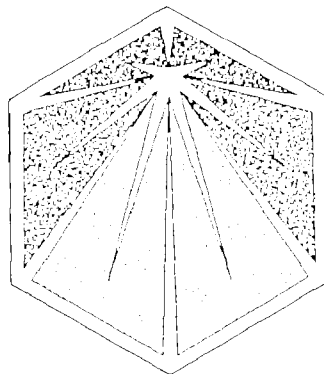
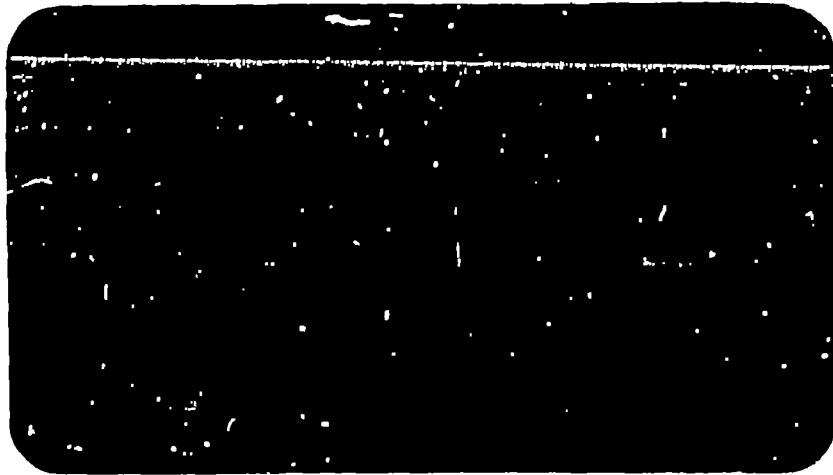


BR 8714303

Ministério da Aeronáutica
Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento
Centro Técnico Aeroespacial



OTIMIZAÇÃO DO REATOR REGENERADOR BINÁRIO
V - REATORES REGENERADORES BINÁRIOS COM
DUAS E QUATRO ZONAS E UM LMFBR-(Pu/U)
CONVENCIONAL DE DUAS ZONAS

CTA - IEAV - RP -- 014/86

Artur F. Dias
Yuji Ishiguro

3

RELATÓRIO DE PESQUISA IEAV-014/86 (Abr.86)

RELATÓRIO DE PESQUISA

RESUMO

Foram feitas análises comparativas entre um reator regenerador rápido convencional (LMFBR-Pu/U) e dois reatores regeneradores binários (RRBs) com diferentes números de zonas de enriquecimento. Ênfase principal foi colocada na comparação entre as características de segurança, regeneração e perda de reatividade durante o ciclo de operação. Através das comparações, ficou demonstrado que podem ser atingidas boas características de segurança em ambos os ciclos, do urânio/tório e do plutônio/urânio, além das ótimas perspectivas de uma eficiente utilização do ciclo do tório, num reator misto, com segurança inerente bem melhor do que as dos atuais LMFBRs.

ABSTRACT

Comparative analyses of a commercial-size Pu/U-fueled liquid metal fast breeder reactor and two binary breeder reactors with different numbers of enrichment zones have been done. Principal parameters of comparison are safety and breeding characteristics and reactivity losses during an operational cycle. The comparison shows that in a binary breeder reactor, good breeding characteristics in both cycles, Pu/U and U/Th, in addition to a possibility of an efficient utilization of thorium, and superior inherent safety than current LMFBRs can be achieved.

1. INTRODUÇÃO

Partindo de um reator regenerador binário com duas zonas de enriquecimento (RRB-2z), com um núcleo total de $6,5 \text{ m}^3$, carregado com os combustíveis metálicos, $^{233}\text{U} - ^{232}\text{Th} - 10\% \text{ Zr}$, no núcleo interno e $\text{Pu-U} - 10\% \text{ Zr}$ no núcleo externo, foram derivados outros dois reatores equivalentes. O primeiro um LMFBR convencional, carregado somente com $\text{Pu-U} - 10\% \text{ Zr}$, e o outro, um RRB com quatro zonas de enriquecimento (RRB-4z). Os combustíveis férteis dos correspondentes envoltórios dos reatores contêm 10% Zr.

As análises dos três tipos de reatores tiveram, como objetivo principal, a comparação quantitativa das características neutrônicas, com ênfase principal na segurança inerente. A consideração de um maior número de zonas de enriquecimento no RRB foi explorada para a verificação dos efeitos na regeneração, segurança e flexibilidade no gerenciamento do combustível.

Os cálculos dos reatores foram realizados mantendo as mesmas dimensões e nível de potência, diferindo apenas no combustível para o LMFBR, e no número de zonas de enriquecimento para os RRBs. Para obter as reatividades de Doppler e de vazios no sódio, os cálculos foram realizados com e sem presença de controle, com referência ao início do ciclo. Na ausência de controle, os enriquecimentos foram selecionados de tal forma que a distribuição de potência no núcleo interno fosse a mais plana possível, mantendo a razão entre os picos das densidades de potência das duas zonas do núcleo igual a 1,10. Os cálculos das reatividades com presença de controle também foram feitos com a distribuição de potência bem plana, conseguida pela escolha adequada dos enriquecimentos de B-10 nos feixes de controle.

Os resultados deste trabalho confirmam as conclusões preliminares de nossos trabalhos anteriores/1,2/, e mostram as diferenças entre o RRB e o LMFBR convencional. Desta forma, ficou demonstrado mais evidentemente, a possibilidade de uma utilização eficiente do tório e a bem melhorada segurança inerente do RRB relativamente a um LMFBR convencional.

2. DADOS DE PROJETO E DISPOSIÇÃO DOS FEIXES

O número total de feixes combustíveis do tipo metálico e de controle com B_4C enriquecido, para os três tipos de reatores é o mesmo; sendo 150 feixes de combustível no núcleo interno (NI), 144 no núcleo externo (NE), 19 feixes de controle (FCs) distribuídos no NI e 204 feixes de combustível fértil no envoltório radial (ER), conforme mostrado na Figura 1. No NI

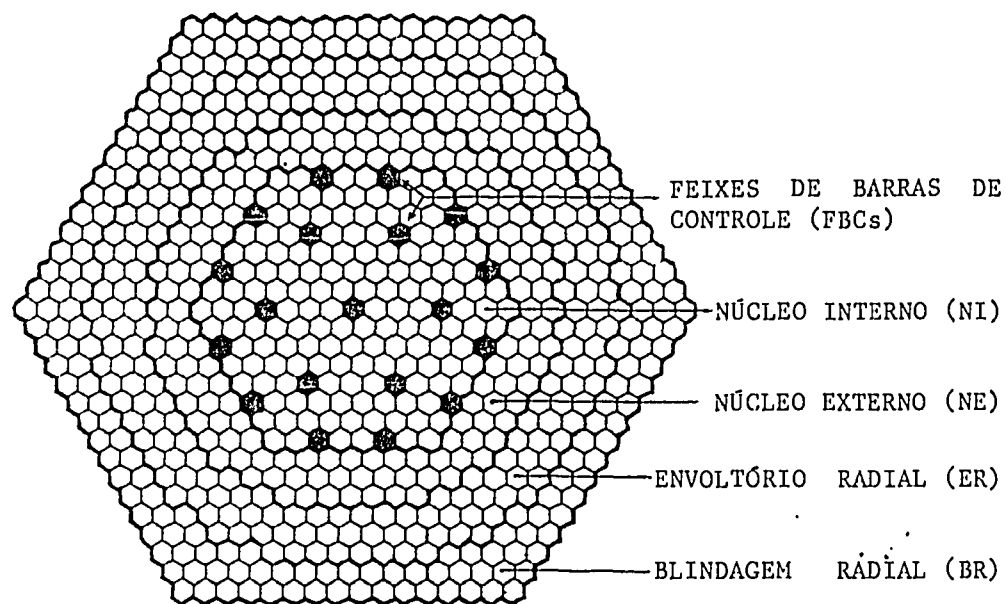


Figura 1: Disposição dos feixes para o LMFBR e o RRB-2 zonas

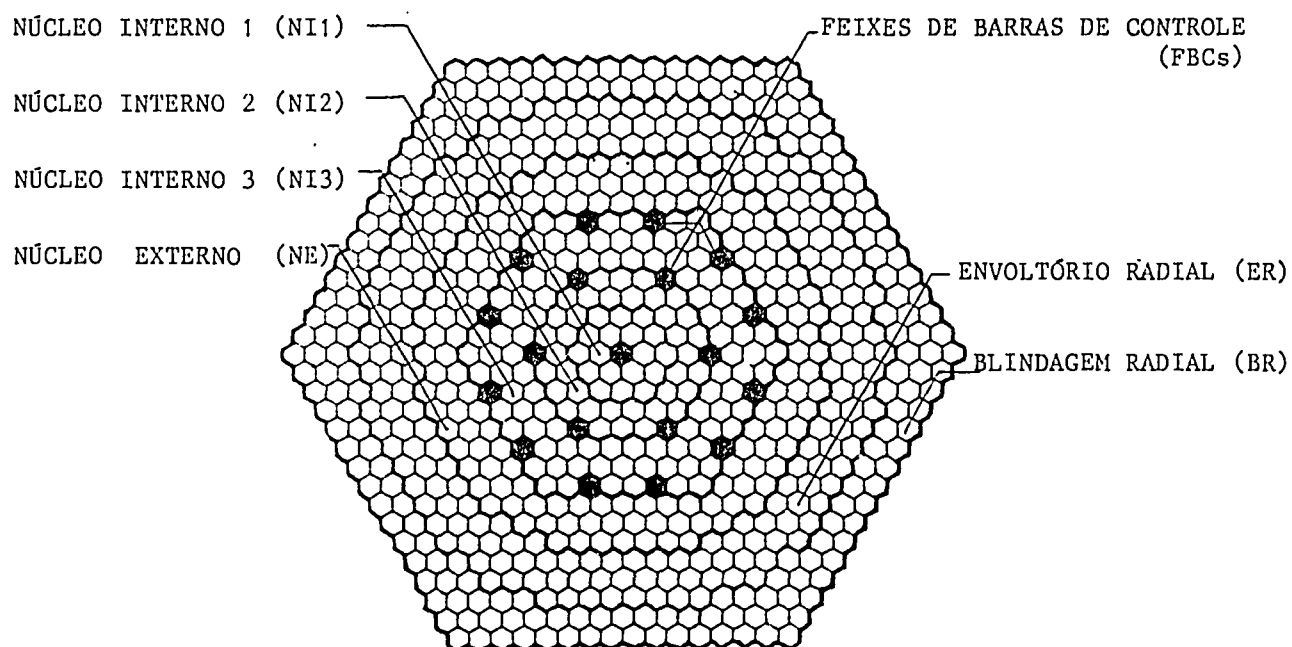


Figura 2 - Disposição dos feixes para o RRB-4 zonas

do RRB de duas zonas, os 150 feixes de combustível são carregados com ^{233}U - ^{232}Th -10% Zr, e no NE, o combustível é o Pu - U-10% Zr. No LMFBR, todos os feixes de combustível (NI+NE) são carregados com Pu - U-10% Zr. O terceiro reator (Figura 2) é o RRB com NI subdividido em 3 zonas de combustíveis, a saber: 18 feixes de $^{233}\text{U}/\text{Th}$ colocados nos primeiros anéis combustíveis (anéis 2 e 3), ou seja, no núcleo interno 1 (NI1); 36 feixes de urânio/plutônio nos anéis 4 e 5 do núcleo interno 2 (NI2) e, mais 96 feixes de $^{233}\text{U}/\text{Th}$ nos anéis 6, 7 e 8 constituindo o núcleo interno 3 (NI3). Para completar a quarta zona de combustível do reator, 144 feixes de urânio/plutônio, nos anéis 9, 10 e 11 determinando o núcleo externo (NE). O combustível fértil para os 204 feixes dos envoltórios radiais dos reatores é o ^{232}Th -10% Zr para os RRBs e ^{238}U -10% Zr para o LMFBR. Os combustíveis férteis dos envoltórios axiais são os mesmos dos núcleos correspondentes. As características de projeto dos reatores tais como, potência, frações de volume, diâmetro das varetas, etc., são dadas na Tabela 1. O material estrutural é o aço inoxidável parecido com o SS-316. Os feixes de controle, num total de 19, estão distribuídos no NI da seguinte maneira: 1 FC central, 6 FCs no quinto anel e, 12 FCs no oitavo anel.

3. CÁLCULOS

A metodologia utilizada obedeceu a critérios um pouco mais rigorosos do que nos casos anteriores na obtenção das seções de choque pelo código EXPANDA. A determinação da curvatura axial, para os cálculos unidimensionais, foi mais cuidadosa do que nos casos anteriores. As curvaturas dependentes da energia, para cada zona, foram obtidas finalmente, somente quando, no processo iterativo, os resultados bidimensionais (CITATION) apresentavam-se bastante precisos. Na presença de absorvedores de controle, os enriquecimentos de ^{10}B , para os feixes de controle nas posições especificadas, foram calculados mantendo a razão entre os picos das densidades de potência dos núcleos interno e externo, sempre igual a 1,10.

A escolha dos enriquecimentos das quatro zonas do RRB também obedeceu a um critério iterativo, mantendo o mesmo rigor na obtenção das seções de choque utilizadas. Os enriquecimentos dos combustíveis e de ^{10}B para os reatores estão mostrados nas Tabelas 2 e 3. Os enriquecimentos de ^{10}B mais baixos para os FCs mais externos do RRB-4z, relativamente ao RRB-2z, reflete a valorização do FC pelo maior número de zonas de enriquecimento no reator.

Tabela 1: Características dos reatores

Potência	2740 MW(t) [1000 (MWe)]
Altura do núcleo	100 cm
Espessura do envoltório axial	38 cm
Temperatura	
Diferença média	156°C
Temperatura de saída	500°C
NÚMERO DE FEIXES COMBUSTÍVEIS	
<u>RRB-2 zonas e LMFBR</u>	
Núcleo interno	150
Núcleo externo	144
Feixes de controle	19
Envoltório radial	204
Blindagem radial	186
<u>RRB-4 zonas</u>	
Núcleo interno 1	18
Núcleo interno 2	36
Núcleo interno 3	96
Núcleo externo	144
PROJETO DA VARETA DE COMBUSTÍVEL	
<u>Materiais combustíveis</u>	
Núcleo interno	^{233}U - ^{232}Th -10% Zr
Núcleo externo	Pu-U-10% Zr
Material entre combustível-camisa	sódio
Diâmetro externo da vareta	7,8 mm
Espessura da camisa	0,38 mm
Razão p/d	~ 1,224
Passo das varetas	9,55 mm
Diâmetro do arame espaçador	1,70 mm
Câmara de gás	122 cm
(Densidade efetiva)/(Densidade teórica)	0,75
Potência linear máxima	660 W/cm
Potência linear média	423 W/cm
<u>PROJETO DO FEIXE</u> -[núcleo, envoltório axial]	
Varetas por feixe	217
Passo do feixe	160 mm
Distância entre os faces externas do feixe	150,5 mm
Espaço entre feixes	9,5 mm
Espessura do duto	3,5 mm
Queda de pressão	~ 6,4 atm
Velocidade máxima	~ 8,7 m/s.

Tabela 1: continuação

ÁREAS

Área da célula do feixe	221,7025 cm ²
Área da parede do duto	17,8228 cm ²
Área da vareta	103,6905 cm ²
Área do arame espaçador	4,93 cm ²
Área do combustível	84,4685 cm ²

FRAÇÕES DE VOLUME

Fração de volume do combustível	38,1% (38,0)
Fração de volume da estrutura	18,93% (20,0)
Fração de volume do sódio	42,97% (42,0)

PROJETO DO ENVOLTÓRIO RADIAL

Varetas por feixe	127
<u>Material combustível</u>	
RRB-2 e 4 zonas	Th-10% Zr
LMFBR	U-10% Zr
Material entre combustível - camisa	sódio
Passo do feixe	160,0 mm
Distância entre as faces externas do feixe	150,5 mm
Espessura do duto	3,5 mm
Espaço entre feixes	9,5 mm
Diâmetro da vareta	11,6 mm
Diâmetro do arame espaçador	0,7 mm
Passo do feixe	12,4 mm
Espessura da camisa	0,38 mm
Densidade efetiva/Densidade teórica	0,85
Razão p/d	1,069

ÁREAS

Área da célula do feixe	221,7025 cm
Área da parede do duto	17,8228 cm
Área da vareta	134,2176 cm
Área do arame	0,4888 cm
Área do combustível	117,2066 cm

FRAÇÕES DE VOLUME

Fração de volume do combustível	52,87% (53,0)
Fração de volume da estrutura	15,93% (16,0)
Fração de volume do sódio	31,2% (31,0)

Tabela 2: Enriquecimentos das zonas de combustíveis (%)

	LMFBR	RRB-2z	RRB-4z	
Núcleo Interno	13,05	13,058	12,550	NI1
			13,220	NI2
			13,075	NI3
Núcleo Externo	17,288	17,588	17,513	NE

Tabela 3: Enriquecimentos (%) de ^{10}B dos feixes de controle e quantidade total de ^{10}B (kg)

REATOR ANÉIS	LMFBR	RRB-2z	RRB-4z
N 1 (1 FC)	15,0	10,0	12,0
N 5 (6 FCs)	15,0	10,0	12,0
N 8 (12 FCs)	30,0	30,0	18,0
^{10}B (kg) total	20,09	17,62	16,07

4. RESULTADOS E COMENTÁRIOS

4.1 Reatividades de realimentação

A significativa melhora nos efeitos de vazios no sódio nos RRBs com duas e quatro zonas, relativo ao LMFBR convencional, é mostrada nas Tabelas 4 e 5. De $\sim 8\%$ para o NI do LMFBR para $\sim 0,3\%$ da zona correspondente do RRB-2z, o que vem satisfazer a um de nossos critérios de projeto pré-estabelecido. As reatividades de vazios no sódio (RVSS) nos NEs de ambos os tipos de reatores não apresentam diferenças significativas. Os efeitos Doppler são baixos, característica do combustível tipo metálico usado. Os valores das reatividades citados acima referem-se ao início do ciclo, com ausência de controle. A presença do material de controle torna as reatividades de vazios no sódio menos positivas para as zonas de espectros mais duros, como pode ser notado nas referidas Tabelas, principalmente no NI do LMFBR. O fato da RVS do NE do LMFBR ser mais positiva com a inserção de controle pode estar mais ligado com a maior presença de ^{10}B nos feixes de controle mais externos, os quais devem exercer influência no componente fuga da RVS. Isto é observado nos reatores LMFBR e RRB-2z. No reator RRB-4z este fenômeno é invertido. Dois motivos parecem contribuir mais significativamente: o primeiro é o espectro intermediário do NI do RRB-4z, relativamente, aos outros dois, juntamente com o efeito de distribuição de potência do NI total por causa das zonas mistas de combustível; o segundo é a menor quantidade de B nos feixes de controle mais externos, o que facilita a fuga de nêutrons do NE para o NI.

4.2 Perda de reatividade

A perda de reatividade para os três reatores é mostrada na Figura 3. Os cálculos foram realizados considerando o mesmo excesso inicial de reatividade para todos os reatores para melhor efeito de comparação. Nota-se que a perda de reatividade, para os reatores regeneradores binários, devido a queima do combustível, é muito mais rápida do que para o LMFBR equivalente carregado apenas com urânio/plutônio. Isto está ligado à presença cumulativa do ^{233}Pa (meia-vida de 27,4 dias) que atrasa a conversão do ^{232}Th para ^{233}U durante os primeiros meses de operação do reator. Da Figura 3, podemos dizer que, para estes reatores binários, os recarregamentos teriam de ser freqüentes e os combustíveis descarregados não atingiriam os índices de queima ideais contrariando os índices econômicos. Nas Tabelas 6 e 7 são apresentados a massa de combustível

$$* 1\% \approx 3,3 \times 10^{-3}$$

Tabela 4: Reatividades de vazios no sódio e de Doppler, início do ciclo com controles inseridos

	LMFBR 10^{-3}	BBR-2 z 10^{-3}	BBR-4 z 10^{-3}	
NI-Esvaziado	+26,98	+0,99	NI1-Esvaziado	+0,56
			NI2-Esvaziado	+5,78
			NI3-Esvaziado	+0,82
NE-Esvaziado	+ 8,57	+7,93	NE-Esvaziado	+3,67
NI-Doppler	- 1,06	-1,16	NI1-Doppler	-0,18
			NI2-Doppler	-0,42
			NI3-Doppler	-0,99
NE-Doppler	- 0,58	-0,59	NE-Doppler	-0,68

Tabela 5: Reatividades de vazios no sódio e de Doppler, início do ciclo com controles retirados

	LMFBR 10^{-3}	BBR-2 z 10^{-3}	BBR-4 z 10^{-3}	
NI-Esvaziado	+28,75	-2,30	NI1-Esvaziado	+0,58
			NI2-Esvaziado	+6,10
			NI3-Esvaziado	+2,12
NE-Esvaziado	+ 6,46	+3,61	NE-Esvaziado	+5,39
NI-Doppler	- 1,63	-1,56	NI1-Doppler	-0,21
			NI2-Doppler	-0,22
			NI3-Doppler	-1,28
NE-Doppler	-0,75	-0,74	NE-Doppler	-0,59

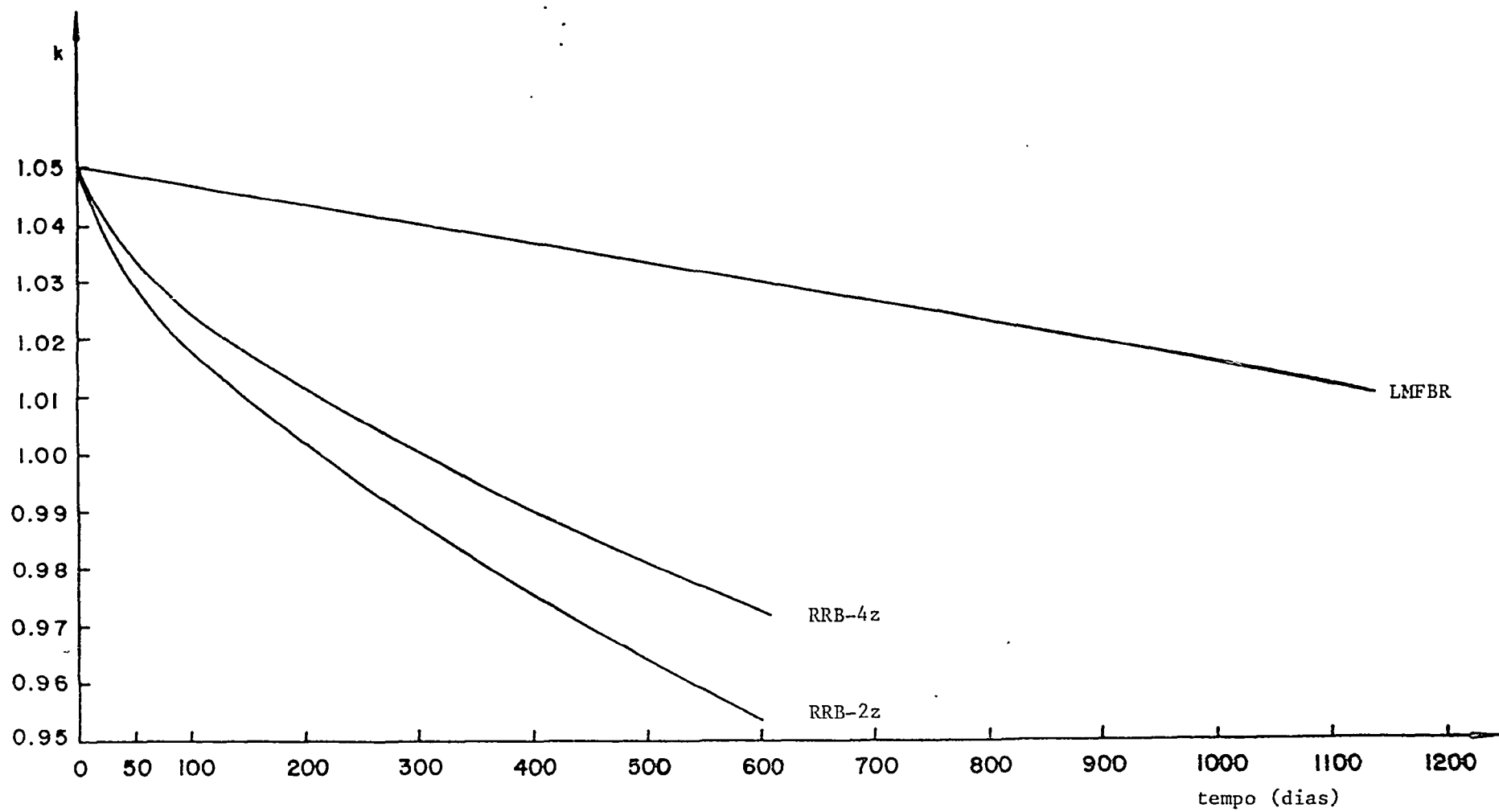


Figura 3: Fator de multiplicação x tempo de queima

Tabela 6: Massa de combustível inicial* (kg)

	LMFBR		BBR-2 z		BBR-4 z	
	U + Th	U + Pu	U + Th	U + Pu	U + Th	U + Pu
NI	—	13682	9661	—	—	—
NE	—	13138	—	13138	—	13138
NI1	—	—	—	—	1159	—
NI2	—	—	—	—	—	3283
NI3	—	—	—	—	6183	—

* ciclo do tório - massa inicial de $^{233}\text{U} + \text{Th}$

ciclo do urânio - massa inicial de $^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu} + ^{241}\text{Pu} + ^{242}\text{Pu}$

Tabela 7: Queima média (MWD/kg)** dos combustíveis por zona

	LMFBR		BBR-2 z		BBR-4 z	
	T = 1100,0 dias		T = 200,0 dias		T = 300,0 dias	
	ciclo do tório	ciclo do urânio	ciclo do tório	ciclo do urânio	ciclo do tório	ciclo do urânio
NI	—	115	27	—	—	—
NE	—	75	—	20	—	28
NI1	—	—	—	—	43	—
NI2	—	—	—	—	—	37
NI3	—	—	—	—	40	—

$$** B \left(\frac{\text{MWD}}{\text{kg}} \right) = \frac{P_{\text{zona}} (\text{MW}) \times \text{tempo (dias)}}{\text{massa combustível inicial (kg)}}$$

inicial e a queima média para as zonas dos reatores. Para o RRB-2z atingir tempos de recarregamentos mais longos e melhor regeneração em ambos os ciclos, o excesso de reatividade inicial deve ser mais alto; para isso, a dimensão do núcleo tem de ser maior e, conseqüentemente, o inventário físsil também deve aumentar.

4.3 Regeneração

Para o ciclo do tório no RRB-2 zonas, a regeneração é perfeitamente observável; porém, para o esquema de gerenciamento de combustível considerado nos envoltórios, a regeneração no ciclo do plutônio não é atingida. Nas Tabelas 8, 9 e 10 são mostradas as razões de conversão e de regeneração para o início e final dos ciclos para os três tipos de reatores. Entretanto, mesmo para o ciclo do plutônio, a regeneração é possível, rearranjando o carregamento dos combustíveis férteis nos envoltórios, de tal forma que haja um balanceamento das regenerações em ambos os ciclos. Nota-se que as regenerações nos RRBs tendem a aumentar durante o ciclo de operação. No RRB-4z, a menos das penalidades nos efeitos de reatividade de vazios no sódio, a regeneração é visível em ambos os ciclos, com melhores opções de gerenciamento nos envoltórios para melhorar a regeneração no ciclo que se desejar.

4.4 Inventário físsil

Para os três modos de carregamentos, a quantidade inicial de material físsil é aproximadamente a mesma conforme pode ser visto na Tabela 11. Para melhorar as características de regeneração e de segurança do reator regenerador binário, a quantidade de material físsil requerida deve ser maior, tendo em vista as características pobres de regeneração no ciclo do tório, uma penalidade que deve ser melhor analisada face às melhores características de segurança e regeneração proporcionadas. Este é o assunto que constará no nosso próximo trabalho.

4.5 Zonas de enriquecimentos

Um maior número de zonas de enriquecimentos favorece significativamente a regeneração em ambos os ciclos. A RVS ainda permanece perto dos 2\$, substancialmente melhor relativamente ao LMFBR convencional. Favorece o aplainamento da distribuição de potência radial, contrariamente aos reatores heterogêneos /3,4/, não é tão sensível à perturbações, ameniza os picos das densidades de potência com relação a média e o valor das barras não é reduzido. A distribuição percentual de potência por zona e por tempo é mostrada nas Tabelas 12, 13 e

Tabela 8: Razões de conversão - início dos ciclos

	LMFBR	RRB-2 z	RRB-4 z	
NI	0,5758	0,6944	NI1	0,1216
			EAI1	0,0453
EAI	0,1834	0,2770	NI3	0,5833
			EAI3	0,2235
ER	0,2628	0,3833	ER	0,5029
			NI2	0,2372
NE	0,3583	0,7447	EAI2	0,0842
			NE	0,5839
EAE	0,1108	0,2460	EAE	0,1946

Tabela 9: Razões de conversão - finais do ciclo

	LMFBR	RRB-2 z	RRB-4 z	
NI	0,4984	0,7140	NI1	0,1235
			EAI1	0,0489
EAI	0,2209	0,2917	NI3	0,5927
			EAI3	0,2395
ER	0,2371	0,4488	ER	0,5655
			NI2	0,2281
NE	0,2719	0,7532	EAI2	0,0861
			NE	0,5833
EAE	0,1096	0,2527	EAE	0,2032

Tabela 10: Razões de regeneração

	INÍCIO DO CICLO		FINAL DO CICLO	
	$^{232}\text{Th} \xrightarrow{233}\text{U}$	$^{238}\text{U} \xrightarrow{239}\text{Pu}$	$^{232}\text{Th} \xrightarrow{238}\text{U}$	$^{238}\text{U} \xrightarrow{239}\text{Pu}$
LMFBR	—	1,4911	—	1,3379
BBR-2 z	1,3547	0,9907	1,4545	1,0059
BBR-4 z	1,4766	1,0999	1,5701	1,1007

Tabela 11: Inventário Físsil (kg)

	INÍCIO	DO	CICLO	TOTAL FÍSSIL	FINAL	DO	CICLO *	TOTAL FÍSSIL
	$^{233}\text{U} + ^{233}\text{Pa}$		$^{239}\text{Pu} + ^{241}\text{Pu}$		$^{233}\text{U} + ^{233}\text{Pa}$		$^{239}\text{Pu} + ^{241}\text{Pu}$	
LMFBR	—		2893	2893	—		4100	4100
BBR-2z	1266		1647	2913	1407		1647	3054
BBR-4z	958		1950	2908	1167		1998	3165

* T (dias) = 1100,0/200,0/300,0 - tempos para os finais de ciclo para os reatores LMFBR/RRB-2 zonas/RRB-4 zonas, respectivamente.

14 para os reatores por propósitos de comparação. A exploração do maior número de zonas pode trazer vantagens não somente com respeito a regeneração, mas também com a segurança. É notado que regeneração e segurança são parâmetros inversamente relacionados. Mas quando se trata de usar o ciclo do tório, a relação inversa destes parâmetros pode ser suavizada com um aumento das dimensões das zonas que contém o ciclo do tório. A particularidade do espectro mais suave do ciclo do tório acaba abrando os espectros das zonas de combustível plutônio/urânio adjacentes, melhorando, desta forma, o componente espectral dos efeitos de vazios no sódio destas zonas. Associado a este fato, o componente fuga pode ser melhorado pela reconsideração de alturas menores. No nosso caso particular, a fração de volume do combustível não é otimizada, mas pode ser melhor analisada conjugando um diâmetro maior da vareta de combustível com uma altura menor para melhorar a segurança inerente. Neste caso, a segurança inerente pode ser beneficiada sem penalizar muito a razão de regeneração, uma vez que para este reator o potencial de regeneração é melhor. O conseqüente aumento do inventário físsil talvez possa ser uma penalidade compensadora se considerarmos as análises, que se seguem, a respeito da queda de reatividade durante o ciclo de operação.

Tabela 12: Distribuição percentual de potência por zona/tempo para LMFBR

ZONAS \ TEMPO (DIAS)	TEMPO (DIAS)		
	0,0	600,0	1100,0
NI	52,03	54,31	52,15
NE	45,56	36,46	32,66
EAI	0,69	4,70	8,32
EAE	0,55	1,75	2,76
ER	1,16	2,79	4,10

Tabela 13: Distribuição percentual de potência por zona/tempo para o RRB-2z

TEMPO (DIAS) \ ZONAS	0,0	100,0	200,0
NI	53,53	49,50	47,75
NE	45,58	48,40	48,48
EAI	0,14	0,69	1,50
EAE	0,56	0,88	1,20
ER	0,19	0,53	1,06

Tabela 14: Distribuição percentual de potência por zona/tempo para o RRB-4z

TEMPO (DIAS) \ ZONAS	0,0	100,0	300,0
NI1	6,73	6,28	6,07
NI2	13,18	13,33	13,66
NI3	34,01	32,03	30,05
NE	45,04	46,16	44,89
EAI	0,02	0,09	0,31
EAI2	0,20	0,38	0,78
EAI3	0,08	0,40	1,39
EAE	0,55	0,84	1,42
ER	0,19	0,49	1,44

5. CONCLUSÃO

As análises comparativas entre o RRB e o LMFBR mostraram que baixas reatividades de vazios no sódio podem ser atingidas, além de uma utilização eficiente do ciclo do tório. A perda de reatividade do RRB é muito rápida, devido a baixa razão de conversão no ciclo do tório por causa da presença cumulativa do Pa. O aumento do inventário físsil, em um RRB de dimensões maiores, deverá ser um compromisso necessário para se atingir tempos de recarregamentos mais longos e melhores características de regeneração nos dois ciclos de combustíveis.

No caso de um RRB-4z vale a pena fazer, futuramente, um confronto entre as vantagens e desvantagens de um reator deste tipo com as dimensões das zonas do ciclo do tório aumentados. Os aumentos das dimensões radiais devem ser associados com alturas menores. O conseqüente aumento do inventário físsil pode deixar de ser uma desvantagem do ponto de vista econômico pela sensível melhora das características de regeneração, segurança, tempo de recarregamento e queimas mais compensadoras.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. J.A. do Nascimento, A.F. Dias e Y. Ishiguro: "Projeto do Reator Regenerador Binário e Segurança Inerente", Nota Técnica, IEAv/NT-024/83.
2. A.F. Dias, J.A. do Nascimento e Y. Ishiguro: "Características de Queima do Reator Regenerador Binário", Nota Técnica IEAv/NT-025/83.
3. W.P. Barthold and J.C. Beitel: "Performance Characteristics of Homogeneous versus Heterogeneous Liquid-Metal Fast Breeder Reactors", Nuclear Technology, 44, p.44, 1979.
4. W.P. Barthold, J.C. Beitel, P.S.K. Lam, Y. Orechwa, S.F. Su and R.B. Turski: "Low Sodium Void Cores", Nuclear Technology, 46, p. 525, 1979.