

BR8510351

NOTA TÉCNICA
CTA- IEAv/ NT- 025/83

05.12.83

CARACTERÍSTICAS DE QUEIMA DE REATORES REGENERADORES BINÁRIOS

por

Artur F. Dias, Jamil A. Nascimento ^{do} e Yuji Ishiguro

IEAv/CTA

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

Trabalho apresentado no IV ENFIR/83.

CARACTERÍSTICAS DE QUEIMA DE REATORES REGENERADORES BINÁRIOS

por

ARTUR F. DIAS, JAMIL A. NASCIMENTO E YUJI ISHIGURO.

IEAv/CTA

SUMÁRIO

Foram feitos cálculos de queima de um reator regenerador binário para dois casos de carregamentos. Em um caso, o núcleo interno, carregado com U-233/Th, e o núcleo externo, carregado com Pu/U, contem o mesmo número de feixes de combustível. No outro caso, os dois anéis mais externos, do núcleo interno, são carregados com Pu/U. O segundo caso é considerado para uma fase inicial da introdução do ciclo do Tório, quando, possivelmente, o fornecimento de U-233 possa ser limitado. Os resultados mostram uma regeneração eficiente no ciclo do Tório em ambos os casos.

ABSTRACT

Burnup calculations of a binary breeder reactor have been done for two cases of fueling. In one case the U^{233}/Th fueled inner core and the Pu/U-fueled outer core have the same number of fuel assemblies. In the other case two outermost rings in the inner core are Pu/U-fueled. The second case is considered for an initial phase of thorium cycle introduction when the supply of U^{233} could be limited. Results show an efficient breeding on the thorium cycle in both cases.

I - INTRODUÇÃO

Um dos méritos do reator regenerador binário (RRB), relativamente aos atuais LMFBRs, é o melhoramento das características de segurança inerentes, conforme apresentado na Ref. 1. Neste trabalho, mais um mérito, uma regeneração eficiente no ciclo do Tório é apresentado através dos cálculos de queima do modelo de RRB descrito na Ref. 1. Dois casos de carregamentos são considerados. Num caso, o núcleo interno carregado com U-233/Th e o núcleo externo carregado com Pu/U, contêm o mesmo número de feixes de combustível. No segundo caso a zona carregada com U-233/Th é reduzida e os dois anéis mais externos, do núcleo interno, são carregados com Pu/U. O primeiro caso é considerado como um modo padrão de carregamento para o RRB, enquanto que, o segundo caso é considerado para uma fase inicial da introdução do ciclo do Tório quando, possivelmente, o fornecimento de U-233 possa ser limitado e uma produção rápida for desejada. A medida que se aumenta a espessura da zona externa, carregada com Pu/U, a reatividade devido a vazios no Sódio tende a aumentar nos anéis internos da zona externa, como apresentada na Ref. 1. Conseqüentemente, no segundo caso de carregamento considerado aqui, os vazios no Sódio em alguns feixes podem introduzir reatividades positivas. Este ponto ainda não foi examinado minuciosamente mas os resultados da Ref. 1 indicam que, mesmo para este caso, a reatividade poderia ser negativa em toda parte, e que, combinado com o efeito Doppler a segurança do reator não é comprometida significativamente.

II - CÁLCULOS

Os cálculos foram feitos pelo código CITATION, em geometria RZ, usando seções de choque microscópicas, para cada região, condensadas para seis grupos de energia, a partir da biblioteca JFS-II a 70 grupos.

Esquema para controle: A perda de reatividade nos primeiros meses, devido ao acúmulo de Pa-233, é estimada em ~ 3% e ~ 1,5% para os dois casos de carregamentos considerados. Nosso esquema básico para o controle das variações de reatividade é o seguinte. Os enriquecimentos iniciais são selecionados de tal forma que os excessos iniciais de reatividade estejam em torno de 8% e 5% para os primeiro e segundo casos, respectivamente, e que, quando um equilíbrio de Pa for atingido, cerca de três meses após a partida, os picos das densidades de potência nas duas zonas sejam aproximadamente iguais. Algumas barras de controle, no núcleo interno, são usadas para compensar o acúmulo de Pa e, após cerca de três meses, todas as barras para controle no núcleo interno são totalmente retiradas. Depois disso, as reatividades devido a queima serão compensadas pelas barras de controle localizadas na interface dos núcleos interno e externo. Algumas das

barras de controle são mantidas fora do núcleo durante a operação e deverão ser usadas para a partida e parada do reator.

A seleção das posições das barras de controle e a sequência operacional deverão ser otimizadas no futuro. Os esquemas usados nos cálculos apresentados aqui são descritos a seguir. No primeiro caso de carregamento, os 12 feixes de barras de controle (FBCs) dos 10º e 11º anéis (A10 e A11) devem ser usados para o controle de queima, e as barras de controle central (A1) e as do 7º anel (A7) devem ser usadas para compensar o efeito do Pa, e os FBCs do 4º anel (A4) deverão estar totalmente retirados. A concentração de B_4C nos feixes de BCs é a mesma das do modelo LC apresentado na Ref. 1. Os enriquecimentos de Boro (B-10/B), nos 25 FBCs inseridos, são ajustados para a criticalidade no início da queima. No segundo caso de carregamento, os FBCs do 7º anel e o FBC do primeiro anel, são usados conjuntamente para compensar os efeitos da queima e do acúmulo de Pa. Todos os demais FBCs permanecem retirados. A concentração de B_4C , nos FBCs especificados, é ajustada para a criticalidade no início de cada passo de queima.

As características e condições iniciais do núcleo estão resumidas na Tabela I.

Cadeia de nuclídeos: As cadeias de nuclídeos consideradas neste trabalho são mostradas na Fig. 1. O Pa-233 e um produto de fissão equivalente são incluídos mas o Np-239 e alguns isótopos, como por exemplo o U-234, e o decaimento do Pu-241 são omitidos.

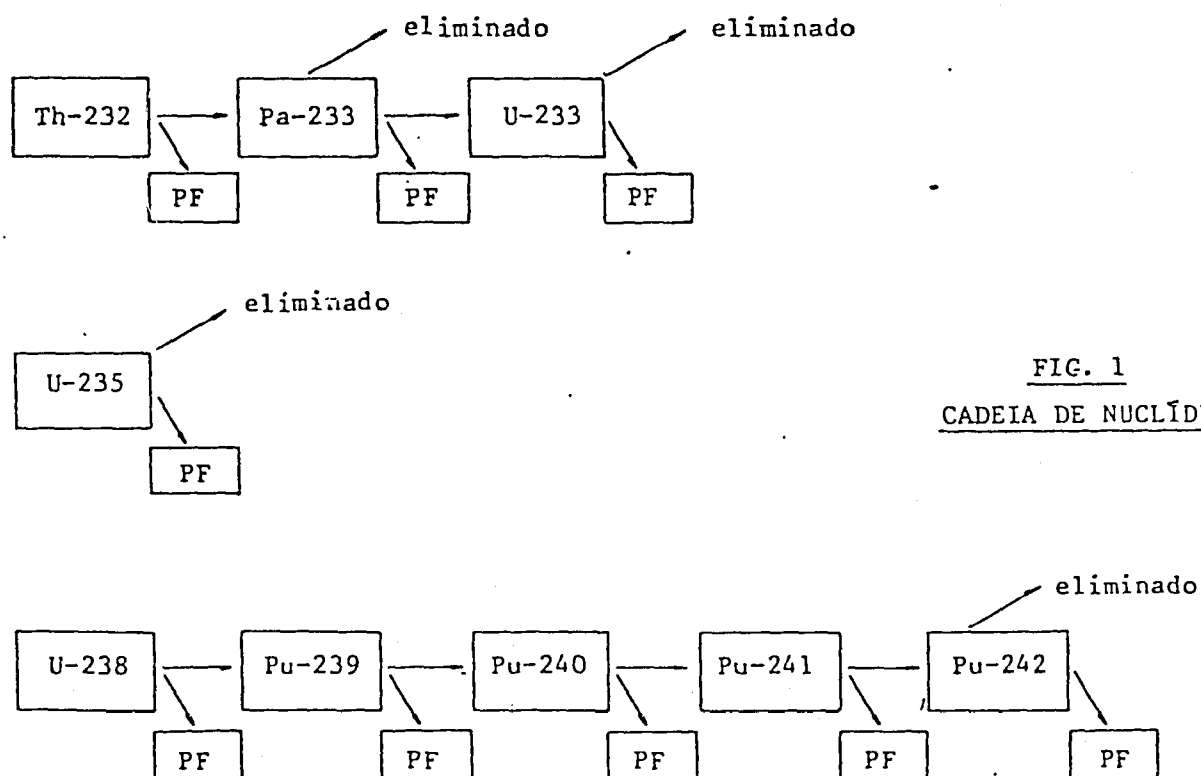


FIG. 1
CADEIA DE NUCLÍDEOS

TABELA 1
CONDIÇÕES DO REATOR

MODO DE CARREGAMENTO	CASO 1	CASO 2
Feixes de combustível no núcleo interno	198	108
Feixes de combustível no núcleo externo	198	288
Raio do núcleo interno cm	107,6	78,2
Raio do núcleo externo cm	150,7	150,7
Altura do núcleo cm	100,0	100,0
Extensão do envoltório axial cm	2 x 40,0	2 x 40,0
Espessura do envoltório radial cm	26,293	26,293
Volume do núcleo interno (a) m ³	3,63	1,92
Volume do núcleo externo (a) m ³	3,50	5,21
Esquema de controle		
Segurança	A4	A4,A10,A11
Compensação do Pa	A1,A7	} A1,A7
Queima	A10,A11	
B-10/B nas barras de controle (BCs)		
BC para compensação de Pa %	27,98	} 27,93
BC-Queima %	18,78	
Enriquecimento inicial do combustível		
Núcleo interno U-233/(U-233+Th)	0,1253	0,12025
Núcleo externo Pu/(Pu+U)	0,1484	0,1232
k inicial, com todas BCs retiradas	1,0773	1,0510
Inventário inicial do combustível		
Núcleo interno ton	11,42	6,23
Núcleo externo ton	11,75	17,08

(a) inclui os feixes de barras de controle.

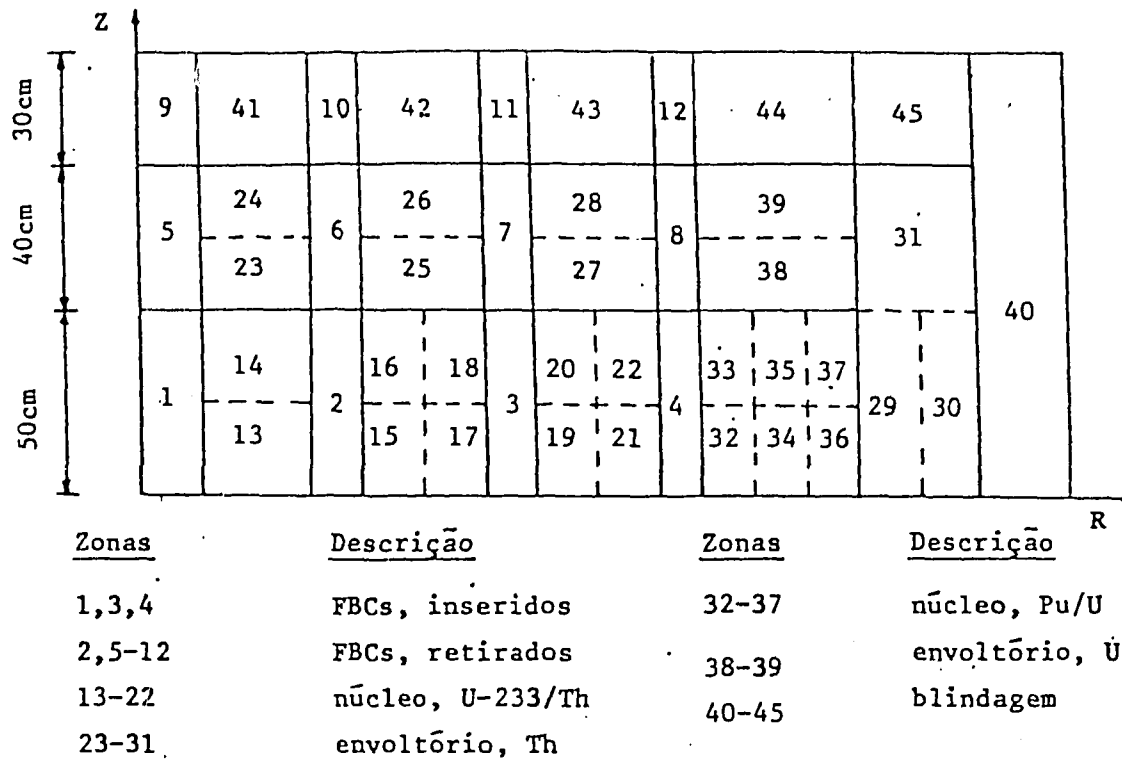


FIG. 2a - DIVISÃO DO REATOR EM ZONAS PARA HOMOGENEIZAÇÃO, CASO 1

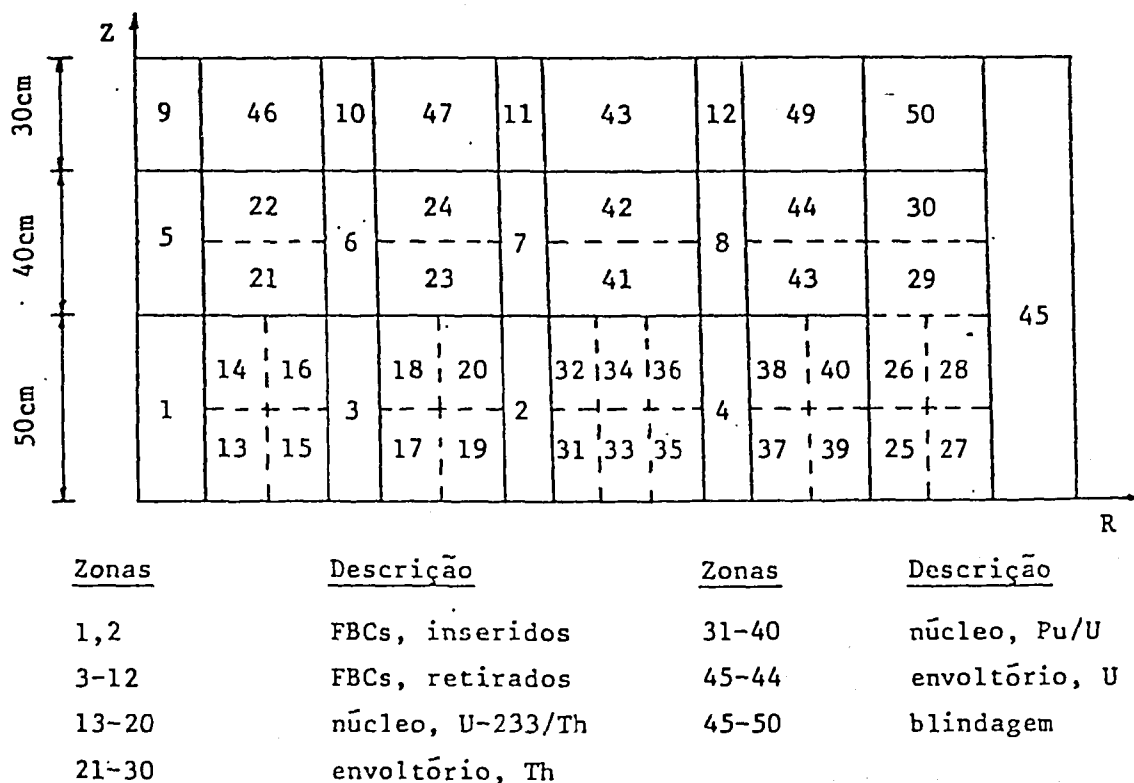


FIG. 2b - DIVISÃO DO REATOR EM ZONAS PARA HOMOGENEIZAÇÃO, CASO 2

Zonas para homogeneização: Devido a variação das densidades de potência, as com posições dos materiais no reator tornam-se especial mente dependentes depois de uma queima. Entretanto, os cálculos são feitos para zonas homogeneizadas com concentrações médias, e a definição destas zonas afetam os resultados. A seleção destas zonas, para os dois casos, é mostrada nas Figs. 2a,b.

Passo de tempo: Os cálculos do fluxo e autovalor são feitos em tempos especifica dos, e as composições dos materiais são calculadas considerando os fluxos constantes durante um passo de tempo. Nossa escolha é mostrada nas Figs. 3b e 4b.

III - RESULTADOS

Os principais resultados estão resumidos nas Tabelas II a IV e Figs. 3 a 4. Vários pontos são discutidos abaixo. Note que os passos de tempo e pontos de malha são mostrados nas Figs. 3b,c e 4b,c.

Vida do núcleo: A vida do núcleo é de ~ 320 dias e de ~ 255 dias para os casos 1 e 2, respectivamente. A queima média de combustível é de ~ 36 MWD/kg para 274 dias de operação a plena potência (75% de um ano). Conseqüentemen te, cada feixe de combustível deve permanecer no núcleo pelo menos dois anos. Re carregamentos parciais, redistribuição do combustível, enriquecimentos mais altos bem como posições e seqüência de retirada/inserção das barras de controle, deve rão ser estudadas para obter-se queima e tempo de residência aceitáveis.

Autovalor: Os valores de k apresentados nas Tabelas II são valores aproximados calculados da seguinte maneira: para o estado inicial, o autovalor k , foi calculado sem absorvedores para controle, conforme apresentado na Tabela I, para os outros tempos o excesso de reatividade ($k-1$) foi considerado proporcional à massa de B-10 no núcleo, conforme mostrado nas Figs. 3b e 4b.

Pa-233: As concentrações de equilíbrio são atingidas em ~ 100 dias, mas algumas variações continuam durante a vida do núcleo devido a variação nas dis tribuições de potência, causadas pelo movimento das barras de controle e devido a queima. A massa do Pa-233 é de ~ 56 kg, ~ 18 kg e de ~ 26 kg, no núcleo, envol tórios axial e radial, respectivamente, para o caso 1, e de ~ 35 kg, ~ 11 kg e de ~ 21 kg, para o caso 2. Uma vez que o reator estiver parado, estas quantidades de U-233 aparecerão nas respectivas zonas e aumentarão a reatividade. Essa reati vidade não foi calculada, mas parece se situar entre 1,5 a 2%.

U-233: A perda cumulativa de U-233 no núcleo interno é apresentada nas Figs. 3a

e 4a. A taxa de perda é alta inicialmente devido ao acúmulo de Pa-233. Depois de um equilíbrio ser atingido, a taxa de perda do U-233 é em torno de 0,3 kg e 0,18 kg por dia no núcleo interno para os casos 1 e 2, respectivamente. Para o caso 1, a produção de U-233 nos envoltórios é de 120 kg e 182 kg nos envoltórios axial e radial, respectivamente, durante os 323 dias de operação. Combinado com Pa-233, a produção líquida de U-233 é de 237 kg. Para uma operação de 274 dias por ano a produção líquida é de 191 kg por ano e o inventário inicial pode ser dobrado em torno de 7,5 anos. Para o caso 2, a produção líquida durante 274 dias é de ~ 175 kg e o tempo de dobramento do inventário inicial do núcleo é de ~ 4,3 anos.

Plutônio: Para o caso 1, a perda de Plutônio físsil no núcleo externo é de 128 kg durante 323 dias de operação, e a produção no envoltório axial externo é de 100 kg. Conseqüentemente, neste caso, o reator é um consumidor de Plutônio. A perda líquida é pequena e pode ser facilmente suprida por um reator térmico ou, o reator pode ser tornado autosustentável com uma ligeira modificação nos combustíveis do envoltório. Para o caso 2, um excesso de ~ 88 kg de Plutônio é produzido durante um ano de 274 dias. Esta quantidade parece ser suficiente para cobrir perdas por reprocessamento e o reator pode ser autosustentável com relação ao Plutônio. A composição do Plutônio é apresentada na Tabela IV em função do tempo de queima. A composição inicial no núcleo é a do Plutônio de LWR de ~ 30 MWD/kg de queima. Deve-se notar que o Plutônio produzido no envoltório é bastante limpo.

Distribuição de potência: As distribuições radiais das densidades de potência próximas ao plano central do núcleo são apresentadas nas Figs. 3c e 4c e as taxas de produção de potência no núcleo interno, núcleo externo e envoltórios, na Tabela II. A potência oscila em torno de 30% numa parte central do núcleo interno e atinge 50% próximo a uma zona de controle, no caso 1. As variações das potências nas regiões também são grandes, 45% a 54% no núcleo externo e de 45% a 52% no núcleo interno. O uso de enriquecimentos dependentes da posição, esquemas de recarregamentos, e posições e seqüência operacional das barras de controle devem ser estudadas para reduzir as oscilações de potência.

Razões de regeneração: As razões de regeneração no núcleo, e total, são apresentadas na Tabela III para os dois ciclos de combustível, separadamente. A razão de regeneração do Th + U-233 é a razão entre as capturas pelo Th, na região, e as absorções do U-233 mais Pa-233, no núcleo interno, e a razão de regeneração do U + Pu é a razão entre as capturas pelo U-238 mais Pu-240, na região, e as absorções no Pu-239, Pu-241 e mais o U-235, no núcleo externo.

TABELA II-a - O VALOR DE K, MASSAS DE COMBUSTÍVEL E DISTRIBUIÇÕES DE POTÊNCIA PARA O CASO 1.

Tempo de queima (dias)		0	30,0	60,0	117,27	147,27	177,27	237,27	297,27	323,13
k sem absorvedores para controle		1,0773	1,0559	1,0443	1,0323	1,0257	1,0188	1,0121	1,0052	1,0025
Massa de combustível (kg)										
U-233	NI *	1436,6	1399,40	1374,3	1342,3	1327,4	1315,8	1295,6	1277,3	1269,7
	EAI	0	3,57	11,74	33,02	45,49	58,41	84,29	109,67	120,43
	ER	0	6,71	21,28	55,73	74,42	92,89	129,74	166,41	182,16
Pa-233	NI	0	26,19	40,28	51,62	55,48	56,64	56,84	56,16	55,81
	EAI	0	8,27	12,68	16,29	17,58	18,08	18,41	18,54	18,63
	ER	0	15,56	21,93	25,38	25,12	25,35	25,81	26,29	26,52
Pu	NE	2428,3	2413,9	2400,5	2376,6	2365,2	2353,7	2331,30	2309,4	2300,3
	EAE	0	9,81	19,28	36,84	45,66	54,72	73,07	91,83	100,06
Variação da massa (kg/dia), média no passo de tempo										
U-233	NI		1,240	0,837	0,559	0,497	0,387	0,337	0,305	0,294
Pu	NE		0,480	0,447	0,418	0,380	0,383	0,373	0,365	0,352
Ganho de massa (kg), reator total										
U-233 mais Pa-233			23,20	45,61	87,74	108,89	130,57	174,09	217,77	236,65
Pu			-4,59	-8,52	-14,86	-17,44	-19,88	-23,93	-27,07	-27,94
Distribuição de Potência (%)										
	NI	45,3	44,8	47,5	49,0	51,9	50,6	49,6	48,4	47,8
	NE	53,7	54,0	51,0	48,7	45,4	46,2	46,3	46,5	46,7
	Envoltórios	1,0	1,2	1,5	2,3	2,7	3,2	4,1	5,1	5,5

*NI=Núcleo interno; EAI=envoltório axial interno; ER=envoltório radial; NE=núcleo externo; EAE=envoltório axial externo.

TABELA II-b - O VALOR DE k, MASSAS DE COMBUSTÍVEL E DISTRIBUIÇÕES DE POTÊNCIA PARA O CASO 2

Tempo de Queima (dias)	0	30	60	120	180	240	255,73
k sem absorvedores para controle	1,0510	1,0363	1,0274	1,0159	1,0077	1,0013	0,9999
Massa de combustível (kg)							
U-233	NI*	752,04	728,08	714,08	699,28	687,89	674,67
	EAI	0	2,41	7,73	21,49	36,51	55,91
	ER	0	5,16	16,65	46,42	78,14	117,41
Pa-233	NI	0	18,14	26,28	31,86	33,71	35,13
	EAI	0	5,58	8,12	9,93	10,67	11,40
	ER	0	11,95	17,49	21,13	21,61	21,31
Pu	NE	3037,32	3030,23	3023,25	3009,72	2996,95	2984,87
	EAE	0	16,11	32,43	64,60	97,44	137,93
Variação de massa (kg/dia), média no passo de tempo							
U-233	NI		- 0,799	- 0,446	- 0,256	- 0,190	- 0,173
Pu	NE		- 0,233	- 0,233	- 0,266	- 0,213	- 0,201
Ganho de massa (kg), reator total							
U-233 mais Pa-233			19,18	38,92	78,07	116,49	163,79
Pu			9,02	18,36	37,00	57,07	82,46
Distribuição de Potência (%)							
	NI	29,9	29,2	28,4	28,2	28,6	29,1
	NE	68,9	69,3	69,7	69,2	67,9	66,6
	Envoltórios	1,2	1,5	1,9	2,6	3,5	4,6

* NI = núcleo interno; EAI = envoltório axial interno; ER = envoltório radial; NE = núcleo externo; EAE = envoltório axial externo

TABELA III-a
RAZÕES DE REGENERAÇÃO, CASO 1

Tempo (dias)	Th + U233		U + Pu	
	Núcleo	Total	Núcleo	Total
0	0,768	1,463	0,650	0,837
117.27	0,806	1,362	0,673	0,870
323.13	0,828	1,387	0,710	0,915

TABELA III-b
RAZÕES DE REGENERAÇÃO, CASO 2

Tempo (dias)	Th + U233		U + Pu	
	Núcleo	Total	Núcleo	Total
0	0,809	1,587	0,819	1,055
120	0,845	1,608	0,831	1,064
240	0,859	1,540	0,843	1,083

TABELA IV
VARIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DE Pu (%), CASO 1

Tempo	0	117.27		323.13	
	Núcleo	Núcleo	Env. axial	Núcleo	Env. axial
Pu-239	60,59	60,33	99,43	59,84	98,46
Pu-240	21,89	22,75	0,57	24,11	1,52
Pu-241	11,49	10,71	0	9,58	0,02
Pu-242	6,03	6,21	0	6,47	0
Pu-físsil	72,08	71,04	99,43	69,42	98,48

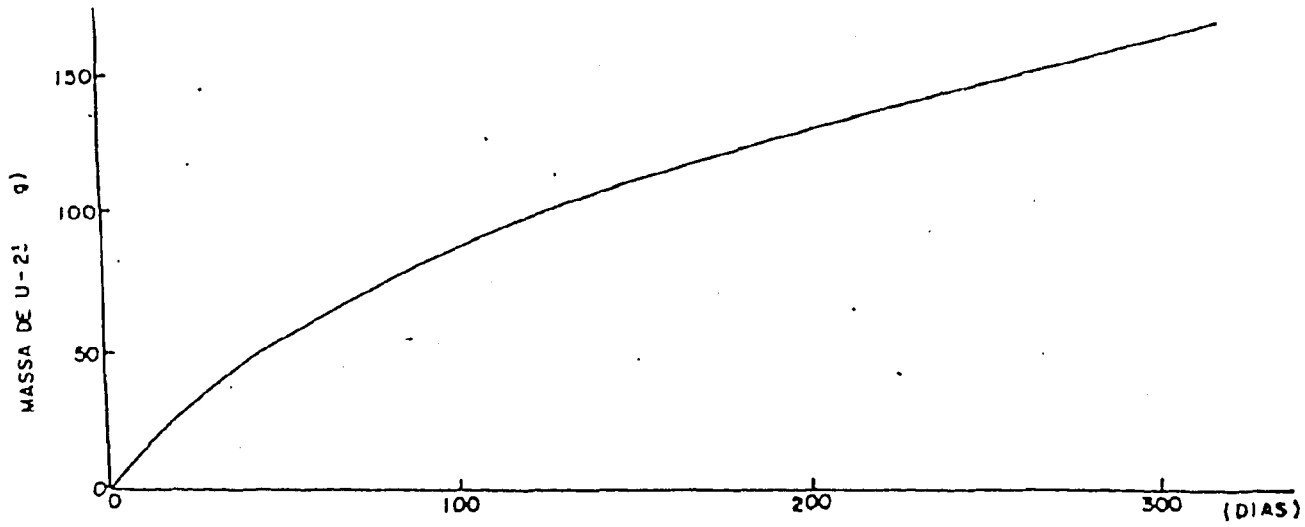


FIG. 3a: PERDA DE U-233 NO NÚCLEO INTERNO, CASO I.

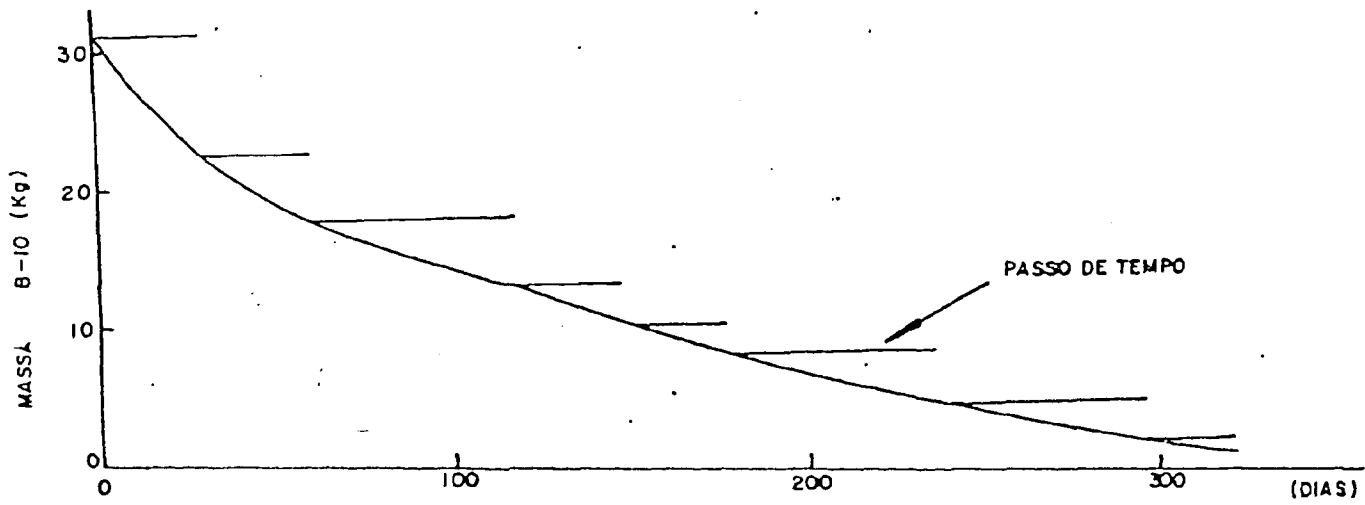


FIG. 3b: MASSA DE B-10 E PASSOS DE TEMPO, CASO I

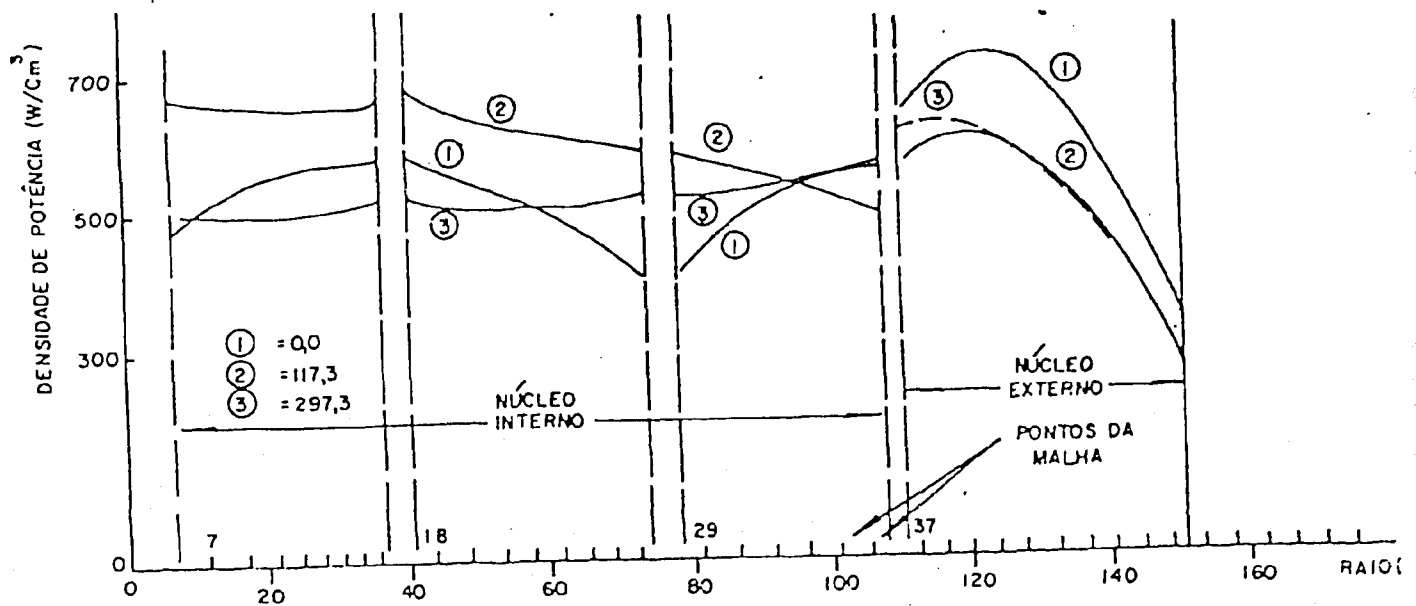


FIG. 3c: DISTRIBUIÇÃO RADIAL DE POTÊNCIA, CASO I.

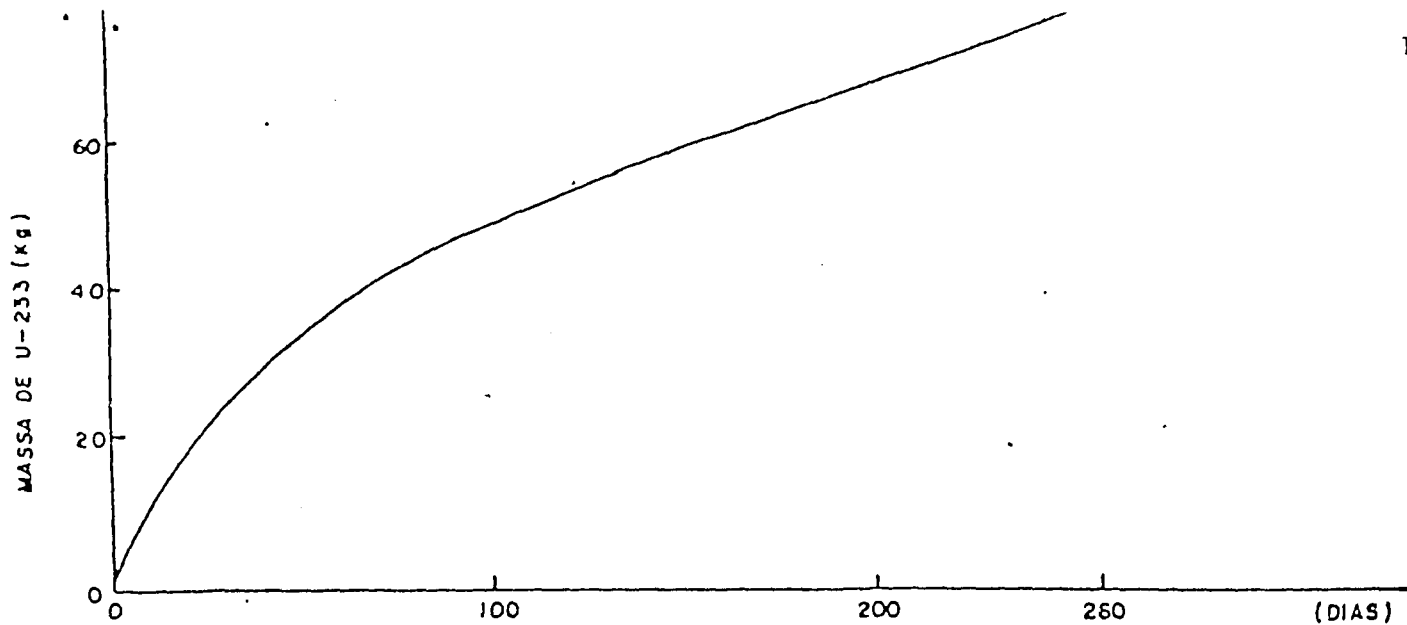


FIG. 4a: PERDA DE U-233 NO NÚCLEO INTERNO, CASO 2.

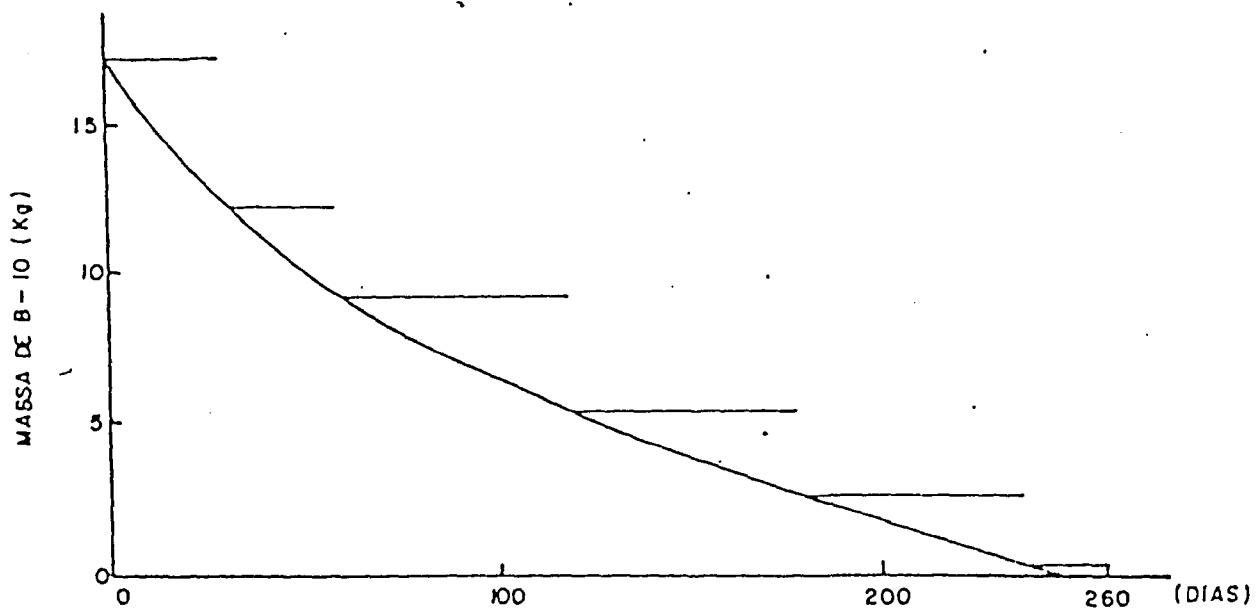


FIG. 4b: MASSA DE B-10 E PASSOS DE TEMPO, CASO 2.

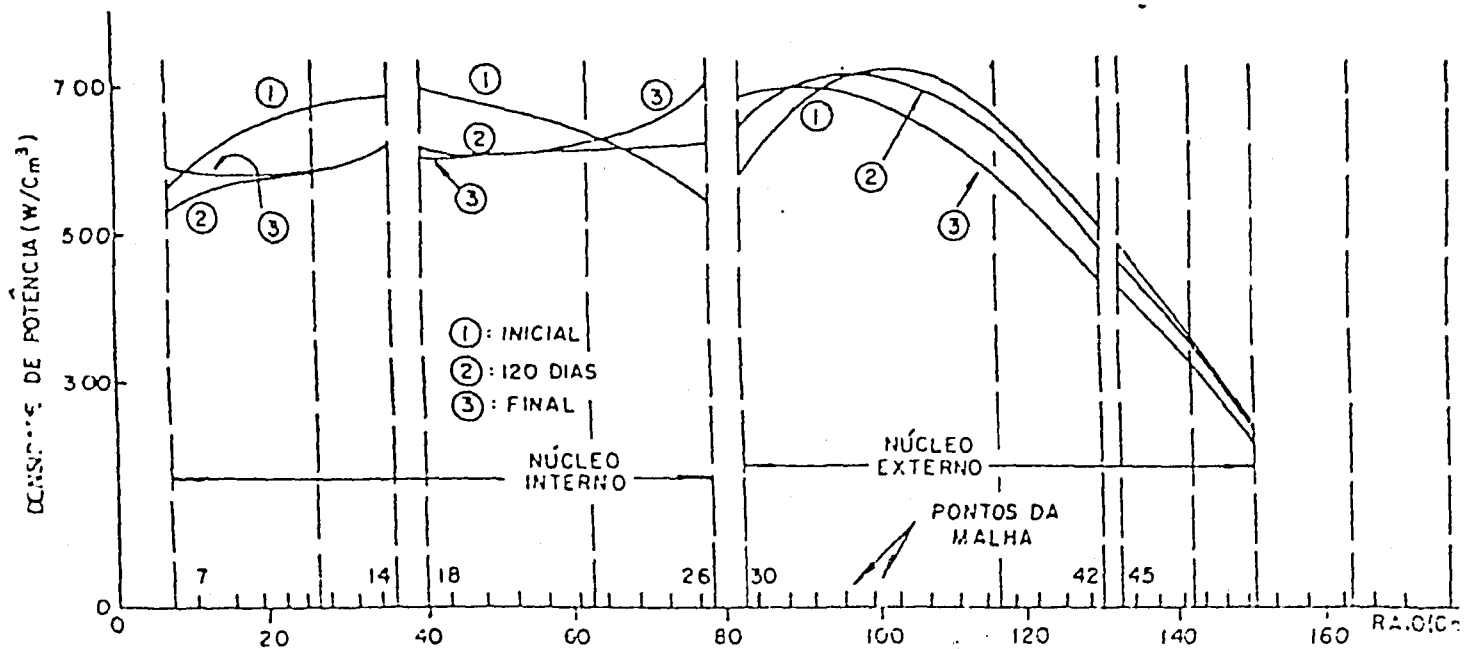


FIG. 4c: DISTRIBUIÇÃO RADIAL DE POTÊNCIA, CASO 2

IV - CONCLUSÕES

Os cálculos apresentados aqui são nossos primeiros cálculos de queima do reator regenerador binário e tanto o modelo usado quanto os resultados são preliminares. Entretanto, várias conclusões podem ser inferidas a partir das análises.

Uma regeneração eficiente no ciclo do Tório é possível. Se um fornecimento suficiente de Plutônio for disponível, a capacidade de RRB pode ser aumentada rapidamente e, para um prazo mais longo, tanto o U-233 como o Pu podem ser regenerados para se obter uma taxa de crescimento similar a do atual LMFBR carregado com Pu/U, mantendo as características superiores de segurança do RRB.

A partir de uma comparação entre os dois casos de carregamentos, conclui-se que um núcleo interno menor é melhor com respeito à regeneração. Tratando igualmente o U-233 e o Pu, o ganho líquido durante 274 dias é de 177 kg e 252 kg para os casos 1 e 2, respectivamente, correspondendo a um ganho de razão de regeneração de ~ 0,2 e ~ 0,3. Em consequência, se a ênfase estiver no melhoramento da segurança inerente, a zona carregada com U-233/Th deve ser um mínimo exigido para a proposição.

O número e as posições das barras de controle e a sequência operacional precisam ser estudadas e otimizadas. A perda da reatividade devido ao acúmulo de Pa e a queima, é maior do que a estimada inicialmente, e consequentemente, a vida reativa do núcleo é um pouco curta, relativamente a estimada, em ambos os casos considerados, e os enriquecimentos terão de ser aumentados, o que afeta as exigências de controle. Também, as variações das densidades de potência com o tempo, apresentadas nas Figuras 3c e 4c, são grandes. São necessários barras de controle no núcleo interno, não somente para a compensação do Protactíneo, mas também para o controle das distribuições da densidade de potência.

V - REFERÊNCIAS

- 1 - NASCIMENTO, J.A.; DIAS, A.F.; ISHIGURO, Y. - Projeto do Reator Regenerador Binário e Segurança Inerente - Trabalho a ser apresentado no IV ENFIR - Itaipava - Rio de Janeiro - 1983.