

CÁLCULO DOS PARÂMETROS NEUTRÔNICOS DO REATOR IEA-R1
E PROPOSTA DE UMA NOVA CONFIGURAÇÃO.

Nanami Kosaka , Leda C.C.B.Fanaro, Mitsuo Yamaguchi

Divisão de Física de Reatores
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Comissão Nacional de Energia Nuclear

RESUMO

No programa de redução de enriquecimento de combustível do IEA-R1-CNEN/SP serão utilizados inicialmente combustíveis de placa contendo U308-Al a 19,9% de enriquecimento em U-235. A geometria do novo elemento combustível padrão, composto de 18 placas de combustível, será mantida.

Este trabalho descreve a metodologia de cálculo de reator utilizada no IPEN e apresenta alguns parâmetros neutrônicos da atual configuração do IEA-R1 assim como os da nova configuração proposta quando da introdução de um novo elemento combustível de baixo enriquecimento fabricado no IPEN.

ABSTRACT

The program for reducing the fuel enrichment of the IEA-R1 reactor considers fuel plates containing U308-Al with 19,9% of U-235. The geometry of the new 18 fuel plate fuel elements has been kept the same.

This work describes the calculation methods utilized at IPEN-CNEN/SP and some neutronic parameters of the present configuration of IEA-R1 as well as for a new configuration proposed with a new LEU fuel element are shown.

1. Introdução

Integrando o programa mundial de redução de enriquecimento dos combustíveis do tipo MTR nos reatores de pesquisa, o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - CNEN/SP estabeleceu um programa de estudo para a possível conversão do núcleo do reator IEA-R1 de urânio altamente enriquecido (HEU) para urânio de baixo enriquecimento (LEU). Embora seja desejável que esta conversão fosse realizada em uma só etapa, redefinindo um novo núcleo, este processo no IPEN será efetuado gradativamente em vista da capacidade limitada de produção de novos combustíveis.

Em 1982 foram colocados 5 elementos combustíveis da NUKEN de baixo enriquecimento (<20% em U-235) no IEA-R1, iniciando a conversão para LEU. Atualmente o reator vem operando a uma potência de 2 MW, sendo que aproximadamente 80% dos elementos combustíveis são de alto enriquecimento (93% em U-235) e os restantes são de 20%.

Em vista da crescente demanda na utilização de radioisótopos no Brasil, o IPEN decidiu conjuntamente com o programa de conversão de enriquecimento, iniciar o programa para o aumento de potência para 5 MW e a mudança do ritmo de operação de intermitente para contínuo (14 dias).

Para atender às necessidades de combustível de baixo enriquecimento no IEA-R1, o Departamento de Metalurgia do IPEN tem desenvolvido o processo de fabricação de combustíveis do tipo MTR a dispersão de U308-Al, com enriquecimento de 19,9% em U-235. A Divisão de Física de Reatores é a responsável pelo projeto de novas configurações do núcleo do IEA-R1. O pacote utilizado para cálculos neutrônicos inclui os programas HAMMER-TECHNION [1], LEOPARD4 [2] e AMPX-II [3] para a geração de seções de choque e CITATION [4] e 2DB [5] para cálculo do reator.

Os objetivos deste trabalho consistem no cálculo de criticalidade, da distribuição de fluxo e densidade de potência, dos coeficientes de reatividade e valor de barras de controle para a configuração atual e para a nova proposta para o reator IEA-R1.

2. Descrição do Reator

O núcleo do reator tem a forma de um paralelepípedo e é composto de elementos de combustível (EC) padrão, elementos de controle, elementos de irradiação e refletores, que são encaixados verticalmente em furos da placa matriz de alumínio que contém 80 orifícios, formando a matriz de 8x10.

O elemento de combustível é do tipo MTR (Material Testing Reactor) e compõe-se de 18 placas planas de combustível montadas paralelamente em estojo de alumínio. O elemento de

controle é formado por 12 placas de combustível, ocupando a posição central do elemento, sendo que as posições 2 e 17 do estojo de alumínio estão reservadas para a inserção das barras absorvedoras. As placas que antecedem e sucedem a barra absorvedora são constituídas somente de alumínio. O elemento de irradiação interno ao núcleo apresenta 9 placas de combustível formando 2 conjuntos de 5 e 4 placas cada, separados por um canal que serve para introduzir amostras a serem irradiadas. Além destes há outros elementos de irradiação localizados fora do núcleo.

O controle do reator é feito por 4 barras de controle do tipo garfo contendo o material absorvedor Ag-In-Cd na proporção de 0,80-0,15-0,05 respectivamente. Os refletores são formados por blocos de grafita e caixas de alumínio contendo água, onde se localizam, em certas posições, os detectores.

Configuração atual do reator IEA-R1

A configuração atual do reator IEA-R1 é denominada CONF.156 e é composta de 32 EC, dos quais 25 são de combustível padrão, 4 elementos de controle, 1 elemento de irradiação interno e 2 elementos de teste. Os elementos de irradiação externos ao núcleo são do tipo:

- EIGRA : elemento de irradiação de grafita refrigerado a água
São em numero de 3.
- EIRA : elemento de irradiação refrigerado a água. São colocados em caixas de alumínio (A40).
- GI : guia de irradiação formado por um tubo de alumínio.

A configuração 156 está ilustrada na figura 1 e os respectivos enriquecimentos estão na figura 2. Já a figura 3 mostra as taxas de queima média por EC.

Configuração nova proposta com 1 EC novo.

Inicialmente será introduzido no reator IEA-R1 um elemento de combustível novo de baixo enriquecimento fabricado no IPEN, onde este elemento será identificado como EC 131. A nova configuração denominada CONF.158 (figura 4) foi definida obedecendo vínculos tais como:

- i) o novo elemento combustível deve ser colocado numa posição de baixo fluxo, na primeira linha da face norte do núcleo;
- ii) a máxima queima do novo elemento combustível deverá ser de 0,4% em massa de U-235 por mês, e deverá ser mantido nesta posição até atingir 4% de queima;
- iii) manter os elementos testes 128 e 129;
- iv) retirar do núcleo o elemento combustível mais queimado;
- v) a nova configuração deve possuir reatividade suficiente para manter o reator operando durante um mês.

Nota-se que são poucas as opções para a nova configuração, mas futuramente dispondo de mais elementos de combustível novos poder-se-á efetuar um estudo mais detalhado de gerenciamento para obter a melhor utilização do combustível.

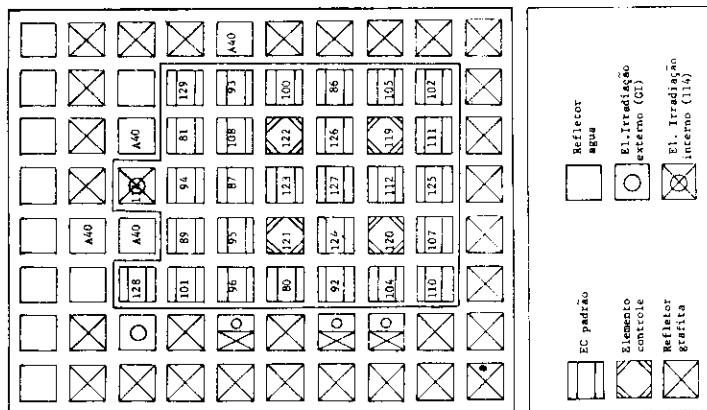


Figura 1. Configuração 156

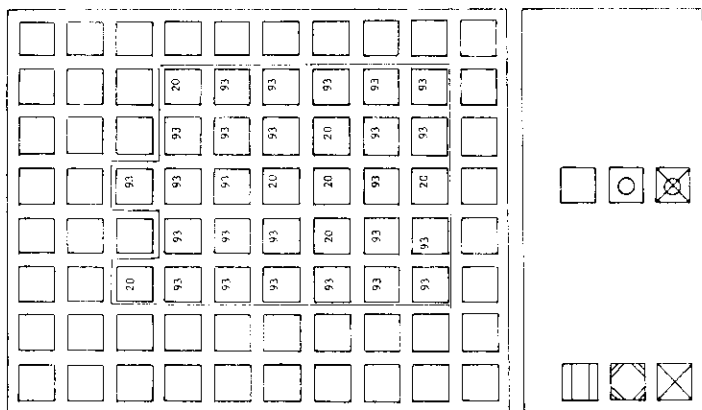


Figura 2. Enriquecimento, em %U-235 - Configuração 156

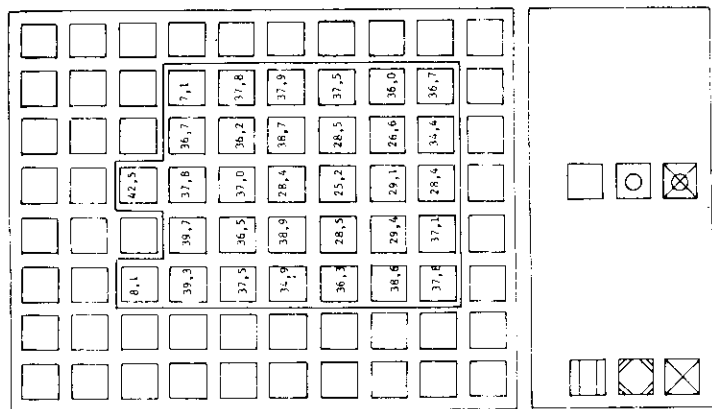


Figura 3. Taxa de queima, em % U-235
- Configuração 156

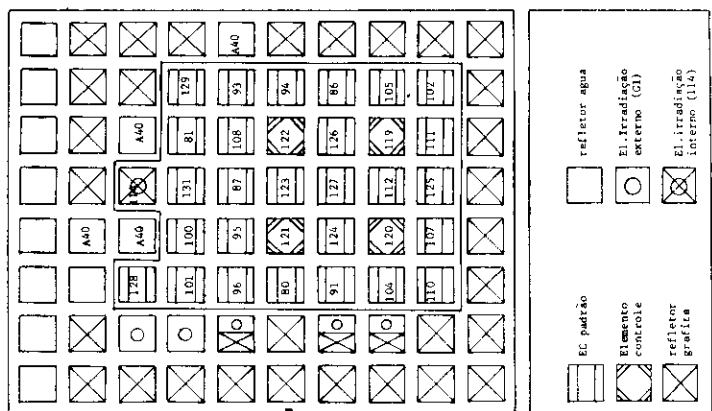


Figura 4. Configuração 158

3. Metodologia de Cálculo Neutrônico

Para a geração de constantes nucleares utilizou-se os programas HAMMER-TECHNION e LEOPARD4. A biblioteca do HT é baseada no ENDF/B-IV com algumas modificações introduzidas pela Seção de Dados Nucleares da Divisão de Física de Reatores. O LEOPARD4 usado é a versão modificada pela Universidade de Michigan própria para combustível do tipo MTR. A célula de combustível padrão adotada está ilustrada na figura 5.

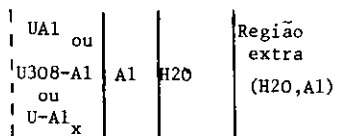


Figura 5. Célula de Combustível Padrão

As seções de choque das barras de controle são calculadas utilizando-se o modelo da supercélula, no qual o cerne é a região absorvedora envolta por alumínio, moderador e região de combustível. Estes dados são modificados de tal forma que as taxas de reação calculadas pela teoria de transporte (HT) sejam preservadas quando calculadas pela teoria de difusão (CITATION). Uma vez determinadas as seções de choque homogeneizadas de cada região do reator, este é modelado inteiro em duas (X-Y) e três (X-Y-Z) dimensões considerando (6x6) e (4x4x24) divisões espaciais por EC, respectivamente. Dois grupos de energia de neutrons foram usados, onde o grupo 1 (rápido) corresponde ao intervalo 10 MeV- 0,625 eV e o grupo 2 (térmico) abaixo de 0,625 eV. É preferível que se utilize 4 grupos de energia de neutrons, mas devido ao tempo de CPU exigido optou-se por 2 grupos para os cálculos rotineiros.

Para o cálculo de queima, dos coeficientes de reatividade e do estudo de gerenciamento de combustível utilizou-se o modelo bidimensional (CITATION, 2DB) e na previsão de criticalidade, valor das barras de controle e cálculo detalhado da distribuição de fluxo e densidade de potência se fez com a modelagem tridimensional (CITATION).

4. Resultados dos Cálculos

Os parâmetros neutrônicos calculados para as duas configurações são: coeficientes de reatividade, valor de barras de controle, fator de pico, excesso de reatividade e distribuição de fluxo de neutrons.

Previsão de criticalidade

Modelando o reator em três dimensões com as barras de con-

trole na posição crítica experimental obteve-se uma previsão de criticalidade com erro da ordem de 0,5% (kef=0,995) para ambas as configurações.

Coefficiente de reatividade

A determinação dos coeficientes de reatividade é necessária para se avaliar a margem de segurança e de desligamento do reator. Os coeficientes de reatividade calculados foram o coeficiente de reatividade de temperatura do moderador (α_m), coeficiente de reatividade de temperatura do combustível (α_f), coeficiente de vazio (α_v) e defeito de potência.

As seções de choque em função das temperaturas do moderador e do combustível foram geradas considerando a queima diferenciada para cada elemento combustível no intervalo de 20 a 80 °C. Os cálculos do reator, em duas dimensões na geometria (X-Y) e 2 grupos de energia foram realizados com o programa CITATION. Os coeficientes α_m e α_f foram determinados usando a expressão abaixo

$$\alpha_i = - \frac{1}{k_i} \left(\frac{k_i - k_{i+1}}{T_i - T_{i+1}} \right) \cdot 10^5 \quad \text{pcm/}^\circ\text{C} \quad (1)$$

O vazio considerado no cálculo do coeficiente de vazio foi simulado pela redução da densidade da água e calculado segundo a expressão

$$V_i = \left(\frac{\rho_{i+1} - \rho_i}{\rho_{i+1}} \right) \cdot 100 \% \quad (2)$$

e o coeficiente calculado usando a equação

$$\alpha_{vi} = - \frac{1}{k_i} \left(\frac{k_i - k_{i+1}}{V_i} \right) \cdot 10^5 \quad \text{pcm / \% vazio} \quad (3)$$

Os resultados encontrados para α_m , α_f e α_v para ambas configurações estão na tabela 1.

Tabela 1. Coeficientes de Reatividade

Coeficientes	CONF.156	CONF.158
α_m (Tm:32-50 °C)	-7,28	-7,23 pcm/ °C
α_f (Tf:42-80 °C)	-0,61	-0,64 pcm/ °C
α_v (V:0,72-1,66%)	-189,72	-191,67 pcm/%vazio

O coeficiente que mais será afetado pela substituição de elemento HEU por LEU é o coeficiente de reatividade de temperatura do combustível pois a variação na temperatura do combustível afeta principalmente a absorção na região de ressonância do U-238 (efeito Doppler).

Na determinação do defeito de potência foram consideradas três situações de operação do reator, a saber:

- i) reator desligado, a frio $T_m = T_f = 20^\circ\text{C}$
- ii) início de operação, potência zero $T_m = T_f = 32^\circ\text{C}$
- iii) operação normal a plena potência ($P = 2 \text{ MW}$) $T_m = 32^\circ\text{C}$
 $T_f = 42^\circ\text{C}$

onde T_m é a temperatura do moderador e T_f a do combustível. A variação da reatividade, da condição de reator desligado a operação a plena potência é da ordem de -105 pcm para ambas as configurações, devido somente à variação da temperatura.

Calibração de Barras de Controle

A determinação da reatividade integral e diferencial das barras de controle (ρ_D e ρ_I) foi feita de maneira semelhante ao procedimento experimental. A calibração das barras é feita mantendo duas barras na posição crítica e movimentando-se outras duas cuja reatividade está sendo calculada. Estes cálculos são efetuados usando modelo tridimensional (X-Y-Z). As barras de controle são movimentadas pelo mecanismo de controle e as suas posições são medidas em passos, sendo que o comprimento total da barra é dividido em 1000 passos com o zero na base do núcleo, com a barra totalmente inserida e cada passo corresponde a $0,6 \text{ mm}$.

As curvas de reatividade integral e diferencial estão ilustradas nas figuras 6 e 7. O valor da reatividade integral e o valor máximo da reatividade diferencial estão na tabela 2. A máxima reatividade diferencial é da ordem de $96,39 \text{ pcm/cm}$. A velocidade de movimentação das barras é de aproximadamente 2 mm/s e o limite máximo permitido da taxa de inserção de reatividade é de 20 pcm/s . Assim nestas configurações nenhuma barra de controle viola o limite de inserção, qualquer que seja a sua posição dentro do núcleo. Quando o limite de inserção é violado deve-se definir uma estratégia de movimentação de barras.

Tabela 2. Reatividade Integral e Diferencial

Barra	CONF.156		CONF.158	
	ρ_I (pcm)	ρ_D (pcm/cm)	ρ_I (pcm)	ρ_D (pcm/cm)
BS1 (120)	3111	76,03	2949	70,16
BS2 (119)	3051	72,48	2858	68,05
BS3 (122)	3676	88,71	3724	90,04
BC (121)	3989	96,39	3884	93,84

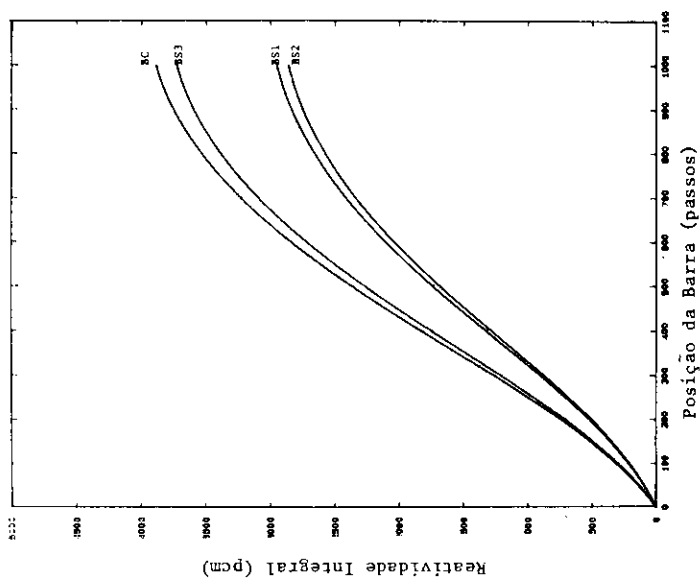


Figura 6. Curva de reatividade integral das barras de controle do reator IEA-R1 - Configuração 158

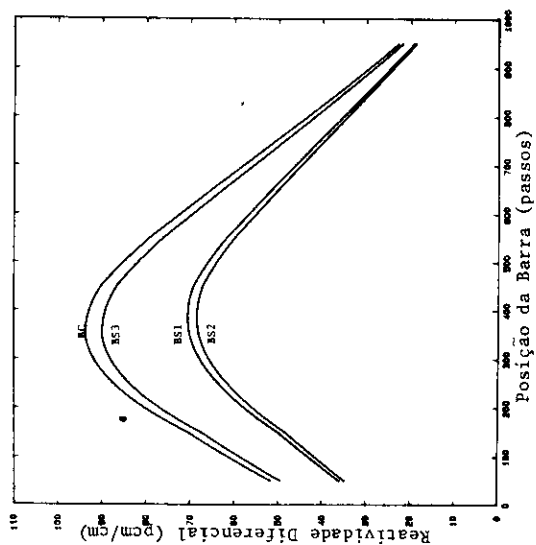


Figura 7. Curva de reatividade diferencial das barras de controle do reator IEA-R1 - Configuração 158

O fator de pico total (F_{xyz}) foi calculado considerando as barras de controle na posição crítica e é definido como a razão entre a densidade de potência local e a densidade de potência média do núcleo. Os fatores de pico encontrados foram 2,110 e 2,095 para as configurações 156 e 158 respectivamente, localizados na região central do núcleo. O fator de pico é um parâmetro importante para a segurança do reator.

Excesso de Reatividade

O ganho em reatividade pela introdução de um novo elemento combustível de baixo enriquecimento (EC130), na periferia do núcleo, substituindo um elemento de alto enriquecimento (EC89) é de aproximadamente 350 pcm. Embora o elemento 114 apresente a maior taxa de queima, este não foi retirado do núcleo por ser um elemento especial de irradiação. Futuramente deverá ser substituído por um novo elemento de irradiação a ser fabricado no IPEN.

Distribuição de Fluxo

A distribuição radial do fluxo de neutrons se encontra ilustrada na figura 8. A introdução do novo elemento de combustível na periferia do núcleo altera a distribuição radial da densidade de potência, tendendo a se espalhar para a periferia como mostra a figura 9.

5. Conclusão

O aumento de 350 pcm na reatividade verificada na CONF.158 em relação a CONF.156 é suficiente para manter o reator IEA-R1 operando durante um mês. No entanto se modificar o ritmo de operação para o modo contínuo serão necessários no mínimo, dois elementos por mês, pois além da maior taxa de queima de combustível deve-se compensar a maior produção de Xe.

Embora fosse observado um erro de 5% na previsão de criticidade isso não afeta os resultados, pois além desse desvio se manter constante em todas as configurações, muitos parâmetros de interesse são valores relativos. Dispondo, futuramente, de mais dados experimentais espera-se reduzir esse erro.

Os parâmetros neutrônicos não são afetados consideravelmente pela substituição de 1 elemento HEU por LEU, mas quando todo o núcleo for convertido essas diferenças serão verificadas. Nos trabalhos futuros serão comparados os valores calculados com os experimentais.

Encontra-se atualmente em andamento um estudo para se prever as necessidades de novos combustíveis em vista à elevação da potência do reator de 2 MW para 5 MW.

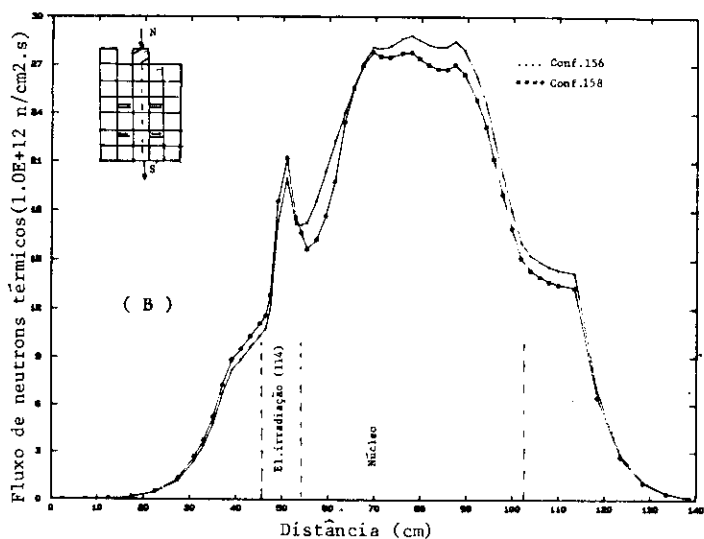
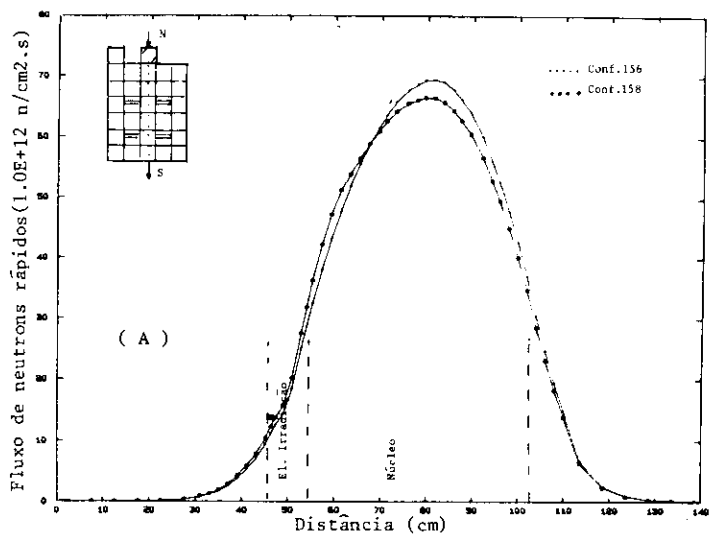


Figura 8. Distribuição espacial dos fluxos de neutrons rápidos (A) e térmicos (B), no sentido N-S. no centro do núcleo.

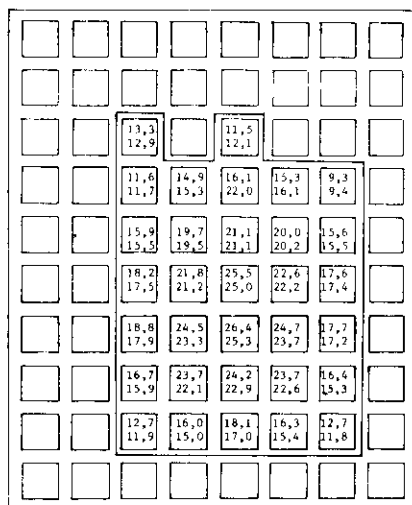


Figura 9. Densidade de potência média por EC, em W/cm^3 . Valor superior corresponde a Conf.156 e o inferior a Conf.158.

Referências

- [1] Barhen et alli, "The HAMMER code system-technion-Israel Institute of Technology", EPRI, NP-565, 1978.
- [2] "LEOPARD-LEO4", University of Michigan, March., 1980 (relatório interno não publicado).
- [3] "AMPX-II- Modular code system for generation coupled multigroup neutron-gamma ray cross section libraries from DATA in ENDF format" - Radiation Shielding Information Center, ORNC, PSR-63, 1981.
- [4] "University of Michigan Nuclear Engineering Reactor Design Code 2-D diffusion with macroscopic depletion 2DB-UM" - University of Michigan, September 1986 (relatório interno não publicado) .
- [5] Fowler, T.B.; Vondy, D.R. e Cunningham, G.W. , "Nuclear Reactor Core Analysis Code - CITATION" - ORNL-TN-2496, Rev.2, 1971.