

"CÁLCULOS DE REATIVIDADE E DO FLUXO TÉRMICO DE NÊUTRONS PARA DIFE  
RENTES CONFIGURAÇÕES, ENRIQUECIMENTO E MASSA DE U-235 NO REATOR

IEA-R1"

Roberto Frájdlich  
Joel A. de Sousa

Comissão Nacional de Energia Nuclear  
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares  
Departamento de Reatores e Circuitos Experimentais - RE  
Divisão de Reatores e Experimentação Nuclear - REN

SUMÁRIO

Na configuração atual do núcleo do reator de pesquisa IEA-R1 estão sendo utilizados elementos combustíveis tipo MTR, de alto e baixo enriquecimento em U-235, 93% e 20% respectivamente.

A configuração acima mencionada é intermediária, já que as próximas deverão utilizar somente elementos combustíveis de baixo enriquecimento em U-235.

Este trabalho se propõe analisar a influência de parâmetros' neutrônicos para diferentes configurações do núcleo, considerando' enriquecimento em U-235 e massa de U-235.

Para os cálculos são utilizados os códigos nucleares Hammer e Citation.

Os resultados são apresentados sob forma de tabelas e gráficos e é feita uma previsão sobre a massa de U-235 necessária, por elemento combustível com baixo enriquecimento em U-235, para que as configurações subsequentes apresentem um desempenho comparável com o núcleo altamente enriquecido em U-235.

## 1. Introdução

Os reatores nucleares de pesquisa utilizados no mundo se destinam principalmente à irradiação de materiais, visando a produção de radioisótopos e experiências com física de nêutrons.

Os dois parâmetros mais importantes nestes reatores dizem respeito ao excesso de reatividade apresentada por cada configuração adotada, e ao fluxo de nêutrons térmico existente para uma mesma potência de operação. O excesso de reatividade traduz o tempo de vida útil da configuração, enquanto o fluxo de nêutrons térmico permite que as amostras sejam irradiadas por menos tempo e atinjam um nível de ativação elevado.

A disposição dos elementos combustíveis padrão e de controle, além dos elementos refletores e dispositivos que permitem a irradiação de amostras, deve ser tal que atenda aos parâmetros acima citados, otimizando-os sem que haja um afastamento dos limites de segurança impostos à operação dos respectivos reatores.

A introdução de um elemento combustível de controle utilizado como dispositivo de irradiação, por exemplo, no centro do núcleo, como veremos nos próximos itens, aumentará o fluxo de nêutrons térmicos nesta região favorecendo a irradiação de materiais que necessitam de fluxo térmico elevado. No entanto esta medida determinará uma perda de reatividade da configuração. A disposição dos elementos refletores na placa matriz é também um fator muito importante no que se refere ao excesso de reatividade apresentada pela configuração. A disposição ideal, em geral, não pode ser obedecida devido a necessidade de se ter dispositivos de irradiação em certas posições. Além destes, dois outros fatores precisam ser analisados, ou sejam: o enriquecimento e a massa de U-235 dos elementos combustíveis. A simples conversão de um núcleo contendo elementos altamente enriquecidos em U-235 para elementos combustíveis com baixo enriquecimento traz consequências que precisam ser analisadas para não prejudicar os trabalhos de utilização nestes reatores.

É preciso que se analise com cuidado a disposição dos elementos em cada configuração adotada e, em caso de necessidade, que se faça uma conversão dos elementos combustíveis do núcleo. E daí, que todos os cálculos neutrônicos e termohidráulicos sejam refeitos e que novos elementos sejam projetados com o objetivo único de melhorar a performance do núcleo, aliando-se os propósitos a que o reator se destina com economia e segurança.

O reator IEA-R1 é um reator nuclear de pesquisa que está operando a uma potência térmica de 2 MW segundo um ciclo de operação de 8 horas diárias, 4 a 5 dias por semana. Contém, atualmente, elementos combustíveis com diferentes enriquecimentos e diferentes taxas de queima de U-235. Apresenta 25 elementos combustíveis padrão, sendo cinco com baixo enriquecimento em U-235 (19,75%), 20 elementos com alto enriquecimento (93,0%) e 5 elementos combustíveis de controle, sendo que em 4 deles encontramos as barras absorvedoras e o restante destina-se à irradiação de materiais. Estes cinco elementos são também altamente enriquecidos em U-235.

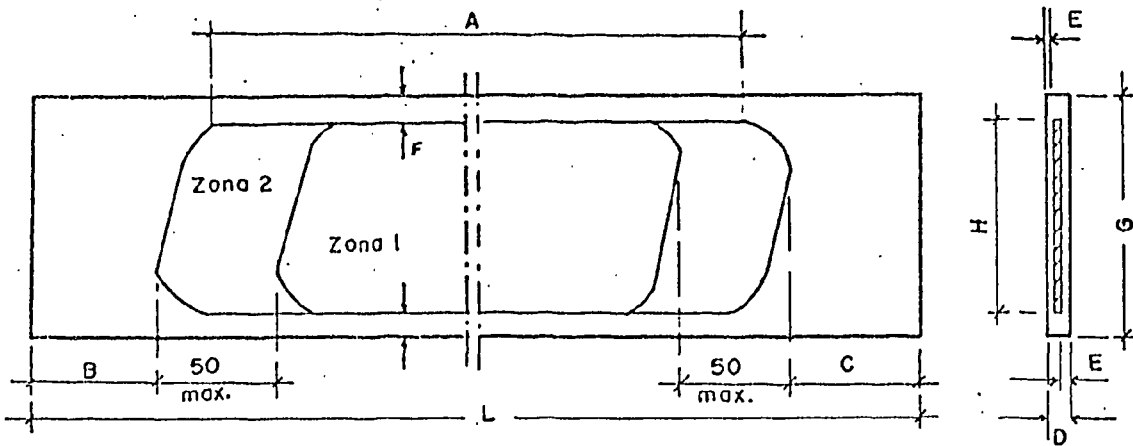
Os 5 elementos com baixo enriquecimento foram introduzidos no núcleo deste reator a partir de 1981, ocasião em que reatores que utilizavam elementos combustíveis do tipo "MTR" com alto enriquecimento em U-235 começaram, por força de uma nova política internacional, a ser convertidos de forma a utilizarem elementos com baixo enriquecimento.

A conversão dos elementos combustíveis traz algumas consequências na performance do núcleo <sup>(5)</sup> que precisam ser analisadas.

Este trabalho tem, entre outros, o objetivo de estudar as consequências da conversão dos elementos combustíveis altamente enriquecidos para elementos com baixo enriquecimento em U-235 na performance do reator, sendo relacionadas alternativas para o aumento do fluxo de nêutrons térmicos e da vida útil das configurações futuras do núcleo.

## 2. Fatores Envolvidos na Conversão

O presente estudo, baseando-se em dados obtidos através da utilização de códigos nucleares, considera os elementos existentes no reator IEA-R1 e outros a serem fabricados pela CNEN/SP para a operação do reator na potência de 2 MW. As características das placas combustíveis usadas nos elementos com baixo e alto enriquecimento podem ser vistas na Figura 1. Como se observa, embora as dimensões externas da placa sejam equivalentes, há variações significativas na espessura do combustível e da camisa. No caso das placas contendo U-235 com alto enriquecimento, a espessura da camisa é igual a 0,505 mm, enquanto que nas placas com baixo enriquecimento o valor médio é igual a 0,34 mm. Como a quantidade de U-235 é a mesma nos dois casos, ou seja, aproximadamente 10g por placa, conclui-se que



DADOS DA PLACA COMBUSTÍVEL em mm		
Enriquecimento	19.75%	93.0%
B	$12.50 \pm 5$	$12.50 \pm 5$
C	$12.50 \pm 5$	$12.50 \pm 5$
D	$1.52 \pm 0.075$	$1.52 \pm 0.075$
E	zona 1: 0.38	0.505
	zona 2: 0.30	0.505
F	min. 2.80	2.80
G	$70.79 \pm 0.15$	$70.79 \pm 0.15$
L	$625.0 \pm 0.20$	$625.0 \pm 0.20$
A	min. 560	560
H	min. 60.35	60.35

FIGURA 1 - Características das placas combustíveis com alto e baixo enriquecimento em U-235.

a densidade de U-235 por placa será menor no segundo caso. Como consequência imediata, observa-se que o excesso de reatividade da configuração com elementos combustíveis com baixo enriquecimento em U-235 é consideravelmente menor. Com relação ao fluxo de nêutrons térmicos, observa-se que a diferença não é significativa <sup>(5)</sup>.

Para compensar a perda de reatividade da configuração, pode-se aumentar a massa de U-235 por placa <sup>(5)</sup>. Estudos neste sentido <sup>(2)</sup> revelam que um aumento de cerca de 20% na massa de U-235 conduz a um excesso de reatividade equivalente a um núcleo com elementos combustíveis altamente enriquecidos. No entanto, nestes casos observa-se que o fluxo de nêutrons térmicos na região central do núcleo apresenta um decréscimo igual a porcentagem de aumento da massa de U-235 em relação ao fluxo de nêutrons térmicos apresentada na configuração com elementos combustíveis já descritos.

Nota-se porém que, embora este decréscimo de fluxo de nêutrons térmicos seja notado no centro do núcleo, na extremidade ele volta a aumentar.

### 3. Cálculos Realizados para o Reator IEA-R1

#### - As Configurações Estudadas

Inicialmente foi feito um estudo para duas configurações formadas por 21 elementos combustíveis padrão e 4 elementos combustíveis de controle (Figura 2), contendo cada placa combustível cerca de 10g de U-235.

O enriquecimento em U-235 adotado na primeira análise foi de 93%, e na segunda, 19,75%. Para simplificar passaremos a chamar a configuração com elementos altamente enriquecidos de "A<sub>1</sub>" e a configuração com elementos com baixo enriquecimento de "A<sub>2</sub>".

Tanto em uma análise como na outra, a posição dos elementos refletor e elementos usados como dispositivo de irradiação de materiais foi mantida e é similar à posição real apresentada nesse reator.

Uma terceira configuração foi adotada e denominada de "A<sub>3</sub>" para elementos combustíveis com o mesmo enriquecimento que "A<sub>2</sub>", mas com massa de U-235 superior, ou seja, igual a 12,75g por placa combustível. A quarta configuração (Figura 3) apresenta 22 elementos combustíveis padrão, 4 elementos de controle e um elemento central com placas combustíveis, utilizado como dispositivo de irradiação e

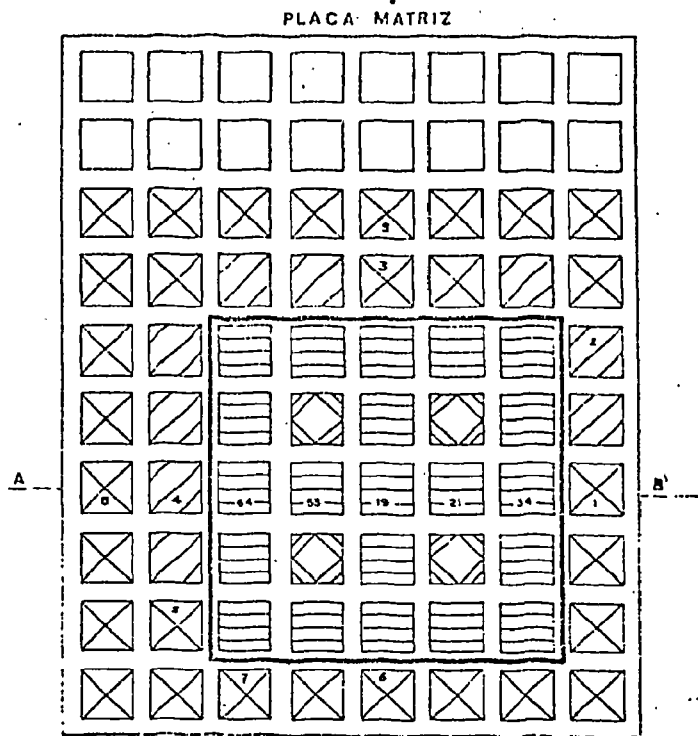


FIGURA 2 - Configurações "A<sub>1</sub>", "A<sub>2</sub>" e "A<sub>3</sub>"

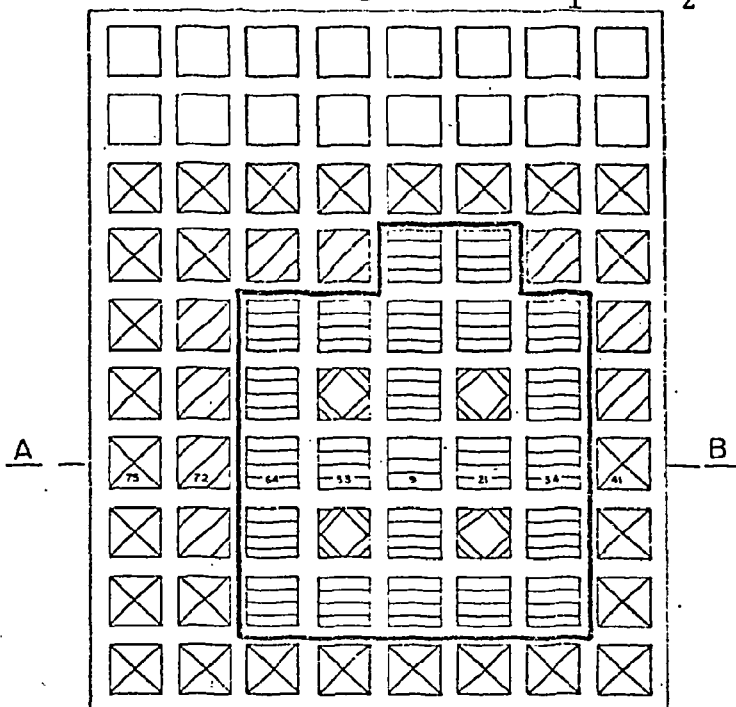
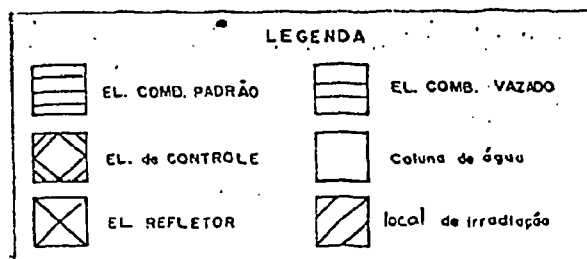


FIGURA 3 - Configuração "B"



que se destina ao aumento de fluxo de nêutrons térmicos da configuração. Todos os elementos combustíveis desta configuração são 19,75% enriquecidos em U-235.

O aumento na massa de U-235 de 10g para 12,75g foi alcançado graças ao modelo teórico de cálculo ajustado a dados obtidos experimentalmente e descrito na referência <sup>(5)</sup>. Este modelo é composto por expressões sem interpretação física e outras expressões podem fornecer resultados equivalentes. A escolha deste modelo deve-se ao fato de que, uma vez utilizado, comprovou a equivalência entre o excesso de reatividade de um núcleo contendo elementos combustíveis altamente enriquecidos em U-235 e elementos com baixo enriquecimento.

$$\rho = (22,45 + 1154,5 \times L) / (N \times d_m)$$

$$\frac{\mu}{\mu_0} = 0,94 + 48,34 \times L$$

$$L = \exp(-0,09556 \times N \times d_w)$$

onde:

$\rho$  = densidade de urânio no cerne da placa ( $\text{g/cm}^3$ )

$\frac{\mu}{\mu_0}$  = fator pelo qual a massa de U-235 deve ser multiplicada quando comparado com a massa de U-235 dos elementos combustíveis com alto enriquecimento

$N$  = número de placas combustíveis por elemento

$d_w$  = largura do canal de refrigeração no elemento (mm)

$d_m$  = espessura do cerne da placa combustível (mm)

#### 4. Metodologia de Cálculo

Os cálculos foram realizados através dos códigos HAMMER <sup>(6)</sup> e CITATION <sup>(1)</sup> e os resultados apresentados, e mostrados a seguir, comprovaram haver uma boa aproximação entre os cálculos teóricos e os resultados experimentais.

As secções de choque utilizadas pelo código CITATION para cálculo do  $K_{\text{eff}}$ , do fluxo e queima de U-235, foram utilizados a partir do HAMMER SYSTEM, conforme o método de cálculo esquematizado na Figura 4. Por sua vez, o código HAMMER foi utilizado no cálculo dos parâmetros de uma rede "infinita" de células unitárias para resolver a equação de transporte e daí fornecer os parâmetros de difusão do reator. Portanto, a sua utilização requer uma análise detalhada'

na escolha das células unitárias e na homogeneização do núcleo do reator.

#### - Células Unitárias

Para determinação das secções de choque e dos demais parâmetros de difusão de todos os nuclídeos presentes no reator, foram escolhidas, inicialmente, cinco células unitárias. As primeiras duas, representam os elementos combustíveis com alto e baixo enriquecimento em U-235, respectivamente; cada uma contém quatro regiões. A primeira delas representa o combustível; a segunda é composta pelo alumínio da camisa; a terceira o fluido refrigerante que se encontra nas placas combustíveis e por fim, a quarta, dita "região extra", contém alumínio e água. O alumínio faz parte do suporte e extremidade das placas envolvidas por água.

A terceira célula, composta por uma fina camada de U-235, é seguida de uma considerável camada de água para obtenção da biblioteca de secção de choque do fluido refrigerante.

A quarta célula é semelhante à terceira, substituindo-se água por carbono com vistas à obtenção das secções de choque do elemento refletor.

A quinta célula representa a placa matriz e subdivide-se em duas regiões. A primeira contendo água e a segunda alumínio.

#### - Comprovação da Eficiência do Método

A comprovação da eficiência do método usado neste trabalho foi realizada através de dois relatórios internos. No primeiro <sup>(4)</sup> foi levantado o mapeamento do fluxo de nêutrons térmicos em 6 elementos combustíveis, totalizando 84 pontos. A determinação experimental foi realizada pelo método de ativação de folhas de ouro.

Considerando-se que o erro previsto na medida experimental é da ordem de 5% e levando-se em conta os erros de cálculo, chegou-se a que em 67% dos pontos estudados (56 pontos), a diferença entre o fluxo calculado e o fluxo medido foi inferior a 12% e que em apenas 7 pontos o resultado foi discrepante.

Os 7 pontos discrepantes localizam-se próximos ao canal por onde desliza uma das barras absorvedoras.

No segundo relatório <sup>(3)</sup> é feita uma previsão de tempo de utilização dos elementos combustíveis no IPEN-CNEN/SP.



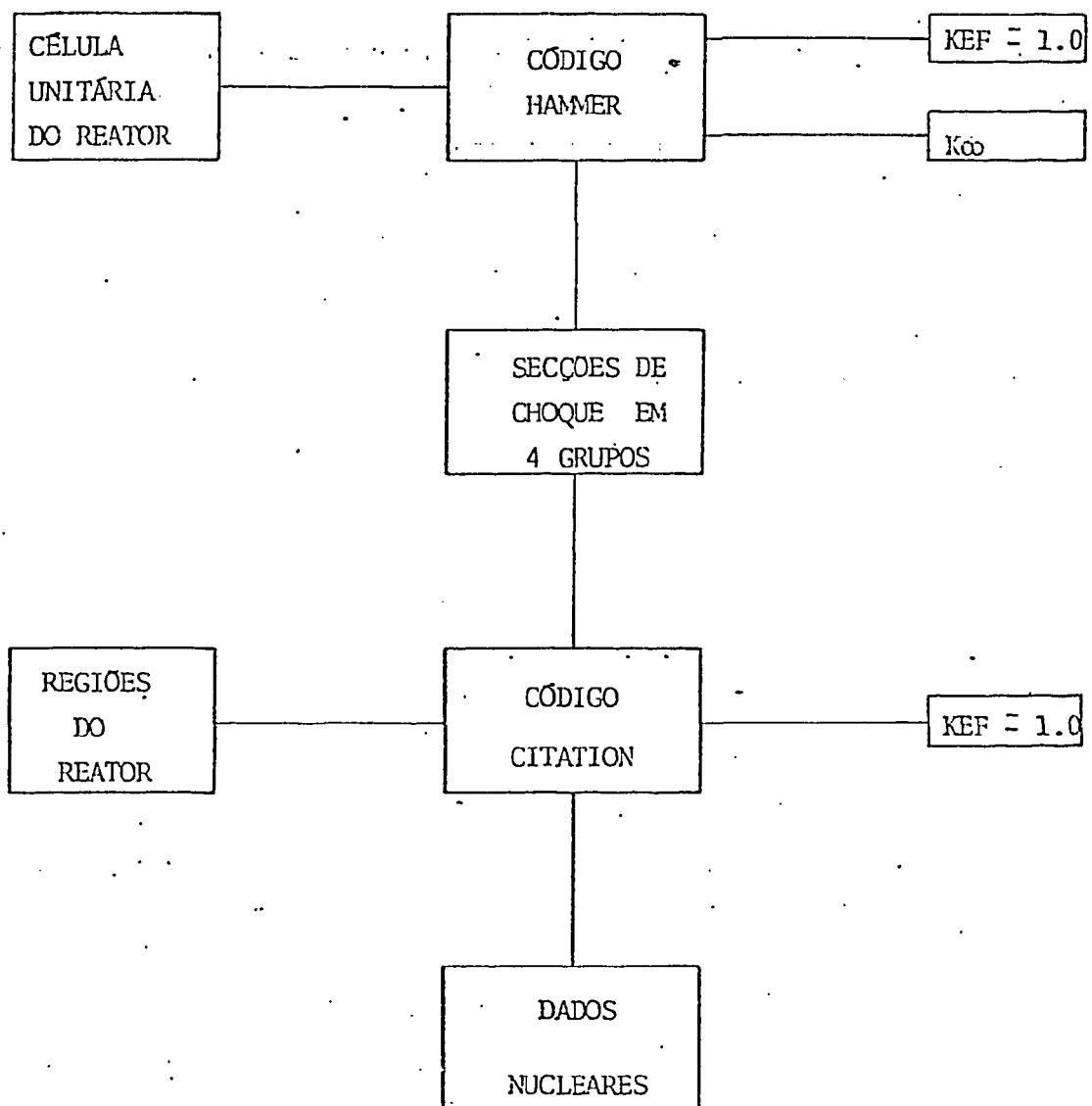


FIGURA 4. Fluxograma do Método Calculacional

Inicialmente procurou-se fixar o excesso de reatividade necessária para que uma configuração tenha um tempo de vida útil de 6 meses no núcleo do reator. Este valor foi obtido a partir da configuração 147. Calculou-se o excesso de reatividade da mesma no início e final de sua vida útil. Estes valores foram utilizados como referência nas previsões seguintes. Na medida em que o excesso de reatividade atingia o valor mínimo estipulado (~ 9%), os elementos eram acrescidos no núcleo até um máximo recomendado de 6 x 5 e procurou-se, então, substituir os mais queimados até uma queima média de 30% do núcleo.

Através deste método obteve-se uma projeção de 4 configurações e consequentes taxas de queima dos elementos. A previsão do tempo de utilização da configuração 148 foi "exata" assim com o valor do excesso de reatividade da configuração 149 que se encontra atualmente no núcleo.

Estes cálculos levaram em conta a situação "real" de cada elemento combustível, a presença de produtos de fissão como o Xe-135, Sm-149, Np-237, Am-243 e as barras absorvedoras (80% de prata, 15% de índio e 5% de cádmio).

## 5. Resultados

Os resultados deste trabalho estão sintetizados nas Tabelas 1, 2 e 3 e nas Figuras 5 e 6.

Como se pode observar na Tabela 1, o valor do " $K_{eff}$ " para as configurações com mesma massa de U-235 mas com diferentes enriquecimentos em U-235 apresenta uma diferença porcentual de cerca de 4,4%. Na medida em que se aumenta a massa de U-235, o valor do excesso de reatividade aumenta. A configuração "A<sub>3</sub>" apresenta, como vimos, elementos combustíveis com massa de U-235 superior à apresentada nos elementos das configurações "A<sub>1</sub>" e "A<sub>2</sub>". Como se observa, os valores do " $K_{eff}$ " tanto em "A<sub>1</sub>" como em "A<sub>3</sub>" são praticamente iguais. Em compensação, como se observa na Tabela 3, o fluxo de nêutrons térmicos no centro do núcleo (configuração "A<sub>3</sub>") é cerca de 20% menor que o apresentado pela configuração "A<sub>1</sub>". Estes resultados confirmam o que foi colocado no item 2.

Com o objetivo de alcançar um fluxo de nêutrons térmicos mais elevado, acrescentou-se à configuração de elementos com baixo enriquecimento, um elemento combustível de controle (9 placas) no centro do núcleo (configuração "B"). O fluxo de nêutrons térmicos máximo nesta região é cerca de 40% superior ao apresentado pelas configurações anteriores.

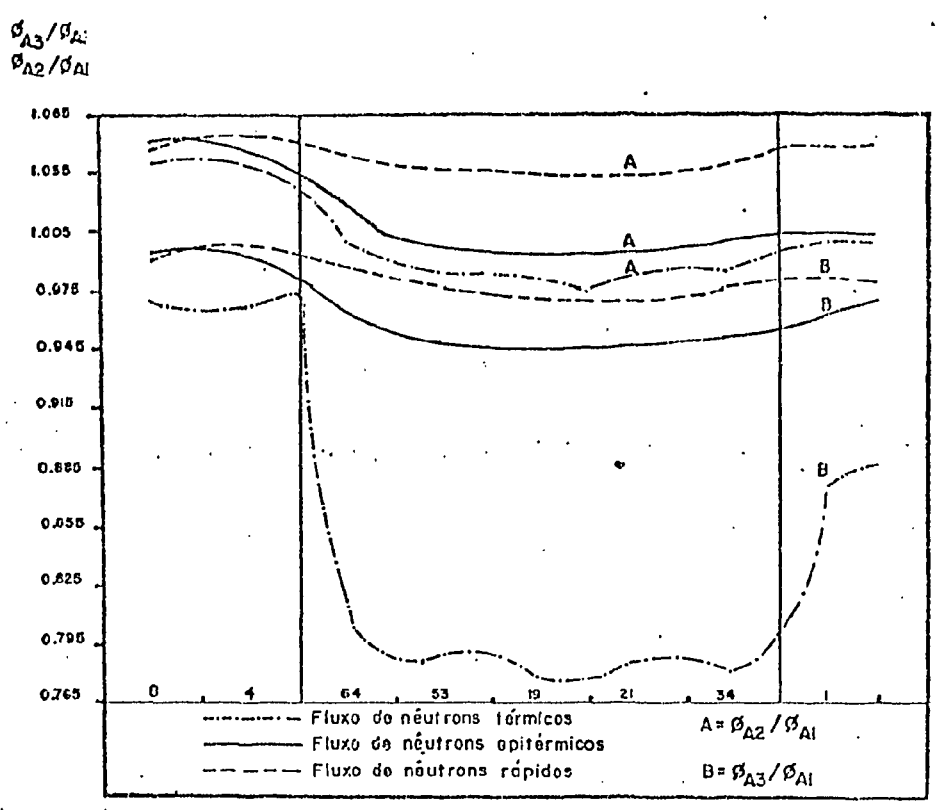


FIGURA 5 - Relação entre o fluxo de nêutrons térmico, epitérmico e rápido no centro do núcleo p/ as configurações A<sub>2</sub>, A<sub>1</sub> e A<sub>3</sub>, A<sub>1</sub>.

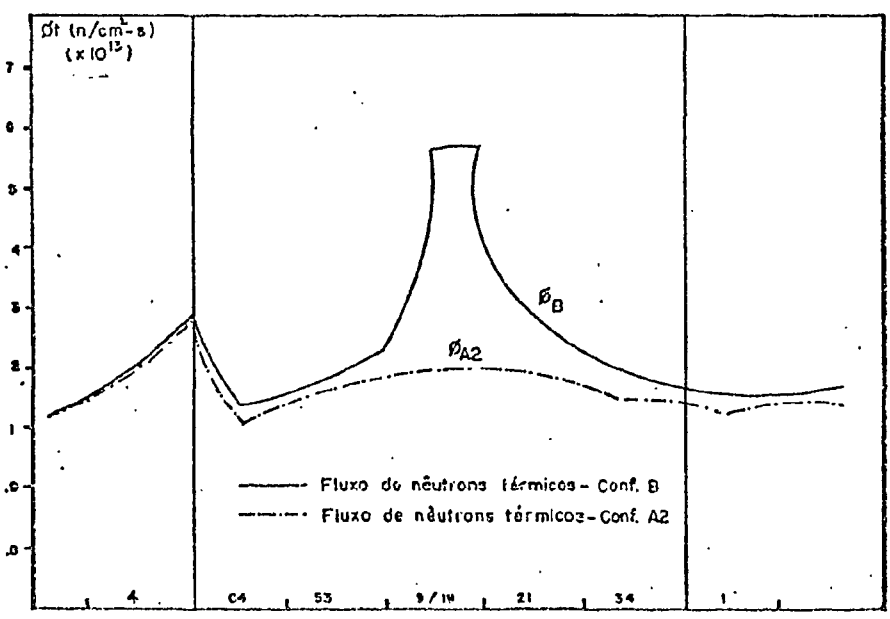


FIGURA 6 - Fluxo de nêutrons térmicos no centro do núcleo para as configurações A e B

CONFIGURAÇÃO	$K_{eff}$	$M_{U-235}$ (kg)	$M_{U-238}$ (Kg)
A1	1,1524	4,26	0,32
A2	1,1017	4,26	17,058
A3	1,1535	5,44	21,750
B	1,0959	4,536	18,140

TABELA 1. - Valor do " $K_{eff}$ ", massa de U-235 e U-238 para várias configurações

(x  $10^{13}$  n/cm<sup>2</sup>.s)

POSIÇÃO	$\phi_T$ (Conf. A1)	$\phi_T$ (Conf. A2)	$\phi_T(A2) / \phi_T(A1)$
GRAFITA	1,146	1,195	1,04
	1,352	1,410	1,04
REFRIGERANTE	2,164	2,256	1,04
	2,998	3,009	1,034
	1,594	1,597	1,00
	1,784	1,765	0,989
	2,179	2,152	0,988
COMBUSTÍVEL	2,434	2,400	0,986
	2,495	2,450	0,982
	2,534	2,488	0,982
	2,553	2,515	0,985
	2,372	2,338	0,986
	2,026	1,999	0,987
GRAFITA	1,768	1,756	0,993
	1,868	1,887	1,010
	1,813	1,841	1,015

TABELA 2 - Fluxo de nêutrons térmicos entre fluxos na região central do núcleo (corte AA') para as configurações "A<sub>1</sub>" e "A<sub>2</sub>".

( $\times 10^{13}$  n/cm<sup>2</sup>.s)

POSIÇÃO	$\phi_T$ (Conf. A1)	$\phi_T$ (Conf. A3)	$\phi_T(A3)/\phi_T(A1)$
GRAFITA	1,146	1,114	0,972
REFRIGERANTE	1,352	1,314	0,9719
	2,164	2,108	0,974
	2,998	2,850	0,951
	1,594	1,286	0,807
COMBUSTÍVEL	1,784	1,402	0,786
	2,179	1,721	0,789
	2,434	1,919	0,788
	2,495	1,949	0,781
	2,534	1,979	0,781
	2,553	2,013	0,788
	2,372	1,873	0,790
	2,026	1,592	0,786
	1,768	1,414	0,800
	GRAFITA	1,868	1,623
1,813		1,612	0,89

TABELA 3. - Fluxo de nêutrons térmicos e relação entre os fluxos na região central do núcleo (corte AA') para as configurações "A1" e "A3".

( $\times 10^{13}$  n/cm<sup>2</sup>.s)

POSICÃO	$\phi_T$ (Conf. B)
GRAFITA	1,107
	1,305
REFRIGERANTE	2,067
	2,837
COMBUSTÍVEL	1,458
	1,600
	1,930
	2,429
	5,730
	5,862
	2,607
	2,195
	1,931
	1,709
GRAFITA	1,712
	1,675

TABELA 4 - Fluxo de nêutrons térmicos no centro do núcleo para configuração "B".

Observa-se que quando um elemento combustível de controle, usado como dispositivo de irradiação, é colocado no centro do núcleo, o " $K_{eff}$ " diminui cerca de 2,7% em relação a uma configuração com elementos combustíveis idênticos e sem vazios no centro do núcleo. Neste caso, foi necessário aumentar a massa da configuração para 4,536 Kg (cerca de um elemento combustível e meio a mais) para que o excesso de reatividade se elevasse a valores compatíveis com núcleo sem elementos combustíveis de controle utilizados como dispositivos de irradiação.

#### 6. Influência dos Elementos Refletores de Grafita Sobre o Excesso de Reatividade

O reator IEA-R1 necessita, segundo estudos registrados na referência <sup>(3)</sup>, de aproximadamente 10.000 PCM para operar durante 6 meses a uma potência de 2 MW térmicos, cerca de 40 horas semanais.

O excesso de reatividade de uma dada configuração é influenciado, entre outros fatores, pela quantidade de combustível nuclear existente no núcleo (U-235 para o presente estudo) assim como pela disposição dos elementos refletores localizados na placa matriz. Com o objetivo de se determinar a influência dos elementos refletores de grafita em função da disposição escolhida, utilizou-se a configuração "A<sub>2</sub>" (Figura 2).

Verificou-se a variação apresentada no excesso de reatividade da configuração "A<sub>2</sub>" quando elementos refletores eram substituídos por coluna de água e vice-versa dependendo do local estudado. Estes locais foram numerados de 1 a 9.

Como se observa na Tabela 5, a influência dos elementos refletores sobre o excesso de reatividade é mais intensa nos locais limitantes do núcleo sobre a linha e coluna central, ou sejam: locais 1, 3, 4 e 6. Destes, os mais influentes se encontram onde existe apenas uma linha ou coluna de elementos refletores, ou sejam, locais 1 e 6.

Observa-se que na medida em que os elementos refletores se afastam da linha e coluna central do núcleo, a influência diminui (zonas 2, 5, 7).

Quando o elemento refletor se encontra na segunda coluna ou linha em relação ao núcleo e é antecedido, em uma primeira situação, por uma coluna de água (zona 8) e, em uma segunda situação, por outro elemento refletor (zona 9), a influência destes sobre o excesso de reatividade diminui consideravelmente.

POSICÃO	$K_{eff}$	$ \Delta K $
	1.1017	-
1	1.0954	630
2	1.0981	360
3	1.0966	510
4	1.1076	590

POSICÃO	$K_{eff}$	$ \Delta K $
5	1.1041	240
6	1.0952	650
7	1.0987	300
8	1.1012	50
9	1.1009	80

TABELA 5. - Influência dos elementos refletoras de grafita sobre o excesso de reatividade da configuração "A<sub>2</sub>".

### 7. Conclusões

A partir deste trabalho conclui-se que dois fatores são fundamentais quando da conversão do núcleo de elementos altamente enriquecidos para elementos com baixo enriquecimento em U-235, a saber:

- excesso de reatividade da configuração
- fluxo de nêutrons térmicos máximo

É importante a escolha de um destes fatores. Se o interesse é pelo aumento da vida útil da configuração, deve-se aumentar a massa de U-235 por placa. Com isto, porém há uma diminuição do fluxo de nêutrons térmicos no centro do núcleo. No caso em que seja o fator preponderante, mantém-se a massa de U-235 ( $m = 10g$  por placa), coloca-se um elemento vazado no centro do núcleo e aumenta-se o número de elementos combustíveis por configuração.

Para o caso de irradiação de materiais que necessitam fluxo de nêutrons térmicos elevados, o trabalho mostra que a configuração "B" é a mais indicada pois com um elemento de irradiação no centro do núcleo, obtém-se um fluxo de nêutrons térmicos 2,3 vezes superior ao apresentado por outras configurações (Tabela 2,3 e 4).

Conclui-se também que uma boa disposição dos elementos refletoras aumenta a reatividade da configuração. A presença de elementos vazados na linha e coluna central do núcleo diminui consideravelmente essa reatividade, principalmente na face direita e inferior, onde existe uma única coluna e linha disponível na placa matriz.

Conclui-se ainda que um elemento refletor posicionado atrás de outro, muito pouco contribui para o aumento de reatividade.

Enfim, para aumentar a reatividade da configuração aconselha-se o menor número de dispositivos de irradiação de amostras no nú -



cleo e, sempre que possível, nas posições extremas e ainda, preferencialmente, nas faces, esquerda e superior. Um elemento refletor afastado do núcleo muito pouco contribui para o aumento dessa reatividade quando antecedido por coluna de água ou outro elemento refletor.

#### 7. Referências Bibliográficas

- (1) FOWLER, T.B.; VONDY, D.R.; CUNNINGHAM, G.W. Nuclear Reactor core analysis code : CITATION. Oak Ridge, Tenn., Oak Ridge National Laboratory, Jul. 1971 (ORNL- TM-2496, Rev.2).
- (2) FRAJNDLICH, R.; SCHAAL, H. Theoretical studies for the conversion from high enrichment fuel to low enrichment fuel for research reactor IEA-R1 at IPEN, São Paulo, Brazil. Jülich, Alemanha Ocidental, 1982.
- (3) FRAJNDLICH, R.; SOUSA, J.A. Cálculos neutrônicos para várias configurações do núcleo do reator IEA-R1 visando a sua otimização. São Paulo, Brasil, CNEN/SP, 1983.
- (4) FRAJNDLICH, R. Resultados de cálculo teórico e medida experimental de fluxo de nêutrons no reator IEA-R1. São Paulo, Brasil, CNEN/SP, 1984.
- (5) Research Reactor core Conversion From the Use of Highly Enriched Uranium to the Use of Low Enriched Uranium Fuels Guidebook. International Atomic Energy Agency IAEA-TECDOC-233, Vienna, 1980.
- (6) SUICH, J.E.; HONECK, H.C. The HAMMER SYSTEM Heterogeneous analysis by multigroup methods of exponentials and reactors. United States Atomic Energy Commission, Jan. 1967.