

16 FEV 81

POSSÍVEIS TIPOS DE REGENERADORES COM O CICLO DO TÓRIO

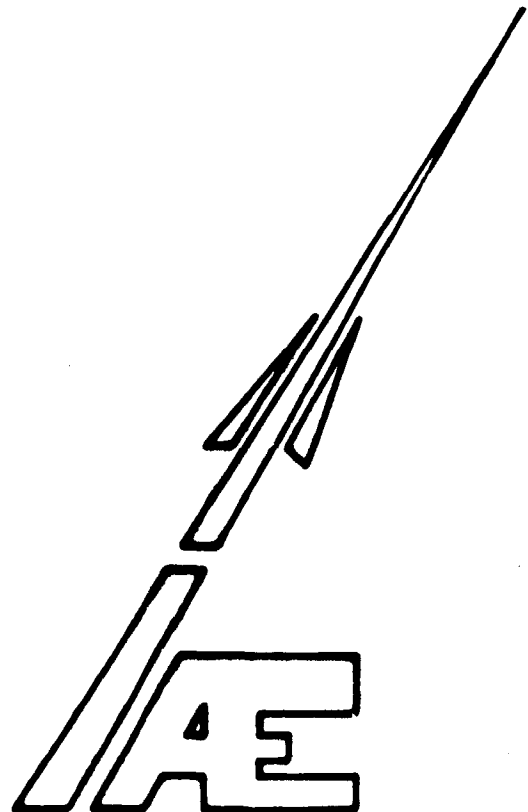
por

Yuji Ishiguro

e

Antonio Soares de Gouvêa (IPEN)

Divisão de Estudos Avançados
Instituto de Atividades Espaciais
Centro Técnico Aeroespacial
12.200-São José dos Campos-SP
Brasil



POSSÍVEIS TIPOS DE REGENERADORES COM O CICLO DO TÓRIO

por

Yuji Ishiguro

e

Antonio Soares de Gouvêa (IPEN)

RESUMO

Cálculos neutrônicos de modelos simplificados de reatores homogêneos mostram a possibilidade que LMFBR com combustível metálico e os reatores carregados com partículas cobertas e refrigerados a gás atinjam tempos de dobramento do reator da ordem de 10 anos com o ciclo do tório. São discutidos três conceitos de regenerador refrigerado a gás. (autor)

ABSTRACT

Neutronics calculations of simplified homogeneous reactor models show the possibility that metal-fueled LMFBRs and coated particle fueled gas cooled reactors achieve reactor doubling times of around 10 years with the thorium cycle. Three concepts of gas-cooled thorium cycle breeders are discussed. (author)

1. INTRODUÇÃO

É conhecido que a regeneração eficiente com o ciclo do tório é mais difícil do que com o ciclo do plutônio. A maioria dos cálculos publicados mostram que o tempo de dobramento do sistema é de 30 ou mais anos (1-6). Contudo, em um trabalho (7), é afirmado que o tempo de dobramento (não definido precisamente) pode ser de 10 anos ou menos se utilizado novo conceito de reator (suspended bed reactor - SBR) ou o LMFBR com combustível metálico. Esta é a base do presente trabalho.

Através de cálculos próprios, obtidos pelo emprego do código EXPANDA e biblioteca de dados nucleares JFS-25 com 25 grupos de energia, constatou-se que realmente é possível atingir tempos de dobramento do reator da ordem de 10 anos, utilizando-se LMFBR com combustível metálico ou reator carregados com partículas cobertas e refrigerados a gás. A realização dos reatores considerados exige a solução de vários problemas de engenharia e de materiais, constituindo-se entretanto, em desenvolvimento razoável da tecnologia atual.

O conteúdo desta Nota Técnica é o seguinte :

Seção 2: são comparados brevemente três tipos de reatores regeneradores.

Seção 3: são analisados os LMFBR com combustível metálico; são mostrados exemplos de estrutura de barra de combustível, taxa de potência, vida do combustível, etc.

Seção 4: são discutidas as características neutrônicas do SBR.

Seção 5: são analisadas em geometria esférica as características neutrônicas dos reatores carregados com partículas esféricas e os efeitos da composição do envoltório.

Seção 6: são discutidos os efeitos da espessura da cobertura das partículas esféricas.

Seção 7: são discutidos três novos conceitos de regenerador de ciclo do tório refrigerados a gás.

Seção 8: são discutidos vários problemas de engenharia e de material que precisam ser resolvidos para a realização dos reatores.

2. TIPOS DE FBR

Todos os reatores rápidos regeneradores em operação ou planejados são refrigerados por metal líquido (LMFBR). Entretanto, há um contínuo interesse em

reatores rápidos regeneradores refrigerados a gás (GCFR) e em 1977 foi proposto o conceito de novo tipo (SBR) de reator (7,8).

Em relação ao combustível, há basicamente dois materiais fissíveis (Pu , U^{233}) e dois materiais férteis (U^{238} , Th^{232}): o plutônio pode ser o Pu^{239} ou a mistura de seus isótopos em diferentes proporções; o urânio fértil pode ser o natural ou o depleto; num reator tanto o combustível fissil como o fértil podem ser misturas dos precedentes.

A Tabela 1 apresenta breve comparação dos reatores tipo FBR. Sabe-se que com o ciclo do plutônio o GCFR é neutronicamente superior ao LMFBR. O fato de que todos os FBR atuais são LMFBR, parece ser devido ao consenso de que o problema da reatividade devida ao vácuo no sódio é de solução muito mais fácil do que o problema da refrigeração de emergência do GCFR.

Tabela I

Comparação entre os tipos de FBR

TIPOS DE FBR		LMFBR	GCFR	SBR
Estado da tecnologia		estabelecida	mais fácil? pouca experiência	mais fácil? nenhuma experiência
Ciclo do Pu	Neutrônico	referência	melhor	inferior?
	Segurança	Na-vazio	refrigeração de emergência	boa
Ciclo do Th	Neutrônico	referência	nenhuma vantagem em particular	melhor?
	Segurança	boa	refrigeração de emergência	boa
Outras Vantagens		pressão baixa	limpo	recarga em operação não há vaso de pressão - limpo
Outras desvantagens		tecnologia do sódio	pressão alta	durabilidade das partículas

3. LMFBR COM COMBUSTÍVEL METÁLICO

É analisado um modelo simplificado do LMFBR carregado com combustível metálico de (U^{233} , Th). O caroço cilíndrico com altura nominal de um metro é circundado por envoltório axial e radial. Todas as regiões são homogeneizadas, as sumindo-se o seguinte:

- o combustível é de U^{233} ... metálico.
- as frações de volume do combustível (FVF) no caroço são 20, 30 e 40%, considerando-se densidades teóricas.
- O SS-316 é o material de encamizamento e das estruturas com fração de volume igual a 20%.
- Os envoltórios axial e radial tem a mesma composição com 50% de Th metálico e 15% de SS-316.
- As espessuras dos envoltórios axial e radial são ambas de 50 cm.
- O espaço restante é preenchido com sódio.

Na Tabela II encontram-se as densidades empregadas no trabalho. O método de cálculo e definições das razões de regeneração ("BR-breeding ratio") e o tempo de dobramento do reator ("RDT-reactor doubling time") são dados na Referência 9. Os resultados encontram-se na Figura 1. O enriquecimento é dado em porcentagem de volume. A potência do caroço é tomado como 2500 MW th. Considera-se como vida do combustível o número de dias com operação à potência plena para atingir uma queima média de 100 MWD/kg-HM.

Tabela II

Densidades Empregadas no Trabalho

Material	U metal	Th metal	SS-316	Na
Densidade g.cm ⁻³	19.05	11.71	7.91	0.9

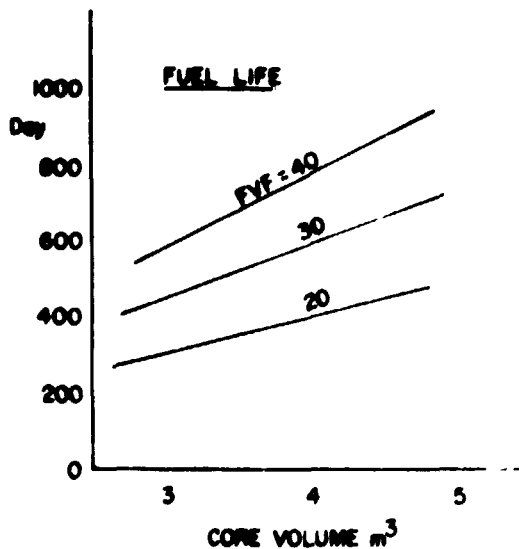
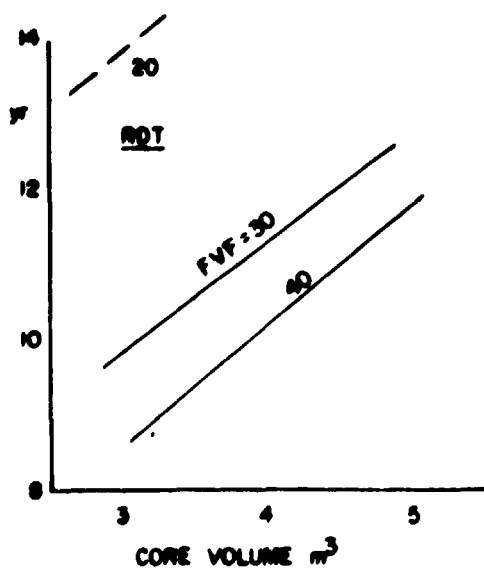
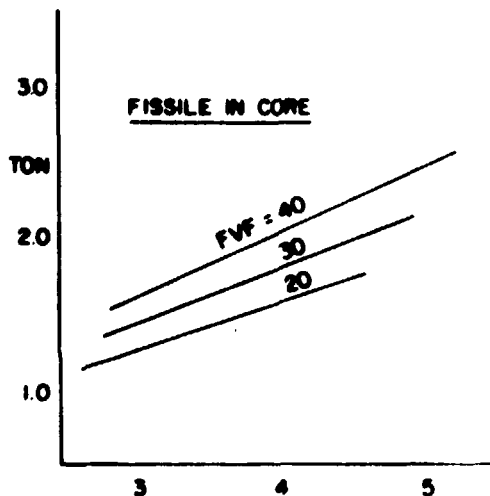
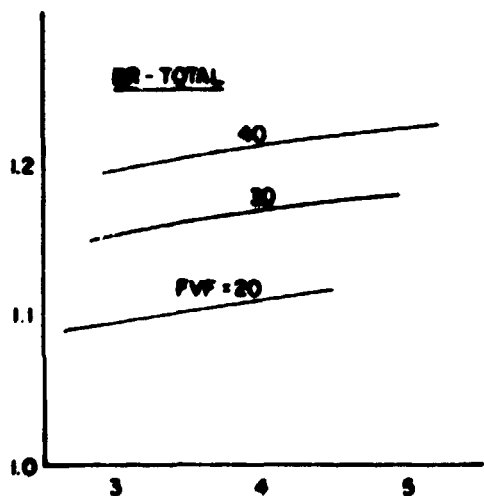
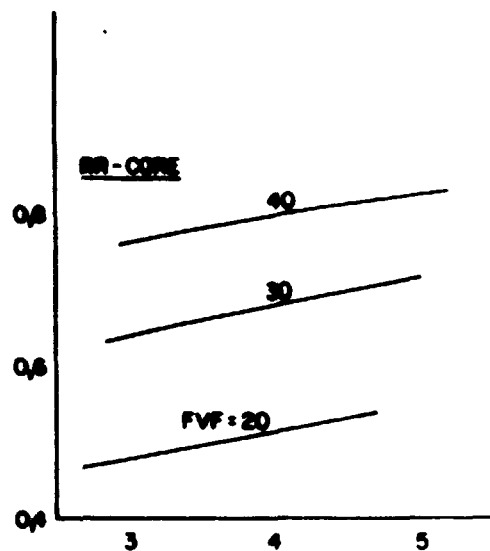
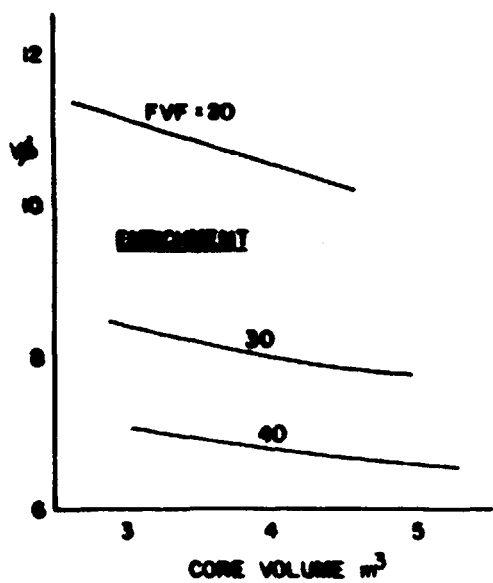


Figura 1 - Resultados do LMFBR

As características gerais apresentadas na Figura 1 são consistentes com as do GCFR relacionadas na Referência 9: para tempos menores de dobramento do reator são preferíveis frações altas de volume do combustível e caroços menores. Numericamente há diferenças, e em particular, duas diferenças devem ser salientadas: o inventário físsil é muito menor comparado as três toneladas para o GCFR e o tempo de dobramento do reator pode ser inferior a 10 anos. Esses são os resultados com o menor caroço possível, refrigerado a sódio. A vida do combustível pode ser suficiente para recarga anual de metade do caroço.

A Tabela III mostra a estrutura aproximada dos "fuel pins" e arranjos do combustível. O diâmetro do "pin" é o diâmetro inicial escolhido com densidade teórica. Para calcular a espessura e diâmetro da camisa, é assumido 75% da densidade média e 25% são considerados preenchidos com sódio. Não são considerados espaçadores e outros materiais estruturais. O "pin rating" pode ser razoavelmente baixo como mostra a Tabela. Observe-se que algumas das estruturas do combustível relacionadas na Tabela III, são semelhantes as do combustível Mark II do reator EBR II (10,11), embora neste trabalho considere-se "pins" muito mais longos.

Tabela III

Estruturas aproximadas dos "pins" e arranjos do combustível para reatores LMFBR com combustível metálico

Fração de volume do combustível $\%$		30	30	40	40	40	40	40
Volume do caroço m^3		3	3	3	3	3	4	4
Diâmetro do "pin" cm		0.3	0.4	0.3	0.4	0.5	0.5	0.6
"Pitch" triangular cm		0.522	0.696	0.452	0.602	0.753	0.753	0.903
Diâmetro externo da camisa cm		0.424	0.566	0.406	0.542	0.677	0.677	0.812
Espessura da camisa cm		0.039	0.052	0.030	0.040	0.050	0.050	0.060
Número de "pins" 10^3		127	72	170	94	61	82	57
Densidade média de potência linear W/cm		196	349	147	266	409	307	442

4. SBR

No projeto original do reator tipo leito suspenso (8), é afirmado que os espaçadores são introduzidos na tubulação do caroço para aumentar a fração de volume do refrigerante e para diminuir a queda de pressão do gás refrigerante. A estrutura e volume dos espaçadores não são especificados. Neste trabalho, analisam-se as características de regeneração dos SBR, considerando-se o volume dos espaçadores como um parâmetro. As seguintes especificações são assumidas ou procuradas.

- altura do caroço: 100 cm
- volume do caroço: 10 m^3
- tubulação: diâmetro externo = 10.75 pol., espessura da parede = 0.5 pol., material = SS-316
- combustível: $(\text{U}^{233}\text{-Th})\text{C}_2$, densidade = 10.0 g.cm^{-3}
- cobertura: grafite de densidade normal, espessura = 0.1 do raio
- fração de compactação da partícula = 0.8886
- os envoltórios axial e radial tem a mesma composição, apresentando as seguintes frações de volume: 20% de combustível, 60% de grafite e 57 de SS-316
- espessura do envoltório axial é de 50 cm e a do radial 40 cm
- potência do caroço: 2500 MWth

Observações:

- 1 - a espessura da cobertura pode ser irrealisticamente pequena; no projeto do SBR é tomada como espessura 0.2 do raio. O efeito da espessura de cobertura é discutido na seção 6.
- 2 - A fração de compactação, das partículas cobertas, tomada pode estar incorreta. Este fator deve ser determinado experimentalmente para um dado tamanho de partícula, geometria da camada de partículas, modo de carregamento, etc.

A Tabela IV, mostra a composição do caroço usada na homogeneização e as concentrações homogeneizadas do U^{233} , Th e carbono. Os resultados numéricos encontram-se na Tabela V.

Tabela IV

Composições do SBR e concentrações atômicas

CASO	1	2	3	4	5
f_c %	11	22	33	33	44
FVF %	43.5	38.1	32.6	32.6	27.2
Cobertura VF %	16	14	12	12	10
SS-316 VF %	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1
Enriquecimento %	9.30	9.95	10.95	10.55	11.95
Concentrações homogeneizadas dos principais isótopos (10^{22} cm^{-3})					
U^{233}	0.094786	0.088822	0.083638	0.080583	0.076157
Th^{232}	0.92836	0.80729	0.68308	0.68615	0.56353
Carbono	3.326	2.912	2.493	2.493	2.079

f_c = fração de volume dos espaçadores no interior da tubulação

FVF = fração de volume do (U^{233} -Th) C_2 em relação ao caroço total

Cobertura VF = fração de volume da cobertura de grafite em relação ao caroço total

SS-316 VF = fração de volume das paredes da tubulação em relação ao caroço total.

Tabela V
Resumo dos resultados do SBR

C A S O		1	2	3	4	5
Caroço - H	cm	101	98	94	104	97
R	cm	180	177	175	180	176
V	m ³	10.3	9.7	9.0	10.5	9.5
BR - Caroço		0.9646	0.9006	0.8150	0.8503	0.7450
envoltório axial		0.1957	0.2340	0.2874	0.2553	0.3212
envoltório radial		0.0504	0.0610	0.0752	0.0742	0.0934
total		1.2107	1.1956	1.1776	1.1798	1.1596
Massa de U ²³³	ton	3.77	3.34	2.90	3.27	2.79
RDT	ano	18.5	17.7	16.8	18.8	18.0
Vida do Combustível	dia	1622	1342	1053	1240	932

Os resultados apresentados na Tabela V mostram que o tempo de dobramento do reator, corrigido da diferença da dimensão do caroço, é aproximadamente independente da fração de refrigerante. A comparação com os resultados do GCFR (9) e do LMFBR dados anteriormente é surpreendente. A razão da diferença não está muito clara (veja seção 5). O tempo de dobramento do reator é da ordem de 18 anos para o caroço com 10 m^3 de volume e decresce para cerca de 16 anos para o caroço com 8 m^3 . A razão de regeneração no caroço é muito dependente da fração de refrigerante. Portanto, ainda que o tempo de dobramento possa ser o mesmo, são preferíveis frações pequenas de refrigerante para ter-se melhores características operacionais. Por outro lado, frações altas de refrigerante podem ser preferíveis em termos do inventário físsil. A vida do combustível é bastante longa em todos os casos. Isto e a possibilidade de recarga em operação permitem eficiente operação do reator, mas problemas de materiais podem forçar o recarregamento antes de atingir o potencial completo do combustível. Este resultado mostra que em termos da vida do combustível, são admissíveis caroços pequenos, sendo também preferíveis para menores tempos de dobramento, sem acarretar grande penalidade no fator de capacidade mesmo que os recarregamentos exijam a parada do reator.

5. CÁLCULOS DO REATOR ESFÉRICO

Nos resultados obtidos para o SBR notou-se que o tempo de dobramento do reator é aproximadamente independente das frações de volume do refrigerante ou do combustível, sendo um resultado diferente daquele para o GCFR(9). Há duas diferenças entre os modelos. O espectro de nêutrons é de menor energia no SBR e a composição do envoltório axial é a mesma para todos os casos do SBR, enquanto que é variável para o GCFR. Uma das intenções desta seção é a investigação do efeito da composição do envoltório.

No projeto do SBR a altura do caroço é limitada por considerações termo-hidráulicas e a razão D/H é superior a 3.5. Nesta seção, resumiram-se os resultados dos cálculos dos reatores esféricos a fim de examinar-se as características extremas de regeneração. O combustível é de partículas esféricas com núcleo de $(\text{U}^{233} - \text{Th})\text{C}_2$ e com espessura da cobertura igual a 0.1 do raio. A fração de volume do SS-316 no caroço é 15%. Duas frações de volume do combustível são considerados, como mostra a Tabela VI. Para cada caso são consideradas três composições distintas para o envoltório. Além disso, para um caso, o enriquecimento foi aumentado para reduzir o tamanho do caroço.

Tabela VI

Resultados do reator esférico (espessura da cobertura igual a 0.1 do raio)

Caroço FVF	z	27,2	←	←	←	38.1	←	←	←
Enriquecimento	z	10,5	←	←	11.1	9.05	←	←	9.4
Envoltório		20-6	40-6	40-4	←	20-6	40-6	40-4	←
Caroço - Volume	m ³	9.6	10.5	11.2	7.9	9.7	10.4	10.9	7.7
Raio	cm	132	136	139	123	132	135	137	122
BR - Caroço		0.8489	0.8630	0.8691	0.8165	0.9878	0.9992	1.0042	0.9636
total		1.1698	1.1954	1.1814	1.1842	1.2064	1.2237	1.2143	1.2152
Massa de U ²³³	ton	2.48	2.73	2.89	2.16	3.02	3.26	3.41	2.51
RDT	ano	15.0	14.4	16.4	12.1	15.1	15.0	16.5	12.0
Vida do combustível	dia	946	1039	1102	777	1344	1439	1503	1066

Observações:

- 1 - Reator esférico, envoltório 40 cm, refletor 20 cm, 2500 MWth.
- 2 - Densidade do U₂C₂ e ThC₂ iguais a 10.0 g. cm⁻³
- 3 - Envoltório 20-6 significa 20% de ThC₂ em volume e 6 x 10²² átomos por cm³ a concentração total de carbono
- 4 - A vida do combustível é o número de dias à potência plena para atingir uma queima média de 100MWD/kg - HM.

Os resultados dados na Tabela VI, também são vistos na Figura 2 onde o tamanho do caroço pode ser normalizado para efeito de comparação. A dependência do RDT (reator doubling time) em relação ao tamanho do caroço é tomada como linear. Várias conclusões são obtidas:

- (i) como na seção 4 o RDT é aproximadamente independente da FVF; de fato FVF altas parecem piores em termos do RDT.
- (ii) é melhor alta concentração de fértil no envoltório; isto explica, pelo menos parcialmente, a diferença já referida entre os resultados do SBR e do GCFR.
- (iii) é melhor alta concentração de carbono no envoltório.
- (iv) o RDT pode ser da ordem de 14 anos para caroço de 10 m³ e da ordem de 11 anos para caroço de 8 m³ (extrapolação do caso 2); ficando claro a melhoria devido a geometria mais compacta.
- (v) em termos da vida do combustível, caroço de 7 m³ ou mesmo menor, é suficiente para um tempo de residência de dois anos.

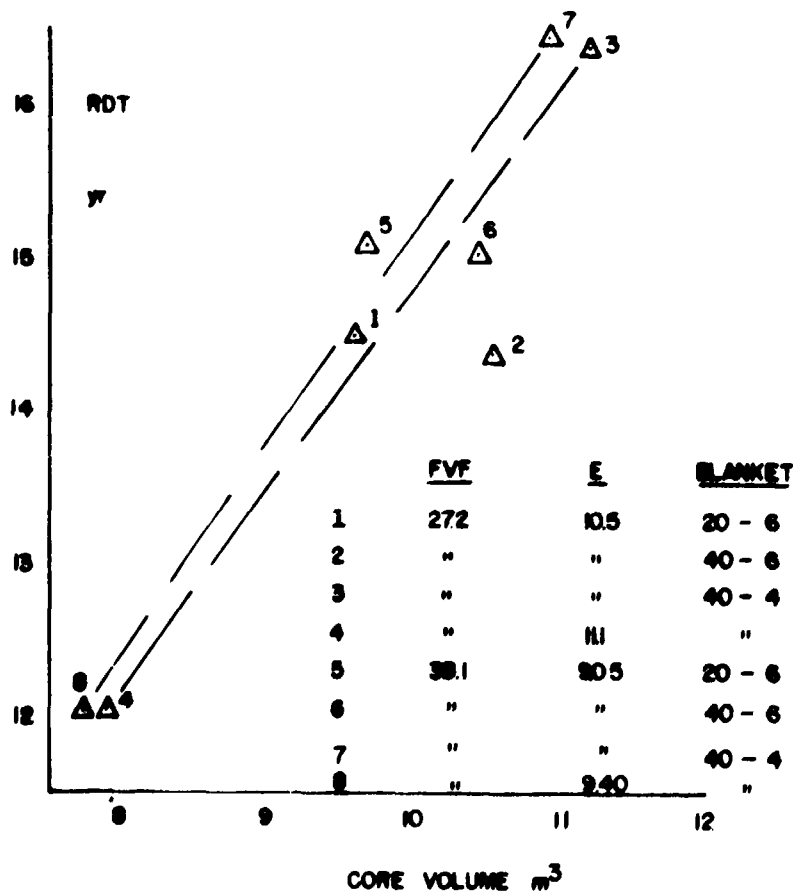


Figura 2 - O RDT do Reator Esférico.

6. COMPARAÇÃO DAS ESPESSURAS DA COBERTURA

Os cálculos nesta seção refere-se a reatores esféricos com combustível de partículas cobertas de $(U^{233} - Th)C_2$. A espessura da cobertura é 0,2 de raio da partícula. A composição dos reatores encontram-se na Tabela VII e os resultados na Figura 3.

Tabela VII

Composição dos Reatores Esféricos (espessura da cobertura = 0.2R)

Caroço	FVF: fração de volume do núcleo de combustível	Variável
	SS-316 VF	12% (*)
	Cobertura de carbono VF	$0.9531 \times FVF$
	Vácuo	Restante
Envoltório	FVF	20%
	Concentração total do carbono	$6.0 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$
	Espessura	50 cm
Refletor	Concentração do carbono	$7.0 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$

(*) Para simplificar os cálculos o SS-316 foi substituído pelo ferro(Fe) com igual número de átomos por cm^3 .

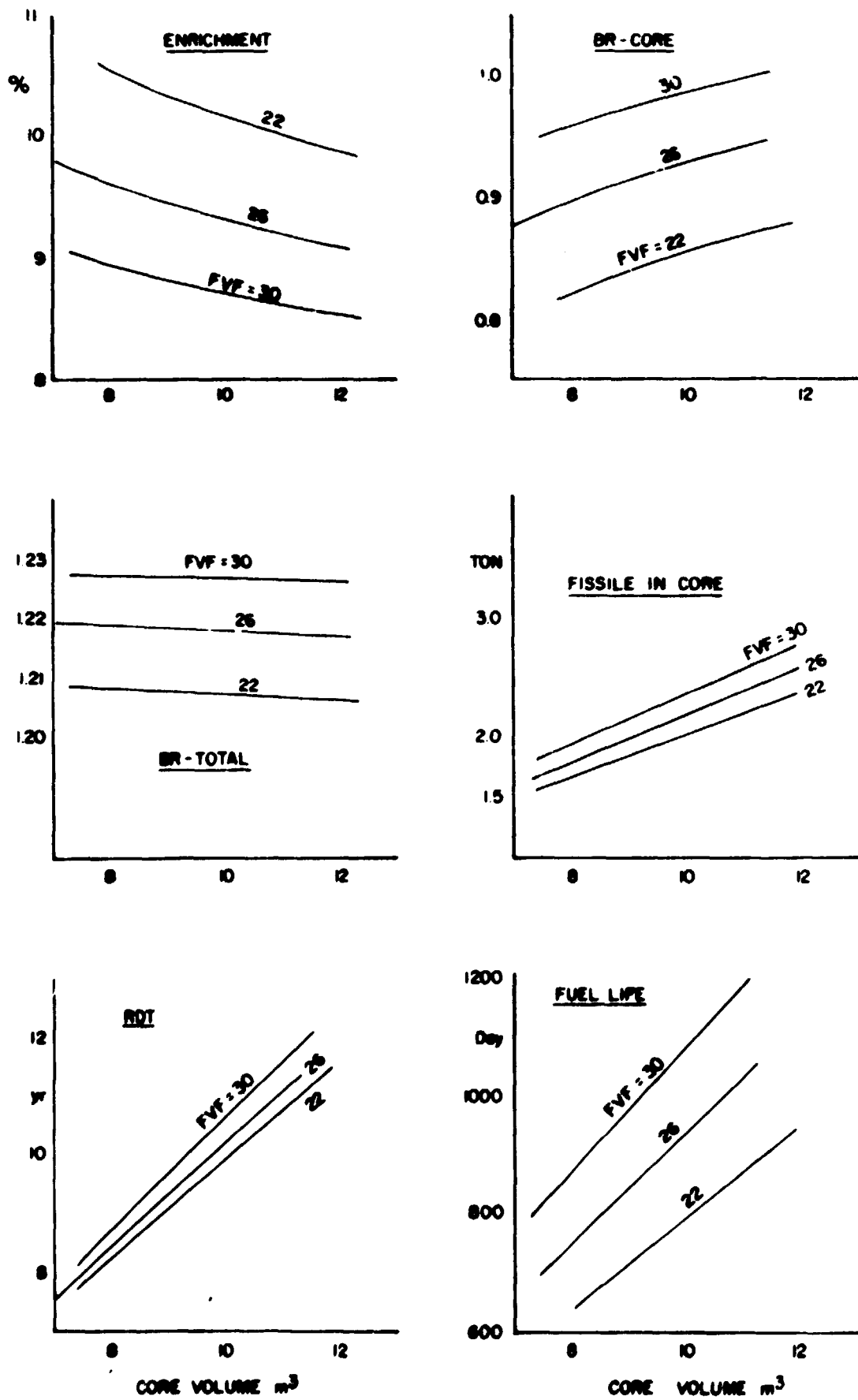
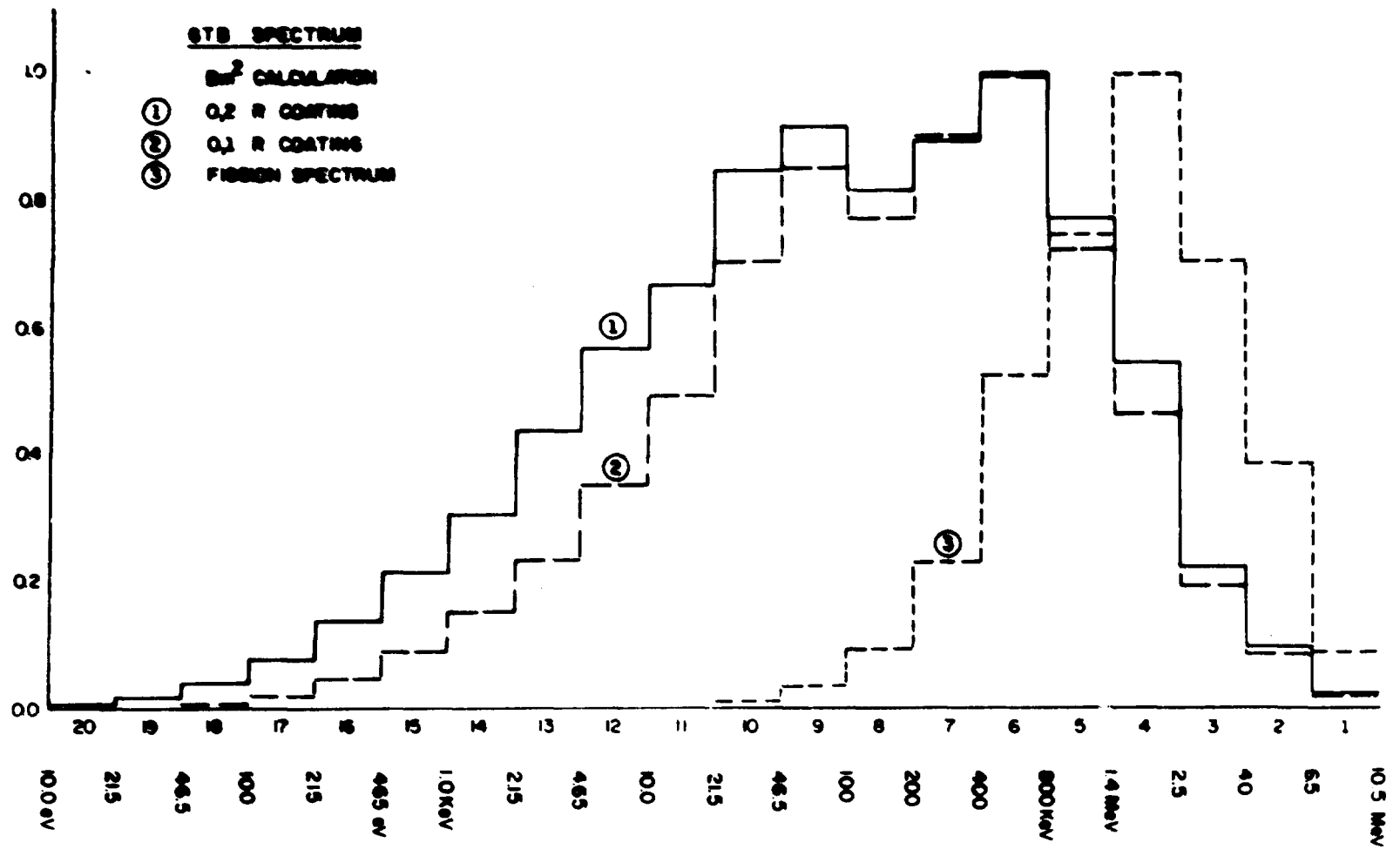


Figura 3 - Resultados do Reator Esférico
(espessura da cobertura igual a 0,2 do raio)

Figura 4 - Espectro de Nêutrons



Dos resultados da Figura 3 e da comparação deles com os obtidos na Seção 5 inferem-se as conclusões seguintes:

1. Para caroço de 10 m^3 de volume o RDT é cerca de 4 anos menor com a cobertura de $0,2R$ do que com $0,1R$. A espessura maior da cobertura é melhor.
2. O RDT é quase independente do FVF, sendo que o menor FVF é melhor.
3. A razão de regeneração no caroço (in-core BR) é mais alta para os maiores FVF.
4. O inventário físsil é mais baixo para os menores FVF.
5. A vida do combustível é suficiente para um tempo de residência de 2 anos.

Parece então que a escolha deve ser um FVF mais baixo. Para um FVF de 22% a fração de volume do leito de partículas é cerca de 50%.

Com relação as conclusões precedentes deve-se ter algumas precauções:

1. Coberturas mais espessas implicam em espectro de nêutrons mais suave e maiores absorções parasitas. A Figura 4 mostra fluxos de grupos normalizados no cálculo do R'_m para dois casos de espessuras de coberturas, bem como o espectro de fissão empregado. Os espectros são graficamente os mesmos para todos os casos da FVF. Para espessura da cobertura igual a $0,2$ do raio o espectro é bastante suave, extendendo-se até cerca de 10 ev . Este pode ser o limite superior da espessura de cobertura, bem como o limite prático inferior para um desempenho confiável das partículas cobertas.
2. Para se ter boas características de regeneração são preferíveis queimas menores de combustível. O esquema de recarregamento e as necessidades de reprocessamento devem ser consideradas.
3. Para um dado tamanho do caroço, uma menor fração FVF acarreta maior geração de calor por partícula. Para a otimização da FVF são necessárias análises termohidráulicas.

7. REGENERADORES COM CICLO DO TÓRIO REFRIGERADOS A GÁS

Como foi discutido anteriormente (9), três condições devem ser satisfeitas para atingir curto tempo de dobramento num sistema em operação:

1. baixo inventário fora do caroço.
2. alto fator de capacidade.

3. curto tempo de dobramento do reator.

Esta Nota Técnica não trata sobre o inventário fora do caroço. O limite superior do fator de capacidade é determinado pelo tempo de parada para os recarregamentos: é desejável recarregamentos em operação para atingir altos fatores de capacidade. Com o ciclo do tório, o ganho de regeneração (breeding gain, BG) é limitado a cerca de 0.3 em contraste com o valor de até 0.8 com o ciclo do plutônio num espectro duro. Para atingir um curto tempo de dobramento do reator, o projeto do reator com o ciclo do tório deve satisfazer as condições seguintes:

- 1. absorções parasitas o mais baixo possível.
- 2. densidade de potência a mais alta possível.
- 3. inventário físsil o mais baixo possível.

Uma questão a ser resolvida antes da construção do reator regenerador refrigerado a gás é como assegurar-se da remoção do calor do decaimento numa situação acidental como a despressurização ou perda da força de bombeamento. Múltiplos sistemas de refrigeração vem sendo empregados nos projetos do GCFR, mas todos são dependentes de fonte externa de força e em nenhum estabeleceu-se esquema inerente de refrigeração tal como a refrigeração de circulação natural do LMFBR. O esquema proposto no projeto do SBR é basicamente eficiente e seguro: em caso de necessidade o combustível na forma de partículas cobertas pode ser armazenado num grande absorvedor de calor capaz de absorver o calor de decaimento durante várias horas sem qualquer dependência de refrigeração.

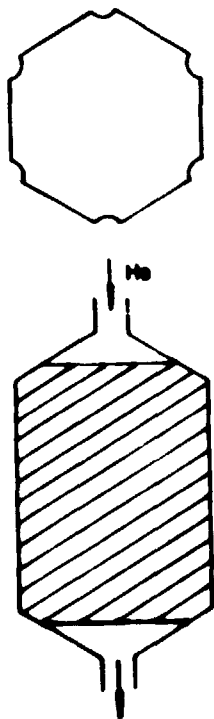
Em contraste com o ciclo do plutônio, o espectro suave de nêutrons pode ser uma característica positiva com o ciclo do tório (9). Os resultados das seções precedentes e os da Referência 9 mostram que o combustível na forma de partículas cobertas é uma boa escolha em relação ao tempo de dobramento do reator.

A seguir são propostos três conceitos de reator regenerador com o ciclo do tório e refrigerados a gás (GTB-1, -2, -3) que tem uma segurança inerentes com relação a remoção do calor de decaimento e a possibilidade de recarregamento em operação. Os três conceitos tem em comum as características seguintes:

- 1. combustível na forma de partículas cobertas.
- 2. uso do vaso de pressão de aço ou de PCRV.
- 3. sistema de refrigeração de emergência do SBR.
- 4. uso de válvulas tampão na parte inferior do leito de partículas (Referência 9).

Todos os reatores podem ter boa geometria com razão D/H próxima da unidade. As diferenças estão na estrutura do caroço.

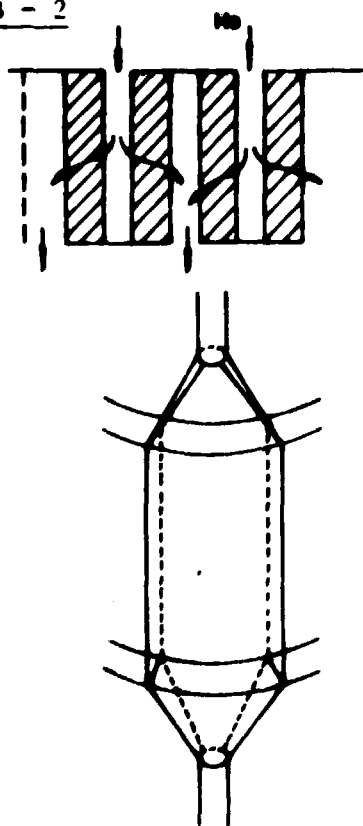
GTB - 1



- O caroço tem uma estrutura multi-camada no sentido axial e multi-câmara no sentido radial. A unidade da estrutura é uma câmara hexagonal com espaço nas vértices para canos de refrigeração dispendo ainda de cano ligado a parte superior e a inferior. Espaçadores podem ser colocados, se necessários, no interior da câmara. Três camadas de câmaras unitárias formam um conjunto compacto de montagem. O combustível de partículas cobertas preenche cada câmara acima da válvula tampão.

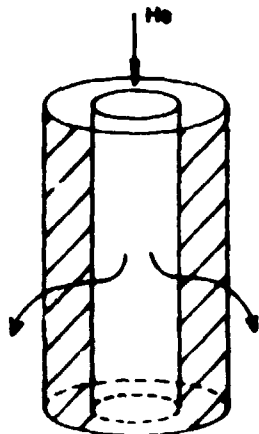
O refrigerante passa através do leito de partículas de uma câmara e segue pela tubulação entre câmaras para outras camadas. Portanto as características termohidráulicas são determinadas pela altura de cada câmara enquanto que as características neutrônicas são determinadas pela altura total do caroço.

GTB - 2



- O caroço deste reator consiste de um conjunto concêntrico de camadas cilíndricas com paredes perfuradas. As camadas são particionadas azimultaneamente e cada seção é conectada superiormente e inferiormente a um cano. As partículas cobertas são introduzidas nas camadas através do cano superior e descarregadas pelo inferior. O refrigerante é introduzido no espaço entre as camadas de partículas cobertas, passa entre duas camadas adjacentes e sai do caroço.

GTB-3



- A estrutura do caroço aqui considerada é praticamente a mesma da GBR-2 projetado pela Gas Breeder Reactor Association. A unidade da estrutura é um cilindro de dupla parede. As partículas cobertas são compactadas entre as paredes perfuradas e o refrigerante passa através dessa camada. Esta estrutura cilíndrica é disposta no conjunto triangular usual e forma o caroço. No GBR-2 este cilindro é a "barra de combustível" e o elemento combustível é o conjunto de sete barras. No GTB-3 os cilindros são estruturas fixas no caroço. O combustível de partículas é vasado no espaço entre as paredes duplas.

Comparação entre os três conceitos - A principal diferença entre GTB-1 e GTB-2 ou -3 está na espessura do leito de partículas através do qual passa o refrigerante. No GTB-1 é da ordem de 50 cm enquanto que no GTB-2 e GTB-3 é de vários centímetros; No GBR-2 a espessura média é de 2,5 cm. No GTB-2 e GTB-3 a área (perpendicular a direção do fluxo do refrigerante) do leito é aumentada e a velocidade do refrigerante é muito menor do que a do GTB-1. Conseqüentemente, para a mesma taxa de fluxo de massa, é esperado menor potência de bombeamento para os GTB-2 e GTB-3. Em outras palavras, com a mesma potência de bombeamento, pode-se esperar maior densidade de potência nos GTB-2 e GTB-3 do que no GTB-1. Por outro lado, a distribuição do fluxo pode ser mais uniforme no GTB-1 do que nos outros.

Outros parâmetros tais como frações de volume, material e razão D/H podem ser aproximadamente os mesmos. Com relação a geometria, o GTB-2 é um cilindro circular, enquanto que os demais são basicamente hexagonais.

Outros critérios de seleção referem-se a tensão estrutural, facilidade de fabricação e características de manutenção e operação.

8 - COMENTÁRIOS

Neutronicamente tanto o MFBR com combustível metálico como os reatores GTB mostram-se capazes de atingir um tempo de dobramento do reator da ordem de 10 anos. Nesta seção são brevemente examinadas várias áreas que necessitam de investigação.

Termohidráulica - A densidade média de potência do reator EBR-II é cerca de 943 MW/m^3 . Mesmo com "fuel pins" mais longos, parece possível atingir uma densidade de potência da ordem de $600\text{-}700 \text{ MW/m}^3$ necessário para atingir RDT da ordem de 10 anos. A refrigeração por circulação natural após a parada neutrônica foi demonstrada nos LMFBR em operação, mas deve ser confirmada nos que tem maiores FVF e densidade de potência.

Na análise do SBR (8), a máxima densidade de potência para partículas de 2 mm, fração de vácuo de 50% e a altura do leito igual a 100 cm (e outras condições), é cerca de 500 MW/m^3 . A densidade de potência pode ser aumentada para partículas menores, menor fração de vácuo e maior fluxo de hélio. Portanto, parece possível que o GTB-1 com leito menor ou o GTB-2 e GTB-3 com leito de pequena espessura a densidade de potência passa ser aumentada para cerca de 400 MW/m^3 .

Materiais - Experiências no EBR-II mostram alta capacidade de queima dos combustíveis de ligas de urânio (10, 11). Ligas de tório são conhecidas como tendo melhor propriedade do que as ligas do urânio (3).

Embora nos reatores GTB o movimento de partículas esteja limitado ao mínimo, permanece a questão referente a durabilidade da partícula num sistema dinâmico comparado a um sistema estático como o do HTGR. Os materiais e espessuras da cobertura das partículas devem ser examinados. Danos de radiação dos materiais de estrutura serão um grave problema nos reatores GTB. Se for constatada uma vida curta para a estrutura do caroço, deve ser considerada a possibilidade de replaçar-la por uma nova.

Estrutura - O principal problema do LMFBR é a exequibilidade de barras de combustível com cerca de um metro de altura. O combustível do EBR-II tem cerca de 34 cm. No caso de serem viáveis "pins" mais longos, a geometria do caroço pode ser melhorado. Outra questão diz respeito aos envoltórios; se o envoltório axial pode ser separado do caroço de modo a aumentar a fração de combustível fértil, se o uso de grafite nos envoltórios é exequível e melhor.

Problemas com relação as estruturas do GTB estão em aberto: materiais, espessuras, disposição das estruturas do caroço; disposição da tubulação; vaso de pressão ou PCRV; localização do vaso (aço) de pressão (se usado), interno ou externo ao envoltório; direção do fluxo de refrigeração; esquema de recarregamento; estrutura e operação das válvulas tampão; etc.

Aspectos operacionais - Muitos anos de experiência foram acumulados na operação do LMFBR, enquanto que os reatores GTB são sistemas completamente novos. Segurança, recarregamento e manutenção devem ser examinados.

Tempo de dobramento do sistema - Os reatores GTB parecem ter vantagens sobre o LMFBR em relação a parada do reator para recarregamento. Contudo, faz-se necessário análise mais detalhada para comparar os dois tipos de reator com relação ao tempo de dobramento do sistema: vida do combustível; tempo de parada; possibilidade de recarregamento em operação; inventário fora do caroço; reprocessamento; etc.

Outros - A presente análise é apenas um ponto inicial e simplificado com relação ao excesso de reatividade, necessidades de controle, queima, etc., e somente caroço de única região foi considerado.

9 - CONCLUSÕES

Baseando-se na análise neutrônica simplificada aqui desenvolvida, parece que ambos os reatores, o LMFBR com combustível metálico e os GTB, tem potencial de serem bons regeneradores com o ciclo do tório, com tempo de dobramento do reator da ordem de dez anos. Em termos da experiência operacional, e estado da tecnologia o LMFBR pode ser preferível, mas a escolha deve aguardar análises mais detalhadas das características neutrônicas, materiais, operacionais, estruturais, termohidráulicas e demais aspectos de uma usina nuclear.

REFERÊNCIAS

- 1 - D.R. Haffner e R. W. Hardie, "Reactor physics parameters of alternative fueled fast breeder reactor core designs", Nucl. Technol. 42, 123 (1973).
- 2 - D.R. Marr, et al, "Performance of thorium-fueled fast breeders", Nucl. Technol., 42, 133 (1979).
- 3 - C.J. Hamilton, et al, "The thorium cycle in fast breeders and thermal converters", Trans. Am. Nucl. Soc., 27, 963 (1977).
- 4 - P.S.K.Lam e S.F.Su, "Pin-diameter optimization of homogeneous and tightly coupled heterogeneous ^{233}U -Th metal-fueled LMFBRs," Trans. Am. Nucl. Soc., 27, 755 (1977).
- 5 - L.D.Felton, et al, "Large plant thorium-fueled reactor system characteristics", Trans. Am. Nucl. Soc., 27, 456 (1977).
- 6 - J.R. White e T.J.Burns, "Alternative heterogeneous GCFR fuel Cycle", Trans. Am. Nucl. Soc., 32, 403 (1979).
- 7 - R.A.Karam, "The ^{233}U - ^{232}Th fuel cycle as an alternative to LMFBR", Trans. Am. Nucl. Soc., 27, 957 (1977).
- 8 - R.A.Karam, et al, "Suspended-bed reactor preliminary design (U^{233} -Th cycle)", a report prepared for ERDA under contract No. E(40-1) - 0273 (May 1977).
- 9 - Y.Ishiguro e A.S. de Gouvêa, "Estudo inicial das características de regeneração dos GCFR com U^{233} -Th", EAV/NT-014/80.
- 10 - L.C.Walters e J.H.Kittel, "Development and performance of metal fuel elements for fast breeder reactors", Nucl. Technol., 48, 273 (1980).
- 11 - R.E.Einziger e B.R.Seidel, "Irradiation performance of metallic driver fuel in Experimental Breeder Reactor II to high burnup, "Nucl. Technol., 50, 25 (1980).

