

ANÁLISE NEUTRÔNICA E TERMO-HIDRÁULICA DO EXPERIMENTO DE OPERAÇÃO CONTÍNUA DE 48 HORAS A 5 MW DO REATOR IEA-R1

Mitsuo Yamaguchi, Pedro Ernesto Umbehaun e Leda Cristina Cabelo Bernardes Fanaro

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, CNEN
Caixa Postal 11049 (Pinheiros)
05422-970, São Paulo, Brasil

RESUMO

A Diretoria de Reatores do IPEN/CNEN-SP vem realizando o projeto de modernização e aumento de potência do reator IEA-R1 para 5 MW visando a produção de radioisótopos, em especial o molibdênio-99. Neste sentido, na semana de 10 a 14 de junho de 1996, foi realizado um experimento de operação de 48 horas contínuas a 5 MW para verificação e testes das condições operacionais e também para obtenção de parâmetros neutrônicos e termo-hidráulicos. Curvas de reatividade das barras de controle e reatividade do xenônio-135 foram calculadas e comparadas com valores experimentais, mostrando que a metodologia de cálculo neutrônico é adequada para o projeto.

I INTRODUÇÃO

A Diretoria de Reatores do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN-SP) iniciou em meados de 1995 o projeto de modernização e aumento de potência do reator IEA-R1 para 5 MW. O empreendimento se destina à produção de radioisótopos, principalmente do molibdênio-99 (^{99}Mo) via captura no ^{98}Mo , irradiado sob a forma de óxido de molibdênio (MoO_3) natural. Neste sentido, realizou-se um experimento de operação de 48 horas contínuas a 5 MW para verificação e testes das condições operacionais do reator e obtenção de parâmetros neutrônicos e termo-hidráulicos.

Do ponto de vista neutrônico, o parâmetro mais importante obtido no experimento foi a reatividade do xenônio-135 (^{135}Xe), visto que, pela primeira vez desde a sua aquisição, o reator foi operado a 5 MW durante um tempo suficiente para que a concentração deste isótopo entrasse em equilíbrio.

A importância do ^{135}Xe se deve ao fato de ser um forte absorvedor de nêutrons, cuja seção de choque microscópica de absorção térmica é da ordem de $2,7 \times 10^6$ barns a energia térmica (2200 m/s). Este isótopo é formado pelo decaimento do iodo-135 (^{135}I) e também é produzido diretamente da fissão. O ^{135}I não é formado na fissão, mas aparece como resultado do decaimento do telúrio-135 (^{135}Te), que é produzido diretamente da fissão. Como o ^{135}Te decai rapidamente ($T_{1/2} < 0,5$ min) para o ^{135}I , pode-se assumir que o ^{135}I é produzido diretamente da fissão.

Após 48 horas de operação contínua a uma potência constante, a concentração do ^{135}Xe entra em equilíbrio. No desligamento do reator, ao cessar a produção de nêutrons, cessa-se também a queima do ^{135}Xe . Nesse instante, a sua

concentração aumenta rapidamente devido ao fato de sua produção via ^{135}I ($T_{1/2} = 6,7$ h) superar o seu decaimento. Aproximadamente 9 horas após desligar o reator, esse processo se inverte, ou seja, a concentração do ^{135}Xe decresce, pois o seu decaimento ($T_{1/2} = 9,2$ h) prevalece sobre a sua produção.

Outros parâmetros também foram obtidos como as curvas de reatividade das barras de controle e curvas de temperatura do refrigerante. Esses parâmetros foram calculados e comparados com os resultados experimentais.

II DESCRIÇÃO DO NÚCLEO DO REATOR

O reator IEA-R1, localizado nas dependências do IPEN, é um reator de pesquisa tipo piscina. O núcleo do reator consiste de um arranjo de 30 elementos combustíveis tipo MTR, sendo 26 padrão, constituído de 18 placas de combustível e 4 de controle com 12 placas de combustível e refletores de grafita, além dos dispositivos de irradiação. Dentre os 26 elementos combustíveis padrão, 8 são de procedência americana cujo material combustível é UAl enriquecido a 93 %, 2 de procedência alemã (UAl_x-Al enriquecido a 20 %) e o restante é de fabricação IPEN (U₃O₈-Al enriquecido a 20 %). A espessura do cerne é de 0,76 mm, do revestimento 0,38 mm e a do canal refrigerante 2,89 mm. As barras de controle são do tipo garfo com espessura de 3,1 mm, constituídas de uma liga de Ag-In-Cd (80-15-5 % em peso) e são introduzidas entre duas placas de alumínio do elemento de controle.

A Fig. 1 mostra a configuração do núcleo do reator. Atualmente, o reator vem sendo operado a potência de 2 MW num regime de 64 horas contínuas por semana.

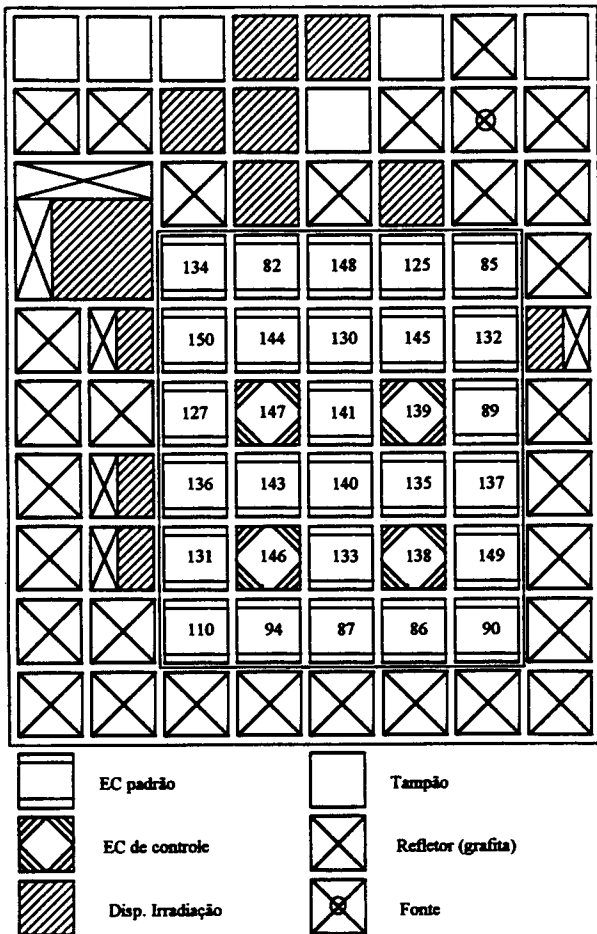


Figura 1. Corte Horizontal do Núcleo do Reator IEA-R1.

III. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

A operação do reator iniciou-se às 9:27 h do dia 11 de junho de 1996 com potência de 2 MW, com vazões constantes durante todo o experimento de 3000 gpm (0,1894 m³/s) no lado primário e 1800 gpm (0,1136 m³/s) no lado secundário. Em seguida, os detectores de potência foram afastados do núcleo ativo até que o indicador de potência registrasse meia escala. A potência foi elevada, atingindo-se 3 MW às 10:44 h e 4 MW às 10:57 h. Novamente os detectores foram afastados até que o indicador atingisse 80 % da escala. A potência do reator foi novamente elevada, atingindo 5 MW às 11:25 h (instante 0 na Fig. 2). Observa-se nitidamente (Fig. 2) a elevação das temperaturas (primário e secundário) nas primeiras 10h do experimento, devido à elevação da potência. A 1:20 h (aproximadamente no instante 14,5 h da Fig. 2) do dia 12 de junho ocorreu um "scram" do reator, provocando uma queda nas temperaturas, mas os operadores conseguiram religar após 32 minutos. As temperaturas voltaram a se estabilizar às 13:00 h (instante 25 h da Fig. 2), apresentando pequenas oscilações devido às variações da temperatura ambiente ao longo do dia. Às 11:58 h do dia 13 de junho atingiu-se 48 horas de operação

contínua a 5 MW. Nesse instante diminuiu-se a potência para 50 kW e às 12:50 h o reator desligou-se porque a reatividade do xenônio atingiu o valor do excesso de reatividade do núcleo. Com a reatividade do xenônio em queda, o reator voltou a ligar após um intervalo de 22,75 horas, ou seja, às 11:35 h do dia 14 de junho.

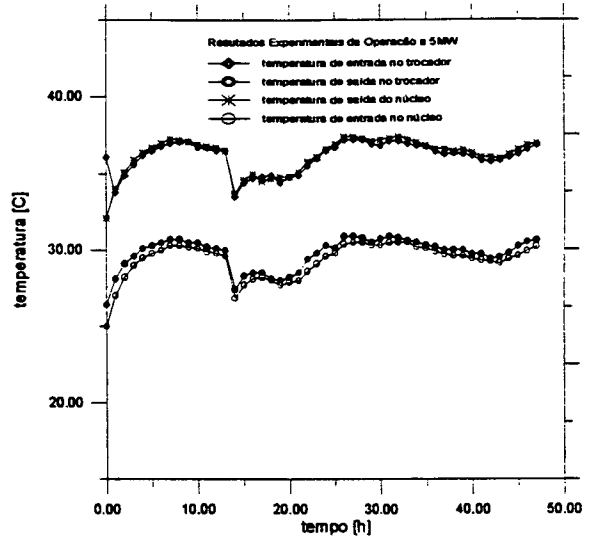


Figura 2. Dados Experimentais da Operação a 5 MW.

IV. BALANÇO DE ENERGIA

Pelas curvas da Fig. 2 pode-se concluir que as perdas de calor pelas pernas quente e fria são muito pequenas.

Considerando as temperaturas médias de entrada e saída no lado primário do trocador de calor no intervalo compreendido entre 25 h e 48 h de experimento, período no qual pode-se dizer que o reator operou em regime estacionário, tem-se:

$$Q_p = m \times c_p \times \Delta T \quad (1)$$

onde :

$$m = 188,45 \text{ kg/s (vazão da bomba);}$$

$$c_p = 4200 \text{ W/kg.}^\circ\text{C};$$

$$\Delta T = (T_s - T_e);$$

$$T_e = 36,50 \text{ }^\circ\text{C (temperatura média de entrada no trocador de calor); e}$$

$$T_s = 30,24 \text{ }^\circ\text{C (temperatura média de saída do trocador de calor).}$$

Substituindo-se os valores na Eq. (1), conclui-se que o calor removido é de 4,95 MW, confirmando a potência de operação no experimento.

O diferencial de temperatura entre a entrada e a saída do núcleo é de 7,9 °C. A refrigeração do núcleo é feita através da circulação forçada de água de cima para baixo. Esta água é succionada pela bomba e reinjetada na parte superior da piscina. A vazão fornecida pela bomba é dividida entre os diversos elementos, sendo que uma parcela desta vazão escoava pelos canais entre os elementos, não refrigerando as placas combustíveis. Portanto, para efetuar-se o balanço de energia na região do núcleo, deve-se considerar apenas as vazões pelos elementos combustíveis e de controle. Uma estimativa desta distribuição de vazão, feita com o programa FLOW [1], é apresentada na Tab. 1.

TABELA 1. Distribuição de Vazão no Núcleo

TIPO	Vazão (m ³ /s)	% Vazão Total
Elementos Combustíveis	0,132	70%
Elementos de Controle	5,58x10 ⁻⁴	8,7%
Dispositivos Irradiação	0,0166	0,3%
Canais entre Elementos	0,0395	20,0%
Furos da Placa Matriz	1,44x10 ⁻⁵	~0,0%

Observa-se que apenas 78,7% da vazão total fornecida pela bomba escoava pelos elementos combustíveis e de controle. Portanto, fazendo o balanço de energia no núcleo do reator e considerando 78,7% da vazão total, obtêm-se uma potência de 4,92 MW. Este resultado é compatível com o valor do balanço de energia no lado primário do trocador de calor.

O balanço térmico realizado no lado secundário do trocador de calor indicou que o calor total removido foi de apenas 4,18 MW. Este resultado mostra que existem problemas relacionados às medidas de temperatura nestes termopares.

V. METODOLOGIA DE CÁLCULO NEUTRÔNICO

A metodologia de cálculo neutrônico se baseia nos programas LEOPARD [2, 3] e HAMMER-TECHNION [4] para geração de seções de choque, 2DB [5] para cálculo do núcleo e queima de combustível em 2 dimensões e CITATION [6] para cálculo do núcleo em 3 dimensões. A geração de seções de choque do combustível é feita com o programa LEOPARD, utilizando o modelo da célula padrão (combustível, revestimento e moderador) com a região extra para homogeneizar o elemento combustível. Para as demais regiões, utiliza-se o programa HAMMER-TECHNION, pois o LEOPARD permite apenas a modelagem da célula padrão com região extra. O histórico de operação do reator é simulado com o programa 2DB em 2 dimensões sem barras de controle. Em 3 dimensões, são calculados os fatores de multiplicação efetivos para levantamento das curvas de reatividade das barras de controle.

VI. REATIVIDADE DAS BARRAS DE CONTROLE

Para o levantamento das curvas de reatividade das barras de controle define-se a reatividade como:

$$\rho = \frac{k_2 - k_1}{k_2 k_1} \times 10^5 \text{ (pcm)}, \quad (2)$$

onde k_1 é o fator de multiplicação efetivo com a barra na posição inicial e k_2 na posição final. A reatividade foi calculada em trechos de 6 cm. A calibração das barras foi feita semelhante ao procedimento experimental, levantando-se as curvas de 2 barras simultaneamente com uma totalmente inserida e outra totalmente retirada. As Figs. 3 e 4 mostram as curvas de reatividade integral e diferencial calculadas (BS#1 é a barra posicionada no elemento de controle 146. BS#2 no 138, BS#3 no 139 e BC no 147 da Fig. 1) e a Tab. 2 mostra os valores medidos e calculados da reatividade integral das barras.

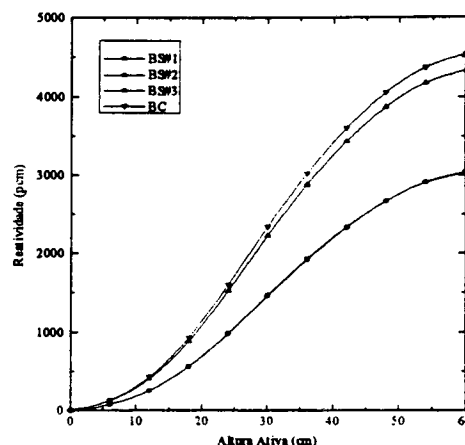


Figura 3. Reatividade Integral das Barras de Controle.

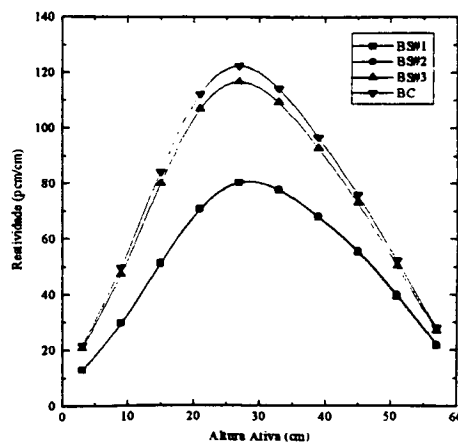


Figura 4. Reatividade Diferencial das Barras de Controle.

TABELA 2. Reatividade das Barras de Controle

Barra	ρ (pcm)	
	Medida	Calculada
BS#1	3077	3036
BS#2	3125	3044
BS#3	4393	4340
BC	4348	4542
Total	14943	14962

VII. COEFICIENTES DE REATIVIDADE

O coeficiente de reatividade de temperatura é definido como:

$$\alpha_T = \rho / (T_2 - T_1) \text{ (pcm/}^\circ\text{C)}, \quad (3)$$

onde ρ é a reatividade do núcleo calculada através da Eq. (2), sendo k_1 o fator de multiplicação efetivo calculado a temperatura T_1 e k_2 a temperatura T_2 .

Para a determinação do coeficiente de reatividade de vazio, definiu-se o vazio como:

$$\%Vazio = \frac{\delta_2 - \delta_1}{\delta_1} \times 100, \quad (4)$$

onde δ_1 e δ_2 são valores de densidades do moderador. Portanto, define-se o coeficiente de reatividade de vazio como:

$$\alpha_V = \rho / (\%Vazio) \text{ (pcm/\%Vazio)}, \quad (5)$$

onde ρ é a reatividade do núcleo calculada através da Eq. (2), sendo k_1 o fator de multiplicação efetivo calculado com a densidade do moderador δ_1 e k_2 com a densidade δ_2 . Fisicamente, a variação da densidade do moderador não introduz vazios, mas neutronicamente tem o mesmo efeito do vazio físico. O cálculo dos coeficientes foi feito com o programa CITATION em 2 grupos de energia. As Tabs. 3 e 4 mostram os coeficientes de temperatura do combustível, do moderador e da densidade do moderador. Para o cálculo do coeficiente de temperatura do combustível, por exemplo, a temperatura e a densidade do moderador foram mantidas fixas e variou-se apenas a temperatura do combustível, procedendo-se da mesma forma para os outros coeficientes. A Tab. 5 mostra os coeficientes de vazio do núcleo.

TABELA 3. Coeficiente de Temperatura do Combustível

T_F ($^\circ\text{C}$)	α_F (pcm/ $^\circ\text{C}$)
20 - 50	-1,70
50 - 100	-1,61
100 - 150	-1,48
150 - 200	-1,40

TABELA 4. Coeficiente de Temperatura (α_M) e de Densidade do Moderador (α_{DM})

T_M ($^\circ\text{C}$)	α_M (pcm/ $^\circ\text{C}$)	α_{DM} (pcm/ $^\circ\text{C}$)
20 - 40	-10,73	-5,97
40 - 60	-13,11	-9,45
60 - 80	-12,79	-12,43

TABELA 5. Coeficiente de Vazio

Vazio (%)	α_V (pcm/%Vazio)
0,605	-197,42
0,914	-206,82
1,176	-211,45

VIII. PARÂMETROS CINÉTICOS

A fração efetiva dos nêutrons atrasados (β_{ef}) e o tempo de geração dos nêutrons prontos (Λ) foram calculados com o programa CITATION em 4 grupos de energia e em geometria bi-dimensional. A metodologia utilizada é a mesma descrita na referência [7]. A Tab. 6 mostra esses parâmetros.

TABELA 6. Parâmetros Cinéticos

Gr. Precursores	β_i	λ_i (s^{-1})
1	$2,88767 \times 10^{-4}$	0,01272
2	$1,57090 \times 10^{-3}$	0,03174
3	$1,43141 \times 10^{-3}$	0,116
4	$3,09448 \times 10^{-3}$	0,311
5	$9,79418 \times 10^{-4}$	1,40
6	$2,01551 \times 10^{-4}$	3,87
β_{ef}	$7,56652 \times 10^{-3}$	
Λ (μs)	61,09	

IX. REATIVIDADE DO XENÔNIO

A reatividade do xenônio foi calculada com o programa 2DB em 2 dimensões, sem barras de controle, através da Eq. (2), enquanto que experimentalmente é inferida através das curvas das barras de controle. As curvas experimentais das barras foram ajustadas por um polinômio de grau 5. Esta é a maneira mais simples e precisa de inferir a reatividade inserida pela movimentação das barras de controle. A Tab. 7 mostra a reatividade das barras medida e ajustada pelo polinômio. A Fig. 5 mostra as curvas de reatividade do xenônio medida e calculada. Na curva experimental estão incluídos o defeito de

potência (reatividade devido à variação da temperatura) e a reatividade devido à queima do combustível. Na curva calculada não existe a parcela correspondente ao defeito de potência, porque não se fez correção das seções de choque com a temperatura durante o transiente. O pico na curva após 15,8 horas do início do transiente se deve ao "scram" ocorrido a 1:20 h do dia 12 de junho. No equilíbrio, a reatividade medida é de 3336 pcm e a calculada de 3133 pcm, cuja diferença é de 203 pcm.

Da reatividade medida deve-se subtrair o defeito de potência. A Tab. 8 mostra as temperaturas no início (a 2 MW) e no fim da operação a 5 MW. A temperatura média nos 3 termopares que medem a temperatura de entrada do refrigerante no núcleo no início da operação foi de 24,8 °C e no fim da operação, registraram 31,2 °C de média. As temperaturas de saída do refrigerante e as médias do combustível no núcleo foram calculadas com vazão de 3000 gpm. Dessa forma, o defeito de potência é de 169 pcm. Subtraindo-se a parcela correspondente à queima do combustível, cujo valor calculado é de 120 pcm, a reatividade medida do xenônio em equilíbrio é de 3047 pcm e a calculada de 3013 pcm.

TABELA 7. Reatividade das Barras Medida e Ajustada

Barra	ρ (pcm)	
	Medida	Ajustada
BS#1	3077	3079
BS#2	3125	3132
BS#3	4393	4401
BC	4348	4356
Total	14943	14968

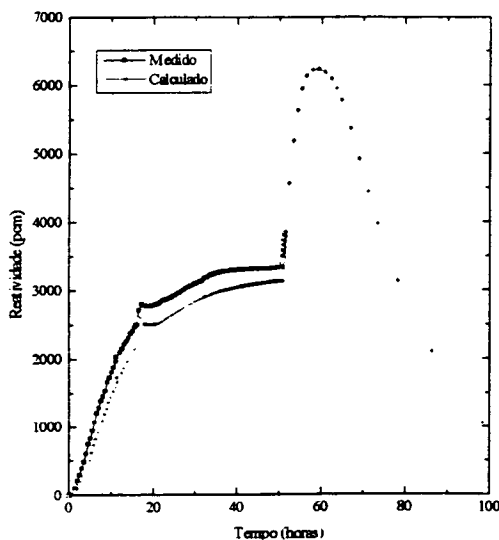
Figura 7. Reatividade do ^{135}Xe a 5 MW.

TABELA 8. Temperaturas no Início e no Fim da Operação a 5 MW

Início da operação a 2 MW:	
.Temp. de entrada do refrigerante	24,8 °C
.Temp. de saída do refrigerante	27,8 °C
.Temp. média do refrigerante no núcleo	26,3 °C
.Temp. média do combustível no núcleo	30,7 °C
Fim da operação a 5 MW:	
.Temp. de entrada do refrigerante	31,2 °C
.Temp. de saída do refrigerante	38,7 °C
.Temp. média do refrigerante no núcleo	34,9 °C
.Temp. média do combustível no núcleo	45,8 °C
Defeito de potência	169 pcm

X. CONCLUSÕES

O experimento de operação de 48 horas contínuas a 5 MW do reator IEA-R1 foi realizado na semana de 10 a 14 de junho de 1996 para verificação e testes das condições operacionais e também para obtenção de parâmetros neutrônicos e termo-hidráulicos com destaque à reatividade do xenônio. A metodologia de cálculo utilizado é a mesma empregada no acompanhamento de operação do reator que a Divisão de Física de Reatores realiza há vários anos. Ela se baseia nos programas LEOPARD e HAMMER-TECHNION para geração de seções de choque, 2DB para cálculo do núcleo e queima de combustível em 2 dimensões e CITATION para cálculo do núcleo em 3 dimensões.

Os parâmetros calculados e comparados com resultados experimentais mostraram que a metodologia de cálculo neutrônico é adequada. A reatividade total das barras de controle apresentou uma diferença desprezível, de menos de 1 %. O valor experimental da reatividade do xenônio, inferida através das curvas das barras de controle, é de 3047 pcm. O valor calculado com o programa 2DB é de 3013 pcm, com um erro de apenas 1,1 % em relação ao valor experimental.

REFERÊNCIAS

- [1] Bastos, J.L.F., **Manual do Usuário do Programa FLOW**, (Documento em Elaboração).
- [2] Barry, R. F., **LEOPARD - a Spectrum Dependent Non-Spatial Depletion Code**, WCAP-3269-26, Westinghouse Electric Corporation, September 1963.
- [3] Kerr, W.; King, J. S.; Lee, J. C.; Martin, W. R. and Wehe, D. K., **The Ford nuclear reactor demonstration project for the evaluation and analysis of low enrichment fuel - final report**, Argonne National Laboratory, Argonne, ANL/RERTR/TM-17, July 1991.

[4] Barhen. J.; Rhotenstein, W. and Taviv, E.. **The HAMMER Code System Technion**, Israel Institute of Technology, Haifa, Israel. NP-565. 1978.

[5] Little, W. W., Jr.; Hardie, R. W., **2DB User's Manual - Revision I**. BNWL-831. REVI, Battelle Pacific Northwest Laboratory, 1969.

[6] Fowler, T. B.; Vondy, D. R. and Cunningham, G. W., **Nuclear Reactor Core Analysis Code: CITATION**, Oak Ridge, Oak Ridge National Laboratory, ORNL-TM-2496. Rev. 2, July 1971.

[7] Yamaguchi, M. e Santos, A., Metodologia de Cálculo de β_{ef} e Λ , **Anais do X Encontro de Física de Reatores e Termo-hidráulica**. Águas de Lindóia, SP, Agosto 1995.

ABSTRACT

The IPEN/CNEN-SP Reactor Department has been engaged in modernizing the IEA-R1 reactor and increasing its power to 5 MW for the purpose of radioisotope production, particularly ^{99}Mo . As part of that work, it has organized and performed an experimental operation at 5 MW during 48 hours in order to test operational conditions as well as to determine neutronic and thermal hydraulic parameters. Control rod worths and Xe-135 induced reactivity has been calculated and compared to the experimental values. The analyses show that the neutronic calculational methodology is appropriate for the project.