

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE COMBUSTÍVEIS REPROCESSADOS POR TÉCNICAS DE BAIXO GRAU DE DESCONTAMINAÇÃO QUANDO RECICLADOS EM REATORES P.W.R.

Cláudia Pereira e Euzimar M. Leite

Departamento de Engenharia Nuclear - Escola de Engenharia - UFMG

Av. Contorno 842, 9o. Andar, Centro
30110-060 Belo Horizonte - MG
email - claudia@nuclear.ufmg.br

RESUMO

A utilização do ciclo fechado de combustível é uma realidade, seja para minimizar o impacto ambiental resultante do armazenamento do combustível queimado, seja para reaproveitamento de material físsil. Entretanto, as técnicas de reprocessamento convencionais, tais como o PUREX, estão sempre associadas a riscos de proliferação. Como resultado, métodos de reprocessamento alternativos com características de baixo grau de descontaminação e coextração de urânio e plutônio têm sido propostos. Neste trabalho, os combustíveis reprocessados pelas técnicas AIROX e Coprocessamento, ambas técnicas não-proliferantes, são avaliados quanto à queima, comportamento neutrônico e impacto ambiental.

Descritores: Ciclo de Combustível, Depleção, Combustíveis Alternativos.

ABSTRACT

The use of the close fuel cycle is a fact, as to minimize the environmental impact resulting of the radioactive waste, as to optimize fuel cycle costs. Nevertheless, the proliferation risks are always associated with conventional reprocessing techniques, such as the PUREX. As a result, alternative reprocessing methods with low-grade decontamination and uranium-plutonium coextraction characteristics are being proposed. In this work, the fuels reprocessed by AIROX and Coprocessing - both alternative non-proliferating techniques - are evaluated as for burning, neutronic behavior and environmental impact.

Key words: Fuel Cycle, Depletion, Alternative Fuels.

INTRODUÇÃO

A necessidade de otimizar os limitados recursos mundiais de minério de urânio e de minimizar o volume de rejeitos altamente radioativos produzidos nos reatores durante a geração de energia elétrica^{1,2} tem levado muitos países a adotarem o reprocessamento do combustível irradiado e a reciclagem da fração de isótopos físsis não queimada.

A idéia de reciclar o plutônio produzido na operação dos reatores surgiu juntamente com os programas nucleares, com a concepção dos reatores rápidos regeneradores (FBR). Entretanto, previsões de demora no desenvolvimento tecnológico dos FBR e, mais ultimamente, os problemas de segurança apresentados pelos mesmos, vêm estimulando

a reciclagem de Pu em reatores LWR. A tendência atual é um aumento da queima acompanhada pela reciclagem de plutônio através do reprocessamento do combustível. Diversos países, incluindo a Bélgica, França, Alemanha, Japão e Suíça, vêm usando efetivamente combustíveis de óxidos mistos de urânio e plutônio (MOX) em reatores LWR^{3, 4, 5}. O processo usado é o PUREX, caracterizado pela separação e purificação dos óxidos de urânio e plutônio, vinculado à proliferação de armas nucleares. Neste contexto, os métodos de reprocessamento de baixo nível de descontaminação vêm viabilizar a reciclagem de combustíveis nucleares. Entre esses métodos, pode-se citar o Coprocessamento^{6, 7, 8} e o AIROX^{9, 10}. Essas técnicas de reprocessamento também fazem

parte dos ciclos avançados propostos para reatores tipo CANDU. O reprocessamento tipo AIOX é adotado dentro do ciclo DUPIC e o Coprocessamento no Ciclo TANDEM. Em qualquer caso, o objetivo principal é a queima do plutônio, através de sua inserção no núcleo de reatores cuja tecnologia é dominada, sem que haja modificações no desenho do reator, aproveitando ao máximo seu potencial físsil, utilizando técnicas não-proliferantes. Deve-se ressaltar também que existem diversos problemas técnicos e econômicos relacionados com ambas as técnicas estudadas. Possivelmente, a escolha entre ambas será mais de cunho político do que de custo propriamente dito, em função da importância da defesa do meio ambiente nos últimos anos.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é, uma vez feita a opção por não-proliferação, verificar a viabilidade técnica a nível neutrônico da inserção destes combustíveis em um reator tipo PWR. O intuito não é mostrar se existe vantagens entre as técnicas alternativas sobre a PUREX, mas se há possibilidade de utilização das mesmas. Assim, apresentaremos um estudo de depleção e análise neutrônica destes combustíveis, verificando suas características quando comparados ao combustível convencional e ao combustível MOX, proveniente de reprocessamento PUREX, cuja utilização já é um fato nas plantas européias e no Japão.

PREPARAÇÃO, MODELAMENTO E CONDIÇÕES DE IRRADIAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS

Com o objetivo de estudar os ciclos propostos, obteve-se a caracterização do combustível padrão, UO_2 , após a queima em uma central tipo ANGRA-I. Utilizou-se um enriquecimento inicial de 3,1% e evoluiu-se no código ORIGEN2.1^{11,12,13} por três ciclos com queima aproximada de 11.000 MWd/T por ciclo com densidade de potência média de 37,75 MW/TU. Assim foi obtida a composição do material irradiado para ser usado como base na produção dos combustíveis reprocessados.

Com o objetivo de obter uma melhor avaliação quanto ao tempo de resfriamento, o combustível irradiado foi submetido à diferentes tempos de armazenamento em piscina (3, 5 e 7 anos) antes de passar à etapa de reprocessamento. Finalmente, o combustível é reprocessado por uma das seguintes técnicas:

a) PUREX - Extrai-se 99,9% do Plutônio presente no combustível irradiado. O combustível MOX é então preparado diluindo-se o Plutônio em

Urânio deplecionado (0,3%) até obter-se nível de enriquecimento físsil de 3,1%;

b) Coprocessamento - Coextração de 99,99% de Urânio e 99,90% de Plutônio presente. São extraídos também 95% de Np, 0,1% de Am, Cm, Ce e Nd, 1,2% de Ru e 1,6% de Zr. Posteriormente é realizada a adição de Urânio enriquecido a 20% para reposição do teor físsil de 3,1%;

c) AIOX - Remoção de 100% de 3H , Kr, Xe, I e C, 90% de Cs e Ru e 75% de Te e Cd. Adiciona-se Urânio enriquecido a 20% para reposição do teor físsil de 4,5%. Este enriquecimento foi utilizado por apresentar características neutrônicas melhores que o AIOX enriquecido a 3,1%¹⁴.

As tabelas 1, 2 e 3 apresentam a composição a BOL ("Beginning Of Life") do combustível preparado pela técnica PUREX, AIOX e Coprocessamento, respectivamente, na primeira reciclagem, utilizando-se 5 anos de resfriamento em piscina.

Tabela 1 - Composição do Combustível Preparado pela Técnica PUREX.

Nuclídeo	% (Peso)	Nuclídeo	% (Peso)
^{235}U	0,29	^{240}Pu	0,76
^{238}U	95,79	^{241}Pu	0,57
^{236}Pu	$1,61 \times 10^{-7}$	^{242}Pu	0,28
^{238}Pu	$8,11 \times 10^{-2}$	^{244}Pu	$1,03 \times 10^{-5}$
^{239}Pu	2,25		

Tabela 2 - Composição do Combustível Preparado pela Técnica AIOX.

Nuclídeo	% (Peso)	Nuclídeo	% (Peso)
Zr	0,228	^{236}U	0,33
Nd	0,289	^{238}U	92,9
Mo	0,207	^{237}Np	$3,91 \times 10^{-2}$
Tc	$6,56 \times 10^{-2}$	^{238}Pu	$1,43 \times 10^{-2}$
Pr	$9,34 \times 10^{-2}$	^{239}Pu	0,40
Ce	0,199	^{240}Pu	0,13
La	0,102	^{241}Pu	$9,97 \times 10^{-2}$
Ba	0,107	^{242}Pu	$4,84 \times 10^{-2}$
4He	$1,04 \times 10^{-4}$	^{241}Am	$3,25 \times 10^{-2}$
^{234}U	$1,31 \times 10^{-2}$	^{243}Am	$9,20 \times 10^{-3}$
^{235}U	4,01	^{243}Cm	$3,83 \times 10^{-5}$

Tabela 3 - Composição do Combustível Preparado pela Técnica Coprocessamento.

Nuclídeo	% (Peso)	Nuclídeo	% (peso)
Zr	$5,33 \times 10^{-3}$	^{239}Pu	0,442
Ru	$2,48 \times 10^{-3}$	^{240}Pu	0,149
Ce	$1,19 \times 10^{-4}$	^{241}Pu	0,112
^{232}U	$1,25 \times 10^{-7}$	^{242}Pu	$5,42 \times 10^{-2}$
^{233}U	$1,96 \times 10^{-7}$	^{241}Am	$3,64 \times 10^{-5}$
^{234}U	$1,46 \times 10^{-2}$	^{242}Am	$1,40 \times 10^{-7}$
^{235}U	2,546	^{243}Am	$1,03 \times 10^{-5}$
^{236}U	0,374	^{243}Cm	$4,29 \times 10^{-8}$
^{238}U	96,24	^{244}Cm	$2,27 \times 10^{-6}$
^{237}Np	$4,16 \times 10^{-2}$	^{245}Cm	$9,56 \times 10^{-8}$
^{238}Pu	$1,60 \times 10^{-2}$		

Com a finalidade de obter parâmetros que possibilitem uma melhor comparação entre as técnicas propostas, são fabricados 1000 Kg de cada um dos combustíveis a cada reciclagem. Portanto, na etapa de fabricação do combustível, pode ser gerado rejeito ou ser necessário uma quantidade de material extra. Estas informações são apresentadas nas tabelas 4 e 5.

Tabela 4 - Quantidade de Material de Reposição do Teor Físsil Inserido a cada Reciclagem (Kg)

	AIROX	COP	PUREX
1	167,639	90,791	960,748
2	133,637	92,479	946,038
3	133,856	92,018	920,672
4	133,788	91,454	879,039
5	133,645	90,952	819,150

Tabela 5 - Rejeito Gerado durante o Processo de Fabricação do Combustível a cada Reciclagem (Kg)

	AIROX	COP	PUREX ^a
1	157,139	55,392	31,080
2	122,537	56,379	35,633
3	122,551	56,618	51,668
4	122,488	54,954	76,441
5	122,245	54,252	107,680

a - No caso do Combustível MOX os valores se referem a quantidade de material extra de mesma composição.

Após a etapa de produção do combustível, este é evoluído a 33.000 MWd/T utilizando o código ORIGEN2.1 para cálculos de depleção. Para tanto, seguiu-se o histórico de potência real dos ciclos 1, 2 e 3 de ANGRA-I¹⁵.

Após a queima, o combustível é novamente resfriado e enviado à etapa de reprocessamento. Este procedimento é repetido por cinco vezes consecutivas com a finalidade de estudar os efeitos da multiplareciclagem. O esquema proposto é apresentado na Figura 1.

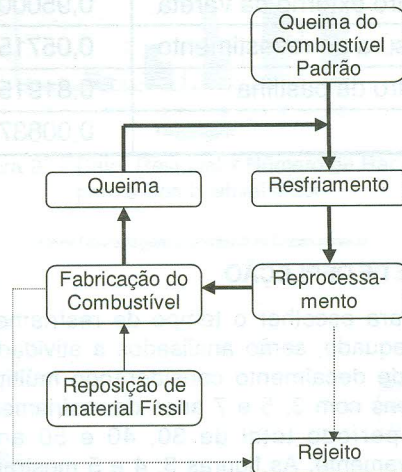
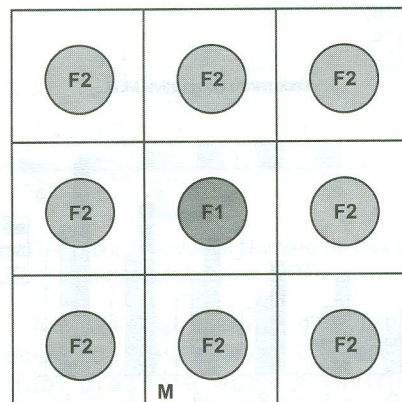


Figura 1 - Esquema de Reciclagem Proposto.

Na análise neutrônica, com o objetivo de melhor simular o núcleo do reator, onde inicialmente pretende-se inserir 1/3 de combustível reprocessado, optou-se pela geometria tipo "cluster", conforme mostrada na Figura 2. Além disso, considerou-se também, sempre que citado, uma concentração de Boro média de 600 ppm.



F1 - Combustível a ser analisado.

F2 - Combustível padrão.

M - Moderador.

Figura 2 - Representação Tipo Cluster.

Para os cálculos, considerou-se o fato de que cada célula é composta de combustível, "gap" (preenchido com Hélio), revestimento (Zircaloy-4) e refrigerante. Esta geometria é detalhada na Tabela 6.

Tabela 6 - Dimensões da Célula Combustível

Item	Dimensões (cm)
Passo	1,2319
Diâmetro externo da vareta	0,95000
Espessura do revestimento	0,05715
Diâmetro da pastilha	0,81915
"gap"	0,008375

ANÁLISE DE DEPLEÇÃO

Para escolher o tempo de resfriamento mais adequado, serão analisados a atividade e o calor de decaimento considerando múltiplas reciclagens com 3, 5 e 7 anos de resfriamento, em um período total de 30, 40 e 50 anos, respectivamente. As figuras 3, 4 e 5 mostram a evolução da atividade em função do número de reciclagens após os diferentes tempos de resfriamento em piscina para os combustíveis MOX, AIOX e Coprocessamento, respectivamente. Nota-se que quanto maior o tempo de resfriamento menor será a atividade total após o período de resfriamento, e que o maior acréscimo de atividade é encontrado no combustível MOX, devido ao alto teor de actínides presentes.

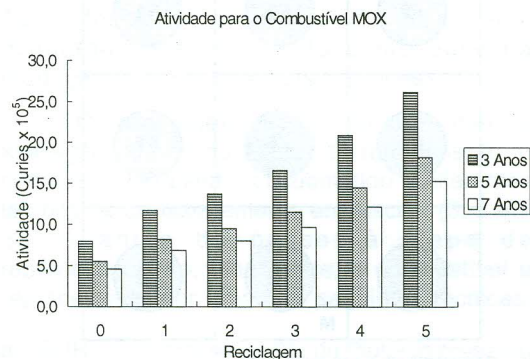


Figura 3 - Atividade x Número de Reciclagens para o Combustível MOX.

Atividade para o Combustível Coprocessado

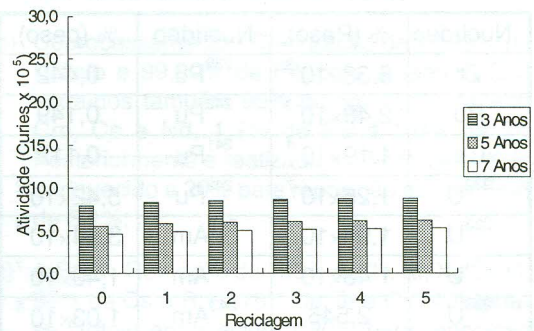


Figura 4 - Atividade x Número de Reciclagens para o Combustível Coprocessado.

Atividade para o Combustível AIOX

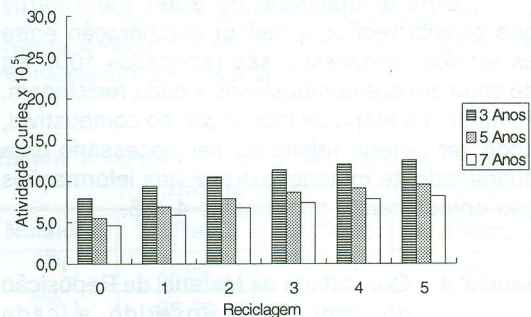


Figura 5 - Atividade x Número de Reciclagens para o Combustível AIOX.

Analisando-se estes gráficos nota-se que, em termos de atividade, tanto para o combustível proveniente da técnica de Coprocessamento quanto para o AIOX, a diferença entre os tempos de resfriamento (3, 5 ou 7 anos) é pequena. Entretanto, para o MOX, essa diferença é acentuada ao passar-se de 3 para 5 anos. Os resultados sugerem ainda um tempo de resfriamento maior para esta técnica, apesar de nas bibliografias a maioria do tempo de resfriamento usado é de 5 anos.

As figuras 6, 7 e 8 apresentam o inventário de actínides menores (Np, Cm e Am) após 3, 5 e 7 anos de resfriamento, respectivamente, para cada uma das técnicas de reprocessamento após os diferentes tempos de resfriamento.

Inventário de Actinídeos Menores para o Combustível MOX

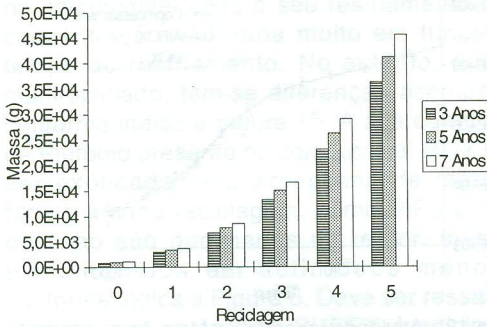


Figura 6 - Actinídeos Menores x Número de Reciclagens para o Combustível MOX.

Inventário de Actinídeos Menores para o Combustível Coprocessado

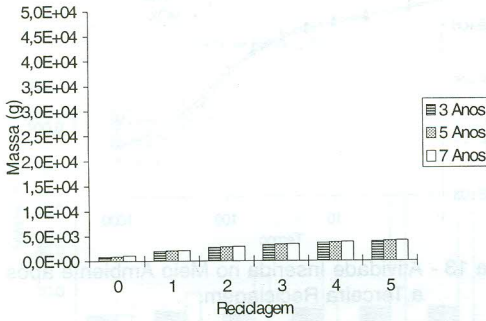


Figura 7 - Actinídeos Menores x Número de Reciclagens para o Combustível Coprocessado.

Inventário de Actinídeos Menores para o Combustível AIOX

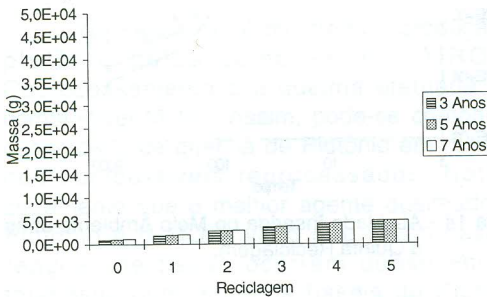


Figura 8 - Actinídeos Menores x Número de Reciclagens para o Combustível AIOX.

Como era de se esperar, o combustível MOX apresenta alto teor de actinídeos menores quando multireciclado, devido ao acréscimo substancial do teor de plutônio que produz, via captura radioativa, seguido de decaimento β^- , maior quantidade de Am, Cm e Np.

As figuras 9, 10 e 11 mostram o calor residual dos materiais em função do tipo de reprocessamento para os combustíveis MOX, AIOX e Coprocessamento, respectivamente.

Calor Residual para o Combustível MOX

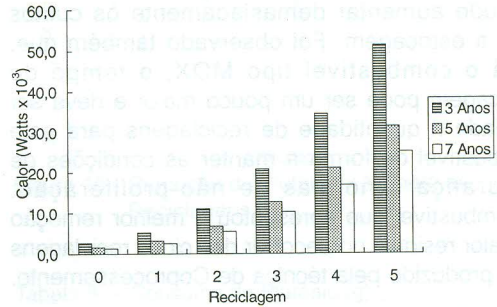


Figura 9 - Calor Residual x Número de Reciclagens para o Combustível MOX.

Calor Residual para o Combustível Coprocessado

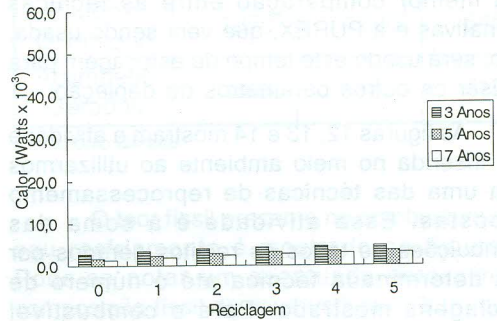


Figura 10 - Calor Residual x Número de Reciclagens para o Combustível Coprocessado.

Calor Residual para o Combustível AIOX

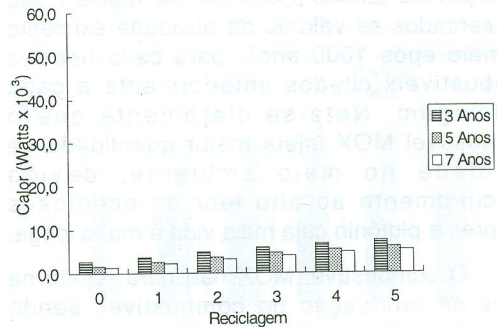


Figura 11 - Calor Residual x Número de Reciclagens para o Combustível AIOX.

Nota-se que para o combustível reprocessado pela técnica PUREX, o calor residual presente após o resfriamento aumenta substancialmente no decorrer das reciclagens, enquanto que os combustíveis alternativos apresentam um comportamento praticamente constante.

Pode-se notar, com base nos gráficos apresentados, que do ponto de vista de remoção do calor residual e atividade do combustível irradiado, o tempo de resfriamento de 5 anos é suficiente para facilitar a manipulação do combustível na planta de reprocessamento sem contudo aumentar demasiadamente os custos com a estocagem. Foi observado também que, para o combustível tipo MOX, o tempo de estocagem pode ser um pouco maior e deve ser avaliada a quantidade de reciclagens para este combustível de forma a manter as condições de segurança e normas de não-proliferação. O combustível que apresentou a melhor remoção de calor residual no decorrer das cinco reciclagens foi o produzido pela técnica de Coprocessamento.

Portanto, o tempo de resfriamento de 5 anos é o que apresenta melhor relação custo benefício do ponto de vista de depleção do combustível, além de ser um tempo que permite uma melhor comparação entre as técnicas alternativas e a PUREX, que vem sendo usada. Logo, será usado este tempo de estocagem para analisar os outros parâmetros de depleção.

As figuras 12, 13 e 14 mostram a atividade total inserida no meio ambiente ao utilizarmos cada uma das técnicas de reprocessamento propostas. Essa atividade é a soma das contribuições de todos os rejeitos gerados por uma determinada técnica até o número de reciclagens mostrado. Para o combustível padrão, esse cálculo foi efetuado levando-se em conta a soma das atividades em cada processo de queima se não tivéssemos optado pelo combustível reciclado. Para uma melhor avaliação em termos absolutos, na Tabela 7 são apresentados os valores da atividade existente no meio após 1000 anos, para cada um dos combustíveis citados anteriormente a cada reciclagem. Nota-se claramente que o combustível MOX injeta maior quantidade de atividade no meio ambiente, devido principalmente ao alto teor de actínídeos menores e plutônio cuja meia vida é muito longa.

O combustível MOX não gera rejeito na etapa de fabricação do combustível, sendo necessária uma quantidade de material extra para se produzir 1 tonelada de combustível (conforme descrito na Tabela 5). Entretanto, quando submetido a mais de três reciclagens, apresenta elevados valores de calor residual, actínídeos menores e atividade após o seu resfriamento. Na Tabela 7, nota-se que após ser submetido a 3 reciclagens a atividade presente no meio após 1000 anos de estocagem apresenta valores elevados.

Atividade Total Inserida no Meio Ambiente ao Final da Primeira Reciclagem

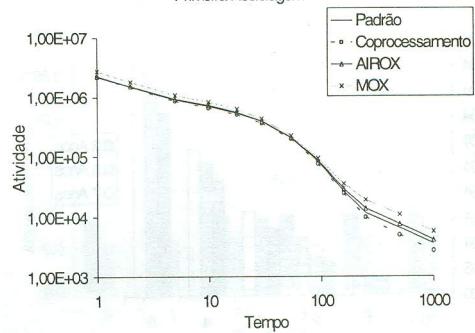


Figura 12 - Atividade Inserida no Meio Ambiente após a Primeira Reciclagem.

Atividade Total Inserida no Meio Ambiente ao Final da Terceira Reciclagem

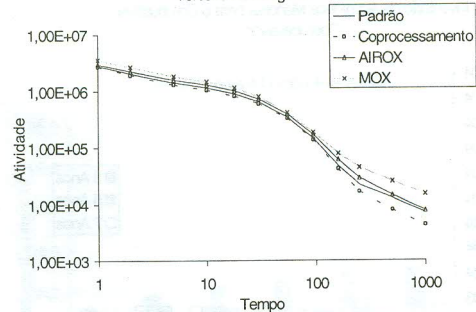


Figura 13 - Atividade Inserida no Meio Ambiente após a Terceira Reciclagem.

Atividade Total Inserida no Meio Ambiente ao Final da Quinta Reciclagem

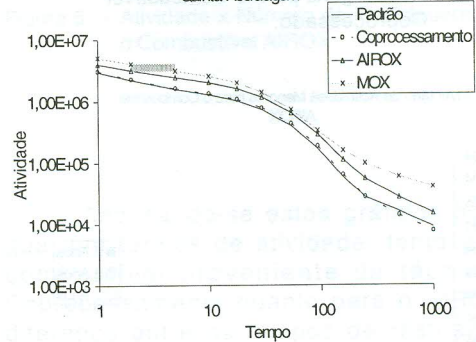


Figura 14 - Atividade Inserida no Meio Ambiente após a Quinta Reciclagem.

Tabela 7 - Atividade Inserida no Meio após 1000 anos de Estocagem ($\times 10^3$ Curies)

	AIOX	COP	MOX	Padrão
1	3,83	2,67	1,45	3,60
2	6,04	3,47	4,15	5,37
3	7,16	4,05	9,53	7,14
4	10,99	6,80	18,55	8,89
5	13,52	7,69	32,50	10,62

Outro importante aspecto a ser acompanhado é o teor de Plutônio presente no combustível após o seu resfriamento. Esta concentração não varia muito em função do tempo de resfriamento. No entanto, quando multireciclado, têm-se diferenças acentuadas, conforme indica a Figura 15. A alta quantidade de Plutônio presente no combustível MOX pode ser explicada pelo acréscimo de isótopos férteis a cada reciclagem, como ^{238}Pu e ^{240}Pu , que não são queimados no reator, mas sim transmutados em actínídeos menores, conforme indica a Figura 6. Deve ser ressaltado também que na técnica PUREX é adicionada uma quantidade de Plutônio extra para se obter uma tonelada de material, em acordo com a Tabela 5.

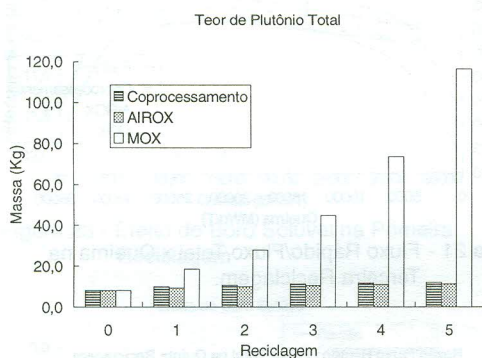


Figura 15 - Teor de Plutônio Total x Número de Reciclagens.

Na Figura 16, é mostrada a produção de plutônio pelos combustíveis AIROX e Coprocessamento e a queima efetuada pelo combustível MOX. Assim, pode-se comparar a capacidade de queima de Plutônio em cada um dos combustíveis reprocessados. Nota-se claramente que o melhor agente queimador de Plutônio é o MOX, visto que neste caso as reações de fissão ocorrem quase em sua totalidade com isótopos férteis do Plutônio. O combustível AIROX apresenta uma queima de plutônio inferior ao combustível Coprocessado. O Plutônio presente no combustível pode ser consumido basicamente de duas formas. A primeira, através da fissão, e a segunda, através da captura radioativa gerando actínídeos menores cuja meia vida é muito longa. A Tabela 8 mostra o consumo de Plutônio na quinta reciclagem para os combustíveis propostos, utilizando-se 5 anos de resfriamento.

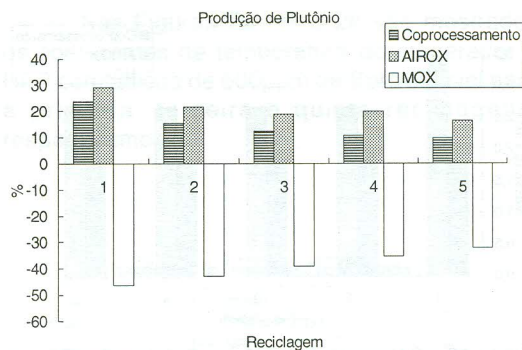


Figura 16 - Produção de Plutônio x Número de Reciclagens

Tabela 8 - Consumo de Plutônio (g)

	AIROX	COP	PUREX
Plutônio Inicial	9610	11100	181000
Plutônio Queimado	1870 ^a	1290 ^a	64500
Actínídeos Gerados	2850	3770	41200

a - Plutônio Gerado.

O teor fissil presente no combustível após seu resfriamento é mostrado na Figura 17. Pode-se notar um acentuado acréscimo na composição fissil do combustível AIROX, devido ao fato de trabalharmos com 4,5%. No combustível Coprocessado e MOX, o teor fissil mantém-se praticamente constante.

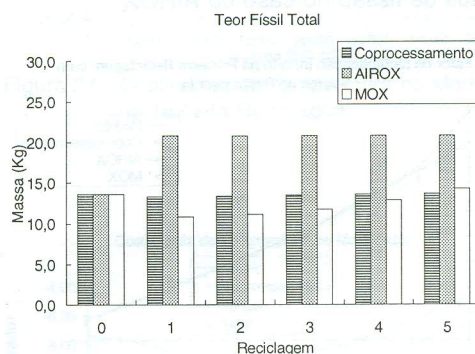


Figura 17 - Teor Fissil Total x Número de Reciclagens

A quantidade de ^{235}U adicionada para reposição do teor em cada ciclo é apresentada na Figura 18, onde podemos notar que o combustível AIROX necessita de uma maior quantidade deste elemento, devido ao fato de seu enriquecimento ser maior.

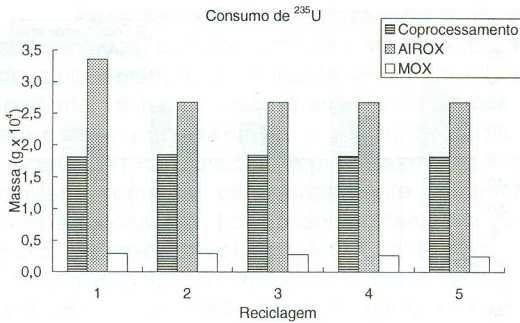


Figura 18 - Consumo de ²³⁵U para Fabricação do Combustível.

Como a queima do combustível MOX é baseada quase em sua totalidade nos isótopos fissíveis do Plutônio, não temos uma grande demanda de ²³⁵U neste caso.

ANÁLISE NEUTRÔNICA

Os parâmetros neutrônicos foram calculados com o código WIMSD-4 e são apresentados em função da queima para os combustíveis AIROX, Coprocessamento, MOX e Padrão.

O fator de multiplicação infinito (k_{∞}) a HFP (Hot Full Power) sem inserção de Boro solúvel é mostrado na Figura 19. Nesta figura, nota-se que o valor inicial do fator de multiplicação é menor para os combustíveis alternativos, entretanto, eles terminam a queima com valor semelhante ao padrão. Este decréscimo inicial nos combustíveis reprocessados é explicado, em grande parte, pela presença significativa de isótopos férteis de Plutônio e Urânio nestes combustíveis e de produtos de fissão no caso do AIROX.

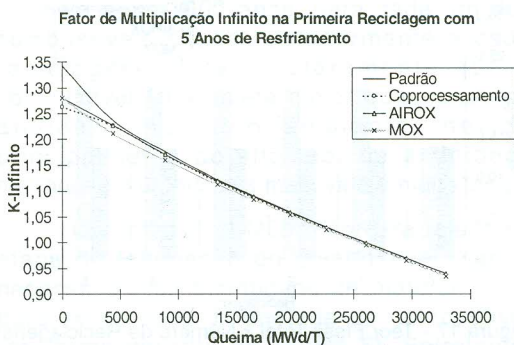


Figura 19 - Fator de Multiplicação Infinito.

Nas Figuras 20, 21 e 22 são apresentadas as razões de fluxo rápido para fluxo total dos casos analisados a HFP e sem a adição de Boro solúvel para a primeira, terceira e quinta reciclagens, respectivamente.

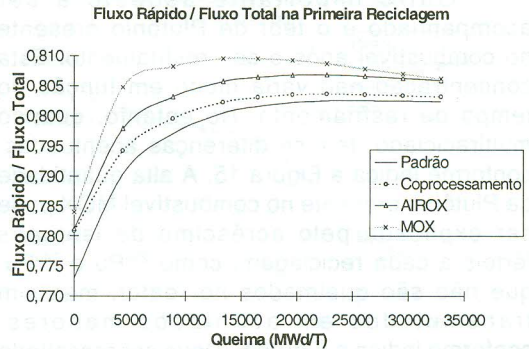


Figura 20 - Fluxo Rápido/Fluxo Total x Queima na Primeira Reciclagem.

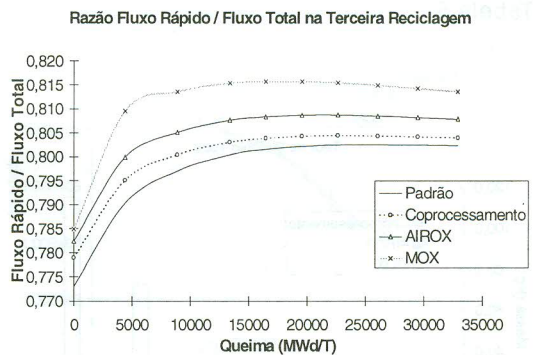


Figura 21 - Fluxo Rápido/Fluxo Total x Queima na Terceira Reciclagem.

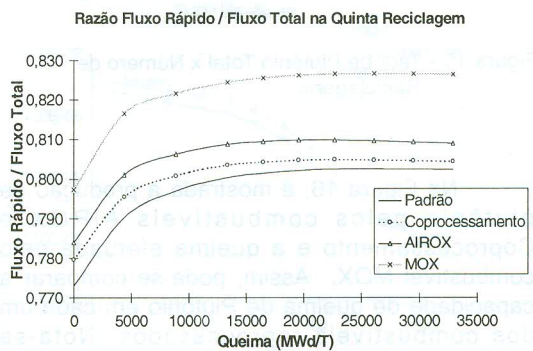


Figura 22 - Fluxo Rápido/Fluxo Total x Queima na Quinta Reciclagem.

Nota-se claramente o endurecimento do espectro durante a queima. Este endurecimento é uma consequência do alto teor de Plutônio e de actínides menores, sendo portanto inicialmente mais pronunciado nos combustíveis MOX. Devido a alta queima do Plutônio no MOX, o espectro torna-se menos endurecido ao final da queima. Entretanto, considerando reciclagens posteriores, verifica-se um endurecimento mais pronunciado deste combustível, em concordância com as Figuras 6 e 15.

Um dos parâmetros que são alterados devido ao endurecimento do espectro é o efeito do boro solúvel mostrado nas Figuras 23, 24 e 25 para 600 ppm de Boro a HFP para a primeira, terceira e quinta reciclagens, respectivamente. Nota-se claramente que este é um efeito negativo do endurecimento do espectro dos combustíveis reprocessados quando comparados ao combustível padrão visto que é necessária uma maior concentração de Boro para provocar uma mesma mudança de reatividade. Entretanto, para os combustíveis alternativos, AIOX e Coprocessamento, o efeito do Boro solúvel apresenta-se mais negativo que para o combustível MOX.

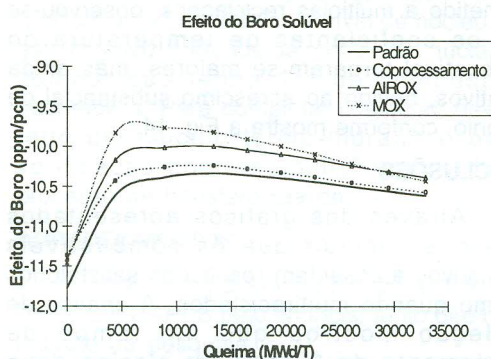


Figura 23 - Efeito do Boro Solúvel na Primeira Reciclagem

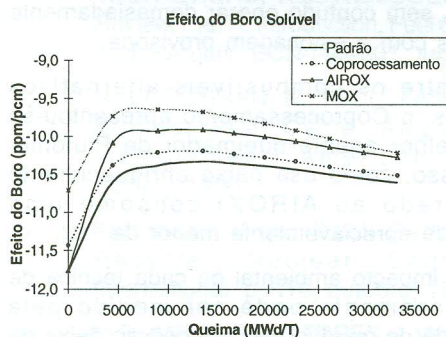


Figura 24 - Efeito do Boro Solúvel na Terceira Reciclagem

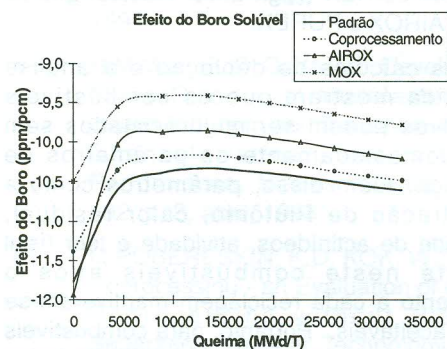


Figura 25 - Efeito do Boro Solúvel na Quinta Reciclagem

Nas Figuras 26, 27 e 28 são mostrados os coeficientes de temperatura do moderador a HFP com adição de 600ppm de Boro solúvel para a primeira, terceira e quinta reciclagens, respectivamente.

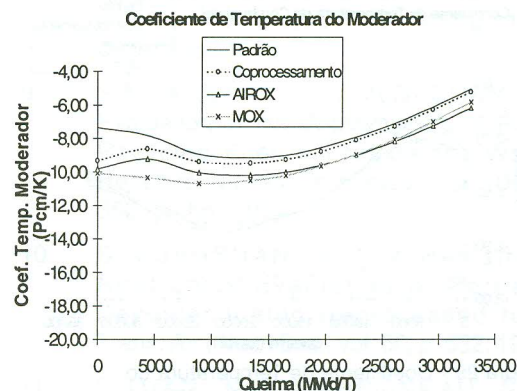


Figura 26 - Coeficiente de Temperatura do Moderador na Primeira Reciclagem.

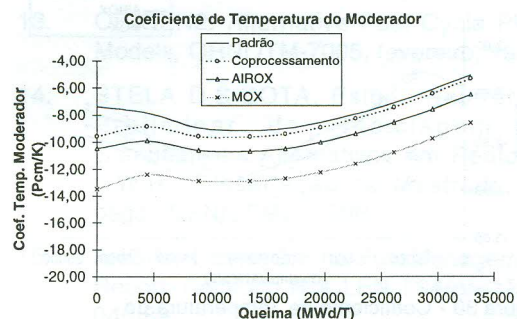


Figura 27 - Coeficiente de Temperatura do Moderador na Terceira Reciclagem.

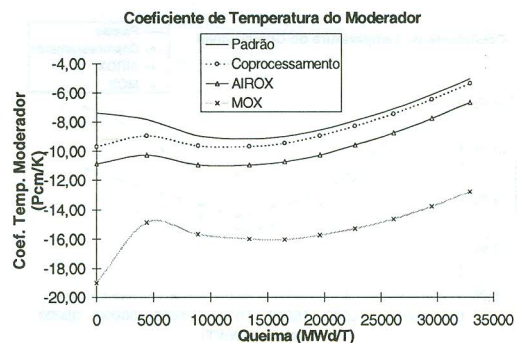


Figura 28 - Coeficiente de Temperatura do Moderador na Quinta Reciclagem.

Nas Figuras 29, 30 e 31 são mostrados os coeficientes de temperatura do combustível a HFP com adição de 600ppm de Boro solúvel para a primeira, terceira e quinta reciclagens, respectivamente.

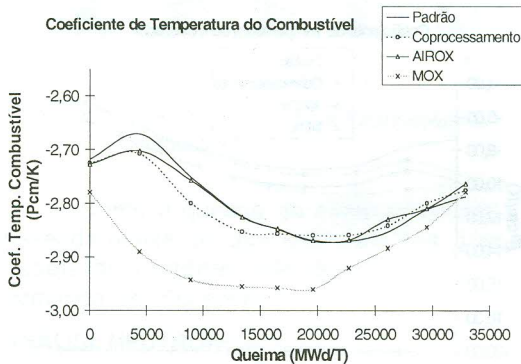


Figura 29 - Coeficiente de Temperatura do Combustível na Primeira Reciclagem.

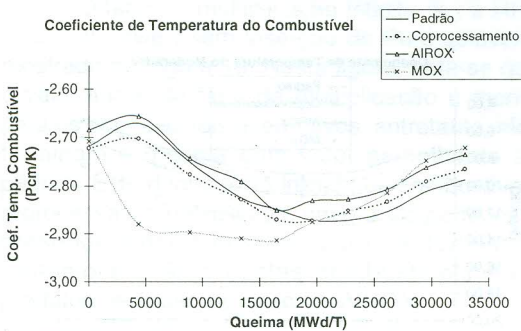


Figura 30 - Coeficiente de Temperatura do Combustível na Terceira Reciclagem.

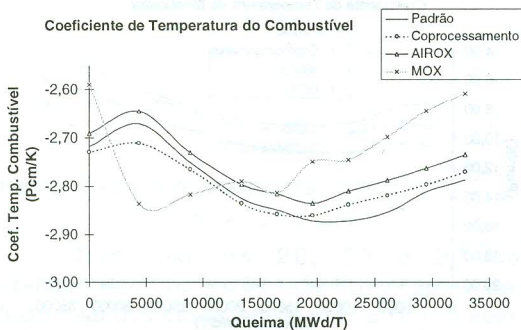


Figura 31 - Coeficiente de Temperatura do Combustível na Quinta Reciclagem.

Pode ser visto que os combustíveis alternativos têm valores de coeficientes de temperatura do moderador intermediários ao padrão e ao MOX e que todos os valores são negativos, satisfazendo os requisitos de segurança. Além disso, os coeficientes são mais negativos para o combustível AIOX.

Não houve grandes mudanças nos valores destes coeficientes quando submetidos à múltiplas reciclagens no caso dos combustíveis alternativos. No caso do coeficiente de temperatura do moderador, este torna-se mais negativo no decorrer das reciclagens.

Já no caso do combustível MOX, quando submetido à múltiplas reciclagens, observou-se que os coeficientes de temperatura do combustível tornaram-se maiores, mas ainda negativos, devido ao acréscimo substancial de Plutônio, conforme mostra a Fig. 14.

CONCLUSÕES

Através dos gráficos apresentados podemos concluir que os combustíveis alternativos apresentam resultados satisfatórios mesmo quando multireciclados. A análise de depleção mostrou que um tempo de resfriamento de 5 anos em piscina deve satisfazer as necessidades de reduzir a alta atividade e o calor de decaimento do combustível irradiado, sem contudo onerar demasiadamente os custos com a estocagem provisória.

Entre os combustíveis alternativos propostos, o Coprocessamento apresentou-se como melhor agente queimador de Plutônio. Além disso, como usa baixo enriquecimento (comparado ao AIOX) consome uma quantidade apreciavelmente menor de ^{235}U .

O impacto ambiental de cada técnica de reprocessamento pode ser medido pela quantidade de resíduo que o processo deixa de injetar no meio ambiente. Deste ponto de vista a técnica de Coprocessamento produz menor quantidade de HLW (High Level Wastes) que as técnicas AIOX e PUREX.

Os cálculos de depleção e a análise neutrônica mostram que os combustíveis alternativos podem ser multireciclados sem afetar demasiadamente os parâmetros de segurança. Além disso, parâmetros como a concentração de Plutônio, calor residual, quantidade de actídeos, atividade e teor fissil presente neste combustíveis após o resfriamento a cada reciclagem mantiveram-se a níveis aceitáveis. Portanto, para combustíveis alternativos provenientes de técnicas de baixo

grau de descontaminação, tais como AIROX e Coprocessamento, pode-se efetuar um número superior de reciclagens. O combustível produzido pela técnica PUREX, quando submetido a múltiplas reciclagens, apresentou elevado acréscimo da quantidade de Plutônio e de actínídeos menores, causando um aumento excessivo nos valores de calor residual e atividade presentes após o resfriamento, principalmente a partir da terceira reciclagem. Assim, o combustível MOX tem a quantidade de reciclagens sucessivas limitada.

Para se ter uma visão completa do comportamento desses combustíveis é necessário efetuar um estudo que obtenha a sua "performance" neutrônica a nível de núcleo. Com este objetivo, pretende-se montar um núcleo cuja composição tenha 1/3 de combustíveis alternativos. Para completar o estudo, deve ser feito um cálculo termo-hidráulico para a verificação dos "setpoints" envolvidos no processo de transferência de calor.

AGRADECIMENTOS

Nossos agradecimentos à FAPEMIG, ao CNPq e à CAPES pelo financiamento direto e/ou indireto da pesquisa.

REFERÊNCIAS

1. V.A.WICHERS, R.J. HEIJBOER, INFCE Review, Part A: Introduction, Fuel Cycles and Technologies, ECN-I-93-001, junho, 1993.
2. R.G.COCHRAN, N. TSOULFANIDIS, The Nuclear Fuel Cycle: Analysis and Management, American Nuclear Society, 1990.
3. Japanese Plan: Back-Peddling on Recycle, Nuclear Engineering International, p. 110, outubro, 1994.
4. M.ROME, M. SALVADORES, J. MONDOT, M. LE BARS, Plutonium Reload Experience in French Pressurized Water Reactors, Nuclear Technology, vol. 94, p. 87, abril, 1991.
5. H.M.MacLEOD, G. YATES, Development of Mixed-Oxide Fuel Manufacture in the United Kingdom and the Influence of Fuel Characteristics on Irradiation Performance, Nuclear Technology, vol. 102, p. 3, abril, 1993
6. M.POBERESKIN, K.D. KOK, W.J. MADIA, Coprocessing - an Evaluation of Chemical Reprocessing without Plutonium Separation, Nuclear Technology, vol. 41, p. 149, dezembro, 1978.
7. J.G.ASQUITH, L.F. GRANTHAM, A Low-Decontamination Approach to a Proliferation-Resistant Fuel Cycle, Nuclear Technology, vol. 41, p. 137, dezembro, 1978.
8. E.A.ESCHBACH, Some Plutonium Recycle Program Fuel Cycles Having Reduced Proliferation Characteristics, Nuclear Technology, vol. 41, p. 168, dezembro, 1978.
9. S.N.JAHSHAN, T.J. MCGEEHAN, An Evaluation of the Deployment of AIROX-Recycled Fuel in Pressurized Water Reactors, Nuclear Technology, vol. 106, p. 350, junho, 1994.
10. S.N.JAHSHAN, AIROX Revisited-Neutronics Evaluation of Partially Decontaminated Reprocessed fuel, Trans. Am. Nucl. Soc., vol. 66, p. 522, 1992.
11. P.KUAN, M.L. CARBONEAU, S.N. JAHSHAN, ORIGEN2 Calculations for AIROX-Recycled PWR Fuel, Trans. Am. Nucl. Soc., vol. 68, p. 93, 1993.
12. ORIGEN2: (U,Pu) Fuel Cycle PWR & BWR Models, ORNL/TM-6051, setembro, 1978.
13. ORIGEN2: Alternative Fuel Cycle PWR Models, ORNL/TM-7005, fevereiro, 1980.
14. STELA D.S.COTA, Estudo Neutrônico Preliminar da Reciclagem de Combustíveis Alternativos em Reatores P.W.R., Dissertação de Mestrado, 93 págs., DEN/UFMG, 1996.
15. ANGRA-1/Cycle 3. Final Fuel Management Report, Relatório NUCLEN TS4/BN/1220/046/89.