

ST2-D

UM MODELO PARA CÁLCULOS DE QUEIMA DE GADOLÍNIO EM P.W.R.

Luiz Roberto Sannazzaro
Departamento de Tecnologia de Reatores - RT
Divisão de Física de Reatores - RTF
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
IPEN-CNEN/SP

SUMÁRIO

^{Apresenta-se}
~~No trabalho é proposto~~ um modelo de célula para cálculos de queima de um elemento combustível de um PWR envenenado com gadolínio projetado pela KWU. Com o modelo proposto é analisada a queima dos isótopos de gadolínio, bem como a influência desses isótopos no comportamento do elemento combustível. Os resultados obtidos com esse modelo de célula são comparados com os obtidos através de um modelo de célula convencional. Pela comparação verifica-se que o comportamento previsto do elemento combustível envenenado com a queima depende do modelo de célula considerado, mostrando a importância da escolha de células mais representativas para os cálculos.

1. INTRODUÇÃO

O uso de gadolínio como veneno queimável em reatores à água pressurizada (P.W.R.) vem sendo bastante cogitado nos últimos tempos. O seu uso faz parte de um amplo programa de desenvolvimento para reatores P.W.R. cujo objetivo é o aumento da queima de descarga [1].

O uso do gadolínio como veneno queimável traz a vantagem da compensação do excesso de reatividade no início do ciclo com baixas concentrações de ácido bórico diluído no moderador, pequena absorção residual, bem como elimina a necessidade de manuseio suplementar de barras de veneno queimável irradiado como no caso do silicato de boro. Uma análise detalhada das vantagens do uso do gadolínio como veneno queimável em P.W.R. é encontrada na referência [2].

O gadolínio vem substituir o silicato de boro como veneno queimável. Enquanto o silicato de boro é inserido em forma de barra centro de tubos guias de barra de controle vazios, o gadolínio é misturado homogeneamente com o UO_2 em varetas de combustível. A concentração de gadolínio, o número de varetas envenenadas, bem como suas posições no elemento combustível (E.C.) são escolhidos segundo vários critérios de tal maneira que um pré-determinado excesso de reatividade inicial seja compensado, uma distribuição de densidade de potência mais homogênea seja conseguida, bem como as normas de segurança sejam respeitadas [3].

Seguindo esses critérios um primeiro caroço de um P.W.R. envenenado com gadolínio foi projetado pela K.W.U. [4] (Figura 1). Cada E.C. envenenado contém 8 varetas com 4% de gadolínio. O enriquecimento em ^{235}U das varetas envenenadas é de 2,5% e das não envenenadas de 3,05%.

Na natureza são encontrados 7 isótopos de gadolínio dos quais o ^{155}Gd e o ^{157}Gd apresentam enormes seções de choque térmica de absorção com cerca de 10^5 e $10^6 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$ respectivamente. Essas enormes seções de choque provocam uma forte blindagem tanto energética como espacial do fluxo, queimando o gadolínio de uma maneira não homogênea ao longo do combustível.

A estratégia geral utilizada no estudo do comportamento de um E.C. com a queima é encontrar uma célula representativa desse elemento. Nos estudos de queima dos isótopos de gadolínio encontrados na literatura são em geral usados modelos de células nos quais, uma vareta de combustível envenenado é circundada por 8 varetas não en

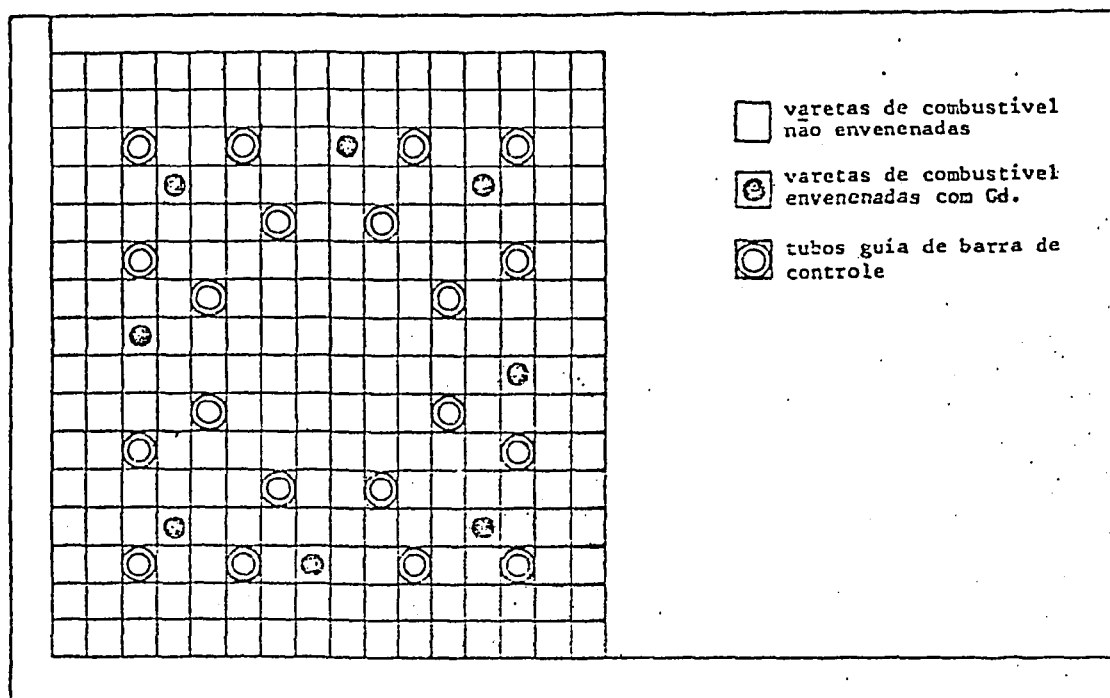


Figura 1 - Elemento Combustível envenenado com Gadolínio-KWV.

venenadas (Modelo 3 x 3) ou outro tipo de supercélula. [5] , [6] , [7] , que :

- a- não consideram suficientemente a influência dos tubos guias de barra de controle.
- b- superestimam as influências mútuas (em condições de contorno brancas) entre varetas envenenadas adjacentes.

Neste trabalho porém é procurado utilizar um modelo de célula e de cálculo mais elaborado. Para tanto são propostos: 1- um modelo de célula mais representativa do E.C., 2- uma estratégia de cálculo de seções de choque e de queima que leve em conta a blindagem espacial e energética do fluxo; 3 - uma cadeia de produtos de fissão suficientemente detalhada.

Modelo de célula : Baseado no E.C. envenenado projetado pela KWU é escolhida uma célula (célula-Gd) contendo 7 regiões. As 3 primeiras regiões constituem-se respectivamente de uma vareta envenenada, do encamisamento e da parte do moderador correspondente . Na formação das outras regiões são definidos 3 tipos de células de combustível não envenenado (célula-combustível) e mais uma célula de

tubo guia de barra de controle (célula-tubo guia).

Cada célula combustível é formado por 3 zonas: - combustível, encamisamento e parte do moderador correspondente. A célula-tubo guia por sua vez compõe-se de : moderador, tubo guia, moderador e 6 células-combustível homogenizadas (célula-combustível 2) respectivamente.

Assim sendo, a região 4 da célula-Gd é formada por 3 células combustível homogenizadas (célula-combustível 1), a região 5 por 2,5 células-tubo guia homogenizadas e a região 6 por 10,5 célula-combustível homogenizada (célula-combustível 3). A sétima e última região considera a parte do moderador de separação na periferia do elemento combustível. A célula formada dessa maneira (célula - Gd) corresponde exatamente a 1/8 do E.C.

Estratégia de cálculo : Para a geração de seções de choque parte-se de bibliotecas de dados com 126 grupos térmicos [8] e 99 grupos rápidos [9]. Essas bibliotecas são disponíveis no IKE-Stuttgart. Com espectros de neutrons calculados em 5 zonas radiais no combustível envenenado (região 1 da célula-Gd) essas seções de choque são condensadas e acopladas em 60 grupos. Com isso obtém-se um conjunto de seções de choque com dependência radial. Novas seções de choque em 60 grupos são geradas a cada 2MWd/kg. Para cálculo de célula e de queima o combustível envenenado é dividido em 11 zonas. Os passos de queima são escolhidos suficientemente pequenos afim de considerar a rápida variação das concentrações de gadolínio. Principalmente no início do ciclo devido aos produtos de fissão e aos actinídeos de rápida formação, esses passos são da ordem de 0,04 MWd/kg. A queima é realizada por 3 ciclos com duração de 290 dias cada, perfazendo uma queima total de aproximadamente 33 MWd/kg.

A Figura 2 mostra a estratégia de cálculo usada no estudo do comportamento do E.C. com a queima. A partir de uma concentração inicial de nuclídeos $N^i(t=0)$, gera-se as seções de choque em 60 grupos, com as quais passa-se ao cálculo de célula. O cálculo de célula é feito pelo programa ISOSTO, que resolve a equação de transporte pelo método de probabilidade de primeira colisão em multigrupos. Com o fluxo de neutrons fornecido pelo cálculo de célula é resolvida a equação de queima para todos os nuclídeos simultaneamente em todas as zonas da célula-Gd, com o programa ABBRAND. O programa ABBRAND fornece as novas concentrações de nuclídeos $N^i(t)$ após um passo de queima Δt , no qual o fluxo fornecido pelo cálculo de célula

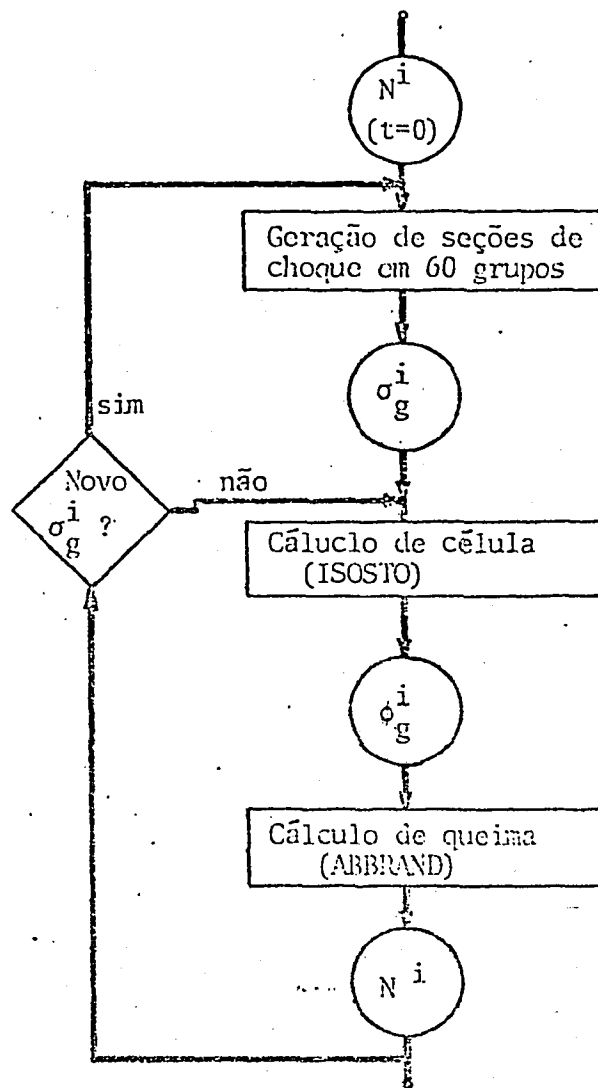


Figura 2 - Estratégia de Cálculo.

la é considerado constante.

Com as novas concentrações de nuclídeos torna-se a resolver a equação de transporte num novo cálculo de célula onde se calcula novo fluxo para mais um passo de queima Δt . Se necessário entretanto, pode-se gerar com as novas concentrações de nuclídeos, novas seções de choque em 60 grupos.

Tanto a geração de seções de choque como os cálculos de célula e de queima são feitos com a ajuda do sistema integrado de programas RSYST [10]. Esse sistema compõe-se de uma base de dados, programas de administração de dados e módulos. Um módulo do RSYST tem uma estrutura de dados definida de tal maneira que os dados de saída de um módulo podem ser usados como dados de entrada por outro módulo. Ordenando os módulos de uma maneira lógica, uma determinada sequência de cálculos pode ser realizada, ininterruptamente. Todos

os programas necessários tanto para a geração de seções de choque ' como para os cálculos de célula (ISOSTO) e de queima (ABBAND) en - contram-se disponíveis como módulos no RSYST, propiciando uma com - pleta automação dos cálculos.

Cadeia de produtos de fissão : Para um estudo mais completo ' da formação e queima dos isótopos de gadolínio, bem como da absor - ção residual é considerada uma cadeia de núclídeos com 79 produtos ' de fissão além de 16 actinídeos.

Com os módulos de célula e de cálculo acima propostos é estu - dado neste trabalho o comportamento do E.C. envenenado durante a queima bem como a influência do gadolínio sobre a queima desse E.C. Não é realizado porém uma comparação dos resultados com dados expe - rimentais, pois os mesmos, até a presente data, ainda não estão dis - poníveis na literatura.

2. RESULTADOS

No cálculo do fluxo de neutrons nas 11 zonas do combustível ' envenenado, foi verificada uma enorme blindagem tanto energética co - mo espacial. Principalmente nas zonas mais internas do combustível ' ainda não irradiado, o fluxo a 0,1 eV é praticamente nulo. Num com - bustível não envenenado o fluxo atinge um máximo nessa energia. A forma do fluxo determina a queima dos isótopos de gadolínio. A Fig. 3 mostra a distribuição da concentração de ^{157}Gd nas 11 zonas do combustível envenenado para diversas queimas da vareta. Pela figura nota-se que o isótopo queima mais rapidamente na periferia do com - bustível. Com 4,1 MWd/kg, o ^{157}Gd já está praticamente queimado em todas as zonas. O comportamento do ^{155}Gd com a queima é pratica - mente a mesma, porém, por causa de sua menor seção de choque compara - do com o ^{157}Gd , sua queima processa-se mais lentamente.

Na realidade os isótopos ^{155}Gd e ^{157}Gd não são consumidos com - pletamente durante a queima. Devido a absorção de neutrons pelos isótopos ^{154}Gd e ^{156}Gd , são produzidos o ^{155}Gd e ^{157}Gd , respectiva - mente. Após algum tempo de queima a produção desses isótopos igua - la-se ao consumo, atingindo assim uma concentração de equilíbrio. ' Tal equilíbrio pode ser visto na figura 4 onde são apresentadas as concentrações do ^{157}Gd em função da queima para as 11 zonas do com - bustível envenenado.

Por outro lado as sucessivas absorções de neutrons pelos isó -

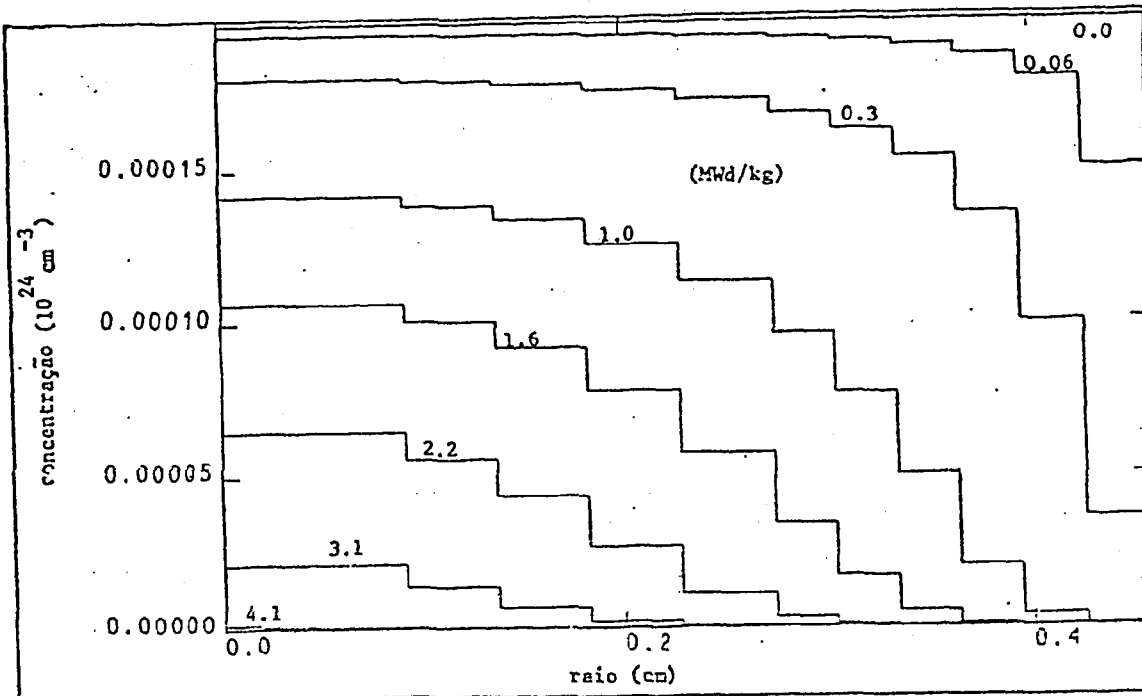


Figura 3 - Distribuição de concentração de ^{157}Gd no combustível envenenado para diversas etapas de queima.

topos de gadolínio levam a formação de outros nuclídeos (após decaimentos β 's) como o Tb e Dy. Pelo estudo notou-se que a taxa de absorção de neutrons por esses isótopos são da mesma ordem de grandeza que a taxa de absorção devida aos isótopos de gadolínio com concentração em equilíbrio. Essas absorções juntas constituem a absorção residual no combustível envenenado.

A variação da concentração média dos diversos isótopos de gadolínio em função de queima pode ser vista na figura 5. Note-se que a diminuição das concentrações do ^{155}Gd e ^{157}Gd corresponde a um aumento nas concentrações do ^{156}Gd e ^{158}Gd respectivamente. A variação das concentrações dos outros isótopos de gadolínio durante a queima é pequena.

A queima relativamente rápida do gadolínio determina o comportamento do E.C. Esse comportamento pode ser interpretado na figura 6, onde é mostrado o fator de multiplicação da célula-Gd e de outras células não envenenadas definidas no modelo, em função da queima. Pela figura nota-se o efeito do gadolínio sobre o fator de multiplicação.

O decréscimo de reatividade devido à queima de material combustível, no caso estudado, é praticamente compensado pelo acréscimo de reatividade devido ao consumo de gadolínio. Isso leva a um K quase constante durante a primeira etapa de queima. Quando os

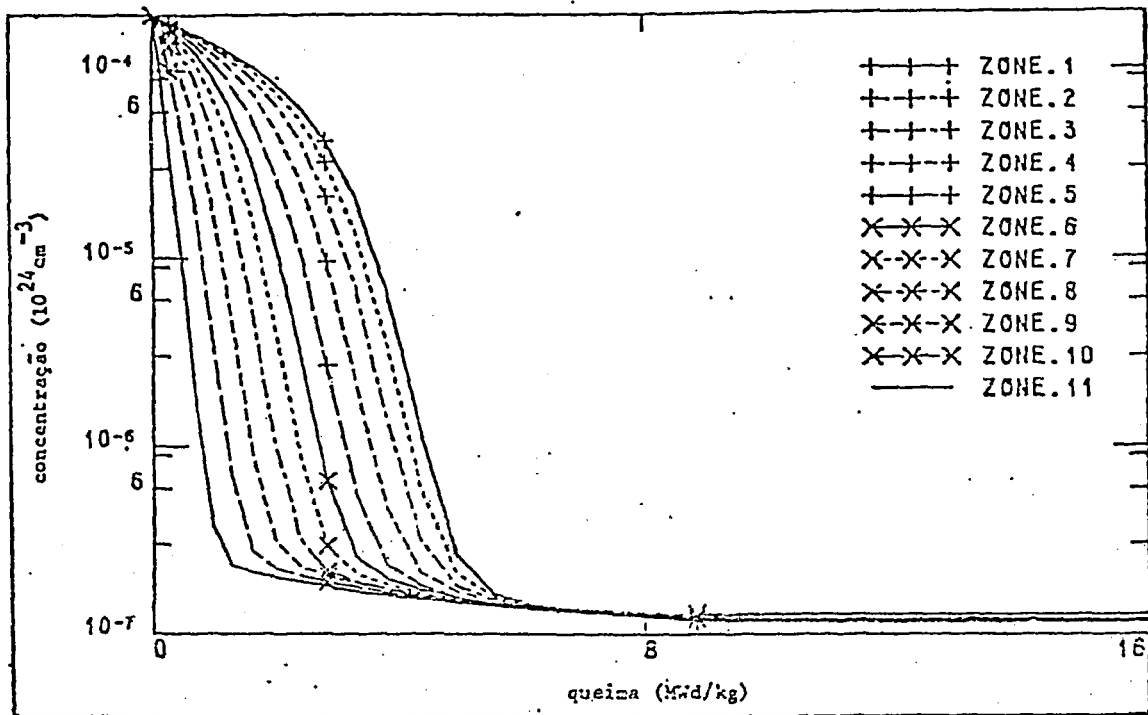


Figura 4 -- Concentração de ^{157}Gd nas 11 zonas do combustível envenenado em função da queima.

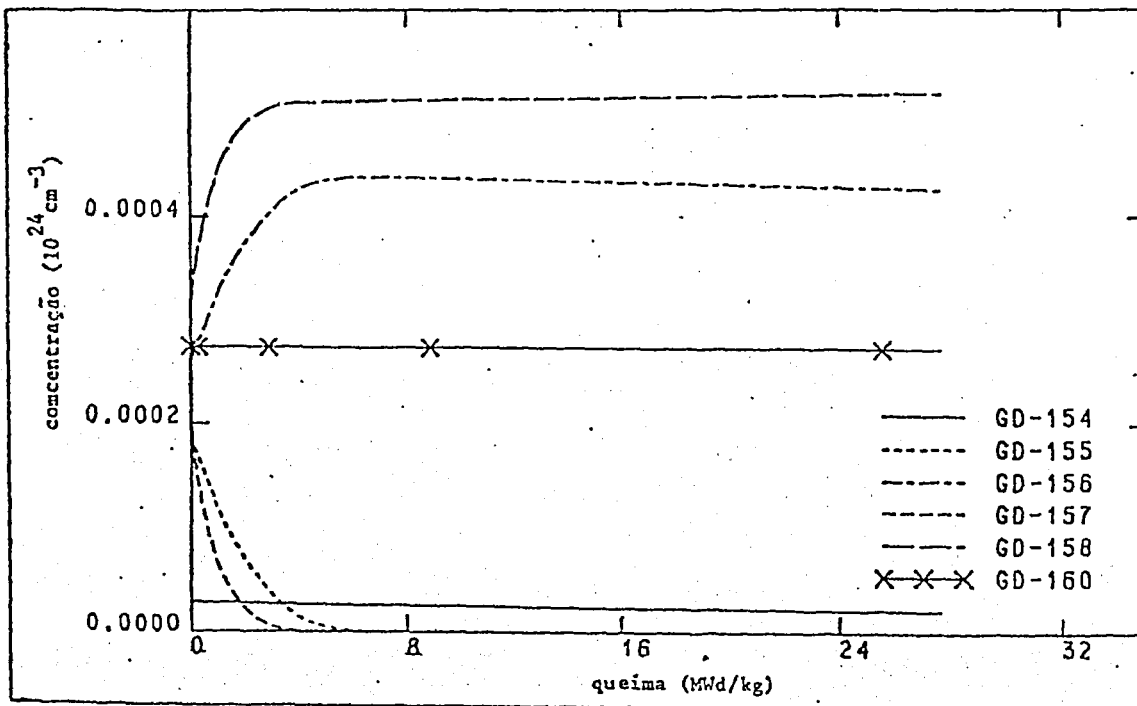


Figura 5 - Concentração média dos isótopos de gadolínio em função da queima.

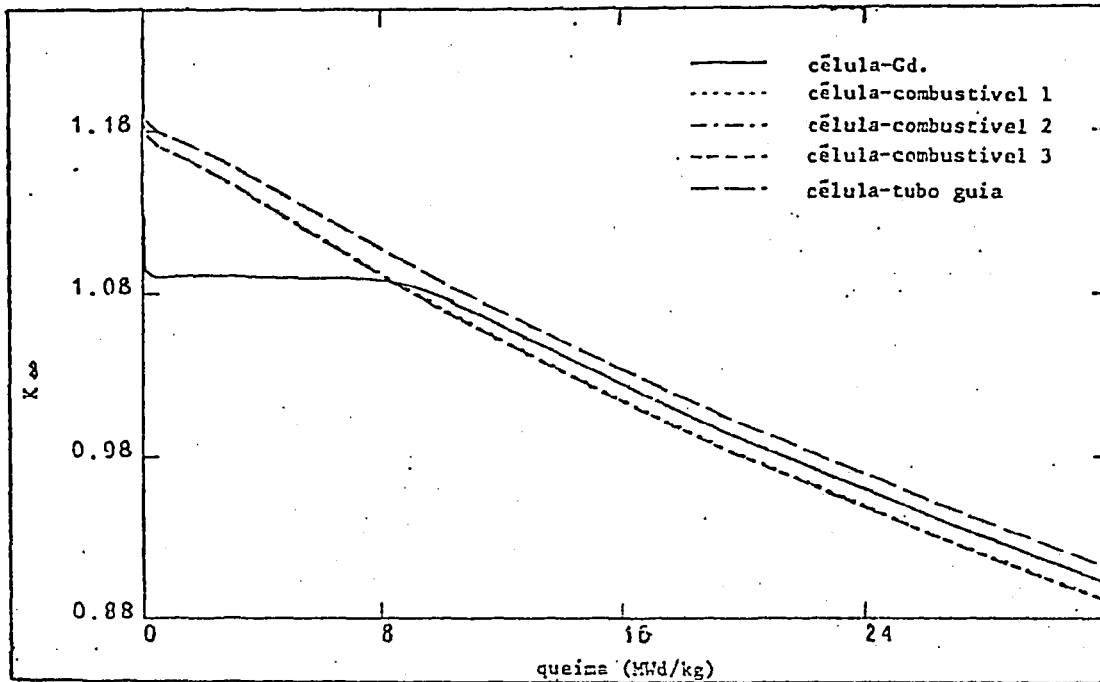


Figura 6 - Fator de multiplicação das diversas células em função da queima.

Isótopos ^{155}Gd e ^{157}Gd encontram-se praticamente queimados a curva da célula-Gd apresenta o mesmo comportamento que as das outras células não envenenadas. Na figura a curva da célula-Gd corre entre as curvas das outras células. Isso era de se esperar já que a célula-Gd é composta dessas células não envenenadas.

Cálculos com modelos de células convencionais têm mostrado um comportamento do fator de multiplicação diferente. A Figura 7 apresenta a curva do K para um E.C. praticamente igual do da Figura 1, com uma única diferença: o enriquecimento das varetas envenenadas e não envenenadas é o mesmo (2,5%). Esse menor enriquecimento das varetas não envenenadas em relação ao E.C. estudado neste trabalho (3,05%) explica o menor valor inicial do K da figura 7. Pela figura nota-se um aumento da reatividade durante a primeira etapa da queima, provocando um pico na curva por volta de 7MWd/kg. A diferença de comportamento entre as curvas das figuras 6 e 7 é decorrente dos diferentes modelos de células utilizados nos cálculos.

Pelo modelo convencional, os efeitos mútuos entre varetas envenenadas adjacentes são superestimados, pois encontram-se mais próximas uma das outras do que na realidade. Para uma determinada densidade de potência do E.C. é exigido pelo modelo convencional um

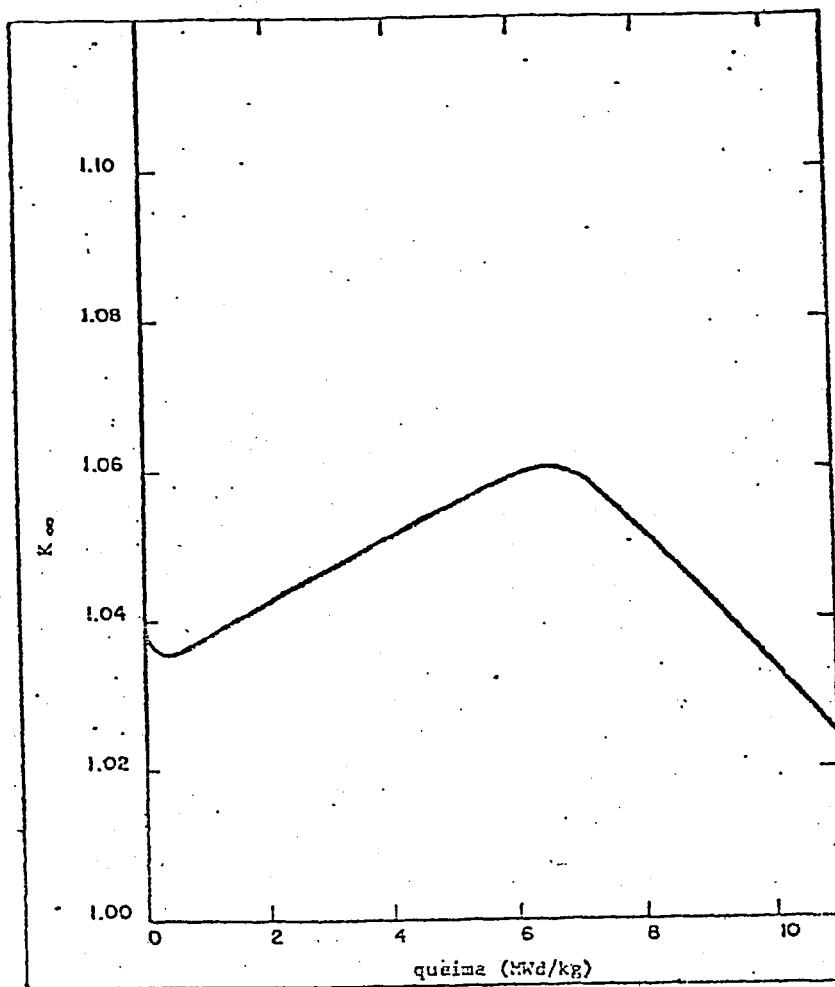


Figura 7 - Fator de multiplicação de um E.C. envenenado considerando um modelo de célula convencional.

fluxo maior nas varetas envenenadas que pelo modelo de célula proposto neste trabalho. Com um maior fluxo de nêutrons no combustível, os isótopos ^{155}Gd e ^{157}Gd queimam mais rapidamente provocando assim um ganho mais rápido de reatividade e como consequência uma subida na curva da figura 7.

A comparação entre as duas curvas mostra portanto, que a escolha do modelo de células para o estudo do comportamento de um E.C. envenenado é importante, e células mais representativas desse elemento devem ser consideradas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Stehle, H.; Böhm, W.; Holzer, R. Neuere Entwicklungen auf dem Gebiet der Brennelement und der Kernaule - gung von Leichtwasserreaktoren. DATF-80, Bonn, 1980.

- 2 . Vandenberg, C.L.; Bonet, H.; Charlier, A.; Motte, F. Safety Aspects of Using Gadolinium as Burnable Poison in Pressurized Water Reactor. Nuclear Technology, Vol. 46, Dec. 1979.
- 3 . Kiehlmann, H.D. Gadoliniumoxid als abbrennbarer Absorber in 18 x 18-24 - Erstkern des 1300-MWe-Druckwasserreaktors. ENS/ANS - Conference, Bruxelles, April 1982.
- 4 . Roth-Seefrid, H.; Fité, J.G. First Core Design of a 1300 MWe with Gadolinium Trans. Am. Nucl. Soc. N° 31, 1979.
- 5 . Mosteller, R.D. An Automated Diffusion Theory Parameterization for Gadolinia-Leaded PWR Assemblies. Trans. Am. Nucl. Soc. N° 39, 1981.
- 6 . Orestano, F.V.; Pistella, F. Application of Gd as burnable poison for light water reactors. Energia Nucleare, Vol 19, N° 5, 1977.
- 7 . Buenemann, D.; Müller, A.; Penndorf, K. Burnable Poison Management for High Burnup Reactivity Compensation. Trans. Am. Nucl. Soc., N° 31, 1979.
- 8 . Keinert, J. A thermal neutron cross section library including scattering matrices. IKE6-105/1, Stuttgart, 1978.
- 9 . Adir, J.; Lathrop, K.D. Theory of Methods Used in the GGC-4 Multigroup Cross Section Code. GA-9021, 1968.
- 10 . Rühle, R. RSYST, ein integriertes Modulsystem mit Datenbasis zur automatisierten Berechnung von Kernreaktionen. IKE-4-12, Stuttgart, 1973.