

OTIMIZAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS NEUTRÔNICAS DE ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS DE  $U_3Si_2$  COM BAIXO ENRIQUECIMENTO PARA UM NOVO PROJETO DO NÚCLEO DO REATOR IEA-R1.

L.A.MAI (\*); J.R.MAIORINO (\*) E A.GOUVÊA (\*\*)

Divisão de Física de Reatores (\*) (RTF)

Divisão de Apoio à Engenharia e Pesquisa (\*\*) (IPP)

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN)

Comissão Nacional de Energia Nuclear, São Paulo (CNEN)

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo de otimização neutrônica das dimensões de elementos combustíveis  $U_3Si_2$ -Al, com baixo enriquecimento. O objetivo é a obtenção de uma proposta de núcleo otimizado para utilização no reator IEA-R1. Mantiveram-se como vínculo as dimensões externas do elemento e como função objetiva definiu-se a perda de reatividade durante a vida do combustível e esta perda foi minimizada variando-se as dimensões do EC.

Os cálculos foram realizados através de células unitárias, com programa HAMMER-TECH /3/, variando-se a queima até 50% da massa inicial de U-235. As funções objetivas calculadas foram ajustadas por superfícies através do sistema SAS /9/ e os extremos dessas funções foram determinados por uma subrotina da Harwell /10/.

ABSTRACT

This work shows a study of neutronic optimization of  $U_3Si_2$ -Al low enrichment fuel element. This study has a goal to propose a optimized Core to be used in the research reactor IEA-R1. The external dimensions of the fuel element were maintained as constraints and the loss of reactivity along fuel life-time was defined as "objective function", and it has been minimized by varying the fuel element dimensions.

Cell calculations were made with HAMMER-TECH /3/ Code, for burnups up to 50% of U-235 initial mass. The Computer values of the objective function for several combinations of fuel element dimensions were fitted by a surface using the SAS system /9/, and it has been minimized by a Harwell subroutine /10/.

## 1. Introdução

Este trabalho faz parte do contrato de pesquisa em desenvolvimento junto à Agência Internacional de Energia Atômica (BR.4661-projeto ARCAL V- Utilização de Reatores de Pesquisa - RLA/4/007), o qual tem como objetivo obter uma configuração de núcleo utilizando combustível com baixo enriquecimento (20% W/O). A configuração fornecerá uma otimização tanto do fluxo nas posições de irradiação, como da utilização do combustível, viabilizando uma proposta que possa ser utilizada no reator de pesquisa IEA-R1 do IPEN/CNEN-SP, com um aumento de potência dos atuais 2MW para 10MW.

O primeiro passo da pesquisa foi avaliar os códigos disponíveis no IPEN/CNEN-SP, necessários para a realização dos cálculos. Para tal foi calculado o "Benchmark" da IAEA, de 10MW, publicado no Tec.Doc 233/1/ e também realizadas medidas experimentais no reator IEA-R1. Estes estudos resultaram em trabalho apresentado no último encontro internacional sobre redução de enriquecimento para reatores de pesquisa /2/. Naquela ocasião notaram-se algumas pequenas discrepâncias relativas aos cálculos de outras instituições que se atribuíram à biblioteca de dados nucleares dos códigos utilizados. No entanto, os resultados indicaram de uma maneira geral, uma razoável concordância. Recentemente melhoramentos foram feitos relativos ao tratamento dos produtos de fissão do programa HAMMER-TECH /3/ utilizado para cálculos celulares, assim como na sua biblioteca de dados nucleares, qualificando o código para ser usado no projeto. Posteriormente foi realizado um estudo da sensibilidade da estrutura de grupos energéticos /4/ que aproximou ainda mais os resultados do "Benchmark". Concluiu-se neste trabalho que serão utilizados nos cálculos seguintes 4 grupos de energia.

Pretende-se, no presente trabalho, definir o elemento combustível do reator IEA-R1, mantendo-se como vínculo suas dimensões externas atuais (seção transversal e altura ativa), de modo a não alterar a atual placa matriz. Por outro lado, a composição do combustível foi determinada com base em estudos de projetos similares e do "estado da arte" na fabricação de elementos combustíveis com baixo enriquecimento /6/.

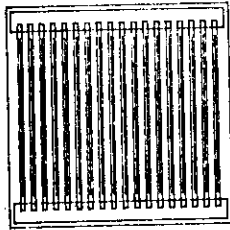
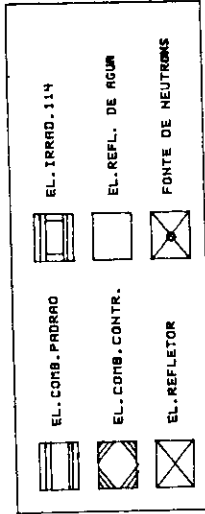
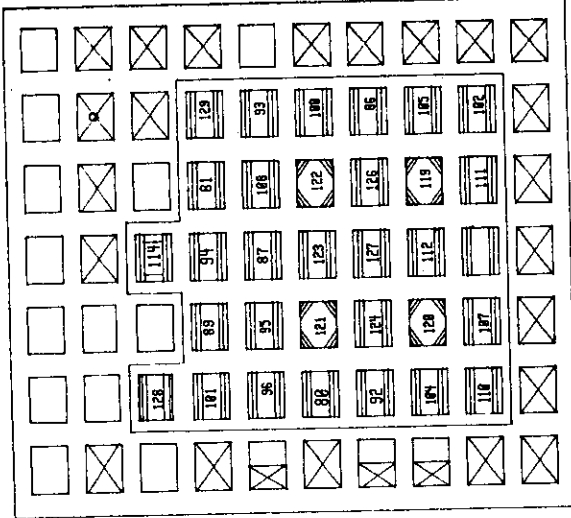
Atualmente, paralelamente a este trabalho, estão se desenvolvendo estudos visando a definição dos elementos de controle/segurança, de refletores e definindo as prováveis configurações de núcleo a serem utilizados. Estes estudos estão sendo realizados através de cálculos celulares com o código HAMMER-TECH e cálculos de reator com o código de difusão CITATION /5/, avaliados no estágio anterior do projeto. Posteriormente, serão verificados os limites termohidráulicos e de segurança do reator através do código HEATHYD /7/, para definir as condições de refrigeração necessárias para o novo núcleo e analisar os acidentes (LOCA, inserção de reatividade) bem como aspectos de blindagem, para finalmente obter-se o projeto a ser proposto para o reator IEA-R1.

## 2. Características do Elemento Combustível

Atualmente o IEA-R1 opera a 2MW utilizando um núcleo misto com alto e baixo enriquecimento, com altas taxas de queima (~37% em massa do U-235) e um pequeno excesso de reatividade.

A figura 1 ilustra a atual configuração do reator IEA-R1, com detalhes dos elementos combustíveis e de controle.

Desde o início desta década, o IPEN/CNEN-SP decidiu seguir a tendência mundial de mudança de elementos combustíveis de alto enriquecimento (HEU), para elementos combustíveis com baixo enriquecimento (LEU) sem perda dos níveis de fluxo do reator, tendo inclusive adquirido os atuais 5 elementos combustíveis LEU da NUKEN. Paralelamente, foram iniciadas pesquisas para a fabricação de combustíveis no próprio instituto, decidindo-se então por combustíveis óxi



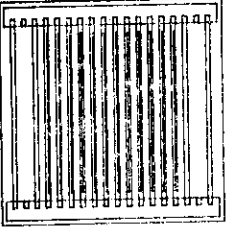
ELEMENTO COMBUSTIVEL PADRAO

DADOS

- i) elemento americano
  - núm. de E.C. - 20
  - enriquecimento - 93,15%
  - composição - liga Al-U
  - espessura no cerne - 0,51 mm
  - espessura de revestimento - 2,89 mm
  - espessamento do canal - 605,0 mm
  - altura ativa

DADOS

- placa combustivel - 12
- placa de alumina - 2
- placas absorvedoras - 2
- composição do absorv. - 80%
- placa - 15%
- Cd - 5%



ELEMENTO COMBUSTIVEL DE CONTROLE

DADOS

- ii) elemento alemão
  - núm. de E.C. - 5
  - enriquecimento - 19,77%
  - composição - UAl<sub>3</sub>
  - espessura do cerne - 0,76 mm
  - espessura do revestimento - 0,30 mm
  - espessamento do canal - 260 mm
  - altura ativa - 600,0 mm

Figura 1. Detalhes do reator IEA-R1

PLACA MATRIZ DO REATOR IEA-R1 CONF. 156C.

dos ( $U_{3,8}O_{10}$ -Al). Estas pesquisas resultaram em dois protótipos (EC# 128, EC# 129), os quais foram colocados no núcleo desde o final de 1987 e tem servido para teste de desempenho sob irradiação /11/, sendo que até o presente não ocorreu nenhum problema. Recentemente o IPEN/CNEN-SP iniciou a construção de combustíveis (EC# 130, EC# 131), que, ainda este ano, deverão ser introduzidos no núcleo do reator, sendo que as características geométricas destes elementos combustíveis são idênticas ao elemento da NUKEN. Pretende-se, a curto prazo, substituir todo o núcleo por estes elementos, aumentando a potência do reator para 5MW com operação contínua.

Entretanto, a densidade de urânio dos elementos combustíveis fabricados pelo IPEN/CNEN-SP ( $1,8 \text{ gU/cm}^3$ ), não é adequada para a conversão HEU para LEU, como pode ser notado da tabela 1. Por outro lado, o reator IFA-R1 já opera desde 1957 (31 anos) e, mesmo com algumas reformas já efetuadas /12/, será necessário a médio prazo, uma grande reforma de todas as estruturas, sistemas e componentes. Dentro deste contexto é que este trabalho se enquadra, ou seja, é necessário desde já propor um núcleo otimizado, para que quando da necessidade de grandes alterações no reator, já se possua o projeto nuclear, o qual obviamente é o que fornece todos os parâmetros (vazão, temperaturas, etc) necessários para realizar as reformas.

Uma preocupação importante do projeto de 10MW com baixo enriquecimento, que é o tema do presente trabalho, é definir um núcleo que mantenha as características geométricas principais do reator IEA-R1. Dessa maneira, as dimensões externas do elemento combustível do reator são mantidas constantes.

Através dos estudos efetuados em reatores similares, que constam na referência 6, chegou-se às faixas de variação dos parâmetros básicos do reator, que são apresentados na tabela 1 a seguir.

Tabela 1. Faixa de variação dos parâmetros básicos pesquisados de reator (20% W/O)

Composição do Combustível	Densidade de U ( $\text{gU/cm}^3$ )	
$UAl_x$ -Al	2,5	
$U_{3,8}O_{10}$ -Al	2,7 - 3,6	
$U_3Si_2$ -Al	3,0 - 4,8	
$U_3Si$ -Al	6,1	
$UO_2$ (Caramelo)	9,1	
Nº de placas p/ E.C.	espessura do Cerne (mm)	espessura do enca- mamento (mm)
18 - 23	0,51 - 1,0	0,34 - 0,50
fluxo médio de calor ( $\text{W/cm}^2$ )	velocidade do re- frigerante (m/s)	fluxo de água p/ E.C. ( $\text{m}^3/\text{h}$ )
20 - 28	3 - 4	28 - 46

Nesta mesma referência, concluiu-se que a densidade mínima de urânio necessária para cumprir os objetivos do projeto era  $3,3 \text{ gU/cm}^3$ . A composição  $\text{UAlx-Al}$  não chega a esse mínimo de densidade sendo, portanto, descartada. A composição  $\text{UO}_2$  também será excluída pois, tratando-se de material cerâmico não disperso, requer tecnologia mais elaborada (EC tipo caramelo) para fabrico de elementos combustíveis tipo placa. O  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$  apresenta grande inchamento (30%) para densidades de fissão acima de  $4,0 \times 10^{27}$  fissões/cm<sup>3</sup>. Tal característica não pode ser tolerada. Restou, portanto,  $\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$  e  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ . Nota-se que a tendência mundial recai atualmente no uso de  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$  como o combustível a ser usado em reatores de pesquisa devido, principalmente, à maior margem de extensão da densidade de urânio desta composição sobre o  $\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$ . Estudos mais recentes /13/ estenderam a densidade de urânio na composição  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$  para  $5,3 \text{ gU/cm}^3$ . Outras características favoráveis deste combustível são a sua pequena percentagem de inchamento (6-7% sob irradiação de  $10^{24}$  fissões/cm<sup>3</sup>) e uma alta temperatura limite para empolamento (515-550°C). Em vistas disso, optou-se pelo  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$  como o combustível a ser adotado neste projeto, com sua densidade de urânio máxima constante na tabela 1, isto é  $4,8 \text{ gU/cm}^3$ .

### 3. Metodologia de Cálculo

Tendo como parâmetros definidos (vínculos) a geometria externa do elemento combustível e a composição dos materiais, tem-se os seguintes parâmetros a serem determinados:

- i. espessura do cerne ( $t_m$ )
- ii. espessura do encamisamento ( $t_c$ )
- iii. número de placas combustível ( $N_p$ )

As restrições termohidráulicas, que serão verificadas posteriormente, são: temperatura de todas as regiões inferiores a 200°C e a razão DNB superior a 2,0. A instabilidade de fluxo também será verificada posteriormente aos presentes cálculos procurando-se sempre as condições de refrigerização que otimizem as margens de segurança.

Os parâmetros a serem determinados serão combinados discretamente segundo os valores constantes na tabela 2. Nesta tabela os extremos das faixas de variação observados foram extrapolados ligeiramente.

Tabela 2: Valores dos parâmetros a serem combinados

$N_p$	$t_m$ (mm)	$t_c$ (mm)
17	0,50	0,20
19	0,625	0,30
21	0,750	0,40
23	0,875	0,50
25	1,000	0,60

O número de combinações dos parâmetros totaliza 125 casos que foram executados pelo programa HAMMER-TECH com 20 estágios de queima de 150 dias cada um. Para cada caso foi determinado o fator de multiplicação infinito no início de vida (KI) e para 50% do consumo de U-235 (KF), além da perda de reatividade entre esses 2 pontos (REAT).

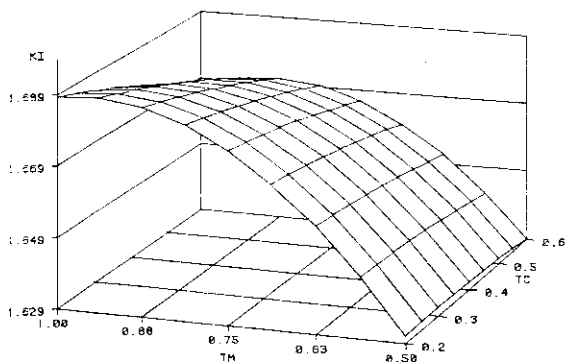


Figura 2. Pontos ajustados para KI

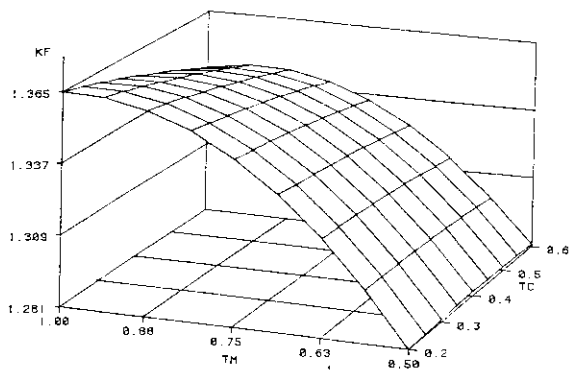


Figura 3. Pontos ajustados para KF

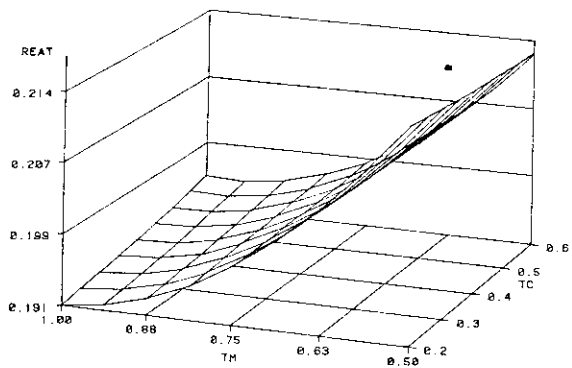


Figura 4. Pontos ajustados para REAT

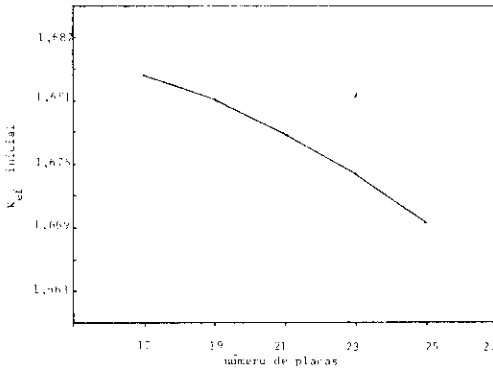


Figura 5. Pontos Máximos de KI em função de  $N_p$

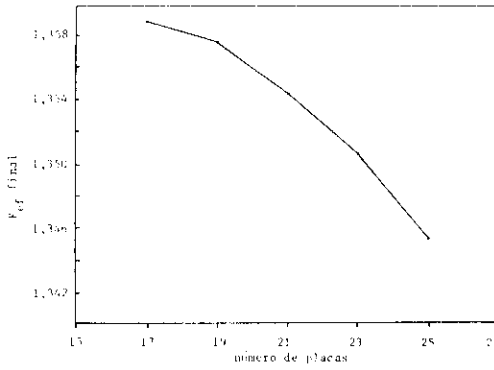


Figura: 6. Pontos Máximos de KF em função de  $N_p$

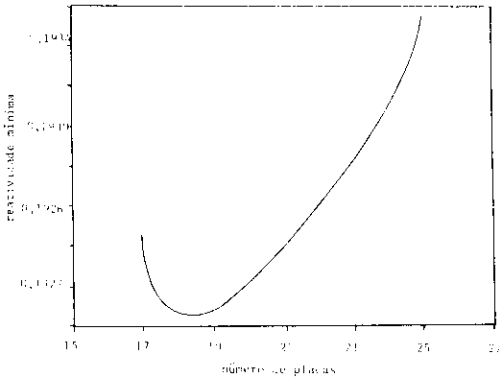


Figura 7. Pontos Mínimos de REAT em função de  $N_p$

Para cada valor de  $N_p$ , ajustou-se uma superfície quadrática completa nos parâmetros  $t_c$  e  $t_m$  através do sistema SAS /9/ para as 3 funções calculadas (KI, KF e REAT) e posteriormente, através da subrotina VEO4 da Harwell /10/, determinaram-se os pontos extremos dessas várias superfícies.

#### 4. Resultados

Nas figuras 2,3 e 4 é apresentada a distribuição dos pontos ajustados para  $N_p = 17$  de KI, KF e REAT. Para todos os outros casos, as figuras são muito semelhantes, e desta forma omitem-se aqui na apresentação.

Nos vários ajustes executados através do sistema SAS, o menor valor do quadrado do coeficiente de correlação foi de 0,9755036, correspondente ao ajuste da perda de reatividade para  $N_p = 25$ . Isso implica em uma excelente concordância com os pontos calculados. Além disso, o gráfico dos resíduos versus pontos calculados nos vários casos se mostrou bem distribuído ao longo da reta resíduo=0.

O critério para selecionar-se o conjunto de parâmetros ótimo foi estabelecido da seguinte maneira:

- i . extensão do ciclo em termo de "burnup"
- ii . boa reserva de reatividade no final do ciclo
- iii . curva de queima que facilite o controle.

Para que se satisfaça todos esses critérios, basta que seja requerido que a curva de queima permaneça a mais "plana" possível, ou seja, o ponto correspondente ao mínimo de perda de reatividade.

As figuras 5,6 e 7 mostram, os pontos máximos de KI e KF e os pontos mínimos de REAT respectivamente, para os vários valores do número de placas  $N_p$ . Da figura 7, determinou-se  $N_p = 18$  como o número de placas ótimo (ponto de mínimo da curva).

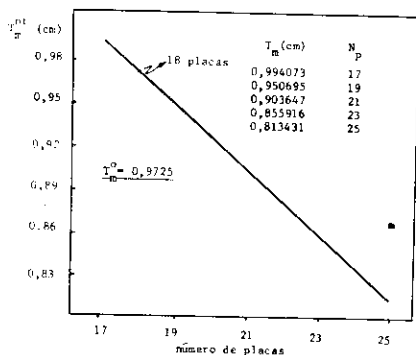


Figura 8. Espessuras ótimas em função de  $N_p$ .

A figura 8 mostra as espessuras do cerne ótimo ( $t_m$ ) encontradas através da subrotina VEO4 do Harwell e, para  $N_p = 18$ , selecionou-se  $T_m = 0,9725$  mm como a espessura ótima. Para todos os casos, o valor da espessura do encamisamento ótimo encontrado foi  $t_c = 0,234$  mm correspondendo ao vínculo inferior colocado no processo de determinação dos pontos extremos das várias superfícies.

Com esses valores determina-se diretamente a espessura do canal de refrigeração que é dado por  $t_{H_2O} = 2,79$  mm.

O conjunto de parâmetros ótimo encontrado é portanto:

$$N_p = 18$$

$$t_c = 0,34 \text{ mm}$$

$$t_m = 0,9725 \text{ mm}$$

$$t_{H_2O} = 2,79 \text{ mm}$$

Por fim, na figura 9, apresenta-se a curva de queima da célula ótima encontrada que está perfeitamente de acordo com os requisitos iniciais.

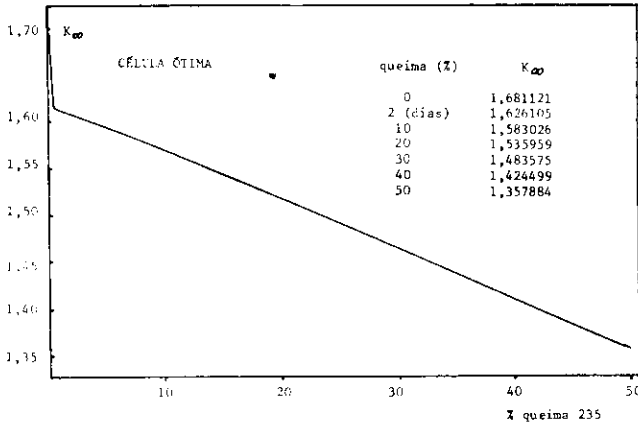


Figura 9. Curva de queima da célula ótima encontrada.

### 5. Conclusão

Os parâmetros geométricos básicos que definem o elemento combustível do reator IEA-RI de 10MW, que melhor satisfazem os critérios exigidos são:

- número de placas do E.C. ( $N_p$ )=18
- espessura do encamisamento  $t_c(t) = 0,34$  mm
- espessura do cerne ( $t_m$ )=0,9725 mm
- espessura do canal refrigerante ( $t_{H_2O}$ )=2,79 mm

Esses valores estão de acordo com as exigências do desempenho neutrônico requerido e cumprem a restrição de não se alterar a geometria externa dos elementos combustíveis atuais do reator IEA-RI. No entanto, como já foi observado anteriormente, esse elemento combustível definido será submetido a cálculos termohidráulicos para verificação de seu desempenho também neste campo.

Comparando-se esses valores com os correspondentes dos atuais elementos combustíveis (americano e alemão) em uso no reator IEA-RI, nota-se principalmente que a espessura do cerne necessita ser aumentada e com a espessura do encamisamento menor, o canal de refrigeração torna-se 1mm mais estreito. Por

esse motivo e mais o aumento da potência do reator pode-se prever a necessidade de um significativo aumento da vazão de refrigerante através do núcleo.

As 125 combinações calculadas pelo programa HAMMER-TECH consumiram 62,5 horas de processamento no computador IBM-4381 disponível a Divisão de Física de Reatores do IPEN/CNEN-SP.

Na sequência do projeto, definidos os elementos combustíveis, de controle, de irradiação, a configuração do núcleo e os refletores, serão efetuados estudos de gerenciamento do combustível, sempre no sentido de otimização do funcionamento e uso do reator.

#### Agradecimentos

Este trabalho faz parte do contrato de pesquisa BR.4661-RLA/4/007, da Agência Internacional de Energia Atômica, pelo qual os autores externam seus agradecimentos.

#### Referências

- (1) IAEA-TEC DOC - 233 - Research Reactor Core Conversion From the Use of Highly Enriched Uranium to the Use of Low Enriched Uranium Fuels - Vienna, 1980.
- (2) MAIORINO, J.R.; FANARO, L.C. B; MAI, L.A.; FERREIRA, P.S.B. & GARONE, J.G. M. - Estudos Neutrônicos Visando a Redução do Enriquecimento do Reator de Pesquisa IEA-R1 - International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, Buenos Aires, Argentina, sep. 28 - oct. 1, 1987.
- (3) SUICH, J.E. & HONECK, H.C. - The HAMMER System: Heterogeneous Analysis of Multigroup Methods of Exponential and Reactor. Aiken, S.C., DuPont de Nemours, Savannah Rives Laboratory, 1967 (DP-1064).
- (4) MAI, L.A. - Sensibilidade de Estrutura de Grupo, relatório interno, Divisão de Física de Reatores, IPEN/CNEN-SP, 1988.
- (5) FOWLER, T.B.; VONDY, D.R. & CUNNINGHAM, G.W. - Nuclear Reactor Core Analysis Code: CITATION, Oak Ridge, Tenn, Oak Ridge National Laboratory, Jul. (ORNL-TM-2496, Rev. 2), 1971.
- (6) MAI, L.A. - Estudo de Elementos Combustíveis tipo placa do ponto de Vista Neutrônica/termohidráulico (Projeto IAEA) - relatório interno, Divisão de Física de Reatores - 1987.
- (7) KHAN, L.A. & NABBI, R. - Heat-transfer Analysis of the Existing HEU and Proposed Leu Cores of Pakistan Research Reactor, Jul. 2118, KFA Julich - 1987.
- (8) MAIORINO, J.R.; PERROTA, J.A.; NANAMI, K. & SILVA, A.T. - Atualização dos Cálculos da Configuração do IEA-R1 para 2MW - Dados Padronizados - relatório interno, Divisão de Física de Reatores/Divisão de Engenharia do Núcleo, 1988.
- (9) SAS User's Guide: Statistics, Version 5 Edition, SAS Institute Inc., North Carolina, USA, 1985.
- (10) HARWELL Subroutine Library, Atomic Energy Research Establishment, Harwell, Oxfordshire, subrotina VEO4, England, 1980.

- (11) FRAJNDLICH, R.; SOUZA, J.A. & KOSHIMIZU, S. - Irradiação e Avaliação de Elementos Combustíveis de Fabricação IPEN/CNEN-SP, VI ENFIR, S.J. dos Campos, dez. 1986.
- (12) SOUZA, J.A. - Reator Nuclear de Pesquisas IEA-R1 - Descrição Geral - Course on Small Computers in Research Reactor Operation and Use, Vol. I, IPEN/CNEN-SP, 1988.
- (13) WEHNER, E.L. & HASSEL, H.W. - The Series Production in a Standardized Fabrication Line For Silicide Fuels and Commercial Aspects - NUKEM GmbH, Hanau, Federal Republic of Germany - International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, Buenos Aires, Argentina, sep. 28 - oct. 1, 1987.