

BR8510350

NOTA TÉCNICA  
CTA - IEA/NT - 024/83

29.11.83

PROJETO DO REATOR REGENERADOR BINÁRIO E SEGURANÇA INERENTE

por

<sup>dos</sup>  
Jamil A. Nascimento, Artur F. Dias e Yuji Ishiguro

Centro Técnico Aeroespacial  
Instituto de Estudos Avançados  
Rodovia dos Tambores, Km 5,5  
12.200-São José dos Campos - SP  
Brasil

Trabalho apresentado no IV ENFIR/83.

## SUMÁRIO

Um arranjo de núcleo para o reator regenerador binário (RRB) é desenvolvido baseado em resultados de cálculos preliminares de queima. A razão de regeneração aparente, no núcleo interno, carregado com U-233/Th, é baixa devido ao acúmulo de Pa-233 nos primeiros meses de operação. A perda de reatividade durante este tempo é de ~ 3%. O RRB requer mais controle de reatividade do que os LMFBRs carregados com Pu/U, e portanto o arranjo do núcleo desenvolvido tem 19 feixes de barras para controle no núcleo interno.

Três aspectos relacionados às características de segurança inerente do RRB foram estudados: a distribuição radial da reatividade devido a vazios no Sódio, a reatividade devido ao efeito Doppler por zona, e as frações de nêutrons atrasados. Os resultados mostram excelentes características de segurança do RRB.

### ABSTRACT

A core layout for the binary breeder reactor (BBR) is developed based on the results of preliminary burnup calculations. In the  $U^{233}/Th$  fueled inner core, the apparent breeding ratio is low due to the accumulation of Pa-233 in the first few months of operation. The loss of reactivity during this time is  $\sim 3\%$ . The BBR requires more reactivity control than Pu/U-fueled LMFBRs and the core layout developed has 19 control rod assemblies in the inner core.

Three aspects related to the inherent safety of the BBR have been studied: radial distribution of the sodium-void reactivity, zone-wise Doppler reactivity, and the delayed neutron fractions. Results show excellent safety characteristics of the BBR.

## 1. INTRODUÇÃO

As meias-vidas dos nuclídeos intermediários, nas cadeias de conversão de fértil para físsil, dos ciclos do Urânio e Tório diferem entre si por um fator superior a dez: 27,0 dias para o Pa-233 comparado aos 2,36 dias para o Np-239. Em um núcleo carregado com U-233/Th a razão de regeneração aparente é baixa, e a perda de reatividade é rápida durante uns meses até que o Pa-233 chegue a um equilíbrio. Cálculos preliminares de queima de um LMFBR, de 1000 MWe, carregado com os dois ciclos, mostraram que a perda de reatividade nos primeiros três meses é mais do que 3%. Comparado a um LMFBR carregado com Pu/U, um reator carregado com os dois ciclos requer mais controle de reatividade.

Levando em consideração os resultados acima, foi desenvolvido um esquema para o reator regenerador binário (RRB) de dimensões comerciais. O modelo contém 19 feixes de barras para controle (FBC) no núcleo interno e 12 FBCs no núcleo externo. O modelo é usado nos cálculos de queima apresentados na Referência 2.

As características de segurança inerente de um LMFBR são influenciadas por vários fatores, tais como: a fração de nêutrons atrasados, o efeito Doppler, expansão e encurvamento das varetas e feixes de combustível e a densidade do Sódio. Três aspectos foram analisados neste estudo. A reatividade devido a um esvaziamento de Sódio, na parte central de um núcleo carregado com Pu/U de porte comercial, é positiva, sendo isto uma fonte de preocupação relacionada à segurança dos atuais LMFBRs. Para evitar, ou pelo menos reduzir esta reatividade positiva, foram investigadas algumas modificações a partir de um núcleo homogêneo simples, tais como: núcleos heterogêneos, panqueca e modulares. A reatividade devido a vazios no Sódio pode ser reduzida até certo ponto, entretanto, todos estes núcleos modificados tem suas próprias desvantagens, tais como: aumento de inventário e complicações operacionais. Um mérito do RRB está no fato da reatividade devido a vazios no Sódio ser negativa em quase todo o núcleo homogêneo. Neste estudo foi analisado a distribuição radial da reatividade. A reatividade devido ao efeito Doppler é calculada separadamente, nos núcleos interno e externo, para as condições - com Sódio e sem Sódio. A fração efetiva de nêutrons atrasados é ligeiramente menor no núcleo interno, relativamente ao núcleo externo, podendo o efeito desta diferença ser considerado pequeno.

## 2. O ARRANJO DO RRB

As exigências de controle da reatividade de um reator consiste de vários componentes: margem de segurança a frio, variação da criticalidade de frio para quente, criticalidade quente para potência, queima, margem de controle e compensação de transiente. Em um LMFBR carregado com Pu/U, comparado aos reatores térmicos, a razão de conversão interna é alta, o efeito dos produtos de fissão é pequeno e a

mudança total da reatividade é pequena. Em um modelo publicado de um LMFBR carregado com Pu/U (modelo LC), o número total de FBCs é 19, [ Ref.1 ]. Num LMFBR carregado com os dois ciclos, a longa meia vida do Pa-233 causa um transiente de reatividade depois de uma partida, de uma parada, ou de uma mudança no nível de potência. A reatividade devida ao transiente é de ~ 3% em um RRB de dimensões comerciais com 50% do núcleo carregado com U-233/Th. Se o valor de um FBC for limitado a um dollar, o controle desta reatividade requereria de 8 a 10 FBCs. Esta consideração está refletida na disposição mostrada na Fig.1, a qual tem 19 FBCs no núcleo interno, 12 a mais do que o modelo LC. A disposição mostrada é uma escolha preliminar e deve haver modificações para otimizações no futuro; mas ela é usada como modelo base para nossas análises de queima reportadas na Ref.2. As estruturas dos feixes são discutidas na próxima seção.

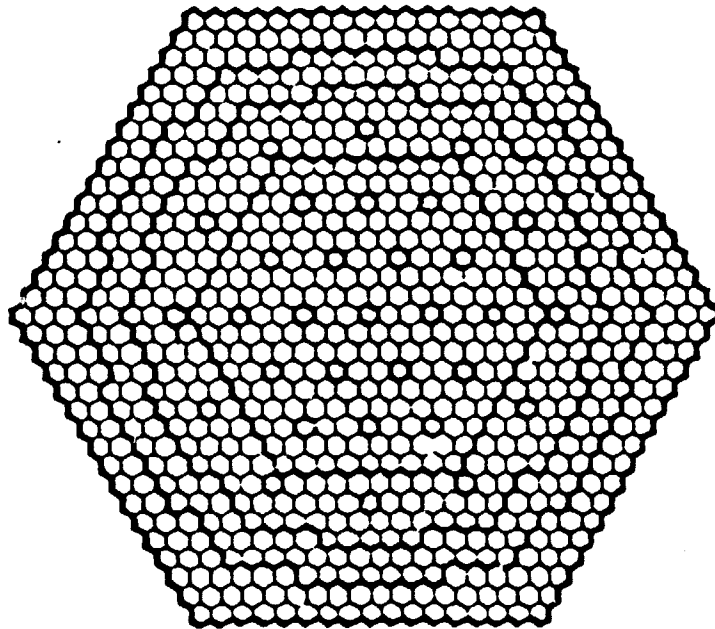


Fig. 1 - O arranjo dos feixes no RRB.

### 3. OS FEIXES DO MODELO LC

Na Ref. 1 é definido um modelo de um LMFBR, de dimensões comerciais, e são dadas as concentrações homogeneizadas em cada tipo de feixe, como apresentado na Tabela 1. Estes feixes são usados em nossas análises comentadas aqui e na Ref. 2. O passo do feixe é de 13,89 cm. As frações de volume e detalhes de projeto, tais como o diâmetro da vareta, não são especificados, porém alguns parâmetros estimados são mostrados na Tabela 2. Para definir totalmente um reator tridimensional para cálculos de queima em geometria RZ, foram especificados, como se segue, os envoltórios e blindagens axiais e extensões dos feixes de controle. Para os feixes de combustível: as estruturas horizontais foram mantidas, a densidade distribuída

TABELA 1. Densidades atômicas por feixe (Átomos/b-cm)

ISÓTOPO	COMBUSTÍVEL		ENVOLTÓRIO RADIAL	BLINDAGEM RADIAL	BARRAS DE CONTROLE INSERIDAS	BARRAS DE CONTROLE RETIRADAS
	ZONA 1	ZONA 2				
Pu-239	7,6 (-4)*	10,1 (-4)				
Pu-240	2,9 (-4)	4,1 (-4)				
Pu-241	1,4 (-4)	1,9 (-4)				
Pu-242	8,0 (-4)	1,12(-4)				
U -238	7,69(-3)	7,23(-3)	1,401(-2)			
U -235	1,9 (-5)	1,8 (-5)	4,2 (-5)			
Cr	2,98(-3)	2,98(-3)	1,73 (-3)	1,516(-2)	2,98 (-3)	2,98 (-3)
Fe	6,26(-3)	6,26(-3)	4,04 (-3)	3,537(-2)	6,26 (-3)	6,26 (-3)
Ni	5,26(-3)	5,26(-3)	3,84 (-3)	3,368(-2)	5,26 (-3)	5,26 (-3)
No	2,6 (-4)	2,6 (-4)	1,9 (-4)	1,47 (-3)	2,6 (-4)	2,6 (-4)
Na	8,08(-3)	8,08(-3)	6,07 (-3)		1,453 (-2)	1,832(-2)
B-10					7,64 (-3)	
B-11					1,147 (-2)	
C					4,78 (-3)	
PF	2,4 (-4)	2,4 (-4)				
O	1,804(-2)	1,804(-2)	2,802(-2)			

\* Leia-se  $7,6 \times 10^{-4}$

do envoltório de combustível axial é 90%, que corresponde ao valor estimado no envoltório radial, e na blindagem axial as varetas de combustível são preenchidas com material estrutural. A extensão axial dos FBCs tem a mesma composição que o FBC do tipo-barras retiradas.

TABELA 2-a Frações de volume estimadas (%).

	NÚCLEO	ENVOLTÓRIO RADIAL	BLINDAGEM RADIAL	ENVOLTÓRIO AXIAL	BLINDAGEM AXIAL
Combustível	48	63	-	48	-
Estrutura	18	12	100	18	66
Sódio	34	25	-	34	34

TABELA 2-b Estrutura estimada do feixe de combustível.

Número de varetas por feixe	271
Potência linear média (W/cm)	308
Espessura da parede do duto (mm)	5,0
Diâmetro da vareta (mm)	6,18
Espessura do encamisamento (mm)	0,26
Razão passo/diâmetro	1,19

#### 4. ANÁLISES DOS PARÂMETROS DE SEGURANÇA

As análises das características de segurança inerente do RRB, apresentadas nas seções seguintes, foram feitas para o modelo LC. O núcleo é dividido em seis subzonas, como mostra a Fig.2. Seis dos 12 feixes de barras para controle externos são inseridos enquanto que os 13 feixes restantes estão totalmente retirados. As análises foram feitas por meio do CITATION, em geometria triangular bidimensional, com uma curvatura axial de  $6,44 \text{ m}^{-2}$ , correspondendo a uma altura do núcleo de 90 cm. As reatividades são calculadas como a diferença entre os fatores de multiplicação do reator base e perturbado. O efeito da perturbação na curvatura axial não é levado em consideração, porém supõe-se que este efeito torne a reatividade devido a vazios no Sódio mais negativa. As seções de choque, para uma zona perturbada, foram calculadas separadamente das do núcleo de referência.

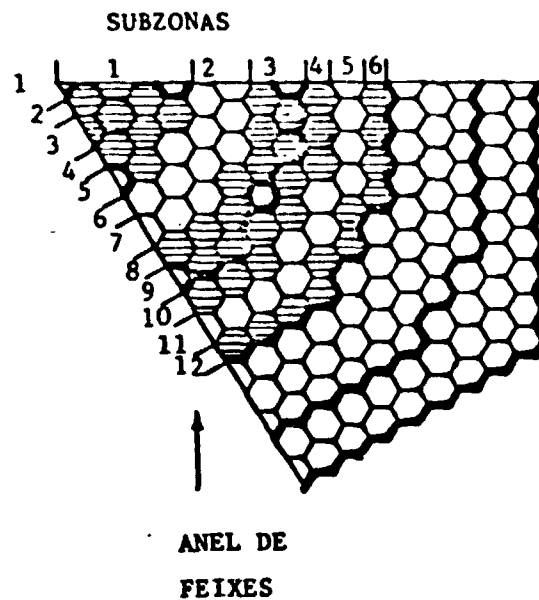


Fig. 2 - Subdivisões do modelo LC.

#### 4.1 REATIVIDADE DEVIDO A VAZIOS NO SÓDIO

O objetivo deste estudo é encontrar a variação radial da reatividade devido a um esvaziamento local de Sódio, ao invés do valor da reatividade devido a um esvaziamento total ou parcial do núcleo e, conseqüentemente, a reatividade é calculada com uma das seis subzonas esvaziada totalmente por vez. Dois casos de carregamentos são considerados. Em um caso as subzonas de 1 a 3 são carregadas com U-233/Th enquanto que as subzonas externas, 4 a 6, são carregadas com Pu/U. Neste caso os núcleos interno e externo possuem o mesmo número de feixes de combustível. No outro caso somente as subzonas 1 e 2 são carregadas com U-233/Th e o núcleo externo carregado com Pu/U é aumentado. Algumas características para os dois estados não perturbados são mostrados na Tabela 3. A Figura 3 mostra a reatividade, por feixe esvaziado em cada subzona, para os dois casos de carregamentos, juntamente com resultados similares de um núcleo inteiramente carregado com Pu/U. A superioridade de um núcleo carregado com os dois ciclos relativamente à reatividade devido a vazios no Sódio é claramente notada. A reatividade é negativa em todo o núcleo, mesmo quando o núcleo externo possui uma espessura equivalente a quatro anéis. Em comparação, a reatividade é negativa somente nos dois anéis mais externos e altamente positiva na parte central de um núcleo carregado com Pu/U.



TABELA 3. Casos referência para os cálculos da reatividade devido a vazios no Sódio.

SUBZONAS CARREGADAS COM U-233/Th	1 - 3	1 - 2
Enriquecimento - núcleo interno (Z)	12,45	12,45
- núcleo externo (Z)	13,15	13,15
k	0,999	1,038
Razão entre os picos de potência	1,000	1,327
Fração de volume do núcleo interno (Z)	50,0	31,7
Taxa de potência do núcleo interno (Z)	54,0	32,8

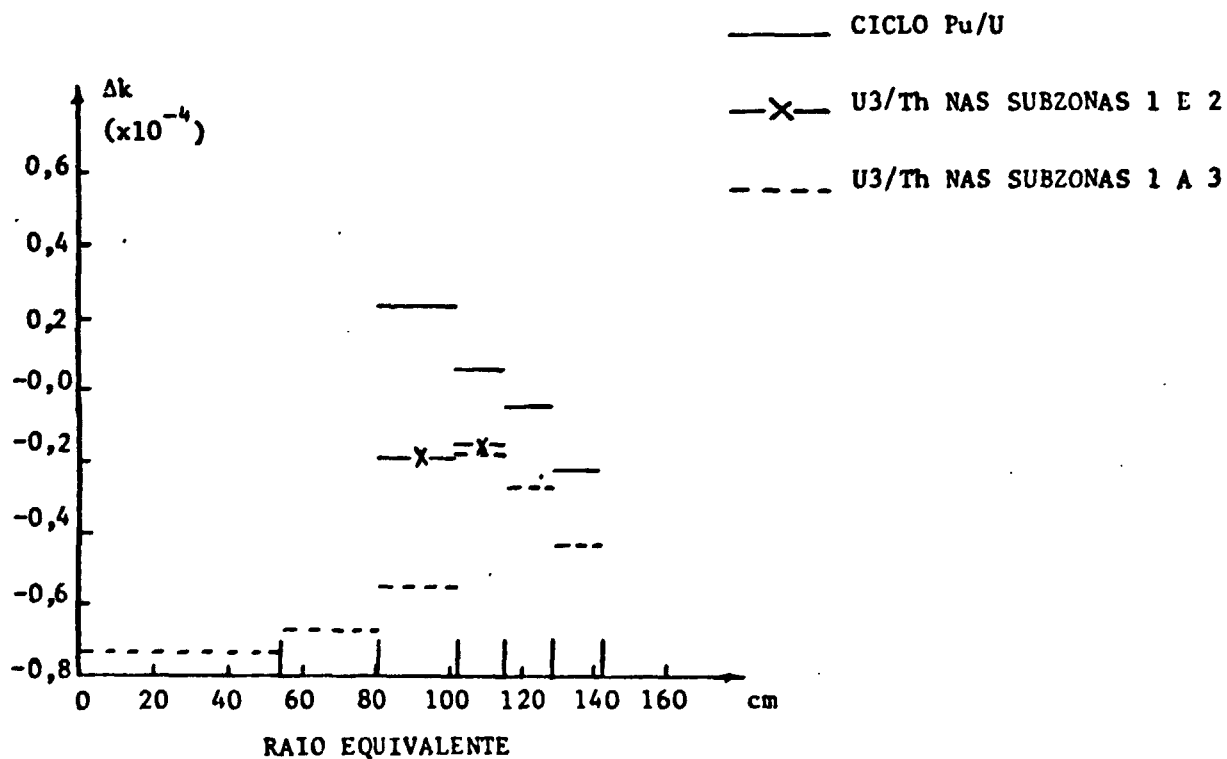


Fig. 3 - Reatividade devido a vazios no Sódio, por feixe de combustível, nas subzonas.

#### 4.2. REATIVIDADE DEVIDO AO EFEITO DOPPLER

A reatividade devido ao efeito Doppler é calculada para uma mudança de temperatura de 900 → 2100°K em cada um dos núcleos, interno e externo, para as condições - com Sódio e sem Sódio. As subzonas de 1 a 3 são carregadas com U-233/Th. Os resultados são mostrados na Tabela 4.

TABELA 4. Reatividade devido ao efeito Doppler.

NÚCLEO INTERNO		NÚCLEO EXTERNO		Δk (10 <sup>-3</sup> )
Na	T(°K)	Na	T(°K)	
com	900	com	2100	-1,45
com	2100	com	900	-4,99
com	900	sem	2100	-6,29
sem	2100	com	900	-14,51

Não foi feita uma comparação consistente dos LMFBRs carregados com Pu/U e com os dois ciclos mas a reatividade devido ao efeito Doppler parece ser da mesma magnitude para a condição - com Sódio. Uma grande diferença aparece no núcleo esvaziado. Enquanto que em um LMFBR carregado com Pu/U a reatividade combinada pode ser positiva no núcleo interno, ela é altamente negativa em ambas regiões de um núcleo carregado com os dois ciclos.

#### 4.3. FRAÇÕES DE NÊUTRONS ATRASADOS

São resumidos os dados das frações efetivas de nêutrons atrasados e taxas de fissões relativas calculadas pelo CITATION.

A Tabela 5 mostra as frações totais de nêutrons atrasados (FNA) para os isótopos combustíveis: estas são dados de entrada para o CITATION.

As taxas de fissões relativas, entre os isótopos combustíveis nos núcleos internos e externos, são mostrados na Tabela 6 e as frações efetivas de nêutrons atrasados ( $\bar{\beta}$ ) na Tabela 7.

As FNAs para o U-233 e Th-232 são maiores do que aquelas dos Pu-239 e U-238, respectivamente, mas o  $\bar{\beta}$  no núcleo interno é menor do que no núcleo externo. Isto é causado pelas maiores taxas de fissão do U-238 e Pu-241 no núcleo externo relativamente ao Th-232 no núcleo interno.

O RRB possui uma ligeira desvantagem a este respeito mas acreditamos que

isto não tenha qualquer efeito sério na segurança do reator.

TABELA 5. Fração total de nêutrons atrasados (FNA) para os isótopos combustíveis ( $10^{-3}$ ).

ISÓTOPO	(FNA)	ISÓTOPO	(FNA)
U-233	2,770	Pu-239	2,136
Th-232	22,494	Pu-240	2,914
U-235	6,671	Pu-241	5,198
U-238	15,524	Pu-242	5,328

TABELA 6. Taxas de fissões relativa (TFR) nos núcleos interno e externo (%).

NÚCLEO INTERNO		NÚCLEO EXTERNO	
ISÓTOPO	TFR	ISÓTOPO	TFR
U-233	97,04	Pu-239	60,74
Th-232	2,96	Pu-240	6,28
		Pu-241	18,14
		Pu-242	1,24
		U-235	1,10
		U-238	12,50

TABELA 7. Fração efetiva de nêutrons atrasados ( $\bar{\beta}$ ) ( $10^{-3}$ ).

REGIÃO	$\bar{\beta}$
Núcleo interno	3,278
Núcleo externo	4,630
Núcleo completo	3,789
Reator total	3,817

## 5. CONCLUSÃO

Um LMFBR carregado com os dois ciclos requer mais controle de reatividade do que um carregado com Pu/U, devido a maior meia vida do nuclídeo intermediário. Uma disposição de núcleo que incorpora este requisito foi desenvolvida para uso nas análises de queima.

As características de segurança inerente do reator regenerador binário mostraram ser superiores às características dos atuais LMFBRs.

## BIBLIOGRAFIA

- 1 - KUJAWSKI, E.; BAILEY, H.S., Benchmark Analysis of Liquid-Metal Fast Breeder Reactor Nuclear Design Methods, Nucl. Sci. Eng, 64 ; 90-94 (1977).
- 2 - DIAS, A.F.; NASCIMENTO, J.A.; ISHIGURO, Y. Características de Queima de Reactores Regeneradores Binários - Trabalho a ser apresentado no IV ENFIR - Itaipava, Rio de Janeiro - 1983.