm.

O restante do excesso da reatividade foi utilizado para compensar a queima de combustível durante o experimento e inserção de alvos e arranjos experimentais:

- valor da reatividade das barras: BS#1 = 3077 pcm, BS#2 = 3125 pcm, BS#3 = 4393 pcm e BC = 4348 pcm;
- margem de desligamento = -6485 pcm (o critério da barra presa);
- taxa de inserção de reatividade no núcleo = -27 pcm/s, válida para a BC, em sua região mais ativa (-12,3 pcm/mm).

Com estes resultados verificou-se que os limites de reatividade descritos nas Especificações Técnicas foram preservados, ou seja:

- excesso de reatividade \leq 4800 pcm;
- taxa de inserção de reatividade \leq -35 pcm/s.

IV. DESCRIÇÃO DO EVENTO

Data: 11/06/96

8:35 horas - Início da Operação.

9:24 horas - Reator Crítico à 2 MW com as seguintes porcentagens de retirada das barras absorvedoras do núcleo: BS#1=66%, BS#2=66%, BS#3=66%, BC=58,6%

- atividades:

1. irradiação de alvos para a medida do fluxo neutrônicos,

2. medidas de parâmetros de referência da instrumentação da Mesa de Controle e instrumentação experimental da Física Nuclear.

10:43 horas - Reator Crítico em 3 MW.

10:57 horas - Reator Crítico em 4 MW.

11:26 horas - Reator Crítico em 5 MW.

Nova porcentagem de retirada das barras: BS#1=66%, BS#2=66%, BS#3=66%, BC=61,7%

Atividades:

1. irradiação de alvos para a medida do fluxo neutrônico

2. medidas de parâmetros relativos à instrumentação da Mesa de Controle e instrumentação experimental da Física Nuclear.

Data: 12/06/96

1:20 horas - desligamento involuntário do Reator após 13:54 horas de operação em 5 MW.

1:52 horas - reator crítico a 5 MW (32 minutos após o desligamento). Porcentagem de retirada das barras do núcleo: BS#1=83,9%, BS#2=83%, BS#3=82,2%, BC=77,8%

Data: 13/06/96

11:58 horas - redução da potência de 5 MW para 20 kW para a obtenção da curva de reatividade do Xenônio. Porcentagem de retirada das barras do núcleo: BS#1=91%, BS#2=90,8%, BS#3=91%, BC=83%

12:02 horas - reator Crítico a 20 kW. Porcentagem de retirada das barras do núcleo: BS#1=91%, BS#2=90,8%, BS#3=91%, BC=81,3%

12:07 horas - Compensação de Barras. Porcentagem de retirada das barras do núcleo: BS#1=94,3%(*); BS#2=92,8%(*); BS#3=97,5%(*); BC=78,6%

(* posições limites de retirada das barras.

12:50 horas - reator Sub-Crítico devido ao crescimento do Xenônio (barras totalmente retiradas).

Data: 14/06/96

10:30 horas - reator Supercrítico (P~250 mW).

11:36 horas - reator Supercrítico (P~20 W).

11:38 horas - reator desligado.

V. MEDIDAS DA POTÊNCIA DO REATOR

Na Rotina de Operação do Reator a 5 MW por 48 horas contínuas [2], foram estabelecidos valores de referência para os canais de monitoração de potência S1, S2, S3, LINEAR, N-16 e ΔT . Estes valores de referência estão relacionados na Tab. 1. Salientamos que a medida absoluta de potência foi realizada de acordo com a "Rotina de Cálculo de Potência por Balanço Térmico"[7], do Manual de Operação do Reator IEA-R1.

Na Tab. 1, os valores de ΔT (ganho de temperatura da água de resfriamento em sua passagem pelo núcleo do reator) são indicativos da potência térmica para uma vazão de 3000 gpm no circuito primário de resfriamento do reator.

TABELA 1. Valores de Referência para Medidas da Potência do Reator.

P MW	Canal S-1 %	Canal S-2 %	Canal S-3 %	Canal N-16 10 ³ A	Linear (escala) 0-10MW	ΔT (°C)
2	100 50 (1)	100 50 (1)	100 50 (1)	25	16	2.6
3	75	75	75	36,4	24	3.9
4	100 80 (1)	100 80 (1)	100 80 (1)	47,7	32	5.2
5	100	100	100	59	40	6.5

(1) - Valores reajustados de acordo com os procedimentos de operação para permitir a elevação da potência.

Pelo fato das indicações dos Canais S1, S2 e S3 sofrerem variações para uma mesma potência em função das posições das barras de segurança e de controle, foi necessário realizar a elevação de potência de 2 MW para 5 MW, no menor tempo possível, evitando assim que a formação de Xenônio, produzida neste intervalo de tempo, provocasse uma alteração significativa nas posições das barras.

O intervalo de tempo desde a criticalidade do reator a 2 MW até atingir a potência de 5 MW foi de 02:02 horas.

A variação da posição da barra de controle (BC) de 58,6% para 61,7% não foi significativa a ponto de afetar a linearidade dos canais de indicação relativa de potência, S1, S2, S3 e Canal Linear.

Os canais S1, S2 e S3 estavam inicialmente calibrados para a potência de 2 MW, ou seja, estavam ajustados para indicarem 100% da escala nesta potência. Para a elevação da mesma, foi necessário reajustar por duas vezes o posicionamento dos detectores destes canais. Este reposicionamento foi realizado em etapas de acordo com a Tab. 1.

Os resultados obtidos demonstraram que é possível o acompanhamento da rampa de potência pelos canais S1, S2 e S3 de forma linear, desde que não haja uma variação significativa no posicionamento das barras de segurança e de controle, para compensar a formação de

Xenônio ou outras variações de reatividade que ocorram no núcleo.

Durante as 48 horas de operação a 5 MW, foi necessário reajustar a posição dos detectores dos canais S1, S2 e S3, para manterem a indicação de 100% em suas respectivas escalas, pois, com a formação de Xenônio, as barras de segurança e de controle são gradativamente retiradas para manter a criticalidade do reator. Com esta alteração, o posicionamento das barras e o perfil de fluxo de nêutrons foram alterados, e os detectores de nêutrons, permanecendo fixos em relação ao núcleo, passam a receber uma maior quantidade de nêutrons, para uma mesma potência.

Com estes reajustes, o detector do canal S3 atingiu o seu limite de retirada após 10 horas de operação a 5 MW, quando sua indicação ultrapassou o valor de 110%, emitindo sinal de alarme para o sistema de segurança do reator. Este sistema possui uma lógica de atuação 2/3, necessitando que dois canais de segurança atinjam 110% para emitir o sinal de desligamento do reator.

Os detectores dos canais S1 e S2 também atingiram o limite de deslocamento em seus respectivos suportes, porém as suas indicações ficaram abaixo de 110%, sendo assim possível concluir a operação de 48 horas a 5MW.

Em função destas observações operacionais, concluímos pela necessidade de substituição dos tubulões suportes dos detectores dos canais S1, S2 e S3, de modo a permitir um maior deslocamento destes detectores em relação ao núcleo do reator.

A câmara de ionização compensada do Canal Linear permaneceu fixa em sua posição original durante todo o experimento. Este canal de faixa ampla, que permite operações em potências de até 10 MW, pela mudança de escala do "Pico-Amperímetro" a ele associado, apresentou uma resposta linear durante a elevação de potência do reator de 2 para 5 MW. Este canal também é influenciado pela redistribuição do fluxo de nêutrons no núcleo do reator, causada pela mudança nas posições das barras de segurança e de controle durante a operação do reator.

O Canal N-16 (Nitrogênio-16) utiliza uma Câmara de Ionização localizada na tubulação de saída da água do circuito de resfriamento do reator, que monitora a radiação gama emitida pelo N-16, formado pela reação (n,p) do oxigênio da água com nêutrons rápidos produzidos na fissão. Este canal teve uma resposta linear com a potência do reator e demonstrou ser um canal de grande utilidade para a operação do reator em função dos seguintes fatores:

- ter uma resposta linear em relação à potência;
- ser independente da variação do perfil de fluxo de nêutrons no núcleo do reator;
- ser independente da configuração do núcleo do reator.

O ajuste da potência do reator durante o experimento foi efetuado de acordo com os valores indicados na Tab. 1, tendo como referência, em ordem de prioridade, os seguintes canais:

- Canal N-16
- Balanço Térmico (ΔT)
- Canal Linear
- Canais de Segurança: S1, S2 e S3.

O Canal N-16 foi calibrado em função do balanço térmico para a potência de 2 MW. Por ter um comportamento linear e uma resposta praticamente instantânea com o aumento de potência, foi utilizado como referência na elevação da mesma. Uma vez que a medida da potência pelo balanço térmico depende do equilíbrio da temperatura da água do circuito primário, este método foi utilizado para confirmação da potência alcançada.

VI. AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE RESFRIAMENTO DO REATOR

A capacidade térmica nominal de cada circuito é de 5 MW, havendo porém restrições quanto à capacidade efetiva de alguns componentes, como por exemplo, do trocador de calor-A (TC-A), equipamento original instalado no reator em 1957, cujo coeficiente de transmissão de calor vem se reduzindo ao longo de seus 39 anos de operação. Em razão destas restrições, optou-se por um alinhamento do sistema de resfriamento que contivesse o Trocador de Calor-B e a torre de resfriamento-B, que são equipamentos mais recentes e com maior eficiência de troca térmica.

Para o cálculo do coeficiente global de transferência de calor no trocador de calor TC-B, foram consideradas apenas os valores médios das temperaturas de entrada e saída no trocador de calor no lado do primário (T2 e T3), bem como a entrada e a saída do trocador de calor no lado do secundário (T4 e T5), obtidos após 30 horas de operação a 5 MW, quando o sistema atingiu um regime de equilíbrio.

No intervalo entre 30 e 48 horas, após o início do experimento, foram obtidas as seguintes temperaturas médias: T2 = 36,5 °C; T3 = 30,2 °C; T4 = 20,2 °C; T5 = 29,0 °C.

Com os valores de temperatura, vazão e dados de projeto, foi possível o cálculo do Coeficiente de Transmissão de Calor " U_{exp} " do Trocador de Calor-B, ou seja, $U_{exp} = 1415 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$. Comparando com o valor fornecido pelo fabricante, $U = 1663 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$, verifica-se uma diferença de 17,5%, considerada razoável, uma vez que não foram considerados fatores que levam a perda de eficiência de troca térmica.

Conclusões da Avaliação Termohidráulica:

1- O resultado do Balanço de Energia no circuito primário no Trocador de Calor-TC-B, apresentou um valor coerente com a potência do reator (erro de 1%);

2- As temperaturas na saída do núcleo, T1, e a temperatura de entrada no Trocador de Calor, T2, são muito próximas, indicando que a perda de calor no ambiente é muito pequena, apesar da distância percorrida e da inexistência de isolamento térmico na tubulação;

3- Após 30 horas de operação, o sistema entrou em regime de equilíbrio, apresentando pequenas oscilações das temperaturas nos circuitos primário e secundário, devido às variações da temperatura externa;

4- A diferença entre as temperaturas de saída do trocador (circuito primário), e saída do trocador (circuito secundário), foi sempre da ordem de 1 °C.

VII MONITORAÇÃO DA RADIAÇÃO

A monitoração dos níveis de radiação no prédio do reator, durante o experimento, seguiu uma rotina específica [3], na qual foram mantidos os pontos de monitoração normalmente realizados em operações a 2 MW, sendo apenas alterada a frequência das monitorações. Com exceção dos pontos localizados na superfície da piscina, os resultados demonstraram que os níveis de radiação aumentam proporcionalmente com a potência do reator.

VIII. MEDIDAS DE FLUXO DE NÊUTRONS

Foram realizadas medidas da variação do fluxo de nêutrons por ativação de alvos no Elemento de Irradiação Refrigerado a Água - EIRA. Os fluxos de nêutrons rápidos obtidos para 2 MW e 5 MW foram, respectivamente, iguais a $4,33 \cdot 10^{12}$ e $1,26 \cdot 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ (fator de 2,9).

IX. MEDIDAS REALIZADAS PELA SUPERVISÃO DE FÍSICA NUCLEAR - TFF

Na operação experimental por 48 horas a 5 MW, a Supervisão de Física Nuclear - TFF realizou diversas medidas, principalmente durante a elevação da potência entre 2 e 5 MW, com objetivo de avaliar o aumento da intensidade no fluxo de nêutrons térmicos nas posições de irradiação dos seguintes arranjos experimentais: Dispositivo de Irradiação de Silício, Difrátômetro de Nêutrons, Espectrômetro de Três Eixos e Reações Fotonucleares.

A maioria das medidas foram efetuadas com os monitores usuais de controle de variação de potência do reator nos respectivos arranjos experimentais: câmaras de fissão de baixa eficiência e detectores de nêutrons do tipo SPND (Self Powered Neutron Detector). Entretanto, em

alguns casos, os resultados foram obtidos de forma indireta por meio da avaliação das taxas de reações.

Os resultados de todas as razões entre os fluxos de nêutrons térmicos a 2 e 5 MW, nas posições dos arranjos experimentais relacionadas anteriormente são mostrados na Tab.2.

De uma forma geral, os resultados de todas as medidas experimentais, concordaram entre si, e o valor médio, obtido para a razão entre os fluxos de nêutrons térmicos nas potências de 2 e 5 MW, foi de **2,41**.

TABELA 2 - RAZÃO ENTRE FLUXOS DE NÊUTRONS TÉRMICOS A 5 E 2 MW.

Arranjo Experimental	Detetor	Razão/ Fluxos
Irradiação do Silício	SPND	2,44
Irradiação do Silício	SPND	2,40
Difratômetro	- CF	2,44
Difratômetro	CF	2,43
Espectrômetro 3 Eixos	CF	2,39
Reações Fotonucleares	SPND/ Ge-Li	2,43
Reações Fotonucleares	SPND	2,45
Reações Fotonucleares	SPND	2,42
Reações Fotonucleares	SPND	2,38
Reações Fotonucleares	SPND	2,36

X. CONCLUSÕES

A) A Calibração da Instrumentação da Mesa de Controle está coerente com os resultados apresentados pela TFF (Fator Médio de Ganho = 2.41, entre os dados obtidos à 2 MW e a 5 MW).

Na comparação com os resultados obtidos por ativação de alvos, como folhas de ouro, e na produção experimental do Mo-99, houve uma discrepância nos resultados. O fator médio de ganho nestas atividades foi da ordem de 2,8 à 3,0. Esta diferença é explicada, pelo fato de que estas medidas, ao contrário das anteriores, foram realizadas em locais do núcleo afetados por picos localizados de potência, causados entre outros, pela deformação do fluxo de nêutrons provocada pela posição das barra absorvedoras.

B) A calibração de Potência do Reator foi realizada por balanço térmico no núcleo do reator, de acordo com rotina operacional e, considerando uma perda de 5% da energia de fissão, que não é absorvida pela água de refrigeração, o erro associado a medida de potência por balanço térmico foi de 5%.

O resultado do balanço térmico no Trocador de Calor indicou uma potência de 4,95 MW, coincidindo praticamente com o balanço térmico realizado no núcleo do reator, utilizado para o controle de potência.

C) O canal do Nitrogênio-16, utilizado para controle de potência, demonstrou ser de grande utilidade na operação do reator, em função de suas principais características de operação:

- não sofrer influência da distribuição de fluxo no núcleo do reator;

- possuir um tempo de resposta adequado para seguir variações de potência do reator.

D) Os tubulões suportes dos detetores nucleares (S1,S2 e S3) deverão ser substituídos por outros que permitam um maior afastamento dos detetores em relação ao núcleo do reator. Durante o experimento, o canal S3 ultrapassou o valor de 110%, não sendo possível o seu reajuste, pelo fato do mesmo ter atingido seu limite de deslocamento no tubulão-suporte. Os Canais S1 e S2 permaneceram com leituras entre 103% e 105%, tendo também atingido seus limites de deslocamento.

E) Os equipamentos do Circuito de Resfriamento do Reator, utilizados no experimento de 5 MW por 48 horas contínuas, demonstraram que possuem capacidade de transferência térmica adequada para as operações a este nível de potência. Mesmo considerando que o experimento foi realizado no inverno, foi possível admitir que estes equipamentos tiveram bom desempenho, quando operando com temperaturas externas da ordem de 38°C e temperatura da água do circuito secundário da ordem de 28 °C. Nestas condições, a temperatura de equilíbrio da água da piscina (temperatura de entrada no núcleo do reator) deverá ser da ordem de 40°C.

F) Os níveis de radiação observados na superfície da piscina não ultrapassam o valor de 30 mr/h, permitindo, assim, atividades no saguão da piscina sem a necessidade de medidas para redução destes valores, como, por exemplo, a formação de uma "Camada de Água Quente" na superfície da piscina.

XI. REFERÊNCIAS

- [1] IPEN, Rotina Experimental de Operação em 5 MW durante 48 horas contínuas. PSI.ROI.IEA-RI.06./RELT.001./R01, 06/05/96.
- [2] IPEN, Rotina de Operação do Reator durante 48 horas contínuas à Potência de 5 MW. Rotina: 17-OP-066/A, Manual de Operação do Reator. 06/11/95.
- [3] IPEN, Rotina de Operação do Sistema de Proteção Radiológica da Instalação, na Operação Experimental de 48 horas contínuas a 5 MW. Rotina: 17-RP-014/A, Manual de Operação do Reator. 05/12/95.

- [4] - IPEN, **Análise Termo-Hidráulica do Reator IEA-R1 a 5 MW.** PSI.REN.IEA-R1.002./ RELT.003./ R00. 23/02/96.
- [5] - IPEN, **Análise do Experimento de Operação contínua de 48 horas a 5 MW.** PSI.ROI.IEA-R1.06./ RELT.002./ R00. 31/07/96.
- [6] - IPEN, **Perspectivas de Produção de Mo-99, via Captura Radioativa a 5 MW.** PSI.RAF.IEA-R1.07./RELT.01./R00. 26/08/96.
- [7] - IPEN, **Calibração da Potência do Reator IEA-R1 por Balanço Térmico.** Relatório Técnico COPESP/CNEN-SP RP51-0040-0004-441-01/00. Agosto/94.

ABSTRACT

The IEA-R1 is a nuclear research reactor located at the University of São Paulo. From 1957 to now, it is being operated at a maximum power level of 2 MW, due to mainly experiments procedures and sample irradiations. With the increasing demand of radioisotopes in Brazil and the needing of a greater neutron flux to the production of new radiopharmacy products used by market, one of the goals of the IPEN and its Reactor Headmaster has been the increase of the power level of this reactor to 5 MW, elevating as well as the operational schedule from 64 hours/week to 120 hours/week in a continuous form.