

## A FÍSICA DE REATORES EPITÉRMICOS TIPO PWR

Por Francisco Corrêa  
(IPEN)

Uma subtarefa de um trabalho realizado no MIT e financiada pelo IPEN, FAPESP e DOE envolveu a otimização de redes PWR no modo de reciclagem<sup>1</sup>.

Como já fora evidenciado, no trabalho preliminar de Garel<sup>2</sup>, a atenção deve, inevitavelmente, ser dirigida para projetos tendo altas razões de volume combustível/moderador (C/M), e consideração deve ser dada ao uso de tório. Nós, conseqüentemente, consideramos a reciclagem de plutônio em urânio ou em tório; e no segundo caso, a reciclagem do  $^{233}\text{U}$  convertido, em tório. Esse modo de reciclagem foi selecionado para o tório ao invés da opção mais comum de reciclagem  $^{235}\text{U}/\text{Th}$  por causa do julgamento, em termos práticos, que o reprocessamento de combustível de urânio precederá o reprocessamento de combustível de tório e, que é altamente desejável se evitar a contaminação de U-235 pelo  $^{232}\text{U}$  e por outros isótopos de urânio, os quais aumentariam a complexidade e os custos de reenriquecimento e de refabricação.

Os métodos e a verificação de dados no intervalo de interesse desse estudo,  $0,5$  (redes atuais)  $< C/M < 3$ , são limitados pela escassez de experimentos com  $C/M > 1,2$ . Contudo, os programas EPRI-LEOPARD e LASER<sup>3</sup> usados nos cálculos de tório e de urânio, respectivamente, foram confrontados com diversos experimentos. Em geral, achou-se que o LEOPARD tende a subestimar o fator de multiplicação efetiva ( $K_{\text{eff}}$ ) para redes apertadas (alto C/M), uma tendência atribuída ao seu negligenciamento da interferência entre as ressonâncias do  $^{233}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ , e pela falta de blindagem espacial para o  $^{233}\text{U}$ . Verificou-se que efeitos semelhantes são menos importantes para as redes contendo  $\text{Pu}/\text{UO}_2$  analisadas pelo LASER devido à sua energia de corte térmica ser mais alta relativamente ao LEOPARD e às integrais de ressonância do  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$  e  $^{241}\text{Pu}$  serem menores do que a do  $^{233}\text{U}$ . O uso de métodos de reatores rápidos (SPHINX + ANISN) para as regiões epitérmicas dão melhores resultados para altas razões C/M, mas a absorção ressonante é superestimada tanto para os núclídeos fisséis

como para os férteis. Obtêm-se melhores resultados, também, substituindo-se a "correlação óxido-metal" para o tório no LEOPARD por uma nova prescrição baseada na correlação de Steen<sup>3</sup>:

$$RI^{1/2} = 0.930 \times + 5.17 + (0.0441 \times - 0.1269) T_{eff}^{1/2}; \quad (1)$$

onde os termos são definidos na Ref. 4.

O uso da Eq. (1) aumenta o  $K_{eff}$  para as redes apertadas dos casos padrões em 0,5%. Além do mais, para as redes apertadas de interesse, os valores calculados de  $K_{eff}$  aumentam de até 3% para temperaturas típicas de operação por causa da menor contribuição do efeito Doppler implicada na Eq. (1), trazendo os resultados do LEOPARD para mais perto dos resultados do SPHINX/ANISN.

A Tabela I dá o enriquecimento físsil de recarga (EFR) e a razão de conversão média (CR) para o ciclo de equilíbrio para um PWR com 3-zonas carregado com  $^{233}\text{U}/\text{ThO}_2$  ou  $\text{Pu}/\text{UO}_2$  e uma queima de descarga de 33 MWd/KgHM. O enriquecimento físsil e a razão de conversão aumentam com a razão C/M para ambos os combustíveis. Para as redes atuais (C/M=0,5), o combustível  $\text{Pu}/\text{UO}_2$  requer um enriquecimento um pouco menor do que o  $^{233}\text{U}/\text{ThO}_2$  devido às seções de choque térmicas dos isótopos de plutônio serem muito maiores do que a do  $^{233}\text{U}$ , e ao maior fator de fissão rápida com  $^{236}\text{U}$  do que com  $^{232}\text{Th}$  (1,09 versus 1,02). O maior  $\eta$  térmico do  $^{233}\text{U}$  relativo ao  $^{239}\text{Pu}$  provê maior CR para o combustível  $^{233}\text{U}/\text{ThO}_2$ , pois esse fator ofusca o diferencial no fator de fissão rápida. Em espectros epitérmicos, por outro lado,  $\text{Pu}/\text{UO}_2$  requer consideravelmente mais enriquecimento do que  $^{233}\text{U}/\text{ThO}_2$  por causa da integral de ressonância muito menor dos isótopos físsis de plutônio comparados ao  $^{233}\text{U}$ . O grande efeito de fissão rápida no  $^{236}\text{U}$  (mais  $^{240}\text{Pu}$ ) comparado ao  $^{232}\text{Th}$  (1,20 versus 1,04, para C/M=3), ajuda a prevenir o EFR para o combustível  $\text{Pu}/\text{UO}_2$  de crescer ainda mais, e provê valores de CR maiores do que para  $^{233}\text{U}/\text{ThO}_2$  apesar do maior  $\eta$  do  $^{233}\text{U}$  (Ref. 5). Em ambos os sistemas, altos valores de CR são favorecidos pelo decréscimo nas seções de choque de captura parasítica relativas às seções de choque dos isótopos férteis.

TABELA I

Características dos Cernes em Função da Razão Combustível/Moderador

F/M	Enriquecimento Físsil de Recarga (w/o)		Razão de Conversão Média		Consumo de Urânio (STU <sub>3</sub> O <sub>8</sub> /GW(e).Yr)	
	<sup>233</sup> U/ThO <sub>2</sub>	Pu/UO <sub>2</sub>	<sup>233</sup> U/ThO <sub>2</sub>	Pu/UO <sub>2</sub>	<sup>233</sup> U/ThO <sub>2</sub>	Pu/UO <sub>2</sub>
0,5	2,8	2,7	0,76	0,72	103	106
1,0	3,0	6,2	0,82	0,85	100	90
2,0	4,2	8,4	0,87	0,94	99	71
3,0	5,4	8,8	0,91	0,99	96	44

Bases :

(a) fator de capacidade de 75%; enriquecimento do urânio empobrecido de 0,2 w/o; perda de 1% no reprocessamento e refabricação; reciclagem sucessiva até extinção com ponderação isotópica<sup>1</sup>. Na mesma base, o ciclo once-through num PWR requereria 167 ST U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>/GW(e).Yr.

(b) Composições isotópicas iniciais :

91 w/o U-233 , 8w/o U-234 , 1w/o U-235

54 w/o Pu-239 , 26 w/o Pu-240 , 14w/o Pu-241, 6w/o Pu-242.

Os coeficientes de vazio e de temperatura do moderador ou de reatividade (sem veneno queimável) são negativos em todos os casos da Tabela I no começo do ciclo, o que está em acordo com o fato do EFR aumentar com C/M. Para espectros térmicos (C/M=0,5) o coeficiente de reatividade de vazio do Pu/UO<sub>2</sub> é mais negativo do que para o <sup>233</sup>U/ThO<sub>2</sub> (-3,8 x 10<sup>-3</sup> versus -1,7 x 10<sup>-3</sup> ΔK/% de vazio) porque o EFR para o último combustível é menos sensível à razão C/M. O oposto é verdadeiro para redes epitérmicas (-5,0 x 10<sup>-4</sup> versus -3,8 x 10<sup>-3</sup> ΔK/% de vazio para F/M=3).

A Tabela I mostra, também, o consumo de urânio natural quando os referidos reatores são operados em sistemas completos: nominalmente, <sup>235</sup>U/UO<sub>2</sub>:Pu/ThO<sub>2</sub>, <sup>233</sup>U/ThO<sub>2</sub>, e <sup>235</sup>U/UO<sub>2</sub>:Pu/UO<sub>2</sub>. Todos os cerne usam um esquema de 3-zonas na administração de combustível, descarregam combustível a 33Mwd/KgHM, e (exceto para o cerne final de cada sequência) têm C/M=0,5. O sistema Pu/UO<sub>2</sub> parece ser superior porque o cerne Pu/ThO<sub>2</sub> domina o cerne <sup>233</sup>U/ThO<sub>2</sub>, e este provavelmente está sub-otimizado. De qualquer modo, no estado de equilíbrio, o sistema Pu/UO<sub>2</sub> com F/M=3,0 pode economizar cerca de 60% de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> quando comparado ao mesmo sistema (reciclagem convencional) com F/M=0,5, e 75% comparado ao ciclo atual once-through (não otimizado).

Muitas questões práticas devem ser respondidas antes que sérias considerações possam ser dadas ao uso de cerne com redes apertadas: questões de termo-hidráulica, mecânica e economia. Enquanto o DNBR no estado estacionário não parece ser fator limitante, o reprojeto do cerne para acomodar maiores quedas de pressão parece ser um requerimento inevitável, e limites do tipo transiente/acidente esperam, ainda, um estudo definitivo. Cálculos de custo de ciclo de combustível mostram que ele é pouco sensível à razão C/M (quando o custo do material físsil convertido é calculado no ponto de indiferença) resultando em poucos incentivos ou em poucos empecilhos, dependendo do ponto de vista.

Contudo, conclui-se que a perseguição dessa mudança evolucionária potencial em projetos de cerne de reatores PWR deva ser continuada para uma conclusão definitiva, pois ciclos de combustível quase-

-regeneradores podem, aparentemente, ser atingidos com substancial melhoria da competitividade dos PWR's com respeito aos futuros FBR's. Experimentos no intervalo de interesse estão na ordem do dia: pois a incerteza nos nossos resultados de EFR é estimado em 15%.

#### AGRADECIMENTOS :

O autor deseja agradecer à segura orientação do Prof. M. J. Driscoll (MIT) na execução do trabalho que engloba esse sumário.

#### REFERÊNCIAS :

1. Corrêa, F., Driscoll, M.J. and Lanning, D.D., "An Evaluation of Tight-Pitch PWR Cores", DOE Contract No. EN-77-5 02-4570, Nuclear Engineering Report No. MITNE-227, Energy Laboratory Report No. MIT-EL 79-022 (August, 1979).
2. Garel, K.C. and Driscoll, M.J., "Fuel Cycle Optimization of Thorium and Uranium Fueled PWR Systems", MIT-EL 77-018, MITNE-204 (October, 1977).
3. Shapiro, N.L. et al., "Assessment of Thorium Fuel Cycles in Pressurized Water Reactors", EPRI-NP-359 (February, 1977).
4. Strawbridge, L.E. and Barry, R.F., "Criticality Calculations for Uniform Water-Moderated Lattices", Nucl. Sci. Eng., 23, 58-73 (1965).
5. Edlund, M.C., "Physics of the Uranium-Plutonium Fuel Cycle in Pressurized Water Reactors", Trans. Am. Nucl. Soc., 25, 136 (November, 1976).