

ESTUDO DE GERENCIAMENTO DE COMBUSTIVEL PARA REATOR
PRODUTOR DE RADIOISOTOPOS

Nanami Kosaka
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN-CNEN/SP
Supervisão de Tecnologia do Núcleo
Caixa Postal 11049 - Pinheiros
05422-970 , São Paulo, SP

RESUMO

Cálculo de queima e estimativa de carregamento foram realizados para o reator OSIRIS, visando avaliar a metodologia do IPEN-CNEN/SP de remanejamento de combustível em reatores de alto fluxo. O sistema de cálculo consiste de programas HAMMER-TECHNION e CITATION. Fez-se também um estudo de custos anuais de combustível para diversos enriquecimentos, dos quais o de 8% mostrou-se o mais conveniente tanto do ponto de vista neutrônico como do econômico. Com esse enriquecimento a recarga será de 8 combustíveis por ciclo.

INTRODUÇÃO

Os estudos de gerenciamento de combustível "in-core" realizados no nosso país têm dado ênfase aos reatores de potência do tipo PWR, em função do reator ANGRA 1. A Supervisão de Tecnologia do Núcleo, IPEN-CNEN/SP, tem também contribuído nesta área desenvolvendo metodologias para determinar estratégias de recarga.

No entanto, além dos reatores de potência para a geração de energia elétrica, há reatores para outras finalidades, tais como os geradores de calor para aquecimento, os de pesquisa, os produtores de radioisótopos e os de teste de materiais. Conforme a finalidade do reator, as características do núcleo e os requisitos de operação são diferentes, influído diretamente na estratégia de recarregamento de combustível.

Visando estudos de elevação de potência do reator IEA-R1, do IPEN-CNEN/SP, para 5 MW ou 10 MW, em operação contínua, realizaram-se cálculos para avaliar a nossa metodologia de gerenciamento "in-core". O reator referência para os estudos foi o reator francês OSIRIS de 70 MW, que exige uma recarga considerável a cada ciclo de um mês, permitindo assim simular vários ciclos. A sua escolha também foi em função da disponibilidade de dados do núcleo assim como do recarregamento na literatura.

Este trabalho descreve a metodologia de gerenciamento, sendo que os parâmetros analisados foram a queima de descarga, número de elementos combustíveis de recarga e os custos associados, em função do enriquecimento do combustível de recarga.

No que se refere aos custos, fez-se uma análise de sensibilidade do custo anual baseando-se nas necessidades anuais de combustível de recarga para quatro diferentes enriquecimentos de recarga.

DADOS DO REATOR OSIRIS

O combustível do reator OSIRIS é do tipo placa, sendo que cada elemento combustível é composto de 17 placas de combustível. Os elementos de controle, por sua vez, possuem 14 placas de combustível.

O núcleo do reator, ilustrado na Figura 1, forma uma matriz 7 x 7, onde 38 posições são ocupadas por elementos combustíveis, 6 por elementos de controle e 5 por elementos de irradiação. Uma fileira de blocos de Berílio é colocada em uma das faces do núcleo. Detalhes sobre o elemento combustível, o elemento de controle e o núcleo estão descritos no trabalho da referência 1, a ser apresentado neste encontro.

7,0	7,0	5,62	5,62	5,62	7,0	7,0
7,0	4,75	7,0	4,75	7,0	4,75	7,0
7,0	4,75	4,75	@ @ @ @	4,75	4,75	7,0
7,0	@ @ @ @	7,0	4,75	7,0	@ @ @ @	7,0
7,0	4,75	4,75	@ @ @ @	4,75	4,75	7,0
7,0	4,75	7,0	4,75	7,0	4,75	7,0
7,0	5,62	5,62	@ @ @ @	5,62	5,62	7,0
@ @ @ @	@	@	@	@	@	@ @ @ @



El. irradiação



Berílio



El. irradiação



Controle
(ε :enriq)

Figura 1 Núcleo do reator OSIRIS

O reator apresenta 3 zonas de enriquecimento, a saber:

- 15 elementos combustíveis a 4,75 %
- 7 elementos combustíveis a 5,62 %
- 16 elementos combustíveis a 7,0 %
- 6 elementos de controle a 7,0 %

O ciclo de operação do reator é de 28 dias, a plena potência, e parada de 6 dias para manutenção e recarga. Com o valor do fator de multiplicação efetivo, no início do primeiro ciclo, de 1,10579, prevê-se que no fim do ciclo a reatividade final seja nula.

CRITÉRIOS E CONDIÇÕES DE CÁLCULO

Como metas a serem alcançadas foram definidos os seguintes critérios:

- ciclo de operação de 28 dias a plena potência;
- parada de 6 dias para manutenção;
- queima máxima de descarga desejada: 40 MWd/kg;
- enriquecimento máximo de recarga: 10% ;
- excesso de reatividade máxima no início de vida: ~ 10.500 pcm ;
- fator de pico radial máximo: 1,65 ;
- fluxo de nêutrons térmicos e rápidos: $10E14$ n/cm²s.

Os cálculos foram realizados segundo as condições abaixo:

- enriquecimentos de recarga: 7, 8, 9, 10 %;
- excesso de reatividade final do ciclo: 1.000 pcm;
- geometria bidimensional: X-Y ;
- quatro grupos de energia de nêutrons;
- sete passos de queima para cada ciclo de operação.

GERENCIAMENTO DE COMBUSTIVEL

Modelagem do Núcleo. Em cada elemento as placas combustíveis foram homogeneizadas e as placas suporte laterais discretizadas. Adotou-se a geometria bidimensional, X-Y, com 5 divisões espaciais por elemento combustível. Devido a sua heterogeneidade o núcleo foi representado por inteiro.

O cálculo de queima foi efetuado usando 7 passos de queima e 4 grupos de energia de nêutrons, núcleo limpo sem barras absorvedoras, utilizando o programa CITATION [2]. As contantes nucleares foram geradas com o programa HAMMER-TECHNION [3].

Estratégia de Recarga. Visando determinar o enriquecimento de recarga que satisfaça as condições de operação e de segurança e que seja atrativo do ponto de vista neutrônico e econômico, fez-se estudo de estratégia de recarga para quatro enriquecimentos, 7, 8, 9 e 10 % em U-235.

Para cada enriquecimento foram efetuados cálculos de recarga até atingir o ciclo de equilíbrio. A configuração, em cada ciclo, não chegou a ser otimizada, mas escolhida a que satisfizesse as condições impostas no trabalho. A condição de 1.000 pcm deixada para a reatividade final engloba os erros de cálculo, embora no OSIRIS se considere nula a reatividade no fim do ciclo de operação.

A estratégia de recarga adotada consistiu em retirar os combustíveis mais queimados, movendo os elementos menos queimados para a região central e os novos, inseridos nas posições periféricas do núcleo. Esse cuidado deve-se ao fato de que, devido à presença de elementos de irradiação na região central do núcleo e por ser reator de alta densidade de potência, a distribuição de potência é muito sensível à queima de combustível. Isto é, qualquer combustível mais ativo colocado na parte central resulta no aumento do fator de pico, ultrapassando o limite de 1,65. Este problema se acentua por ocasião da troca dos elementos de controle.

Atualmente, nos reatores de potência, adotam-se o esquema de "low leakage" para preservar o vaso de pressão. No caso de reatores produtores de radioisótopos, ao contrário, é interessante que o fluxo de nêutrons seja alto na periferia, principalmente nas posições de irradiação.

Resultados. Para cada enriquecimento de recarga determinou-se o número de novos elementos de recarga, em cada ciclo, até o 10º ciclo, onde já foi alcançado o equilíbrio.

Baseando-se nos resultados do ciclo de equilíbrio, fez-se uma estimativa da necessidade anual de recarregamento, levando em consideração que são necessários aproximadamente 11 ciclos de operação durante um ano.

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos, indicando a queima máxima de descarga, em MWd/kg e o percentual de queima do U-235.

Analisando os resultados notou-se que os enriquecimentos de 8 e 9% apresentam melhor desempenho, em relação ao número de combustível e a queima de descarga.

Tabela 1 Necessidade anual de combustível de recarga

c % recarga	EC/ciclo	Necessidade anual recarga	Queima máxima descarga	
			MWd/kg	% U-235
7	10	92 EC + 18 ECS	23	35
8	8	70 EC + 18 ECS	30	39
9	6	54 EC + 12 ECS	40	45
10	5 a 6	53 EC + 12 ECS	40	41

EC : elemento de combustível

ECS: elemento de controle

(*) : percentual de queima do U-235.

Mas no caso do 9% uma dificuldade a mais foi verificada. Na primeira troca de elementos de controle não se pode inserir os elementos de 9% devido ao problema de fator de pico. Esse fato decorre de os enriquecimentos iniciais serem baixos e os elementos de controle ocuparem posições centrais do núcleo. Mesmo na inserção dos primeiros combustíveis de 9% deve-se tomar muito cuidado na sua localização, pois isto facilmente pode acarretar na superação do limite de segurança do reator. Assim o processo de remanejamento nos primeiros ciclos torna-se mais complexo e é recomendável que o enriquecimento de recarga aumente gradativamente.

Somente após o ciclo 7 os elementos de enriquecimento menor são todos retirados, aproximando-se ao ciclo de equilíbrio, e a queima máxima de descarga é da ordem de 40 Mwd/kg, atingindo o objetivo.

No caso do enriquecimento de 8% o remanejamento se faz com maior folga em relação ao fator de pico, facilitando o processo de recarga, como mostra a Tabela 2. Os maiores fatores de pico correspondem ao ciclo onde foram substituídos os elementos de controle.

Conforme a literatura [4] o recarregamento no reator OSIRIS é da ordem de 1/6 dos elementos do núcleo por ciclo, o que corresponde a cerca de 7 elementos. O enriquecimento de recarga é de 8%. Nota-se portanto que chegamos a resultado muito próximo, pois pelos nossos cálculos, para 8% são necessários 8 elementos por ciclo. Devemos enfatizar que não otimizamos a configuração em cada ciclo, além de deixarmos 1.000 pcm no fim do ciclo. Nas Tabelas 3 e 4 pode-se inteirar da quantidade de combustíveis carregados a cada ciclo e a queima máxima de descarga, para os enriquecimentos acima.

Tabela 2 Fator de Pico

Ciclo	Enriquecimento de recarga			
	8%		9%	
	BOC	EOC	BOC	EOC
1	1,65	1,61	1,65	1,61
2	1,50	1,45	1,49	1,44
3	1,50	1,50	1,58	1,55
4	1,62	1,56	1,55	1,54
5	1,49	1,46	1,61	1,56
6	1,53	1,52	1,61	1,61
7	1,51	1,49	1,62	1,60
8	1,57	1,55	1,64	1,62
9	1,50	1,49	1,59	1,58
10	1,53	1,53	1,63	1,56

BOC: início do ciclo
EOC: fim do ciclo

Tabela 3 Estratégia de recarga para enriquecimento de recarga de 8%

Ciclo	Nº combustível recarga	Queima máxima descarga (Mwd/kg U)
1	-----	6,60
2	6 EC	11,59
3	10 EC	20,67
4	4 EC + 6 ECS	21,10
5	8 EC	24,81
6	8 EC	26,67
7	8 EC	26,96
8	2 EC + 6 ECS	30,57
9	8 EC	31,13
10	8 EC	29,92

EC : elemento combustível
ECS: elemento de controle

Tabela 4 Estratégia de recarga para enriquecimento de recarga de 9%

Ciclo	Nº combustível recarga	Queima máxima descarga (Mwd/kg U)
1	-----	6,60
2	6 EC	11,91
3	8 EC	16,53
4	1 EC + 6 ECS	26,95
5	7 EC	26,24
6	7 EC	27,00
7	7 EC	32,84
8	6 EC	31,07
9	6 EC	34,96
10	6 EC	40,17

EC : elemento combustível
ECS: elemento de controle

CUSTO DE COMBUSTÍVEL

A escolha do enriquecimento de recarga deve ser efetuada em função do desempenho do combustível e do custo associado. Assim, na sequência do trabalho, determinada a necessidade anual de combustível de recarga, estimou-se o custo associado a esses combustíveis.

Os principais custos de um ciclo de combustível que podem contribuir para o custo de combustível são:

- urânio natural;
- conversão;
- enriquecimento;
- reconversão;
- fabricação do elemento combustível;
- transporte;
- estocagem de combustível irradiado;
- reprocessamento;
- crédito de urânio e plutônio recuperados.

Neste trabalho considerou-se somente os 5 primeiros itens fazendo a hipótese de que os elementos irradiados serão estocados na piscina no prédio do reator.

Dados de Custo. Devido à dificuldade de se obter custos nacionais adotou-se custos do mercado livre internacional, retirados da revista NUEXCO [5], de outubro de 1992.

Urânio natural : US\$ 8.75/lb U₃O₈
 Conversão : US\$ 1.40/lb U como UF₆
 Enriquecimento : US\$ 68.0/SWU
 Fabricação : US\$ 8.600 - US\$ 34.400
 (por EC)

Em virtude de não se dispor do custo de fabricação de combustível tipo caramelo, como o de OSIRIS, fez-se uma parametrização dentro do intervalo de preço correspondente a 1-4 vezes o custo de fabricação de elemento padrão tipo placa. Este intervalo foi adotado baseando-se nos estudos de A. Travelli [6], que corresponde a valores de US\$ 8.600 a US\$ 34.000 por EC. Adotou-se, neste estudo, o mesmo custo de fabricação para elementos de controle.

Devido às incertezas nos custos associados a cada etapa do ciclo de combustível, foi proposta uma análise de sensibilidade. Os parâmetros considerados foram os custos de urânio natural, de enriquecimento e de fabricação, sendo que para os dois primeiros, acrescentaram-se ao valor da literatura frações até atingir 100%. No caso de fabricação, onde o desconhecimento é maior, a variação foi de 1 a 4 vezes o da literatura.

Custos. Os resultados obtidos estão ilustrados nas Figuras 2 a 6. A Figura 2 compara os custos de urânio enriquecido associados a um EC e um ECS, diferença esta basicamente devido à diferença de massa de urânio requerida. Já a Figura 3 mostra o custo anual de urânio enriquecido para os quatro enriquecimentos de recarga, baseando-se nas necessidades anuais de combustível dadas na Tabela 1.

Na Figura 4 a influência do custo de fabricação sobre o custo de combustível é apresentada em função do enriquecimento de recarga. Quanto maior o custo de fabricação maior se torna a diferença de custo para menores enriquecimentos, pois está diretamente relacionada com o número de EC de recarga.

Os resultados do cálculo de sensibilidade realizado sobre os preços do urânio natural e da unidade de trabalho separativo (SWU) estão ilustrados nas Figuras 5 e 6, respectivamente.

A incerteza nos custos de urânio natural afeta pouco o custo total de combustível: um erro de 100% no preço de urânio natural resulta em desvios de 5 a 7 % no custo total. Por outro lado a incerteza de 100% no preço de SWU influi na ordem de 17 a 23 % no custo anual.

Neste trabalho foi observado que a incerteza no preço de fabricação do elemento combustível é o maior fator na grande variação do custo anual de combustível de recarga.

Para a determinação dos custos não se levou em consideração o tempo envolvido em cada etapa do ciclo de combustível assim como as taxas de juros associados.

CONCLUSÃO

O processo de remanejamento de combustível em reatores produtores de radioisótopos e em reatores de teste de materiais é mais complexo do que em reator de fluxo de nêutrons e alta densidade de

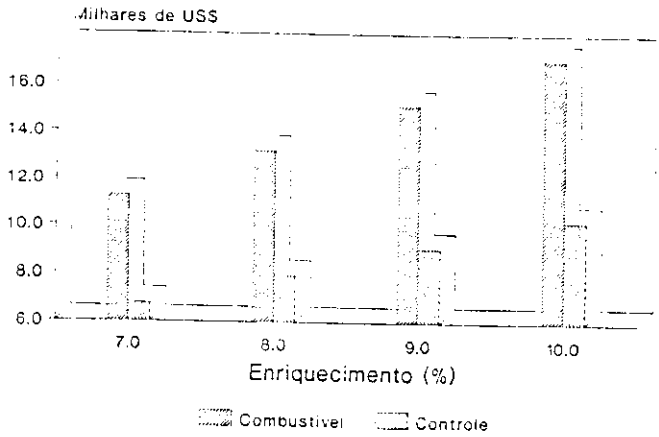


Figura 2 Custo de urânio enriquecido Elemento combustível/control

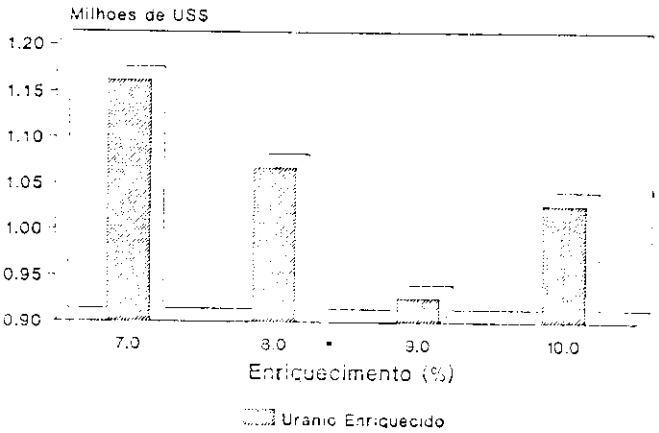


Figura 3 Custo anual de urânio enriquecido

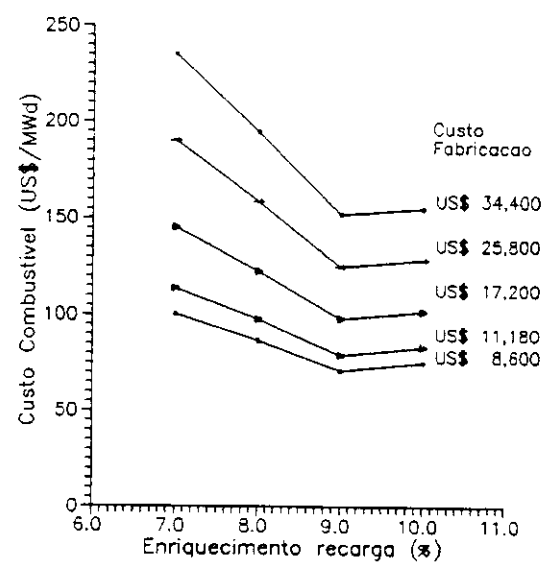


Figura 4 Sensibilidade do custo combustível com o custo de fabricação

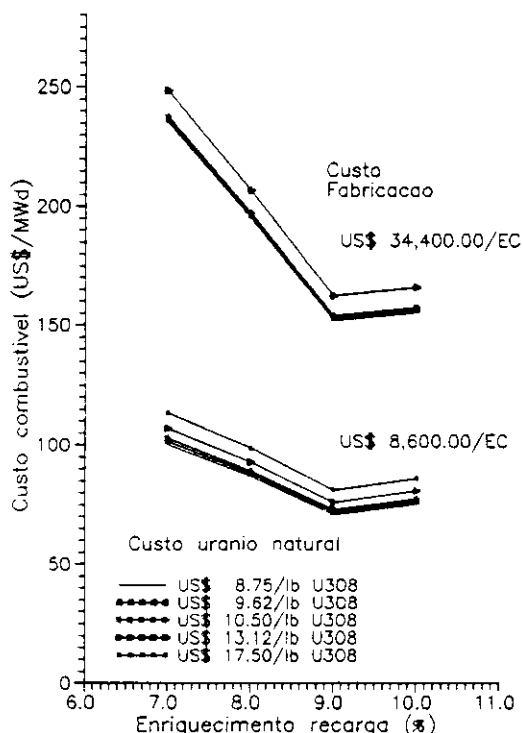


Figura 5 Efeito do custo de urânio natural sobre o custo de combustível.

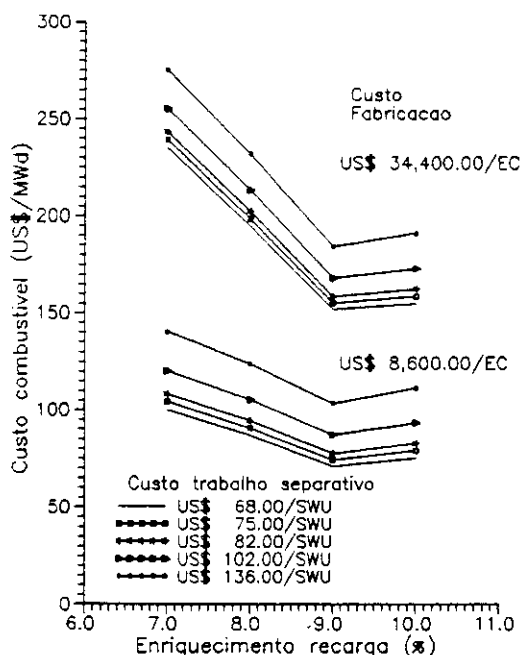


Figura 6 Efeito do custo de trabalho separativo sobre o custo de combustível

potência. A isto se adiciona a heterogeneidade da configuração do núcleo, por conter posições de irradiação nas regiões centrais. Como o fator de pico mostrou-se muito sensível à queima do elemento combustível, deve-se tomar muito cuidado na substituição, principalmente dos elementos de controle.

Para os enriquecimentos de recarga considerados neste estudo, os que mostraram mais eficientes foram os de 8 e 9%. Pela análise do ponto de vista somente econômico, certamente o enriquecimento de 9% apresenta vantagens, mas do ponto de vista neutrônico e de remanejamento, o de 8% mostrou-se mais conveniente. Neste caso, a cada ciclo serão necessários, em média, 8 novos combustíveis. Segundo a literatura, o reator OSIRIS substitui cerca de 7 elementos por ciclo, para enriquecimento de recarga de 8%.

Os nossos programas e a metodologia adotados mostraram-se satisfatórios para estudo de gerenciamento de combustível do reator de alto fluxo.

AGRADECIMENTOS

À seção de Neutrônica da Supervisão de Tecnologia do Núcleo do IPEN-CNEN/SP, pela geração das constantes nucleares. Ao Luiz A. Mai pelo auxílio nos cálculos.

REFERENCIAS

- [1] FANARO, L. C. C. B.; FERREIRA, C. R. Metodologia de cálculo de barras de controle do reator OSIRIS. In: Anais do IX Encontro Nacional de Física de Reatores e Termo-Hidráulica. (Caxambu, MG, Brasil, 25-29 de outubro de 1993).
- [2] BARHEN, J.; ROTHNSTEIN, W.; TAVIV, E. The HAMMER code system. Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, October 1978, (NP-565)
- [3] FOWLER, T. B. et alii. Nuclear reactor core analysis code: CITATION. Oak Ridge National Laboratory. (ORNL-2496 Rev.2-71)
- [4] Osiris. Prospecto técnico emitido pela CEA- Commissariat à l'Énergie Atomique.
- [5] NUEXCO Monthly Report (290). October 1992.
- [6] TRAVELLI, A. The effect of reduced enrichment on the fuel cycle for research reactor. Transaction of American Nuclear Society, 40:264-266, 1982.

ABSTRACT

The fuel burnup and loading strategies for the OSIRIS reactor have been studied in order to evaluate IPEN-CNEN/SP in-core fuel management methods. The calculational system is based on HAMMER-TECHNION and CITATION codes. Annual fuel costs are computed for different fuel enrichments. The results indicate that the 8% enriched fuel is more convenient for the equilibrium cycle, when 8 fuel elements are refueled at each cycle.