

CONSIDERAÇÕES NEUTRÔNICAS PARA O DESENVOLVIMENTO DE
REATORES BWR AVANÇADOS

Valdemir Gutierrez Rodrigues
Divisão de Operação de Circuito Experimentais
IPEN/CNEN
SP

Dieter Stegemann
Institut für Kerntechnik und Zerstörungsprüfungsverfahren
Universität Hannover
RFA

Resumo

Com o objetivo de aumentar a taxa de conversão dos reatores BWR, foi pesquisado a viabilidade neutrônica de um reator BWR avançado ("Advanced Boiling Water Reactor" - ABWR). Devido a heterogeneidade da estrutura do núcleo do reator BWR, foi desenvolvido uma metodologia para minimizar a complexidade de cálculo e atender a qualidade dos resultados. Na pesquisa foram realizados estudos para verificar a influência de diversos parâmetros geométricos e físicos. Os resultados revelaram que a viabilidade neutrônica do reator conversor avançado é promissora.

Abstract

The main goal of the Advanced High Converter Water Reactor is to increase the conversion ratio.

Amelioration of the conversion ratio is only economically reasonable when the specific construction costs of conventional LWR plants remain almost unchanged, i.e., when the major system equipment does not become more complicated and more expensive. Having such boundary conditions in mind, this paper deals with the first neutronics features of the high converter boiling water reactor. The results shows that the physics of this type of reactor is promising.

1. Introdução

É fato consumado que a energia nuclear tornou-se uma componente imprescindível da economia, e hoje não é inconcebível que a energia de fissão em futuro próximo seja a responsável pela metade da produção mundial de energia elétrica. Considerando este fato, emerge a questão do esgotamento das reservas de urânio. Estimativas da relação Necessidade/Disponibilidade, mesmo usando hipóteses conservativas do crescimento energético mundial, indicam que as reservas de urânio do mundo ocidental são insuficientes. Por conseguinte, é necessário desenvolver reatores que melhorem a utilização do urânio natural, como por exemplo, os reatores rápidos. Em face da atual indefinição no desenvolvimento de tais reatores, torna-se urgente adotar medidas para reduzir o consumo de urânio natural. Neste aspecto, é indubitável que os reatores térmicos avançados, devam ser colocados no cenário econômico em horizonte muito próximo, já que com eles poderemos estender o prazo do esgotamento das reservas de urânio em cerca de 20 anos.

Desde os trabalhos de Edlund [1], que demonstrou ser possível elevar a taxa de conversão dos reatores a água leve pressurizada (PWR) até cerca de 1,0, cresce anualmente o interesse nesta área. Presentemente, chegou-se à concepção de um reator a água leve pressurizada com alta taxa de conversão ("Advanced Pressurized Water Reactor" - APWR), e os trabalhos de P+D estão sendo acelerados em diversas instituições internacionais.

A principal característica deste reator é o seu núcleo com geometria hexagonal e reduzida relação volumétrica Moderador/Combustível. O pequeno poder de moderação provoca "endurecimento" do espectro neutrônico, aumentando por conseguinte a taxa de conversão. Os reatores a água fervente ("Boiling Water Reactor" - BWR) possuem, em média, espectro neutrônico mais energético que os reatores PWR. Utilizando-se desta vantagem, a redução da relação volumétrica Moderador/Combustível dos reatores BWR provocaria "endurecimento" do espectro ainda maior que nos reatores PWR. Partindo deste princípio, está sendo pesquisado a problemática do projeto de aperfeiçoamento dos reatores BWR. Com vistas a uma contribuição para redução do consumo do urânio natural, este trabalho propõe uma primeira concepção neutrônica de um reator a água fervente avançada ("Advanced Boiling Water Reactor" - ABWR).

2. Reator de Referência

Como condição para o desenvolvimento dos ABWR, impõe-se a utilização da tecnologia já comprovada dos reatores BWR. Tal imposição facilitará o licenciamento e reduzirá os custos de investimentos para estes reatores. Seguindo este princípio, a configuração do núcleo dos ABWR deve ser compatível com os atuais BWR comerciais. Como base para este trabalho, tomou-se como referência um reator BWR comercial de 770 MWe, cujos parâmetros de interesse estão mostrados na Tabela 1.

3. Método de Cálculo

A estratégia de cálculo deste trabalho, foi montada com o sistema de programas RSYST [2]. Este sistema constitui-se de um programa principal e de um conjunto de módulos, que podem ser montados de acordo com o tipo de problema a solucionar. A estratégia montada para o cálculo nuclear está fortemente simplificada na Figura 1.

No cálculo do reator ABWR foi utilizado além de uma série de programas para manipulação de dados, os seguintes principais módulos:

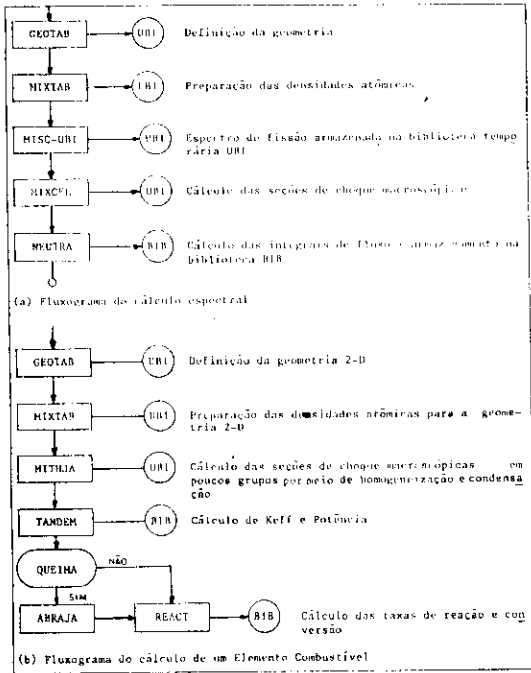


Figura 1 - ESQUEMA DO CÁLCULO NUCLEAR

GAM: Gera as constantes de grupo para as regiões epitérmica e rápida, com tratamento apropriado das ressonâncias, utilizando-se das aproximações B_n ou P_n para o cálculo espectral.

THERM: Programa espectral 0-dimensional com aproximação B_n e correção de "Buckling".

NEUTRA: Programa S_n com matriz de espalhamento completa (uni ou bidimensional).

TANDEM: Resolve a equação de transporte (X, Y, R-Z) em multi grupo, com opção de utilização da teoria da Difusão ou aproximação S_N . Matriz de espalhamento completa, isotrópica ou linear anisotrópica.

Tabela 1. Reator de Referência

- Pressão de Operação	72 bar
- Vazão Mássica (Total)	32600 t/h
- Vazão Mássica/Elemento	54,5 t/h
- Temperatura de entrada/saída do núcleo	277/286 °C
- Entalpia de entrada	292 Kcal/Kg.
- Potência linear média	230 W/cm
- Fluxo de Calor Médio	51.4 W/cm ²
- Altura ativa do núcleo	3660 mm
Elemento de Combustível	
- Arranjo das varetas	7 x 7
- Espaçamento entre as varetas	18,75 mm
- Diâmetro externo das varetas	14,29 mm
Vareta Combustível	
- Diâmetro da pastilha	12,4 mm
- Densidade do UO ₂	10,25 g/cm ³
- Material do revestimento	Zircaloy - 2

MITHJA: Programa para homogeneização ou condensação das constantes de grupo com diferentes teorias.

ABRAJA: Resolve a equação da queima utilizando-se de método analítico com um modelo programado da queima.

REACT: Calcula as taxas de reação e conversão por Zona, por Nuclídeo e total.

4. Taxas de Reação, Conversão e Vetor de Plutônio

Para determinar a influência de cada isótopo no fator de multiplicação e conversão, é necessário conhecer a composição do vetor de Plutônio utilizado na fabricação do combustível. Neste trabalho considerou-se dois vetores extraídos de reatores a água leve após queima de 34 MWd/Kg e estocagem de 3 e 10 anos. A Tabela 2, mostra as características dos vetores. Para o cálculo da taxa de conversão é necessário definir o ciclo de combustível utilizado. Para este trabalho, considerou-se somente o ciclo de Urânio-Plutônio. A Figura 2 mostra o referido ciclo, partindo-se do U-235. Os núclídeos considerados no cálculo da taxa de conversão estão indicados dentro de um quadro como mostrado na Figura. Reações secundárias, tais como a captura de um neutron pelo U-239 não foram consideradas. Para o cálculo das taxas de reações, foi desenvolvido o programa REACT. O programa foi desenvolvido em forma modular e integrado ao sistema RYST.

As taxas de reações calculadas são as seguintes:

$$\text{- Captura} = C(N) = \sum_K N \sigma_c(N,K) \phi(K,j); \quad (1)$$

$$\text{- Fissão} = F(N) = \sum_K N \sigma_f(N,K) \phi(K,j); \quad (2)$$

$$\text{- Produção} = P(N) = \sum_K N \gamma \sigma_f(N,K) \phi(K,j); \quad (3)$$

$$\text{- Absorção} = A(N) = \sum_K N \sigma_a(N,K) \phi(K,j); \quad (4)$$

onde:

N - núclídeo; $\sigma_c, \sigma_f, \sigma_a$ - Seções de choque microscópicas de captura, fissão e absorção;
 K - grupo;
 j - zona N_N - densidade atômica do núclídeo $N(\text{cm}^{-3})$

Utilizando-se das definições acima, a taxa de conversão (CR) do ciclo Urânio-Plutônio é:

$$CR(j) = \frac{\text{Taxa de captura ressonante no [U-238 + Pu - 240]}}{\text{Taxa de absorção no [U-235 + Pu - 239 + Pu - 241]}} \quad (5)$$

e a taxa de conversão integrada, CR:

$$CR = \frac{\sum_j CR(j) V(j)}{\sum_j V(j)} \quad (6)$$

onde V = Volume.

Tabela 2. Composição dos Vetores de Plutônio

Vetor	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242	Pu(físsil)	Pu(Total)
$T_{1/2}$ (anos)	$2,439 \cdot 10^4$	$6,540 \cdot 10^4$	15	$3,870 \cdot 10^5$	—	—
Pu-3a(%)	55,79	25,56	12,63	5,93	68,42	100,00
Pu-10a(%)	57,81	26,57	9,47	6,15	67,28	100,00

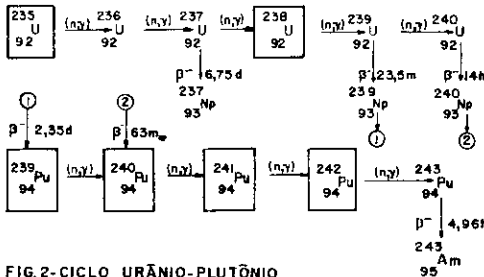


FIG.2-CICLO URÂNIO-PLUTÔNIO

5. Divisão do Elemento Combustível para Cálculo do Espectro

Nos reatores BWR, o elemento de combustível é constituído por varetas encerradas em uma caixa de Zircaloy, para diminuir o escoamento bifásico. Entre cada quatro elementos, forma-se um canal para receber e refrigerar a barra de controle cruciforme. Esta estrutura heterogenea do núcleo causa forte dependência local do fluxo de neutrons, dificultando o cálculo simplificado do reator. Consequentemente, faz-se necessário a divisão do elemento em regiões para cálculo apropriado do espectro. A Figura 3 mostra a divisão do Elemento em 4 regiões ou células típicas utilizadas nos cálculos. Para cada célula foi gerado o espectro e após condensação e homogeneização foram geradas as constantes de grupo para estas regiões.

O cálculo do espectro para a região 1 foi realizado com geometria cilíndrica unidimensional, mantendo-se constante a relação volumétrica Moderador/Combustível. A influência das varetas periféricas na vareta central é considerada através da homogeneização das oito células que circundam a célula central e através da condição de contorno de reflexão. A cilindrização da região central está mostrada na Figura 4(a). O es

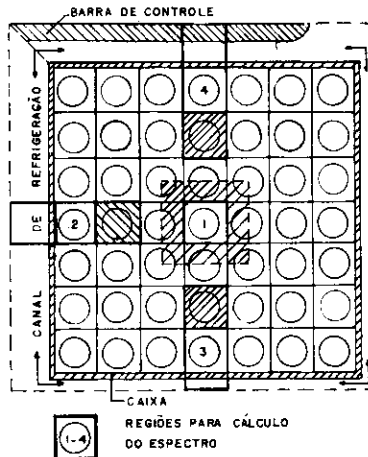


FIG.3.DIVISÃO DO ELEMENTO DE COMBUSTÍVEL

pectro de condensação das regiões periféricas foram calculados com geometria tipo placa unidimensional. Também, neste caso foi mantido constante a relação volumétrica Moderador/Combustível. O efeito de "autoblindagem" foi considerado dividindo-se a região de combustível em três zonas de iguais volumes.

A figura 4(b) mostra a transformação das varetas e regiões periféricas em geometria tipo placa. O método de cálculo utilizado para a geração dos espectros, está descrito em [3].

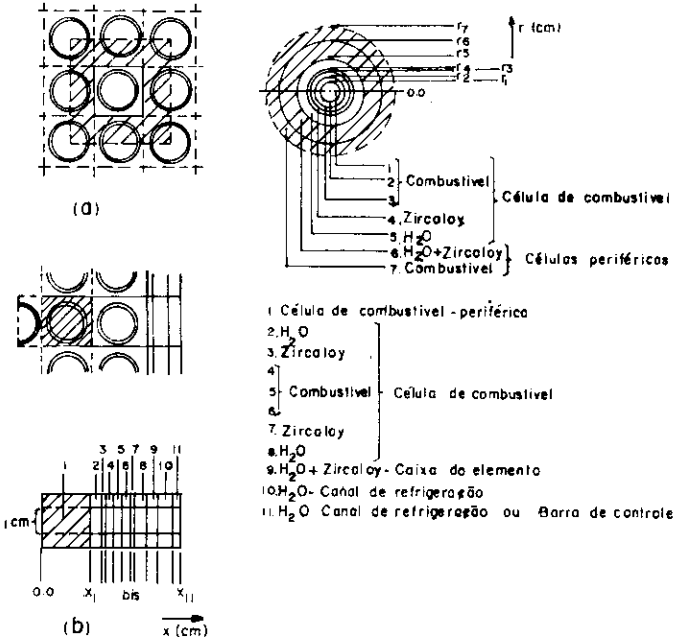


FIG. 4 . DIVISÃO DAS REGIÕES EM ZONAS

(a) PARA A REGIÃO 1, (b) PARA AS REGIÕES 2 E 3

Para cálculo do espectro foi gerado uma biblioteca básica com 60 grupos, contendo 30 grupos rápidos (14 MeV - 1,86eV) e 30 grupos térmicos (1,86 eV - 0 eV). Esta biblioteca foi gerada utilizando-se dos programas GAM [4] e com o programa THERM [5]. Estas bibliotecas baseam-se na biblioteca ENDF/B-IV. A estrutura da biblioteca de 60-grupos foi orientada para captar as ressonâncias do Plutônio e U-238. Esta biblioteca aqui denominada "60-Gr-ABWR(IKH), foi gerada para uma mistura de UO₂-PuO₂ com 4% de enriquecimento e relação volumétrica Moderador/Combustível: 2,0; 1,0; 0,6 e 0 (considerando-se ainda uma fração volumétrica de vazio de 30%). Os espectros de condensação foram gerados para as temperaturas de 20; 280 e 663°C.

6. Célula de Referência

Para verificação do processo de cálculo das seções de choque dos reatores

conversores a água leve, a célula de referência do reator conversor-APWR [6] é especialmente adequada, já que a sua geometria e composição dos materiais é bem conhecida, além do fato da mesma já ter sido exaustivamente calculada por diversas instituições. Isto, permite uma comparação direta com outros cálculos de referência, fornecendo um indicador da qualidade dos resultados. Os principais parâmetros da célula de referência estão listados na Tabela 3 abaixo:

Tabela 3. Especificação da Célula de Referência

Diâmetro da vareta de combustível (mm)	8,70	Enriquecimento do Pu (%)	7,50
Fração de Volume (%)			
. Combustível	56,01	Pu-239/Pu (%)	57,81
. Moderador	29,71	Pu-240/Pu (%)	26,57
. Aço	14,28	Pu-241/Pu (%)	9,47
V _{MOD} /V _{COMB}	0,53	Pu-242/Pu (%)	6,15
		U-235/U (%)	0,20
Temperaturas (K)			
. Combustível	1500		
. Moderador	573		

A célula de referência foi calculada para um arranjo infinito, bem como para um reator finito de uma única zona ("Buckling": $3,44 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-2}$). A biblioteca utilizada foi a 60 Gr.-IKH gerada com os dados fornecidos na Tabela 3.

Os resultados foram comparados com os obtidos com outros programas, com bibliotecas próprias, tais como: SPEKTRA, GRUCAH, WIMDS-D [6]. A Figura 5 mostra os fatores de multiplicação em função da densidade do moderador. Observa-se que no cálculo do fator de multiplicação efetivo, há boa concordância entre os programas NEUTRA (IKH) e SPEKTRA (TU-Braunschweige) na faixa de 0,7 a $0,2 \text{ g/cm}^3$ para a densidade do moderador. Já para os programas NEUTRA e GRUCAH (KfK - Karlsruhe) a concordância é boa na faixa de 0,3 a 0 g/cm^3 para a densidade do moderador. Além da reatividade, outro parâmetro de importância na avaliação da efetividade da biblioteca de trabalho é a taxa de conversão. A Figura 6 mostra as taxas de conversão calculadas com os programas NEUTRA e SPEKTRA. Observa-se boa concordância nos resultados; com diferença máxima de 2,6%. Como conclusão consideramos o método de cálculo e o processo de geração de seções de choque para os reatores a água leve avançados (APWR e ABWR) como adequados.

7. Configuração de Referência

Para determinar a configuração básica de referência, partiu-se do princípio que é possível aumentar a taxa de conversão do núcleo de um reator BWR convencional (da ordem de 0,4 a 0,6), por meio da alteração da sua geometria, configuração de varetas e do seu enriquecimento.

Para uma primeira concepção básica de referência, fez-se um estudo paramétrico para determinar a influência na reatividade e taxa de conversão, dos seguintes parâmetros:

- Numero de varetas combustíveis;
- Diâmetro da vareta;
- Vetor de Plutônio;
- Enriquecimento do combustível, e
- Relação Moderador/Combustível.

a. Número de varetas / Elemento Combustível

A Figura 7 mostra o fator de multiplicação infinito e a taxa de conversão em função do enriquecimento para três configurações de varetas/Elemento de combustível. Verifica-se que com o aumento do número de varetas, reduz-se o fator de multiplicação, ocorrendo efeito contrário para a taxa de conversão. Este comportamento é explicado pelo aumento da absorção no material fértil e estrutural.

Como consequência, reduz-se o fator de multiplicação e, devido o aumento da taxa de captura no material fértil, aumenta-se a taxa de conversão. A causa direta é a relação Moderador/Combustível que com o aumento do número de varetas, deixa de ser otimizado. Observa-se que para produzir a mesma reatividade, como por exemplo da configuração 7 x 7, devemos aumentar a relação Moderador/Combustível ou o enriquecimento, reduzindo-se, consequentemente a taxa de conversão. Cálculos preliminares indicam que o excesso de reatividade inicial para cobrir um ciclo econômico (queima até cerca de 60 MWd/Kg) e todas as incertezas de cálculo, está na ordem de 8 a 10%. Adotando a reatividade inicial de 10% (valor conservativo) como referência, a configuração 7 x 7 necessita de um enriquecimento de 3,8% comparado ao valor de 4,7 e 5% das configurações 8 x 8 ou 9 x 9. Para evitar problemas com o coeficiente de reatividade do moderador, devemos optar pelo enriquecimento mínimo. Em razão disto, escolheu-se a configuração 7 x 7 como referência, apesar dela possuir menor taxa de conversão comparada com os arranjos 8 x 8 ou 9 x 9.

b. Variação do diâmetro da Vareta

A influência do diâmetro da vareta sobre o fator de multiplicação e conversão, foi verificado para dois diâmetros típicos; 10,56mm (PWR) e 12,5mm (BWR).

A Figura 8 mostra o comportamento da reatividade e da taxa de conversão. Devido ao efeito de auto-blindagem, ocorre o aumento do fator de multiplicação com o aumento do diâmetro da vareta combustível. Este comportamento é explicado pela seguinte equação:

$$p = \exp. \left\{ \frac{(1-a)N_F}{\sum_s (H_2O)_v \frac{V}{V_{COMB.}}} \times I_{eff} \right\}; \quad (7)$$

onde: $I_{eff} = A + B \sqrt{S/M}$

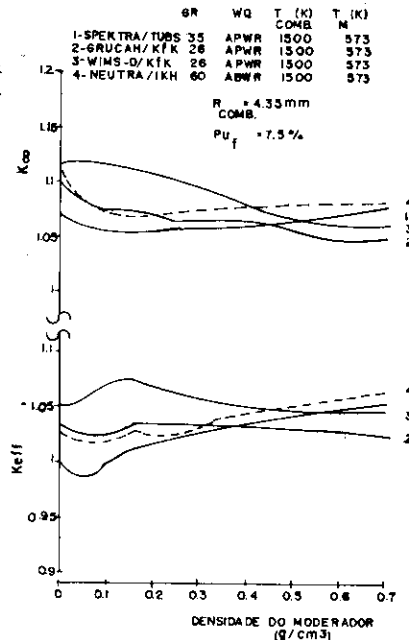


FIG. 5. TIPO PARA O REATOR CONVERSOR AVANÇADO (APWR)

$$M/S = \rho_F \pi r_F^2 / 2\pi r_F \propto r_F \quad (8)$$

$$I_{\text{eff}} \propto (r_F)^{-1/2} \quad (9)$$

a = enriquecimento

N_F = densidade atômica do combustível

ξ = letargia

I_{eff} integral de ressonância efetiva

p = probabilidade de escape a ressonância

A equação (9) mostra que o aumento do diâmetro da vareta aumenta a auto blindagem, reduz a integral de ressonância efetiva, aumentando, portanto, a probabilidade de escape p e, consequentemente, o fator de multiplicação. Conclui-se que com o convencional diâmetro de 12,5mm, dos reatores BWR, é possível obter o excesso de reatividade de necessário, com praticamente a mesma taxa de conversão obtida com o diâmetro de 10,56mm, não sendo necessário alterar o diâmetro das varetas.

c. Vetor de Plutônio

A influência da composição do vetor de Plutônio sobre o fator de multiplicação e conversão, está mostrado na Figura 9. As composições dos vetores estão na Tabela 2. O cálculo foi realizado para relação volumétrica Moderador/Combustível variando de 2 a 0,4 e com fração de vazio média de 30% (correspondente a uma relação volumétrica efetiva de 1,4 a 0,28). Como pode ser visto na figura o fator de multiplicação para o vetor de 3 anos é maior que o de 10 anos. A razão disto é a maior concentração de material físsil do vetor 3a (68,4%) em comparação com o vetor 10a (67,28%).

Através do balanço neutrônico para ambos vetores, verifica-se que a taxa de fissão do Pu-241 do vetor 3a é maior que a do vetor 10a. Efeito contrário observa-se para o Pu-239, devido a maior porcentagem

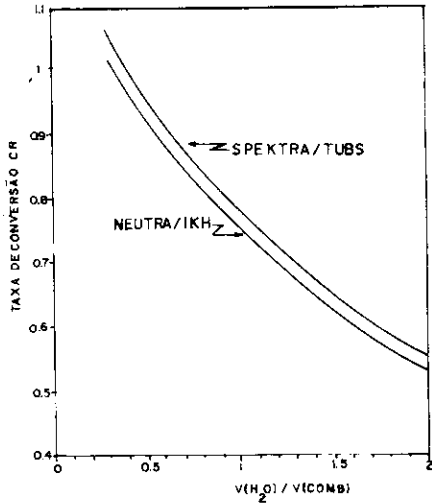


FIG. 6. TAXA DE CONVERSÃO EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO VOLUMÉTRICA V(H₂O)/V(COMB) (APWR)

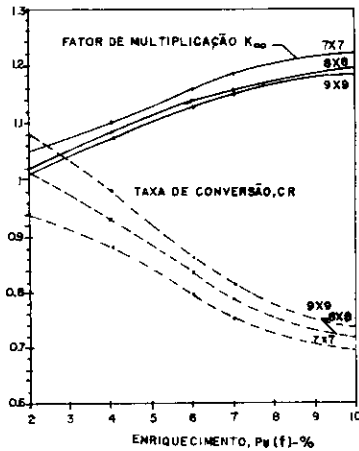


FIG. 7. K_{∞} , CR X ENRIQUECIMENTO
(VH₂O/V COMB=0,5 α = 30%)

físsil (3,5%) do vetor 10a em relação ao vetor 3a. Isto, causa quase que um equilíbrio para ambos os vetores, com reduzida vantagem para o vetor de 3 anos. Escolheu-se como referência para o reator ABWR a composição do vetor de 10 anos de estocagem. Esta opção baseou-se em hipótese conservativa, já que após 10 anos de estocagem de caiu 40% do valioso Pu-241 ($T_{1/2} = 15$ anos).

e. Relação volumétrica Moderador/Combustível

Os principais parâmetros que influenciam o fator de multiplicação e a taxa de conversão são a relação volumétrica Moderador/Combustível e o enriquecimento físsil. A Figura 10 mostra o comportamento dos fatores referidos. Esta figura permite uma primeira avaliação das possíveis configurações ou alternativas (Variantes) do reator ABWR.

Para caracterizar a configuração ou variante, adotou-se o excesso de reatividade e o fator de conversão como "fatores de mérito". Portanto, adotamos o excesso de reatividade mínimo de 10% e arbitrariamente a taxa de conversão mínima de 0,8. Da Figura 10 podemos extrair uma série de alternativas que satisfazem as condições neutrônicas impostas. Tais alternativas (doravante chamada de Variantes), devem ainda serem avaliadas sob o aspecto de transferência de calor e fabricação.

Nesse aspecto, limitamos o espaçamento mínimo entre as varetas para 1,0mm. Variantes com espaçamento abaixo deste limite apesar de serem neutronicamente desejáveis, fatalmente seriam rejeitadas sob o aspecto construtivo. Tendo em vista estes limites, a Tabela 4, resume as Variantes que foram obtidas da Figura 10, e que satisfazem os critérios neutrônicos pré-estabelecidos. A Figura 11 mostra as dimensões geométricas das Variantes propostas.

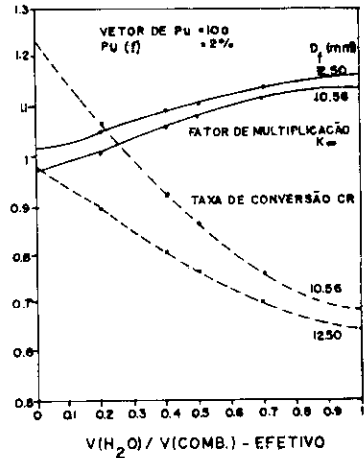


FIG. 8. K_{∞} , CR X $V(H_2O) / V(Comb)$. CONFIGURAÇÃO 7 X 7

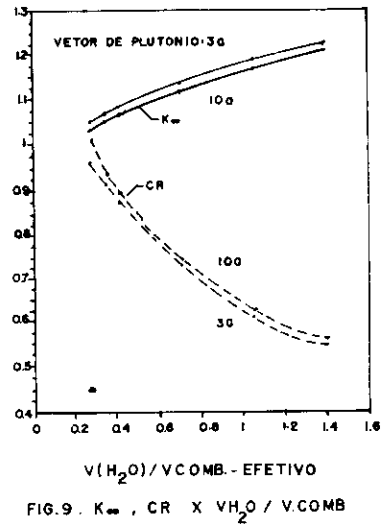


FIG. 9. K_{∞} , CR X $V(H_2O) / V(Comb)$

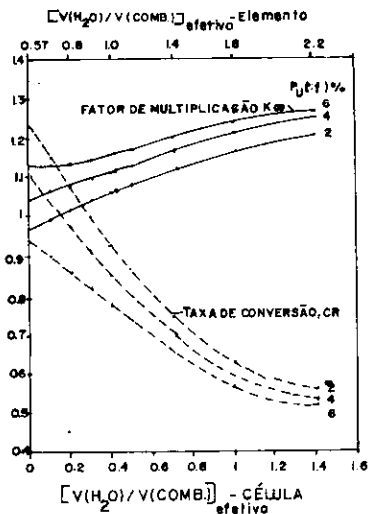
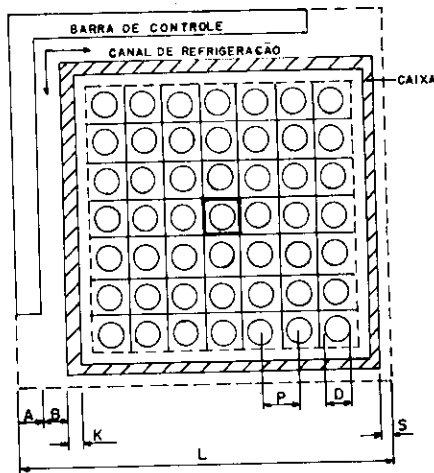


FIG.10. K_{∞} , CR PARA A CONFIGURACÃO 7X7



DIMENS.(MM)	A	B	D	K	L	P	S
VARIANTE 1	3,95	5,82	14,3	2,1	128,5	15,3	4,7
VARIANTE 2	3,95	5,82	14,3	2,1	131,3	15,7	4,7

FIG.11. VARIANTES DO ABWR

TABELA 4 - Variantes do ABWR

VARIANTE	CONFIGURACÃO	$V_{MOD}/V_{COMB.}$ (Célula)	$V_{MOD}/V_{COMB.}$ (Elemento)	ENRIQUECIMENTO (%)	pitch (mm)	CR
1	7 x 7	0,6	1,3	3	15,30	0,84
2	7 x 7	0,72	1,7	4	15,73	0,80

8. Conclusão

Do estudo da viabilidade neutrônica de um reator a água fervente avançado, obteve-se duas Variantes que satisfazem as condições neutrônicas pre-estabelecidas (reatividade e taxa de conversão). A Variante 1 com taxa de conversão de 0,84 corresponde a um aumento de 60,8% em relação a taxa de conversão do reator BWR convencional (taxa de conversão média de 0,5). Este acréscimo causa significativo aumento no fator de utilização do urânio natural, implicando na preservação de suas reservas. A Variante 2 com taxa de conversão 5% inferior a primeira Variante é vista como alternativa no caso de problemas construtivos. Como observação final, as Variantes propostas são as Concepções neutrônicas básicas do reator ABWR, as quais deverão ainda serem estudadas sob os seguintes pontos:

- . Novas geometrias, como por exemplo, a hexagonal para o Elemento de Combustível com arranjo triangular das varetas;
- . Distribuição de potência;
- . Ciclo de Combustível;
- . Coeficiente e controle da reatividade.

Referências

- [1] M.C. Edlund, Physics of the Uranium-Plutonium Fuel Cycle in Pressurized Water Reactors.
Trans.Am.Nucl.Soc., 24, 508 (1976)
- [2] R. Röhle, RSYST, ein integriertes Modul system mit Datenbasis Zur automatisierten Berechnung von Kern reaktoren. IKE-Bericht Nr. 4-12 (1973)
- [3] K. Pendorf, F. Schult, G. Schulz, The PWR spectral Code GELS - Part I: a survey of theory, GKSS 76/E/21 (1976)
- [4] J. Adir et al: Theory and Methods used CGC-4 Multigroup Cross Section Code, GA-9021 (1968)
- [5] J. Keinert: IKE - Kerndatenbibliothek THERM-123, IKE-Bericht Nr. 6-80 (1975)
- [6] H.D. Berger, A.W. Rowe, C. Broeders, M. Schatz:
Überprüfung der Berechnungsverfahren für enge Reaktorgitter von Fortschrittlichen Druckwasserreaktoren (FDWR) an experimentellen Anordnungen. KfK 3389, IfRR 8212 - Oktober 1982.