

UM LMFBR PARA UTILIZAÇÃO DO TÓRIO E O PROJETO DAS VARETAS DE

COMBUSTÍVEL DE U²³³/Th

Yuji Ishiguro (CTA/IEAv)

Artur F. Dias (CTA/IEAv)

Antônio S. de Gouveia (IPEN)

1. INTRODUÇÃO

As situações da energia nuclear no mundo sugerem que se continue a operar os reatores térmicos baseados no U^{235} como o principal combustível físsil, e que a maior parte das reservas estimadas de urânio natural terá de ser destinada aos reatores térmicos planejados e em operação e que uma grande quantidade de plutônio será acumulada no combustível gasto. Os atuais esforços em vários países para desenvolver reatores regeneradores rápidos refletem-se nestas realizações e nas limitações da energia nuclear baseada em reatores térmicos e numa tentativa de aumentar a base de recurso das reservas de urânio.

É bem conhecido que a reserva de tório no mundo e, em particular no Brasil, é estimada em 3 a 5 vezes a do urânio e que o ciclo do combustível U^{233}/Th deve ser iniciado com um outro combustível físsil, (U^{235} ou plutônio). Assim, um reator regenerador efetivo é mais difícil de se realizar com o ciclo do tório fechado do que com o ciclo do plutônio/urânio.

Propomos que, numa fase inicial da introdução do FBR, parte do plutônio acumulado possa ser consumido para produzir U^{233} , a fim de iniciar e aumentar a contribuição do ciclo do tório no sistema de geração de eletricidade nuclear. Assim, o sistema deve utilizar, idealmente, urânio e tório em proporção à disponibilidade dos recursos.

Neste relatório, discutimos uma concepção de LMFBR que é adequada para o período de transição, possivelmente para um futuro mais distante. O reator proposto é flexível na utilização dos combustíveis nucleares. Com a seleção apropriada dos parâmetros de projeto e gerenciamento dos envoltórios, o sistema poderá produzir mais mantendo uma taxa desejada da contribuição dos dois ciclos de combustível.

A utilização do tório como fonte de energia de fissão tem sido, durante muito tempo, um assunto de pesquisa em diversos países. Vários tipos de reatores e sistemas têm sido propostos e investigados para finalidades tais como reatores regeneradores térmicos ^(1,2), reatores regeneradores rápidos ^(3,4), sistemas simbióticos de reatores rápidos e térmicos ⁽⁵⁾ e reatores regeneradores rápidos operando em ciclos de combustíveis simbióticos ⁽⁶⁾.

A concepção do reator discutida aqui é outra proposição para a utilização do tório com melhoramentos, comparado aos sistemas acima, nas características neutrônicas, de segurança e possivelmente, econômicas.

A característica central da concepção proposta é o uso do combustível U^{233}/Th numa parte central do núcleo do LMFBR e o combustível Pu/U no núcleo externo. As vantagens básicas resultantes são: a razão de regeneração do $Th \rightarrow U^{233}$ pode ser alta devido a maior produção de nêutrons no núcleo ex

terno; e a reatividade de vazio no sódio é negativa nos núcleos interno e externo e, no núcleo como um todo as reatividades de vazio no sódio são reduzidas, quando não negativas.

Neste relatório, apresentamos as características neutrônicas básicas e de segurança e o projeto das varetas de combustível para serem usadas no núcleo interno. Embora neste trabalho os núcleos interno e externo tenham volumes aproximadamente iguais, cada um com uma única zona de enriquecimento, a divisão do núcleo é um parâmetro de projeto a ser selecionado de acordo com a ênfase colocada nas características de segurança, na razão entre os dois ciclos de combustível e nos inventários físséis.

Cada núcleo pode ser também dividido em duas ou mais zonas de enriquecimentos. Na seção 2 são discutidos o modelo do reator considerado neste trabalho e os métodos de cálculos empregados. Na seção 3 são apresentados os resultados dos cálculos neutrônicos. Na seção 4, é discutido um novo conceito de projeto de vareta de combustível e são calculadas as temperaturas nas varetas propostas.

2. O MODELO DO REATOR E OS MÉTODOS DE CÁLCULO

Consideramos reatores cilíndricos com núcleos de aproximadamente 5 m^3 de volume e potência de 2500 MW(t) para usinas de potência da ordem de 1000 MWe. O núcleo é dividido em núcleos interno e externo, de volumes aproximadamente iguais. O núcleo interno é alimentado com U^{233}/Th e o núcleo externo com Pu^{239}/U^{238} . As dimensões e composições do reator são listadas na Tabela 1. O modelo do reator é simplificado e idealizado: o cilindro hexagonal real é tratado como um cilindro circular, os materiais combustíveis contêm apenas os isótopos principais, o material estrutural é o ferro puro, sem a inclusão dos absorvedores de controle e a queima não é considerada.

São considerados os combustíveis das varetas, muito embora, para os cálculos neutrônicos, cada região é homogeneizada. O projeto das varetas de combustível é discutido na seção 4. São considerados dois tipos de combustíveis, o dióxido e o monocarbeto. No núcleo interno são considerados dois tipos de varetas de combustível: as do tipo convencional com pastilhas sólidas de combustível com fração de volume de combustível (FVC) de 40% e as de um novo tipo, com uma fração de volume de combustível de 25%, contendo na sua parte central uma coluna de grafite com uma fração de volume de 15%. Denominamos o segundo tipo de varetas espessas de espectro suave. No núcleo externo são usadas varetas sólidas convencionais. A fração de volume de combustível no núcleo externo é de 40% para o tipo óxido e de 35% para o tipo carbeto. As varetas do envoltório axial possuem a mesma estrutura que nos correspondentes núcleos exceto que, contêm apenas combustíveis férteis.

Basicamente, são considerados quatro casos: dois tipos de varetas de combustível no núcleo interno para cada um dos dois tipos de combustíveis. Com o objetivo de utilizar o tório o máximo possível, os modelos básicos do reator têm um envoltório radial alimentado com tório. Entretanto, para mostrar a flexibilidade do reator, com respeito à utilização dos combustíveis nucleares, também consideramos o envoltório radial alimentado com urânio para os casos com varetas sólidas no núcleo interno.

Os cálculos foram executados da maneira descrita a seguir. Inicialmente foram feitas investigações dos enriquecimentos por um código de difusão unidimensional usando uma biblioteca de seções de choque em 70 grupos, a JFS-70⁽⁷⁾, de tal forma que fossem obtidos um fator de multiplicação efetiva da ordem de 1,05 e uma razão do pico de potência no núcleo externo para o núcleo interno de aproximadamente 1,2.

Foram feitos cálculos finais para casos selecionados usando o código CITATION na geometria R-Z, com a utilização de seções de choque microscópicas em seis grupos de energia, "colapsadas" em cada região a partir da biblioteca JFS-70 grupos através de cálculos unidimensionais. A estrutura, em seis grupos de energia, é mostrada na Tabela 2.

As reatividades de vazio no sódio foram calculadas como a variação no fator de multiplicação, quando a concentração de sódio é reduzida em 50% no núcleo especificado. As reatividades Doppler foram obtidas similarmente com a temperatura aumentada de 900 K para 2100 K.

3. RESULTADOS DOS CÁLCULOS NEUTRÔNICOS

Tabela 1 - Dimensões e composições do reator

D I M E N S Õ E S	
Altura do núcleo	100 cm
Raio do núcleo interno	90 cm
Raio do núcleo externo	128 cm
Volume do núcleo	5,15 m ³
Envoltório axial	2 x 50 cm
Envoltório radial	30 cm
Refletor	40 cm
COMPOSIÇÕES (porcentagem em volume)	
<u>Núcleo interno</u>	
Combustível U ²³⁵ /Th	40 25
Coluna de grafite	- 15
Estrutura (Fe)	10
Sódio	50
<u>Núcleo externo</u>	
	<u>óxido</u> <u>carbeto</u>
Combustível Pu ²³⁹ /U ²³⁸ ...	40 35
Estrutura (Fe)	15 15
Sódio	45 50
<u>Envoltório radial</u>	
Combustível	50
Estrutura (Fe)	15
Sódio	35
<u>Refletor</u>	
Sódio	100

Tabela 2 - Estrutura de seis grupos

GRUPO	ENERGIA INFERIOR *	GRUPOS -JFS-
1	1,4 MeV	1 - 8
2	0,2 MeV	9 - 16
3	21,5 KeV	17 - 25
4	1,0 KeV	26 - 37
5	4,65 eV	38 - 49
6	0,215 eV	50 - 70

* O limite superior de energia é 10,5 MeV.

Tabela 3 - Características do Reator.

TIPO DE COMBUSTÍVEL	DIÓXIDO			MONOCARBETO		
	Núcleo Interno					
Fração de Volume %	40	40	25	40	40	25
Enriquecimento %	11,0	11,0	11	11,1	11,1	11
Densidade Comb. g/cm ³	10,0	10,0	10	10,0	10,0	10,0
Núcleo Externo						
Fração de Comb. %	40	40	40	35	35	35
Enriquecimento %	15,4	15,4	14,9	13,5	13,5	12,9
Densidade Comb. g/cm ³	10,3	10,5	10,5	13,62	13,62	13,62
Envoltório radial	Th	U	Th	Th	U	Th
K-efetivo	1,05173	1,05461	1,0526	1,0557	1,0587	1,0597
Potência núcleo int. %	51	50	52	52	51	52
Razão de Pico da Potênc.	1,24	1,27	1,22	1,21	1,24	1,19
Razão de Regeneração do Th → U-233						
Núcleo	0,8767	0,8769	0,7620	0,8625	0,8627	0,7432
Total	1,5077	1,1374	1,3762	1,4592	1,1149	1,3427
Razão de Regeneração do U-238 → Pu-239						
Núcleo	0,6941	0,6942	0,71696	0,7877	0,7883	0,8273
Total	0,8896	1,3127	0,9268	1,0044	1,4572	1,0832
Inventário do Núcleo, Kg						
U ²³⁸	988	988	730	1074	1074	786
Pu ²³⁹	1491	1491	1442	1594	1594	1524
Th	7963	7963	4865	8606	8606	5264
U ²³⁵	8154	8154	8202	10219	10219	10290
Tempo de Dobramento do Inventário do Núcleo, anos						
U ²³⁵	4,01		3,88	4,8		4,6
Pu ²³⁹		10,0			7,6	
Reatividade de vazio no sódio, 50% vazio, % ΔK						
Núcleo interno	-0,27		-0,60	-0,34		-0,71
Núcleo externo	-0,23		-0,25	-0,21		-0,25
Reatividade de Doppler, T=900° → 2100°K, % ΔK						
Núcleo interno	-0,62		-1,25	-0,52		-1,14
Núcleo externo	-0,25		-0,29	-0,22		-0,27
Vida do Combustível, dias a potência plena a 100 RHD/kg						
Núcleo interno	701		430	745		465
Núcleo externo	786		803	984		985

3. RESULTADOS DOS CÁLCULOS NEUTRÔNICOS

Os resultados dos cálculos neutrônicos estão sumarizados na Tabela 3. Com tório no envoltório radial, a razão de regeneração $\text{Th} \rightarrow \text{U}^{233}$ é bastante alta e um curto tempo de dobramento do inventário de U^{233} é obtido com o combustível óxido ou carbeto. Para o ciclo do Pu/U no núcleo externo, é necessário algum suprimento externo de plutônio, com o combustível óxido, enquanto que, uma proximidade à auto-suficiência pode ser obtida com o combustível tipo carbeto.

Com urânio no envoltório radial, o reator torna-se um regenerador, para o ciclo do urânio, com o tempo de dobramento do inventário de plutônio da ordem de dez anos com o combustível tipo óxido, e oito anos com o carbeto; enquanto é obtida uma auto-suficiência para U^{233} no núcleo interno.

A principal diferença entre os dois tipos de varetas no núcleo interno está no inventário do combustível. Com varetas espessas de espectro suave, o inventário é muito menor e a vida de queima do combustível mais curta para uma dada queima de descarga. Seriam necessários recarregamentos mais frequentes; porém, a vida do combustível para uma queima de 100 MWD/kg é superior a 400 dias, operando a potência plena, e parece que recarregamentos do núcleo interno, em intervalos de um ano ou mais longos, são suficientes. Com o progresso da tecnologia do combustível, o tempo de residência do combustível do núcleo interno pode ser estendido para dois anos. O baixo inventário é uma vantagem para uma fácil introdução do reator. As razões de regeneração do núcleo e total são menores, mas o tempo de dobramento do inventário é ligeiramente mais curto devido ao inventário mais baixo.

As características de segurança são excelentes para todos os casos, com reatividades de vazio no sódio e Doppler sendo negativas nos dois núcleos, interno e externo, apesar das reatividades de vazio no sódio poderem ser positivas para pequenos vazios locais na região interna do núcleo externo. Deve ser notado que ambas reatividades são mais negativas com varetas de espectro suave no núcleo interno.

4. A VARETA DE ESPECTRO SUAVE

Os resultados reportados na seção precedente mostram que as varetas espessas de espectro suave têm algumas vantagens em relação às varetas sólidas mais convencionais. Outra vantagem está no fato de que o diâmetro da vareta pode ser aumentado para uma dada temperatura máxima do combustível e, em consequência, o número de varetas no núcleo é reduzido. Nesta seção, discutimos exemplos de projetos de varetas e relatamos as temperaturas calculadas.

Nesta seção mantivemos a fração de volume de combustível (25%) e a fração de volume da coluna (15%), especificados nas seções precedentes; po

rém, a fração de volume do encamisamento não é especificada. Ao invés disso, a espessura do encamisamento e o espaço de sódio são estabelecidos em 0,3 mm ou 0,4 mm e 0,2 mm, respectivamente. As frações de volume consideradas são apenas exemplos. Outros valores podem, obviamente, ser selecionados com consequentes modificações nas características do reator.

As dimensões e razões calculadas são mostradas na Tabela 4.

A densidade de potência média linear e o número de varetas no núcleo são calculados para o núcleo de 2500 MW(t) de potência, volume de 5 m³ e altura de 1 m.

As temperaturas nas varetas são calculadas apenas na direção radial, considerando uma condutividade térmica constante em cada zona de material. O coeficiente de transferência de calor entre a superfície da camisa e o sódio refrigerante é calculado em função do diâmetro da vareta. A temperatura e a velocidade do fluxo de sódio são de 400°C e 6,88 m/s, respectivamente.

A Tabela 5 mostra as temperaturas na superfície interna da camisa. É considerada uma condutividade térmica de 15 W/m°C. Considerando o limite normal de 700°C para o encamisamento de aço inoxidável e que a temperatura do refrigerante pode ser maior em 100°C, podemos concluir que os diâmetros das varetas de 14 mm ou maiores, dependendo da espessura da camisa e condições de operação, são aceitáveis no tocante às temperaturas na camisa.

As Tabelas 6 e 7 mostram a temperatura na superfície interna do combustível (T_1) para os combustíveis tipos óxido e carbetto ou metálico, respectivamente, juntamente com a temperatura central (T_0) das varetas sólidas de mesma dimensão e densidade de potência média linear. Para o tipo óxido as vantagens das varetas propostas são claramente notadas na grande diferença entre as duas temperaturas T_1 e T_0 . Os diâmetros das varetas de 9 a 10 mm mostram-se favoráveis. Para o combustível carbetto ou metálico, em particular este último, a temperatura crítica que limita o diâmetro da vareta parece ser a temperatura da camisa discutida acima.

Adicionalmente ao número reduzido de varetas e, aos consequentes benefícios de custos na fabricação do combustível, esperamos também que, as propriedades mecânicas sejam melhoradas.

5. CONCLUSÕES

Apesar do nosso modelo ser simplificado e as análises aqui reportadas serem preliminares, acreditamos, que o LMFBR discutido, neste relatório, possui excelentes características relativamente à utilização do recurso, segurança inerente e, possivelmente, aos aspectos econômicos.

O reator é bastante flexível no seu projeto e gerenciamento dos envoltórios.

Tabela 4 - Exemplos de varetas espessas de espectro suave.

Diâmetro Ext. da Camisa mm	8	9	10	12	14
Passo mm	10,540	12,045	13,551	16,561	19,574
Espessura do Comb. mm	1,357	1,551	1,744	2,132	2,520
Diâmetro da Coluna mm	4,286	4,898	5,512	6,736	7,960
Potência = 2500 MWth V = 5 m ³ H = 100 cm					
Número de Varetas 10 ³	52,0	39,8	31,4	21,1	15,1
Densidade de Potência média linear w/cm	481	628	795	1188	1659
Fluxo médio n/cm ²	191	222	253	315	377

Fração de volume de combustível 25%

Fração de volume da coluna 15%

Espessura da camisa 0,3 mm

Espessura do espaço de sódio 0,2 mm

Tabela 5 - Temperaturas (°C) na superfície interna da camisa

DIÂMETRO EXTERNO DA CAMISA	ESPESSURA DA CAMISA	
	0,3 mm	0,4 mm
10 mm	515	551
12 mm	543	587
14 mm	571	624

Condutividade térmica da camisa 15 W/m⁰C

Densidade de potência linear 2 vezes a média

Temperatura do sódio 400°C

Tabela 6 - Temperaturas ($^{\circ}\text{C}$) do combustível óxido

DIÂMETRO EXTERNO DA CAMISA	DENSIDADE DE POTÊNCIA LINEAR			
	média		2 vezes a média	
	T_1	T_o	T_1	T_o
8 mm	1081	1982	1762	3563
9 mm	1281	2458	2163	4515
10 mm	1508	2997	2615	5594

Condutividade térmica do combustível 2,5 W/m $^{\circ}\text{C}$

Espessura da camisa 0,3 mm

Tabela 7 - Temperaturas ($^{\circ}\text{C}$) do combustível carvão ou metálico

DIÂMETRO EXTERNO DA CAMISA	$k_c = 20$		$k_c = 30$	
	T_1	T_o	T_1	T_o
10 mm	973	1166	707	955
12 mm	954	1511	825	1196
14 mm	1141	1918	960	1478

Densidade de potência linear 2 vezes a média

Espessura da camisa 0,3 mm

k_c = condutividade térmica do combustível em W/m $^{\circ}\text{C}$

5. CONCLUSÕES (continuação)

A razão entre os volumes dos núcleos interno e externo pode ser variada de acordo com a ênfase colocada nas características de segurança, razão desejada entre os dois ciclos de combustível e, disponibilidade dos combustíveis físséis. O gerenciamento do envoltório é outro fator ajustável, conforme é mostrado neste trabalho, embora parcialmente. O envoltório radial pode conter montagens de urânio e de tório e não se exclui a possibilidade de colocação de tório no envoltório axial externo.

Outra proposição feita neste relatório refere-se ao projeto das varetas de U^{233}/Th para o núcleo interno. Com varetas espessas de espectro suave, o inventário físsil necessário é reduzido e, a introdução do ciclo do tório torna-se mais fácil. Espera-se que o custo do ciclo do combustível seja menor. As características de segurança do reator são melhoradas, com as reatividades de vazio no sódio e Doppler mais negativas.

O material combustível no núcleo interno pode ser óxido, carbetto ou metálico embora, o diâmetro para as varetas do tipo óxido sejam limitadas em torno de 10mm comparada aos 14mm ou mais para as do tipo carbetto. No núcleo externo, combustível carbetto ou metálico parece superior ao óxido. Na fase inicial da introdução do FBR, o ciclo do tório pode ser introduzido no sistema de energia nuclear as custas de algum consumo de plutônio acumulado. Com o progresso das tecnologias do combustível as características de regeneração serão melhoradas tornando o sistema produtor sem qualquer suprimento externo de combustíveis físséis.

Finalmente, acreditamos, que o LMFBR proposto aqui é um reator re-gerador seguro, flexível e eficiente, que pode expandir a base de recurso da energia nuclear para os ciclos do urânio e do tório.

REFERÊNCIAS

- 1 - W.D. Loewenstein and B.R.Schgal, Trans. Am. Nucl. Soc., 27, 312 (1977)
- 2 - R.A.Karam, Trans. Am. Nucl. Soc., 27, 957 (1977)
- 3 - D.R.Marr, et al; Nucl. Technol., 42, 133 (1979)
- 4 - C.J.Hamilton, et al, Trans. Am. Nucl. Soc., 27, 963 (1977)
- 5 - D.M.Ligon and R.H.Brogh, Nucl. Technol., 48, 261 (1980)
- 6 - T.J. Burns, et al, Trans. Am. Nucl. Soc., 27, 454 (1977)
- 7 - R.A.Karam and C.C.Lee, Fast Reactor Physics, 1979, 2, 423, IAEA (1980)
- 8 - Japan Atomic Energy Research Institute, JAERI - 1255 (1978).