

REATORES BWR AVANÇADOS : REATIVIDADE E QUEIMA

Valdemir Gutierrez Rodrigues
Dieter Stegemann *Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN/CNEN
*Institut fuer Kerntechnik/Universitaet Hannover -RFA

RESUMO

Estudou-se a distribuição de potência, ciclo de combustível, comportamento e controle da reatividade para um reator BWR com alta taxa de conversão. Os cálculos mostraram que é possível obter um longo ciclo de queima, da ordem de 50 MWd/kg, com enriquecimento médio do Plutônio em 3%. O coeficiente de reatividade do moderador mostrou-se negativo, mesmo em caso de um acidente de perda de refrigerante. Para o controle da reatividade, as convencionais barras de controle dos reatores BWR, são adequadas.

INTRODUÇÃO

Estudos visando o aperfeiçoamento dos reatores a água leve (PWR), mostraram que é possível elevar a sua taxa de conversão até cerca de 0.95 [1,2,3]. Do ponto de vista econômico os estudos demonstraram também que a relação custo/benefício é vantajosa [4]. Estes reatores denominados avançados, Advanced Pressurized Water Reactor, estão sendo pesquisados há aproximadamente duas décadas. As modificações básicas nos reatores convencionais, consiste em substituir o combustível de Dióxido de Urânio pelo combustível mixto de Urânio - Plutônio levemente enriquecido e introduzir novo arranjo celular no núcleo. Partindo do princípio que o espectro neutrônico de um reator BWR é mais energético do que um reator PWR, as mesmas modificações no combustível e na estrutura celular do núcleo "endureceria" muito mais o seu espectro neutrônico, aumentando a taxa de conversão.

Estudos preliminares para a concepção de um reator BWR avançado (ABWR) mostraram que a física deste tipo de reator é promissora [5,6]. Deste estudo foi obtida uma concepção básica do reator ABWR, e neste trabalho apresenta-se uma contribuição nas pesquisas neutronicas para o desenvolvimento deste tipo de reator.

Os cálculos concentraram-se na distribuição de potência, ciclo de combustível, coeficiente e controle da reatividade.

MÉTODO DE CÁLCULO

Os cálculos foram realizados com o programa modular RSYST o qual constitui-se de um programa principal e um conjunto de módulos que podem ser montados de acordo com o problema a solucionar. A estratégia montada para o cálculo nuclear está descrita em [5].

MATRIZ DE REFERÊNCIA DO ABWR

Do estudo de concepção do reator ABWR [5,6] foi obtido duas configurações básicas que satisfazem as condições neutronicas pré-estabelecidas, quais sejam, reatividade e taxa de conversão. Estas concepções, doravantes chamadas de Variantes estão mostradas na Figura 1.

As principais características destas Variantes estão listadas na Tabela 1, as quais são objetos do estudo que será apresentado neste trabalho. Os cálculos

da distribuição de potência, queima, comportamento e controle da reatividade foram realizados para a primeira Variante já que os resultados podem ser diretamente extrapolados para a segunda.

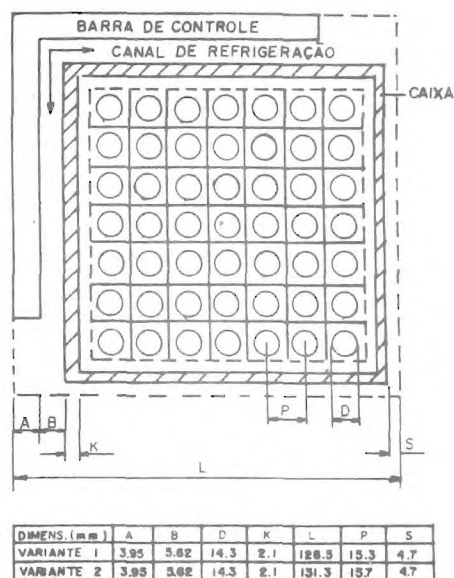


FIG. 1- VARIANTES DO ABWR

Tabela 1. Principais características das Variantes

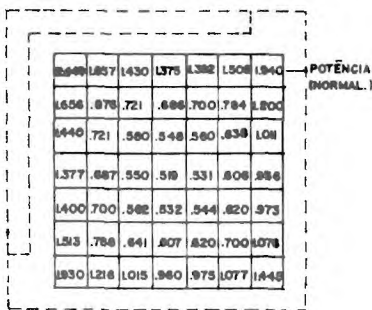
Variantes do ABWR	1	2
Nº de varetas	7 x 7	7 x 7
V(H ₂ O)/V(combustível)-Célula	0,6	0,7
V(H ₂ O)/V(combustível)-Elemento	1,3	1,7
Diâmetro da vareta (mm)	14,3	14,3
"Pitch" (mm)	15,30	15,73
Comprimento da vareta (mm)	2300,0	2300,0
Enriquecimento do Plutônio(%)	3,0	4,0
Queima (média) (MWd/kg)	50	-
Taxa de Conversão	0,88	0,80

DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA

O cálculo da distribuição de potência foi feito inicialmente com o Plutônio físsil enriquecido em 4% homoganeamente distribuído nas varetas de combustíveis.

A Figura 2 mostra a distribuição de potência, notando-se que os fatores de pico para as varetas localizadas nas bordas do Elemento de Combustível, são maiores que o permitido (1,3). A distribuição não uniforme é causada pelo amolecimento do espectro nas bordas do Elemento devido ao canal de refrigeração entre a Barra de Controle e o próprio Elemento. Para reduzir os fatores de picos locais, fez-se nova distribuição do enriquecimento para as regiões periféricas do Elemento.

A Figura 3 mostra a nova distribuição de potência, utilizando-se de enriquecimentos diferenciados, correspondendo a uma distribuição média de 3%. As varetas centrais apesar de possuírem enriquecimento elevado (6%), tem baixos fatores de picos comparados com as das regiões periféricas. O motivo está no fato que o espectro da região central é mais energético que o da região periférica.



$K_{eff} = 1.07647$ $P_U(f) = 4\%$
 $CR = 0.87$

Fig. 2 Distribuição de Potência (Enriquecimento Homogêneo)

QUEIMA DO COMBUSTÍVEL

A Figura 4 mostra o comportamento do fator de multiplicação efetivo e da taxa de conversão em função da queima em MWd/kg. Observa-se que o excesso de reatividade de 3%, permite obter um longo ciclo da ordem de 50 MWd/kg. O fraco aumento da taxa de conversão com a queima é explicado pelos enriquecimentos diferencia-

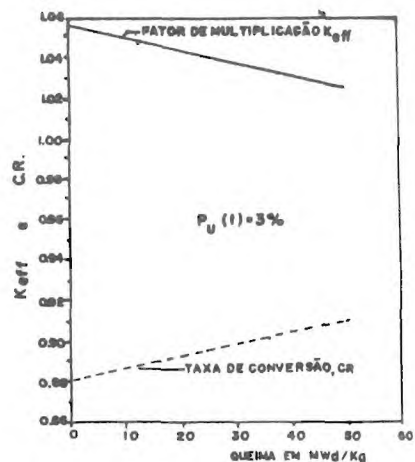


Fig. 4 K_{eff} e CR X Queima

dos utilizados para se obter uma distribuição de potência uniforme (Figura 3). Conclui-se da Figura 4 que também é possível operar um reator ABWR com enriquecimento da ordem de 2 a 3%, reduzindo-se portanto o enriquecimento médio, aumentando consequentemente a taxa de conversão.

REATIVIDADE

Um dos principais critérios para avaliação da segurança de um reator nuclear, é o comportamento da reatividade em caso de acidente de perda de refrigerante do núcleo. Esta questão foi analisada através da simulação da redução da densidade do moderador da condição normal de operação, até ao completo esvaziamento do núcleo (em caso real da perda de refrigerante, ocorreria depressurização e vaporização, aumentando-se a fração de vazio do núcleo). O resultado desta simulação está mostrado na Figura 5, onde a reatividade em função da relação volumétrica moderador/combustível efetiva, foi calculada para 3 enriquecimentos do Plutônio. Nota-se na Figura a negativa e clara tendência da reatividade com a redução da densidade do moderador, mesmo com o aumento do enriquecimento. Este resultado nos permite concluir que a concepção neutrônica dos reatores ABWR desponta como possível de realizar-se.

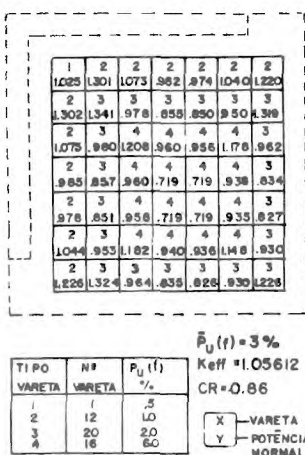


Fig. 3 Distribuição de Potência (Enriquec. Heterogêneo)

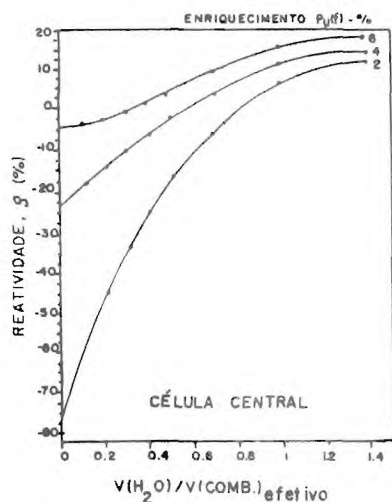


Fig. 5 ρ X $V_{H_2O} / V_{Combust.}$

CONTROLE DA REATIVIDADE

Para verificar a efetividade das convencionais barras de controle do reator BWR nos ABWR, as barras foram redimensionadas para satisfazerem as características geométricas da Variante 1. A estrutura da barra de controle utilizada, está mostrada na Figura 6, e os dados geométricos, materiais estruturais e absorvedores estão listados na Tabela 2.

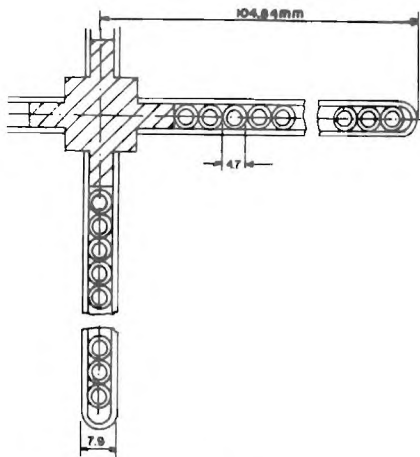


Fig. 6 Barra de Controle

Tabela 2. Características Geométricas da Barra

Tipo	cruciforme
Material estrutural	aço-inox.
Envergadura da asa	(mm) 104,84
Largura da asa	(mm) 7,90
Espessura da asa	(mm) 1,38
Comprimento ativo do absorv.	(mm) 2300
Diâmetro das varetas de B ₄ C	(mm) 4,70
Densidade do B ₄ C	(g/cm ³) 1,76
Nº de varetas/asa	15

O cálculo foi realizado para a condição fria (mais crítica) e normal de operação. O cálculo na condição fria é de interesse porque a efetividade do absorvedor atinge seu valor mínimo, enquanto a reatividade atinge seu valor máximo. A efetividade da barra de controle foi calculada para diversas posições, desde totalmente retirada até 100% de inserção. A Figura 7 mostra

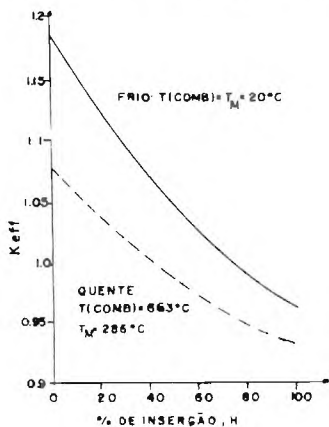


Fig. 7 K_{eff} X % de Inserção
($Pu_f = 4\%$, $H = 230$ cm)

o fator de multiplicação efetivo em função da inserção da barra de controle para as condições fria e normal de operação. Nota-se a considerável efetividade da barra de controle, como por exemplo, na condição operacional com 70% de inserção, chega-se a 4% de subcriticalidade. Comparando com a condição fria, chegar-se-ia a mesma subcriticalidade somente com 100% de inserção. Na condição operacional com 100% de inserção a efetividade é de 13,6%, valor este suficiente para compensar o excesso de reatividade até a condição segura, incerteza de cálculos e tolerâncias de fabricação. Estimativas da reatividade para o reator ABWR estão mostradas na Tabela 3. Para a formação da Tabela, foram considerados alguns dados não obtidos diretamente dos cálculos, mas sim adotados de um reator BWR de 770 MWe tomado como referência. Esta hipótese é conservantista, uma vez que a reatividade necessária para controlar os reatores conversores pressurizados a água leve (APWR) é significativamente menor que os reatores PWR convencionais[1]. É interessante observar na Tabela 3 que a reatividade necessária para controlar os reatores conversores pressurizados a água leve (APWR) é significativamente menor que os reatores PWR convencionais[1]. É interessante observar na Tabela 3 que a reatividade dos produtos de fissão de saturação rápida é de um fator 10 vezes menor enquanto que a reserva de reatividade para queima é 4 vezes menor que as correspondentes reatividades dos reatores BWR convencionais. A Tabela 3 mostra também a pequena reserva de reatividade (6,8%) dos reatores ABWR em comparação com os reatores BWR convencionais (21%).

É conveniente mencionar que devido ao complexo processo de cálculo com barras de controle, foram feitas algumas simplificações na geração das seções de choque, de tal maneira que os cálculos aqui apresentados não são exaustivos, mas possuem precisão suficiente para avaliação dos limites de segurança do reator em estudo.

Tabela 3. Balanço de Reatividade

	BWR	ABWR
k_{eff} , frio, limpo, s/controlado	1.2140	1.1879
Δk , frio \rightarrow quente	+0.0100	+0.0100
Δk , Doppler	-0.0070	-0.0070
Δk , Moderador	-0.0230	-0.0230
Δk , Xenônio e Samário	-0.0330	-0.0030
Δk , Queima	-0.1560	-0.0400
Δk , Controle fino	-0.0050	-0.0050
Δk , Total	-0.2140	-0.0680
Δk , Barra de Control., frio	-0.1740	-0.2260
Δk , Gadolinio, frio	-0.1110	-
Δk , Total p/controlado	-0.2850	-0.2260
k_{eff} , frio, limpo, totalmente controlado	0.9290	0.9620

CONCLUSÃO

Da análise dos resultados, extraímos os seguintes pontos chaves para a consolidação da concepção neutrônica do reator ABWR avançado :

1. É possível obter um longo ciclo de operação (50 ou 60 MWd/kg) com reserva de reatividade da ordem de 3 a 4%;
2. O coeficiente de reatividade do moderador, mesmo em caso de uma hipotética vaporização total do núcleo, mostrou-se negativo;
3. O controle da reatividade dos ABWR com as tradicionais barras de controle não apresentaram problemas.

O presente estudo não encontrou nenhum ponto para colocar em dúvida a concepção neutrônica do reator ABWR avançado, os resultados são promissores e incentivam ao aprofundamento das pesquisas.

REFERÊNCIAS

- [1] Oldekop, W., Berger, H. D., Zeggel, W., " General Features of Advanced Pressurized Water Reactors with Improved Fuel Utilization ", Nuclear Technology, vol.59, 1982.
- [2] Penndorf, K., Schult, F., Buenemann, D., "Abschaetzung der wesentlichen neutronenphysikalischen Eigenschaften hochkonvertierender DWR im U/Pu Zyklus", Proc. Jahrestagung Kerntechnik 80, Berlin,RFA,1980.
- [3] Dalle-Donne, M., "Fluid-and Thermodynamics Calculations for an Advanced Pressurized Light Water Reactor with a Tight Fuel Rod Lattice", Proc. Jahrestagung Kerntechnik, p. 597, Duesseldorf,RFA,1981.
- [4] Seifritz, W., "Zielkonflikte in einer LWR-FDWR-SBR-Reaktorstrategie", Atomkernenergie - Kerntechnik , vol. 44, Nº 3, 1984.
- [5] Rodrigues,V.G., Stegeman,D., "Considerações Neutrônicas para o Desenvolvimento de Reatores BWR Avançados", Anais do VII ENFIR, Encontro Nacional de Física de Reatores e Termoidráulica, vol 1, pag. 337, Recife - PE, Brasil, 1989.
- [6] Rodrigues, V.G., Stegemann, D., "Análise Termoidráulica de Reatores BWR Avançados", Anais do VII Encontro Nacional de Física de Reatores e Termoidráulica vol. II, pag. 315, Recife,PE, Brasil, 1989.

SUMMARY

Power distribution, fuel cycle, behavior and reactivity control have been studied for a high converter boiling water reactor. The calculations have showed that it is possible to obtain a long fuel cycle, almost 50 MWd/kg with a 3% Plutonium enrichment. The moderator reactivity coefficient, even in a complete voiding of the reactor, is negative. The reactivity can be controlled by the conventional BWR control rods. The study showed that the physics of the Advanced Boiling Water Reactor is feasible.