

DETR.PD-072/79

TÍTULO INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DA GERÊNCIA DE COMBUSTÍVEL NO NÚCLEO  
 SOBRE O CUSTO DO CICLO DE COMBUSTÍVEL

NOTAS CORRELATAS

OBJETIVO

Apresentar de modo qualitativo a influência de parâmetros da gerência de combustível no núcleo sobre o custo do combustível de modo a permitir sua otimização econômica.

LISTA DE DISTRIBUIÇÃO

RESUMO E CONCLUSÕES

- SUPED (1)
- ASPC.PD \* (1)
- DETR.PD (2)
- SUPLA:
- Dr.C.S.Valadão (1)
- Dr..J.Albo (1)
- DIFNU.PD (3)
- SEDOTE.PD (1)

Mencionam-se as etapas do ciclo de combustível de um reator, mostrando-se a variação do custo ao longo do ciclo e a contribuição de cada lote no custo global da energia.

Após mencionadas exigências técnicas e econômicas da gerência de combustível no núcleo, são apresentados parâmetros envolvidos e resultados de cálculo para um reator PWR de 3250 MW<sub>t</sub>.

A seguir são apresentados os resultados de análise econômica nos quais se mostram as influências dos parâmetros da gerência de combustível sobre a otimização de custos.

\* Apenas folha de rosto

ÍNDICE

1. Introdução	2/20
2. O Ciclo do Combustível no Núcleo	3/20
Referências	6/20
Tabelas	7/20
Figuras	11/20



mmcd.

Nº. CÓPIAS 10

AUTOR (ES)	VISTO	DATA	APROVAÇÃO	VISTO	DATA
E. P. Andrade	<i>[Signature]</i>	17/10/80	CHEFE DO LAB. OU GRUPO		
H. A. Mascarenhas	<i>[Signature]</i>	17/10/80	CHEFE DA DIVISÃO	<i>[Signature]</i>	17/10/80
			CHEFE DO DEPARTAMENTO	<i>[Signature]</i>	17/10/80
CLASSIFICAÇÃO			TAREFA: 11.25		

INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DA GERÊNCIA DE COMBUSTÍVEL  
NO NÚCLEO SOBRE O CUSTO DO CICLO DE COMBUSTÍVEL

1. INTRODUÇÃO

Em um sentido mais amplo, o ciclo de combustível de uma central nuclear envolve uma série de operações industriais necessárias à transformação do minério de urânio em elementos combustíveis, à geração de energia elétrica a partir destes elementos adequadamente colocados no núcleo do reator e uma nova série de operações industriais após a sua retirada do núcleo (Figura 1).

Custos diretos - decorrentes destas diversas operações - bem como custos indiretos - refletindo encargos financeiros - são envolvidos de um modo bastante complexo no cálculo da parcela referente ao combustível do custo global da energia elétrica produzida (Figura 2).

Em um sentido mais restrito - compreendendo apenas a utilização do combustível no núcleo do reator - denomina-se ciclo ao intervalo de tempo entre duas trocas (recargas) sucessivas de combustível. Estas trocas se fazem seguindo critérios pré-estabelecidos envolvendo conjuntos particulares de elementos combustíveis denominados lotes ("batches").

Custos de cada um destes lotes, evoluindo individualmente com o tempo, compõem o custo da energia elétrica gerada ao longo da vida útil do reator (Figura 3). O manuseio adequado destes lotes constitui a gerência (gestão) no núcleo do combustível, passível de otimização sob diversos aspectos técnicos e econômicos.

Esta Nota é uma primeira abordagem de alguns aspectos qualitativos desta gerência de combustível relativos à otimização do custo do ciclo.

## 2. O CICLO DO COMBUSTÍVEL NO NÚCLEO

A otimização da gerência do combustível no núcleo ("in-core fuel management") envolve o preenchimento de determinadas exigências técnicas e econômicas decorrentes:

- da rede de energia elétrica:

- . demanda de energia;
- . minimização de custos, etc.

- do reator:

- . reatividade do núcleo;
- . limites termo-hidráulicos;
- . limites físicos do combustível, etc.

- dos fornecedores:

- . custo do urânio;
- . custo das diversas operações industriais;
- . garantias do combustível;
- . taxa de juros, etc.

As Tabelas e Figuras apresentadas a seguir foram extraídas de [2] e sintetizam a gerência de combustível no núcleo de um PWR de 3250 MWt (1060 MWe) e sua análise econômica (custos extrapolados, na época, para julho de 1980); os valores apresentados, portanto, têm uma finalidade apenas ilustrativa.

### 2.1 Gerência de Combustível no Núcleo

Uma expressão simples relacionando parâmetros importantes é:

$$B = 365 \frac{p.T.L}{f}$$

onde:

B = queima ("burnup") de equilíbrio<sup>\*)</sup> do núcleo [Mwd/tU], isto é, a energia extraída por tonelada de urânio presente na carga inicial do núcleo.

\*) Um núcleo está em equilíbrio quando se encontra num regime constante em que sua recarga se constitui de um lote de mesmo número de elementos combustíveis com mesmo enriquecimento, produzindo queimas médias iguais.

$p$  = potência específica do núcleo [MW/tU];

$T$  = tempo entre recargas sucessivas [ano], isto é, a duração de um ciclo de combustível;

$L$  = fator de utilização da central, isto é, a razão entre a energia efetivamente gerada para a energia nominal que poderia ter sido gerada no mesmo período de tempo;

$\bar{f}$  = fração de lote, razão entre o número de elementos combustíveis compondo um lote e o número total de elementos do núcleo.

A Tabela 1 foi obtida a partir desta expressão. Nesta Tabela indica-se uma faixa mais realística de operação dos PWRs atuais.

Outros parâmetros envolvidos nos programas de computador utilizados na gerência de combustível no núcleo, são:

- o enriquecimento  $\epsilon$  [% em massa de U-235] do lote de recarga;
- a massa total de urânio  $M$  [tU] compondo a carga inicial do núcleo;
- a energia elétrica  $E$  [MW<sub>eh</sub>] gerada pela central em um determinado período;
- o rendimento térmico  $\eta$  da central, isto é, a razão entre a potência elétrica [MW<sub>e</sub>] produzida por suas turbinas e a potência térmica [MW<sub>t</sub>] gerada pelo reator;
- o tempo de parada da central  $\Delta T$  [fração de ano] para recarga.

A Figura 4 representa a queima média de equilíbrio B do núcleo, em função do enriquecimento  $\epsilon$  de recarga e da fração de lote  $f$ .

A Figura 5, obtida da Figura 4, representa a energia  $E$  do ciclo de equilíbrio, em função do enriquecimento de recarga  $\epsilon$  e da fração de lote, em que:

$$E = 24 \eta f B M$$

## 2.2 Análise Econômica da Gerência de Combustível

A partir de resultados fornecidos pelos programas computacionais de gerência de combustível no núcleo - tais como a queima de equilíbrio B do núcleo em função da fração de lote  $f$  e do enriquecimento  $\epsilon$  de recarga - efetua-se a análise de custos da gerência de combustível, por meio de programas de análise econômica.

A Tabela 2 apresenta custos globais <sup>\*)</sup> de ciclo de equilíbrio obtidos para diversas frações de lote e enriquecimentos de recarga, considerando-se três diferentes situações de utilização do reator:  $T = 1,0$  ano,  $T = 1,5$  ano e  $L = 0,9$ .

A Figura 6 - obtida de maneira semelhante à Tabela 2 - representa custos globais de ciclos de equilíbrio para  $T = 1,5$  anos e diversos valores do fator de utilização,  $L$ . Nesta figura observa-se que os custos globais, função da fração de lote  $f$  e do enriquecimento de recarga  $\epsilon$ , apresentam mínimos que nem sempre podem ser atingidos devido a restrições sobre a queima de equilíbrio B do combustível.

A Figura 7 - obtida a partir da Figura 4 - apresenta o lugar geométrico dos custos globais de ciclos de equilíbrio, em função da fração de lote  $f$  e da energia gerada por ciclo  $E$ . Novamente nesta Figura observa-se que o mínimo em sempre é atingido uma vez imposta limitação sobre a queima de equilíbrio B do combustível.

A Tabela 3 apresenta custos da energia gerada no ciclo de equilíbrio em função dos mesmos parâmetros utilizados na Tabela 2:  $T = 1,0$  ano,  $T = 1,5$  ano e  $L = 0,9$ . (Deve ser observado que aqui não são incluídos custos decorrentes de investimentos, operação, manutenção, etc., da central mas apenas a parcela referente ao custo do combustível propriamente dito).

A Figura 8 - obtida de maneira análoga à Tabela 3 - representa custos de energia no ciclo de equilíbrio, para outros valores de  $L$ . Aqui também observam-se mínimos nas curvas de custo.

---

\*) Custo total no qual se consideram investimento, operação, manutenção, etc. da central e o custo do combustível.

A Figura 9 - semelhante à Figura 6 - representa custos globais de ciclos de equilíbrio para  $T = 1,0$  ano e diversos valores de  $L$ . Aqui também observam-se mínimos nas curvas de custo e queimas B limitadoras.

A Figura 10 apresenta custos globais da energia em função do enriquecimento de recarga  $\epsilon$ , para diversas frações de lote  $f$  e dois diferentes tamanhos de ciclos  $T = 1,0$  ano e  $T = 1,5$  anos para fator de utilização  $L = 0,9$ . (Deve ser observado que aqui são incluídos os custos decorrentes de investimentos, operação, manutenção da central, etc.) Também estes custos globais apresentam mínimos e são limitados por queimas B.

A Tabela 4 apresenta a influência, sobre os diversos custos da energia, devido à redução do tempo de recarga  $\Delta T$ , de 6 semanas para 1 semana.

#### REFERÊNCIAS

- [1] RUBINI, L.A. Comunicação pessoal.
- [2] BENEDICT, M. Effects of Fueling Options. In: Nuclear Fuel and Power Management, MIT, 23 July 1975.

TABELA 1 - FRAÇÃO DE LOTE EM FUNÇÃO DO FATOR DE UTILIZAÇÃO E DO TEMPO DE RECARGA (B = 31.500 MWd/tU e p = 35 MW/tU)

L \ T	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5
0,90	0,1821	0,274	0,3636	0,4545	0,5464
0,85	0,1724		0,3448		
0,80	0,1626		0,3236		
0,70	0,1429		0,2857	0,3571	
0,60	0,1220		0,2439	0,3030	0,3636

Faixa mais  
realista

DETR. PD-073/79

TABELA 2 - CUSTO GLOBAL DO CICLO DE EQUILÍBRIO EM FUNÇÃO DO ENRIQUECIMENTO DE RECARGA  $\epsilon$  E DA FRAÇÃO DE LOTE  $f$ 

B = Queima ("Burnup") MWd/tU

E = Energia elétrica por ciclo,  $GW_{eh}$  $\overline{TC}$  = Custo global por ciclo,  $\$10^6$ 

(1) = Tamanho do ciclo igual a 1 ano

(1,5) = Tamanho do ciclo igual a 1,5 ano

(0,9) = Fator de utilização da central igual a 0,9

		Fração de lotes $f$				
		<u>1/1</u>	<u>1/2</u>	<u>1/3</u>	<u>1/4</u>	<u>1/6</u>
Enriquecimen to, (w/o), $\epsilon$						
2.0	B	8,879	12,129			
	E	6,278	4,287			
	$\overline{TC}(1)$	58,8393	34,4226			
	$\overline{TC}(1.5)$	61,5837	37,1575			
	$\overline{TC}(.9)$	58,1693	32,4796			
2.4	B	13,097	17,235	20,083		
	E	9,259	6,092	4,735		
	$\overline{TC}(1)$	70,9786	41,4784	30,8796		
	$\overline{TC}(1.5)$	74,4153	44,6983	34,1586		
	$\overline{TC}(.9)$	72,5709	40,5446	29,4840		
2.8	B	17,155	22,068	25,571	27,938	
	E	12,127	7,801	6,026	4,938	
	$\overline{TC}(1)$	83,3647	48,6592	36,4971	30,0534	
	$\overline{TC}(1.5)$	87,5051	52,4749	40,4136	34,1525	
	$\overline{TC}(.9)$	88,1288	49,0931	35,3124	27,8057	
3.2	B	21,085	26,708	30,771	33,718	36,907
	E	14,906	9,441	7,251	5,959	4,348
	$\overline{TC}(1)$	95,9328	55,9563	41,9396	34,6159	26,6507
	$\overline{TC}(1.5)$	100,7862	60,2456	46,3756	39,2712	31,5793
	$\overline{TC}(.9)$	104,7624	58,1288	41,8703	33,1456	23,3573
3.6	B		31,209	35,791	39,035	42,899
	E		11,032	8,434	6,899	5,053
	$\overline{TC}(1)$		63,3525	47,4539	39,1013	30,1842
	$\overline{TC}(1.5)$		68,1941	52,4185	44,2787	35,7027
	$\overline{TC}(.9)$		67,6514	48,7727	38,5980	27,3480
4.0	B		35,582	40,634	44,285	48,635
	E		12,577	9,575	7,827	5,730
	$\overline{TC}(1)$		70,7960	52,9852	43,6689	33,7167
	$\overline{TC}(1.5)$		76,1972	58,4795	49,3853	39,8116
	$\overline{TC}(.9)$		77,6039	55,9386	44,3566	31,5037
4.4	B		39,861	45,352	49,339	54,195
	E		14,089	10,687	8,720	6,385
	$\overline{TC}(1)$		78,3034	58,5627	48,2514	37,2609
	$\overline{TC}(1.5)$		84,2705	64,5917	54,5101	43,9301
	$\overline{TC}(.9)$		87,9995	63,4135	50,3266	35,8318
4.8	B			49,968	54,277	59,564
	E			11,775	9,593	7,019
	$\overline{TC}(1)$			64,1661	52,8508	40,8037
	$\overline{TC}(1.5)$			70,7315	59,6489	48,0415
	$\overline{TC}(.9)$			71,1726	56,5236	40,3060
5.3	B				60,316	
	E				10,660	
	$\overline{TC}(1)$				58,6252	
	$\overline{TC}(1.5)$				66,1017	
	$\overline{TC}(.9)$				64,5853	
7.0	B					87,021
	E					10,253
	$\overline{TC}(1)$					60,3094
	$\overline{TC}(1.5)$					70,6051
	$\overline{TC}(.9)$					67,4850



TABELA 3 - CUSTO DA ENERGIA DO COMBUSTÍVEL EM FUNÇÃO DO ENRIQUECIMENTO DE RECARGA E DA FRAÇÃO DE LOTE

(1) = Tamanho do ciclo igual a 1,0 ano

(1,5) = Tamanho do ciclo igual a 1,5 ano

(0,9) = Fator de utilização da central igual a 0,9

Enriquecimen- to (w/o),ε	Fração de lotes f	Custo da Energia do Combustível				
		1/1	1/2	1/3	1/4	1/6
2.0	(1)	9.3729	8.0290			
	(1.5)	9.8101	8.6669			
	[ .9]	9.2662	7.5758			
2.4	(1)	7.6661	6.8085	5.8138		
	(1.5)	8.0372	7.3371	6.4312		
	[ .9]	7.8381	6.6553	6.2271		
2.8	(1)	6.8741	6.2380	6.0568	6.0863	
	(1.5)	7.2155	6.7182	6.7068	6.9164	
	[ .9]	7.2669	6.2937	5.8602	5.6311	
3.2	(1)	6.4357	5.9273	5.7838	5.8087	6.1286
	(1.5)	6.7613	6.3816	6.3956	6.5899	7.2620
	[ .9]	7.0280	6.1574	5.7743	5.5620	5.3712
3.6	(1)		5.7428	5.6264	5.6677	5.9730
	(1.5)		6.1817	6.2150	6.4181	7.0651
	[ .9]		6.1325	5.7827	5.5947	5.4118
4.0	(1)		5.6290	5.5335	5.5794	5.8838
	(1.5)		6.0584	6.1073	6.3098	6.9474
	[ .9]		6.1703	5.8419	5.6673	5.4976
4.4	(1)		5.5576	5.4797	5.5335	5.8352
	(1.5)		5.9811	6.0438	6.2512	6.8797
	[ .9]		6.2458	5.9336	5.7715	5.6114
4.8	(1)			5.4493	5.5095	5.8136
	(1.5)			6.0069	6.2182	6.8448
	[ .9]			6.0444	5.8924	5.7427
5.3	(1)				5.4996	
	(1.5)				6.2010	
	[ .9]				6.0587	
7.0	(1)					5.8223
	(1.5)					6.8855
	[ .9]					6.5822

DETR. PD-073/79

TABELA 4 - CUSTO GLOBAL DA ENERGIA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE PARADA PARA RECARGA  $\Delta T$   
E FRAÇÃO DE LOTE f

Tempo de parada para recarga, semanas	~6	1		
Tempo de parada para recarga, anos	0,125	0,01916		
Tempo de queima, anos	0,875	0,48084		
Tamanho do ciclo, anos	1,000	0,50000		
Fator de utilização	0,9733	0,9733		
Fator de utilização global	0,85164	0,93600		
Energia elétrica gerada por ciclo, $GW_e h$	7913,4	4348,6		
Fração de lote	1/3	1/4	1/6	1/6
Enriquecimento, % em massa de U-235	3,41	4,025	5,375	3,20
Queima ("Burnup") de descarga, $MWd/tU$	35.528	44.704	67.056	36.907
Custo global da energia, mills/kWh *				
Ciclo do combustível	5,692	5,575	5,812	5,208
Custo operacional, $US\$12.10^6$ /ano	1,516	1,516	1,516	1,380
Investimento	<u>13,269</u>	<u>13,269</u>	<u>13,269</u>	<u>12,073</u>
	20,477	20,360	20,597	18,661

\* Custo de investimento,  $US\$700/kW$   
Juros , 15%/ano

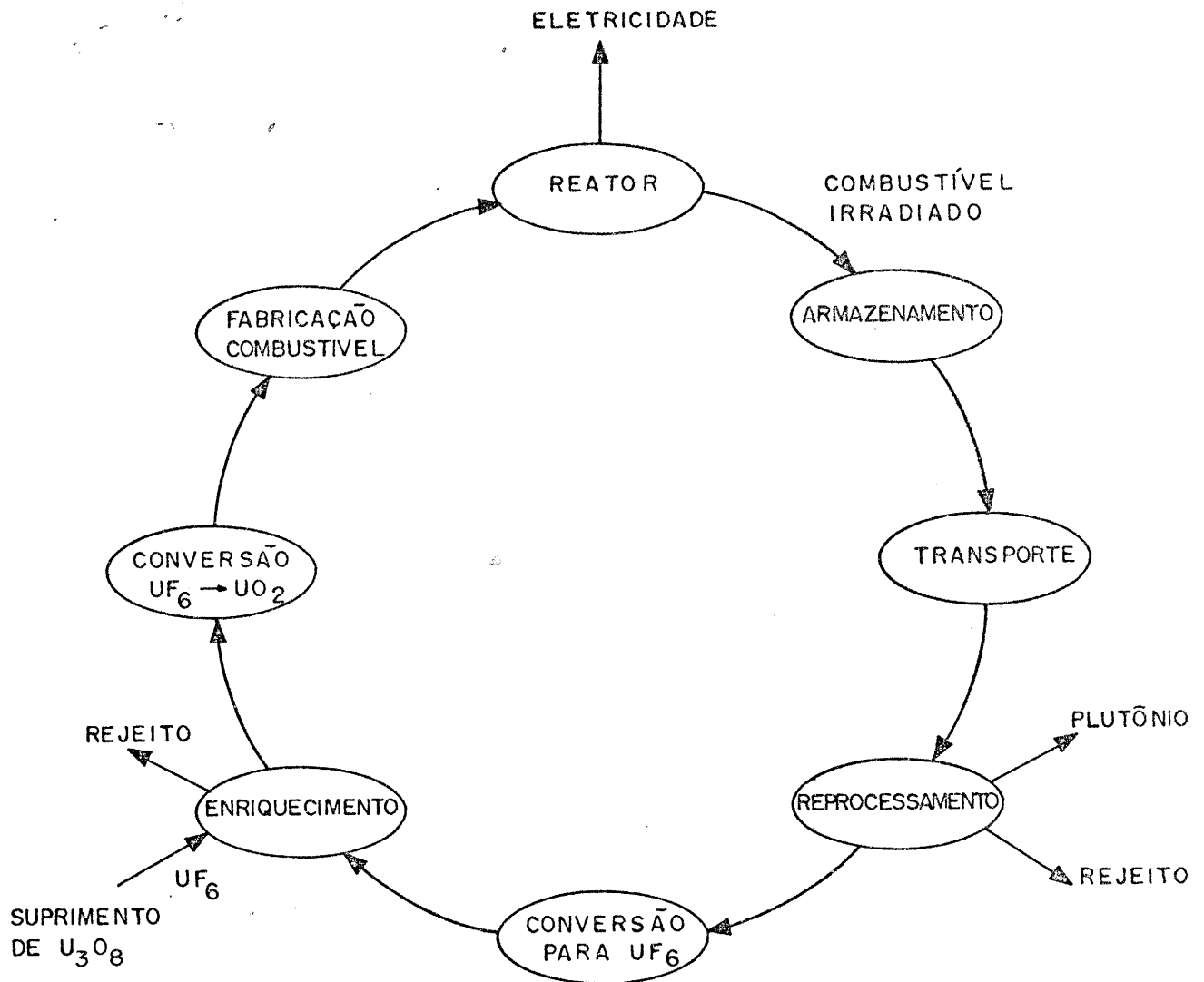


FIGURA 1 - ETAPAS DO CICLO DE COMBUSTÍVEL

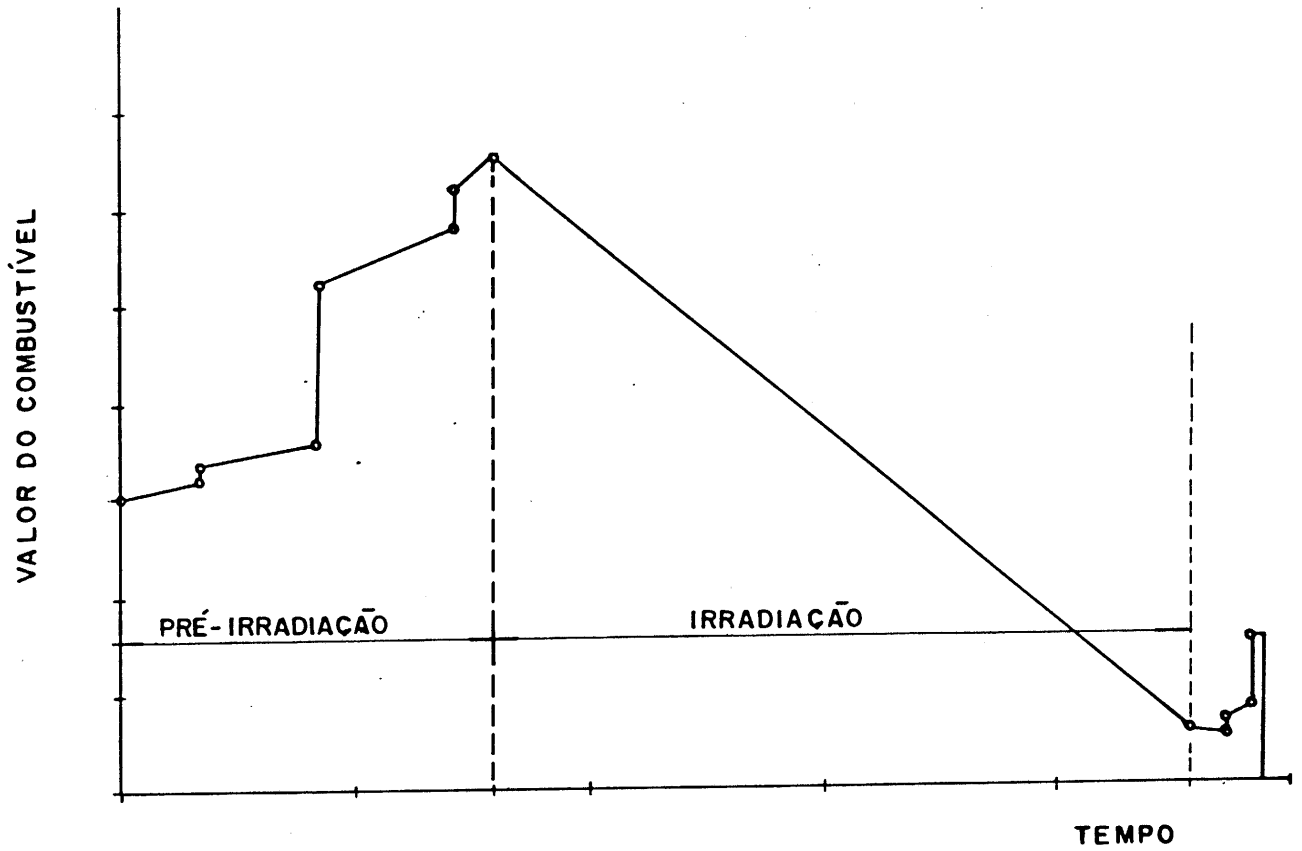


FIGURA 2 - VARIAÇÃO DO CUSTO DO COMBUSTÍVEL AO LONGO DO CICLO

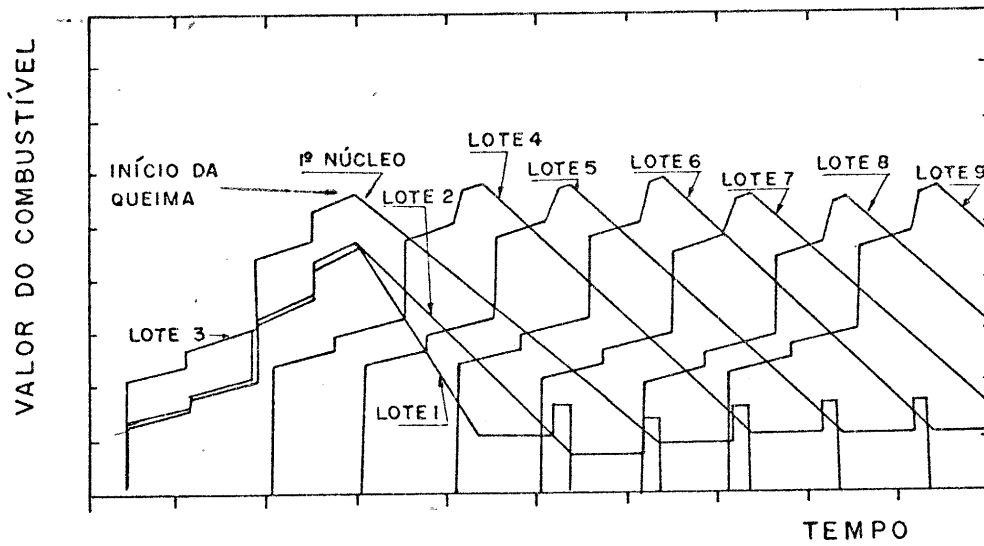


FIGURA 3 - COMPOSIÇÃO DE CUSTOS DE LOTES INDIVIDUAIS  
AO LONGO DA VIDA DA CENTRAL

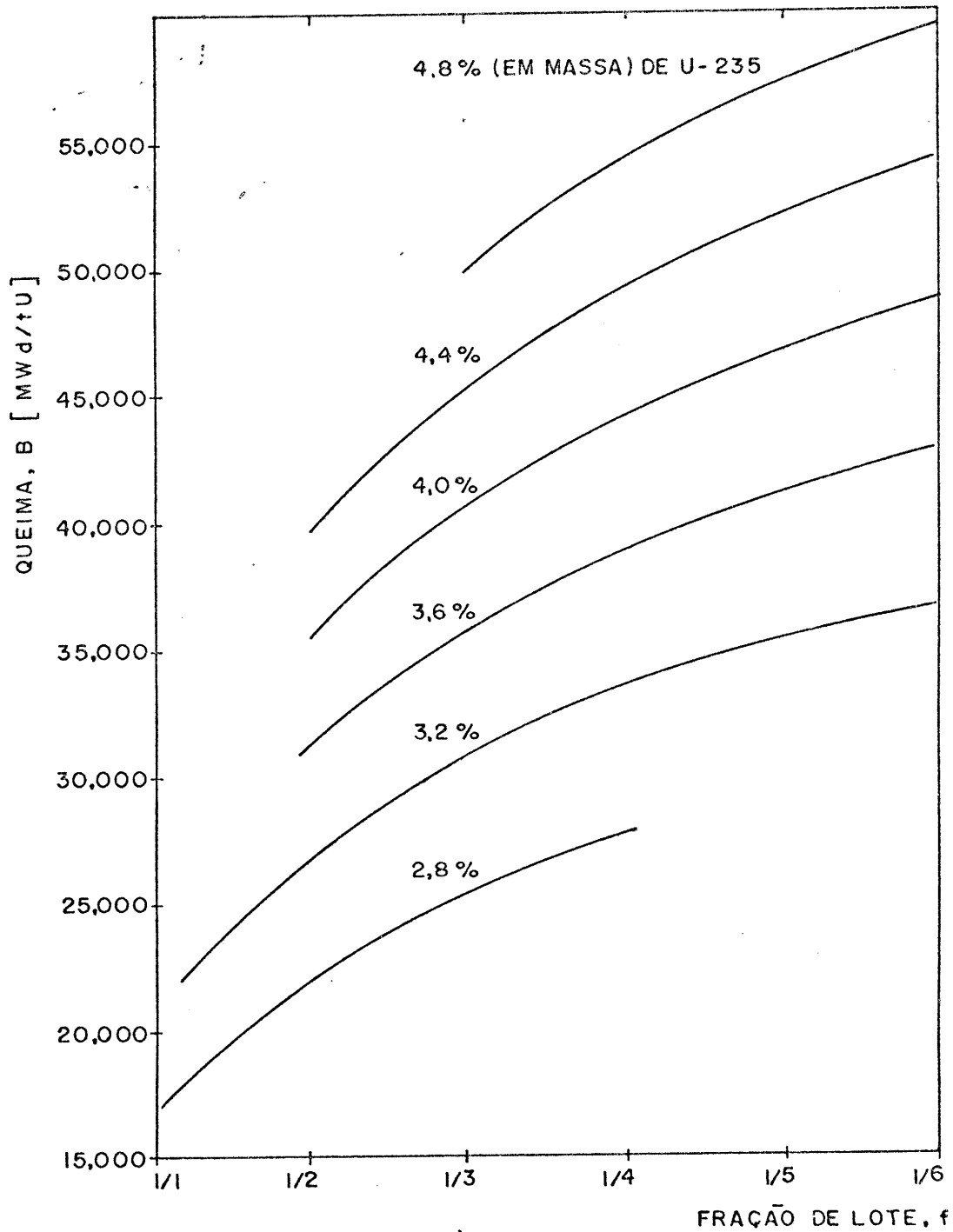


FIGURA 4 - QUEIMA ("BURNUP") DE EQUILÍBRIO B, EM FUNÇÃO DA FRAÇÃO DE LOTE  $f$  E DO ENRIQUECIMENTO DE RECARGA  $\epsilon$

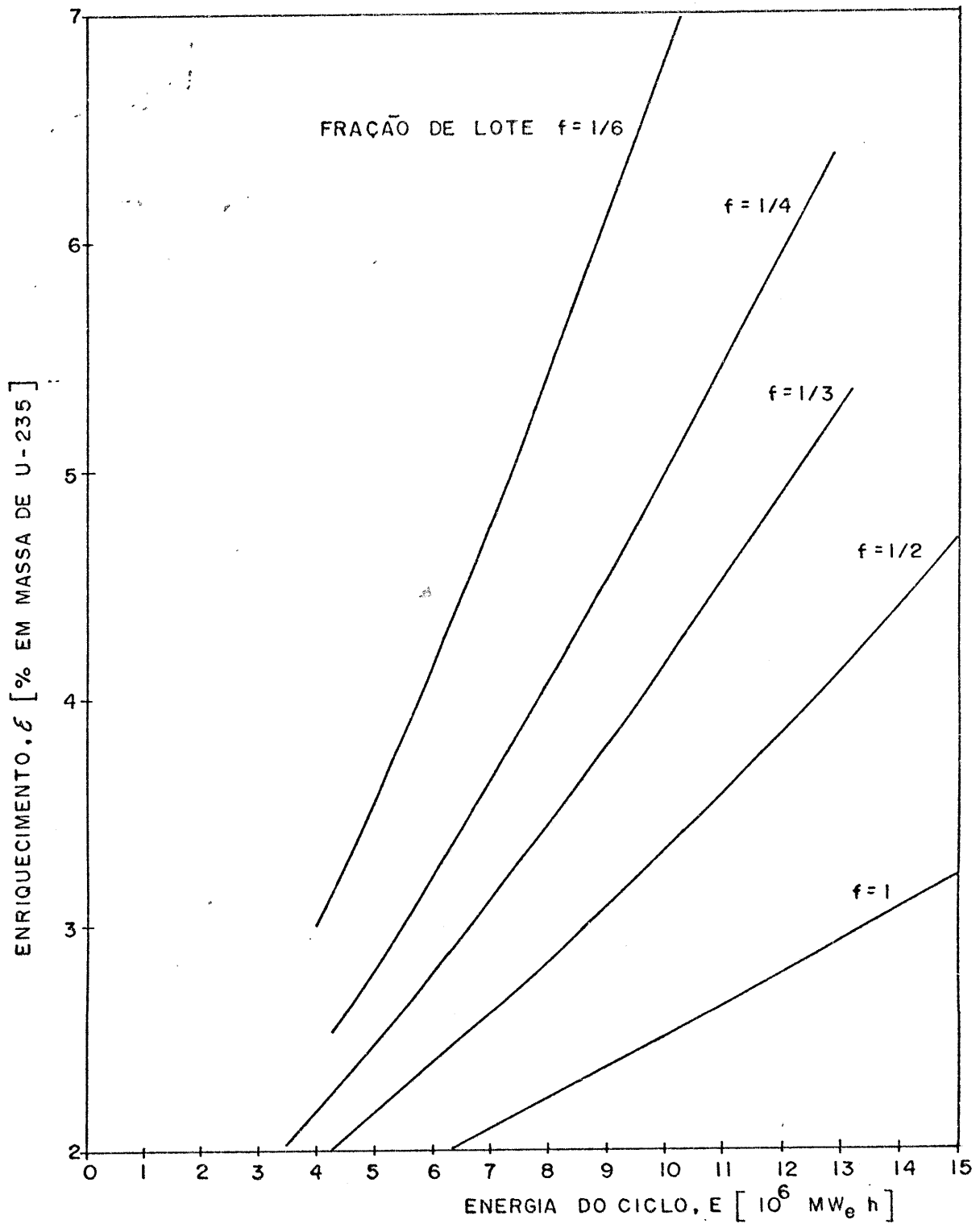


FIGURA 5 - ENRIQUECIMENTO DE RECARGA  $\epsilon$  EM FUNÇÃO DA ENERGIA DO CICLO DE EQUILÍBRIO  $E$ , E DA FRAÇÃO DE LOTE  $f$

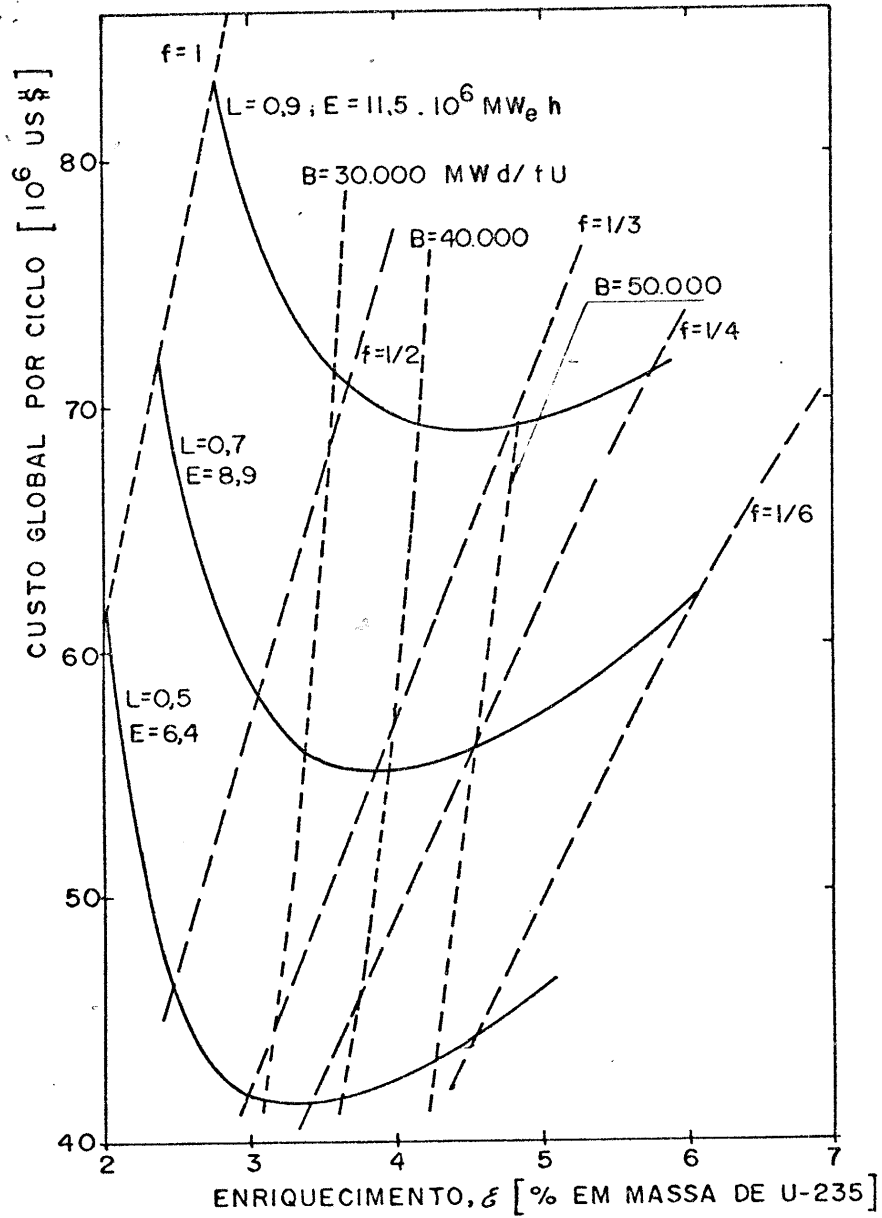


FIGURA 6 - CUSTO GLOBAL DO CICLO DE EQUILÍBRIO EM FUNÇÃO DO ENRIQUECIMENTO DE RECARGA  $\epsilon$ , DA FRAÇÃO DE LOTE  $f$  E DO FATOR DE UTILIZAÇÃO  $L$  (PARA UM TEMPO ENTRE RECARGAS SUCESSIVAS  $T = 1,5$  ANOS E UMA PARADA PARA RECARGA  $\Delta T = 0,125$  ANOS)



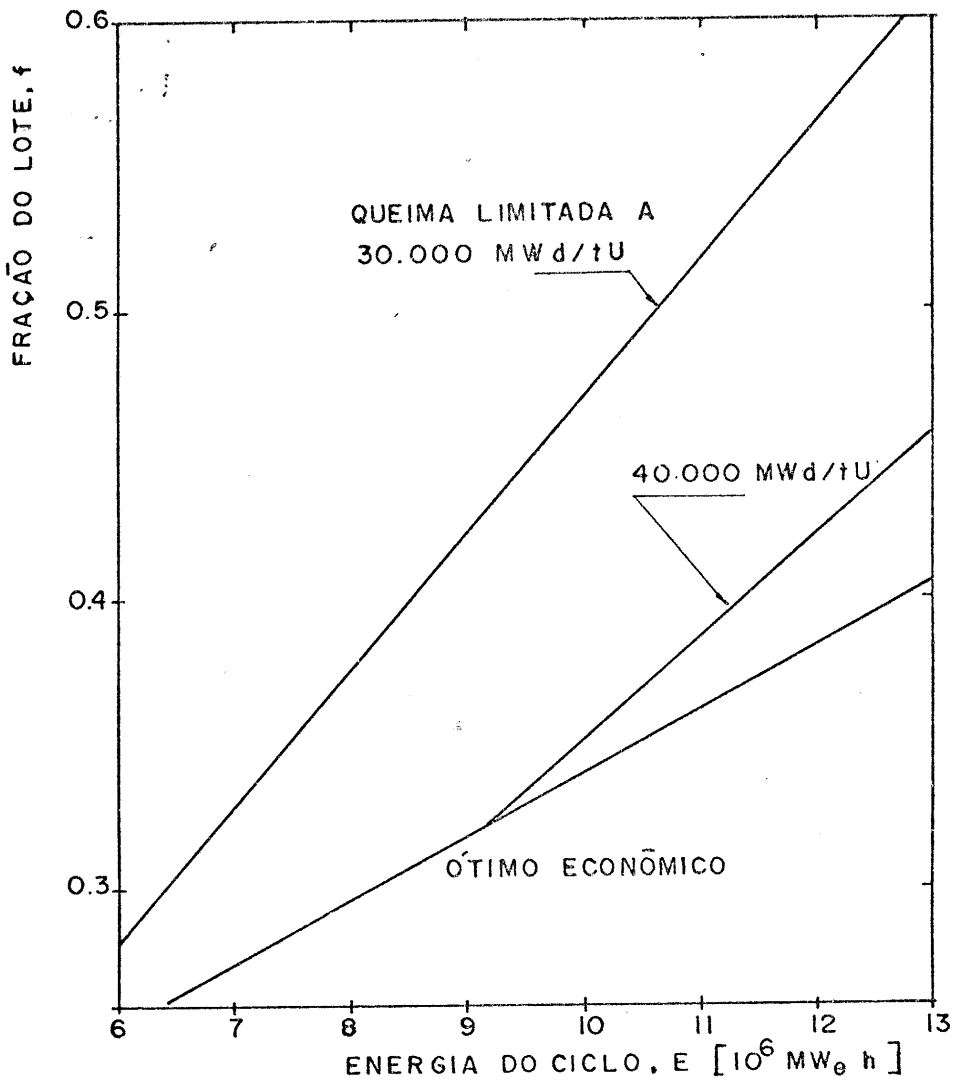


FIGURA 7 - FRAÇÃO DE LOTE  $f$  ÓTIMA EM FUNÇÃO DA ENERGIA DO CICLO DE EQUILÍBRIO  $E$  (LIMITADA POR QUEIMAS DE EQUILÍBRIO B MÁXIMAS)

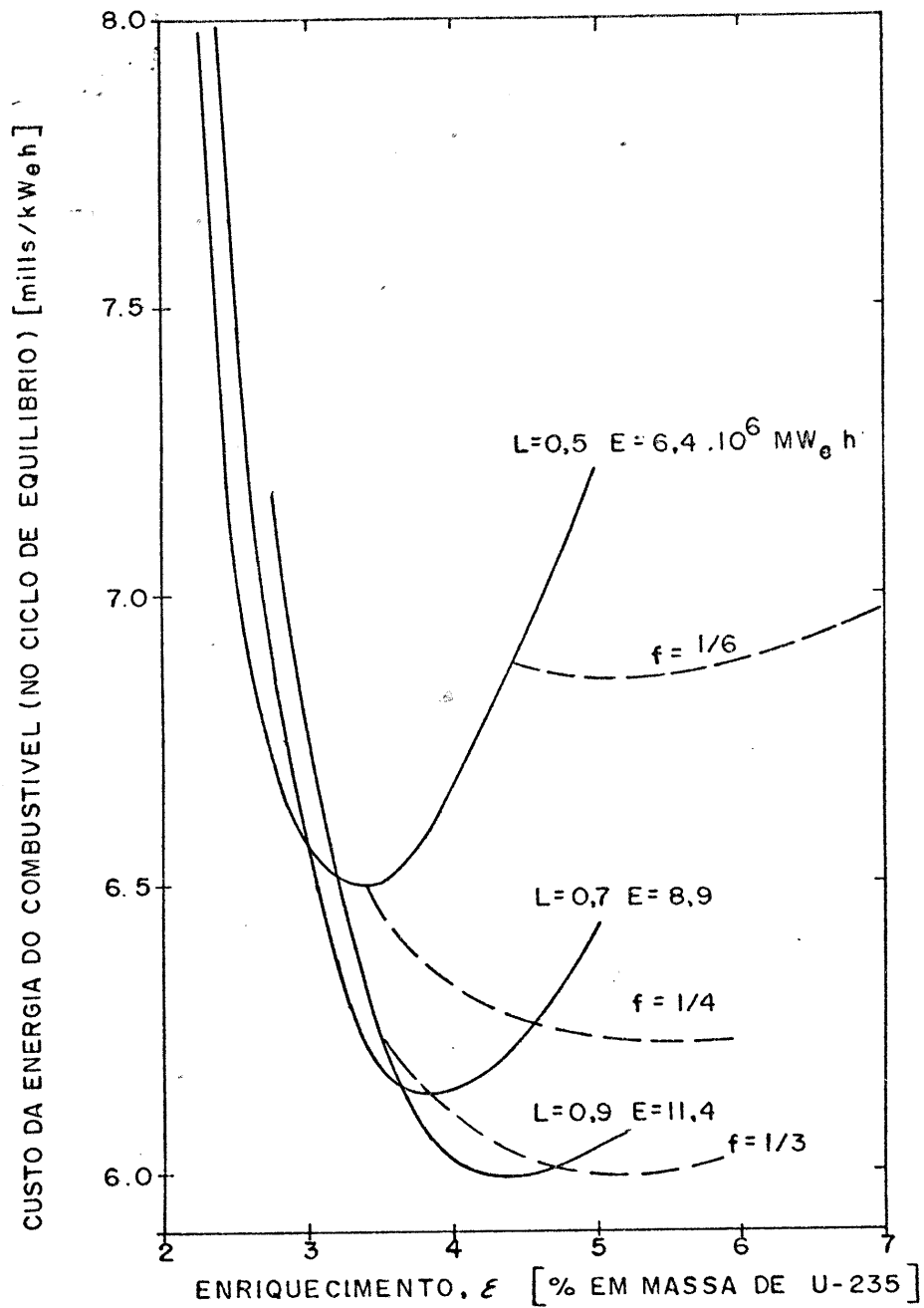


FIGURA 8 - CUSTO DA ENERGIA DO COMBUSTÍVEL EM FUNÇÃO DO ENRIQUECIMENTO DE RECARGA  $\epsilon$  E DO FATOR DE UTILIZAÇÃO L

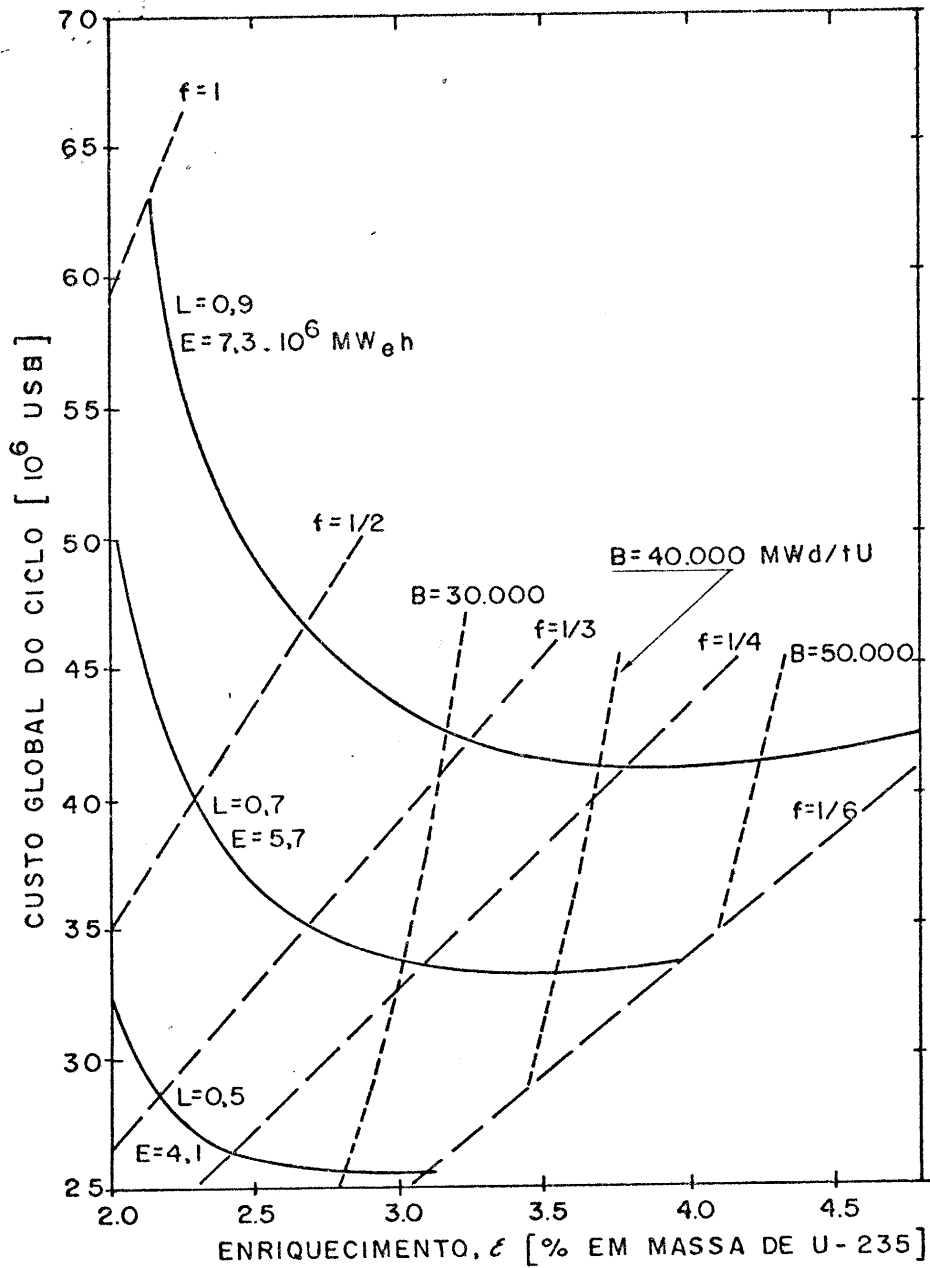


FIGURA 9 - CUSTO GLOBAL DO CICLO DE EQUILÍBRIO EM FUNÇÃO DO ENRIQUECIMENTO DE RECARGA  $\epsilon$ , DA FRAÇÃO DE LOTE  $f$  E DO FATOR DE UTILIZAÇÃO  $L$  (PARA UM TEMPO ENTRE RECARGAS SUCESSIVAS  $T = 1,0$  ANOS E UMA PARADA PARA RECARGA  $\Delta T = 0,125$  ANOS).

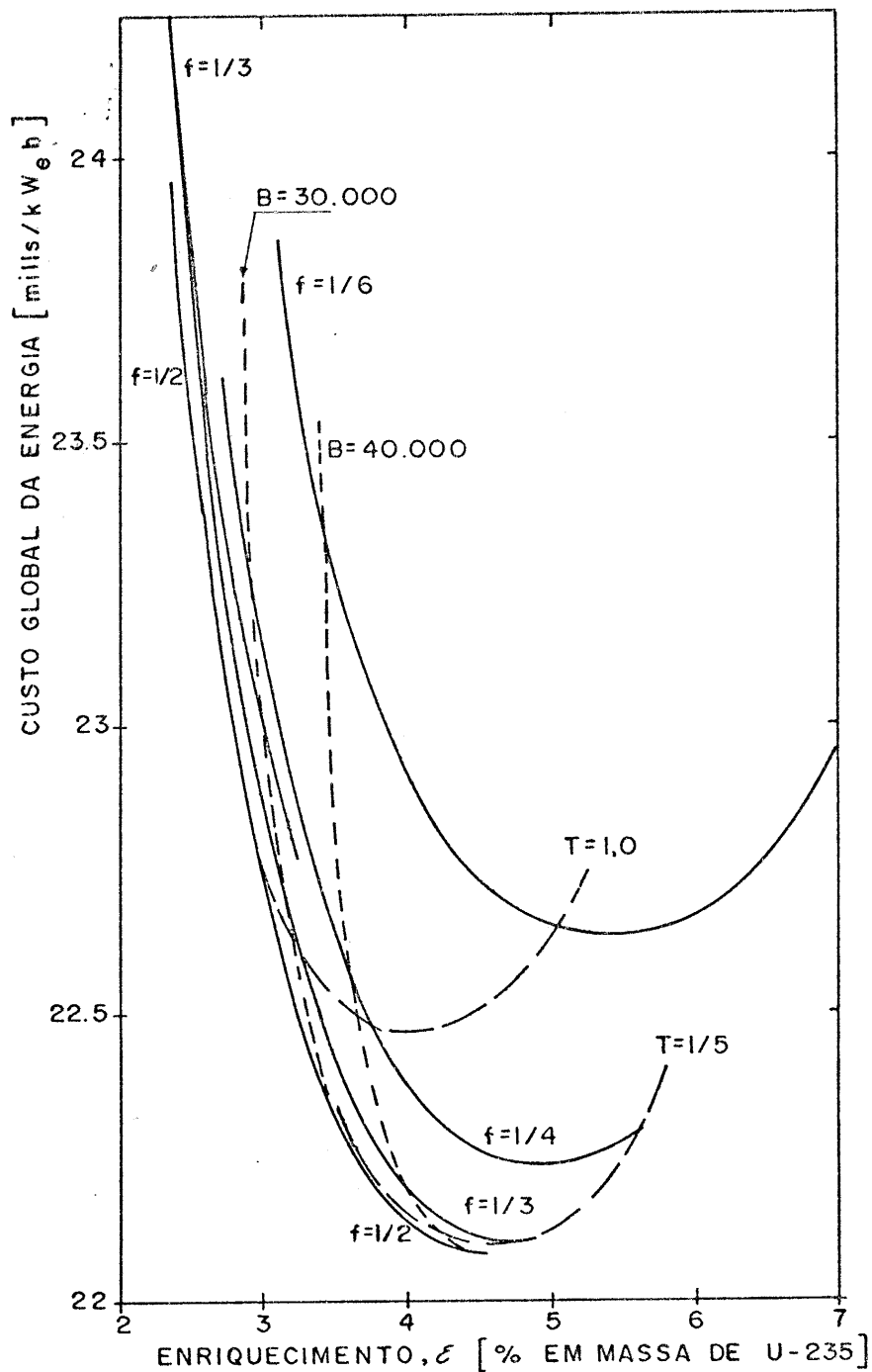


FIGURA 10 - CUSTO GLOBAL DA ENERGIA EM FUNÇÃO DO ENRIQUECIMENTO DE RECARGA  $\epsilon$  E DA FRACÃO DE LOTE  $f$  (CUSTO DE INVESTIMENTO = US\$700/kW, JUROS = 15%/ANO, CUSTO OPERACIONAL = US\$12.10<sup>6</sup>/ANO, FATOR DE UTILIZAÇÃO  $L = 0,9$  PARADA PARA RECARGA  $\Delta T = 0,125$  ANO)