

ESTUDO PARAMÉTRICO DO FLUXO DE MASSA PARA O CICLO
TANDEM ENTRE ANGRA-I E EMBALSE

Luiz Antonio Mai e José Rubens Maiorino
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
IPEN-CNEN/SP
Travessa R, 400 - Cid. Universitária - S. Paulo-SP, 05508-900

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo estimar o fluxo de massa de um ciclo TANDEM aplicado entre o reator PWR de Angra-I (Brasil) e o reator CANDU de Embalse (Argentina), a partir de parâmetros como queima ótima de descarga num ciclo de Angra-I (queima atual) e diluição sugerida do combustível descontaminado com urânio natural (1,9:1,0) no reator de Embalse. Estudou-se também o comportamento da queima variando-se a porcentagem de diluição de combustível descontaminado no urânio natural e a queima de descarga de Angra-I.

INTRODUÇÃO

A energia nuclear tem comprovado ser uma alternativa de geração de eletricidade segura e viável em todo o mundo, não obstante a grande hostilização sofrida devido, notadamente, a acidentes mais graves ocorridos nas usinas nucleares de "Three Miles Island" e "Tchernobil". Tecnicamente, porém, esses acidentes não colocaram em questão de fato a segurança dos reatores nucleares.

A eletricidade gerada através de fonte nuclear é hoje responsável por aproximadamente 15 % de toda a energia elétrica gerada mundialmente [1], proveniente de cerca de 400 reatores de potência em operação. Nota-se ainda que em países como a França e a Bélgica, mais de 50 % da geração de energia advém de reatores nucleares.

Devido às perspectivas pouco duradouras para o combustível de origem fóssil para geração elétrica e do esgotamento do potencial hídrico, nenhum país deveria ignorar a alternativa nuclear pelo menos a médio ou longo prazo. Por outro lado, muito se tem discutido atualmente a respeito de se racionalizar o uso do combustível nuclear basicamente por 3 motivos:

1. diminuir o volume de rejeitos radioativos,
2. limite das reservas de urânio, e
3. otimizar o custo da energia gerada.

Neste sentido estudam-se novos tipos de ciclos de combustível, os chamados ciclos avançados, que podem ser classificados em 2 grupos:

1. ciclos simples ("once-through"), e
2. ciclos que dependem da reconversão e reciclagem de materiais fisséis.

Contatos recentes entre pesquisadores brasileiros e argentinos da área nuclear têm promovido um acordo de cooperação mútua entre os países, em consonância com os aspectos aqui mencionados. Levando-se em conta motivos de ordem prática de interesse mútuo, um dos primeiros frutos desse acordo poderá ser a

utilização do combustível queimado no reator brasileiro de Angra-I pelo reator argentino de Embalse, através do ciclo avançado de combustível denominado CICLO TANDEM.

O objetivo deste trabalho é fazer um estudo paramétrico do fluxo de massa para um ciclo TANDEM aplicado especificamente entre os reatores de Angra-I e Embalse. Este trabalho é parte de um estudo mais amplo que trata da viabilidade técnico-econômica de um ciclo TANDEM entre Angra-I e Embalse. Este estudo conta com a participação de pesquisadores argentinos, coordenados pelo Dr. Maximo Julio Abbate da CNEA (Argentina).

O CICLO TANDEM

Tendo em vista a predominância dos reatores tipo PWR, recentemente os canadenses, como fabricantes dos reatores tipo CANDU, sugeriram o ciclo avançado TANDEM como forma de se racionalizar o uso do combustível nuclear [2, 3]. A idéia básica deste ciclo é a reconversão e reciclagem dos elementos fisséis (U-235 e Pu-239) dos combustíveis queimados num PWR e sua utilização no CANDU. Desta forma os combustíveis queimados dos PWR, os quais contêm cerca de 1,5 % de elementos fisséis, são transferidos para uma planta de "reprocessamento" onde os produtos de fissão são removidos, mas sem a separação do urânio e plutônio. Esse tipo de "reprocessamento" é denominado descontaminação química, para diferenciar dos reprocessamentos clássicos, onde a intenção é separar o plutônio. A mistura urânio-plutônio é então diluída com urânio natural para a fabricação do combustível de óxido misto de urânio-plutônio conhecido como MOX ("mixed oxide").

Segundo estudos canadenses, esse combustível de óxido misto tem um potencial de queima de cerca de 22.000 MWd/ton U na proporção de 1,9 partes de combustível descontaminado para 1,0 de urânio natural. A queima média de um combustível com somente urânio natural é, em média, de 7.000 MWd/ton U, ou seja, observou-se um ganho de 200 %. Ainda segundo esse estudo, para um sistema em equilíbrio formado por PWR e HWR

na proporção de 1,1:1,0, a utilização do ciclo TANDEM reduziria as necessidades de urânio em 32 %, relativo ao ciclo de urânio natural, apesar dos custos serem ligeiramente superiores em cerca de 0,5 mills/kWh. Entretanto, no estudo é previsto também um aumento de preço do urânio no mercado internacional, o que favoreceria significativamente o ciclo TANDEM [4].

A figura 1 mostra, de modo simplificado, o ciclo do combustível do sistema integrado PWR-CANDU envolvendo o ciclo TANDEM.

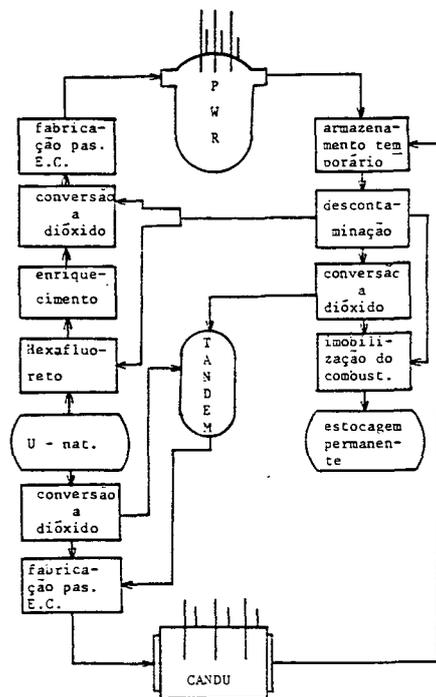


Figura 1 Ciclo de combustível integrado PWR-CANDU

O ciclo TANDEM aplicado para o caso específico de Angra-I e Embalse tem vantagens adicionais às econômicas, quais sejam:

1. o reciclo do combustível irradiado leva a uma redução considerável do volume dos rejeitos de alta atividade,

2. o reprocessamento do plutônio é um processo que economicamente depende de seu valor de mercado e pode representar problemas em termos políticos (questões de não proliferação). Para combustíveis tipo MOX, advindos da descontaminação química, esses problemas não mais existem,

3. a opção tecnológica nuclear de Brasil e Argentina é coincidentemente conveniente e por si só já representa motivação suficiente para o estudo de um ciclo TANDEM. Essa opção se justifica ainda mais pela proximidade relativa dos dois países e na oportunidade de um relacionamento científico-tecnológico que, mais que interesse econômico, representa um passo em direção à independência dos centros supridores de tecnologia. Essa independência é fundamental para firmar as soberanias desses países.

A ENERGIA NUCLEAR E O CICLO DO COMBUSTÍVEL NO BRASIL E ARGENTINA [5,6]

Atualmente no Brasil, cerca de 90 % da energia elétrica gerada advém de usinas hidroelétricas, o que gerou grande experiência na construção desse tipo de usina. Ainda hoje o potencial hidroelétrico é grande, porém localizado principalmente na bacia amazônica onde, devido à topografia, haveria um impacto ambiental considerável. Além disso a distância relativa aos grandes centros consumidores do Sudeste e Sul, geraria altos custos na transmissão da energia. É de se prever então uma reavaliação da participação da eletricidade advinda de fonte nuclear no país para as próximas décadas.

A capacidade instalada de geração núcleo-elétrica no país é hoje de 626 MW oriunda da central nuclear de Angra-I. As centrais de Angra-II e Angra-III estão em construção, sendo que as obras civis de Angra-II já estão concluídas e prevê-se o término de sua construção para o final da década. Quanto a Angra-III, está apenas no início de construção.

Quanto aos aspectos do ciclo do combustível, grandes esforços foram promovidos entre 1975 e 1985 na prospecção de mineral de urânio dentro do acordo de colaboração entre Brasil e Alemanha, no qual grandes ocorrências do mineral foram descobertas. As reservas brasileiras hoje são estimadas em mais de 300.000 toneladas de U_3O_8 . A figura 2 mostra a evolução das reservas brasileiras de mineral de urânio de 1975 até 1982.

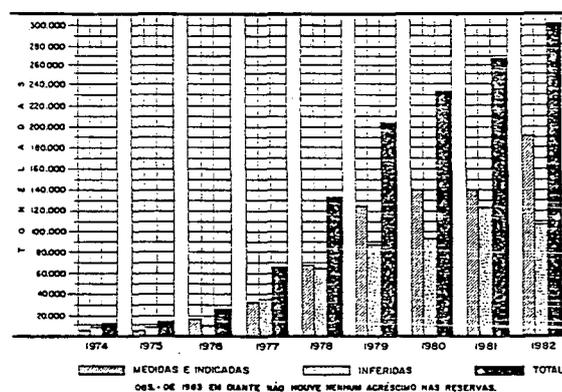


Figura 2 Evolução das reservas brasileiras de urânio - ton métricas de U_3O_8 - 1975-1982

As tecnologias de purificação, conversão e reconversão à UO_2 sinterizável foram desenvolvidas no país na década de 70, com produção piloto a partir de 1980. Quanto ao processamento de combustível irradiado, iniciou-se na década de 70 a nível de laboratório para trabalhos de pesquisa e desenvolvimento e concluiu-se também na década de 80.

Um amplo programa de cooperação foi desenvolvido conjuntamente com a Alemanha (1979-1988), envolvendo fabricação, irradiação, avaliação pós-irradiação e reprocessamento de combustíveis avançados, com vistas à utilização de tório em reatores PWR.

A nível de política nacional na área nuclear, muito se fez e desfez, sendo o acordo nuclear com a Alemanha (1975), o que gerou maiores controvérsias.

Com relação à Argentina, cerca de 15 % da energia elétrica gerada (~ 1GW_e) advém de fonte nuclear e estima-se que, a partir de 1995 essa proporção cresça para 26 %, com a introdução da Central Nuclear de Atucha-II. A perspectiva para o ano 2030 é que sejam instalados mais 5 GW_e nucleares no sistema elétrico, o que elevaria as necessidades de urânio das atuais 150 ton/ano para 800 ton/ano.

Na Argentina foram descobertas 16.000 ton de U₃O₈, das quais 5.000 ton já foram beneficiadas. Sua produção anual é de 150 ton, suficiente para cobrir a demanda das centrais de Atucha-I e Embalse operando normalmente. Com a entrada de Atucha-II, haverá um aumento anual de 90 ton. Em vistas desse aumento, um estudo de reprocessamento de combustível é justificável.

A experiência argentina na área de reprocessamento vem desde a década de 60 quando foram reprocessados combustíveis MTR oriundos do reator RA1. O conhecimento adquirido no empreendimento foi utilizado para o reprocessamento de elementos combustíveis MTR do reator RA3, cujo enriquecimento é de 90 %. Em 1977 foi concluído o projeto e iniciada a construção e montagem de uma planta experimental (LPR) com vistas ao reprocessamento do combustível de Atucha-I. Hoje mais de 80 % de suas instalações estão concluídas.

A Argentina tem investido no desenvolvimento de tecnologia de combustíveis MOX desde 1975. Foram investigadas várias etapas do processo que culminou em 1988 com a fabricação de uma vareta contendo pastilhas MOX, que foi irradiada no reator PETEN (Holanda) e a avaliação pós-irradiação conduzida no KFK (Alemanha), cujos resultados, até o presente, são animadores.

UTILIZAÇÃO DE COMBUSTÍVEL MOX NO REATOR CANDU

De um modo geral, cálculos de fatores de multiplicação de sistemas MOX têm sempre se mostrado superestimados e são hoje um grande desafio para a área de Física de Reatores [7]. Isso porém não impede que se façam cálculos paramétricos que permita algumas conclusões. De qualquer forma, algumas dessas conclusões estão consolidadas com relação ao uso de combustível de óxido misto em reatores tipo CANDU:

1-não são antecipados, a priori, problemas com relação a controle e segurança,

2-a proporção de combustível reprocessado diluído no urânio natural será determinada pela margem de desligamento disponível nas barras de controle,

3-os gradientes de fluxo e potência do E.C. do CANDU utilizando combustível MOX são mais elevados que os existentes no CANDU com urânio natural e

4-devido ao espectro neutrônico mais "mole", o reator CANDU promove a absorção de neutrões preferencialmente nos plutônio físséis (Pu-239 e Pu-241), reduzindo a absorção ressonante no Pu-240, o que é vantajoso para o uso do combustível MOX face à queima do plutônio nos reatores PWR. Isso favorece o número de reciclagens do plutônio.

Com o objetivo de se obter sensibilidade com relação à utilização de combustível MOX em reatores de água pesada, realizou-se um estudo paramétrico com relação à porcentagem de diluição de combustível descontaminado, advindo da queima no PWR de Angra-I, no urânio natural. Parametrizou-se também a queima de descarga de Angra-I.

Para tanto utilizou-se o código ORIGEN2 para cálculo do inventário de núclídeos de Angra-I [8] e do código WIMS-D/4 [9] para a análise neutrônica e de queima do reator CANDU de Embalse.

Inventário de Núclídeos de Angra-I

A composição isotópica do combustível nuclear, à medida que é irradiado, varia devido às fissões, decaimentos radioativos e absorções. Depois do período de irradiação a composição isotópica do combustível continua variando como consequência dos decaimentos dos núclídeos radioativos que foram formados.

A composição do combustível irradiado varia consideravelmente também dependendo: da composição inicial do combustível, do espectro neutrônico sob o qual o combustível é irradiado, da potência específica gerada no combustível, da duração da irradiação e do período de "resfriamento".

Para o caso do reator de Angra-I, foi rodado o código ORIGEN2 para o reator operando a plena potência durante 1.200 dias para simular os 3 ciclos de queima que o combustível permanece no núcleo. O período de resfriamento foi de um ano.

O enriquecimento do combustível de recarga de Angra-I é, desde o ciclo 3, de 3,4 %. Esse será, a princípio, o enriquecimento inicial de todo elemento combustível do núcleo do reator, a partir do ciclo de equilíbrio.

A figura 3 mostra as variações das concentrações dos núclídeos físséis (U-235, Pu-239 e Pu-241) e dos produtos de fissão de uma maneira global, para o núcleo de Angra-I.

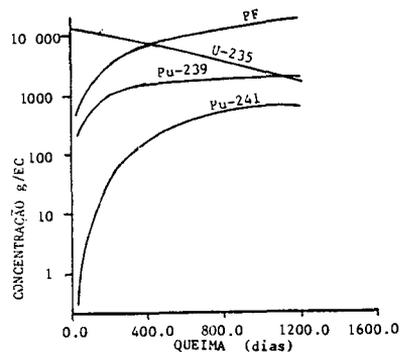


Figura 3 Comportamento das concentrações de alguns actínídeos e P.F. durante a irradiação em Angra-I

O comportamento do Pu-239, até o limite de 1.200 dias de queima, ainda é crescente, indicando porém que sua concentração está quase atingindo o ponto de máximo. Isso permite dizer, numa primeira abordagem, que esse modo de operação do reator otimiza a produção de Pu-239.

Cálculo Celular do Reator CANDU (Embalse)

Por se tratar de geometria tipo "cluster", a super-célula definida para o reator CANDU de Embalse é como mostrada na figura 4.

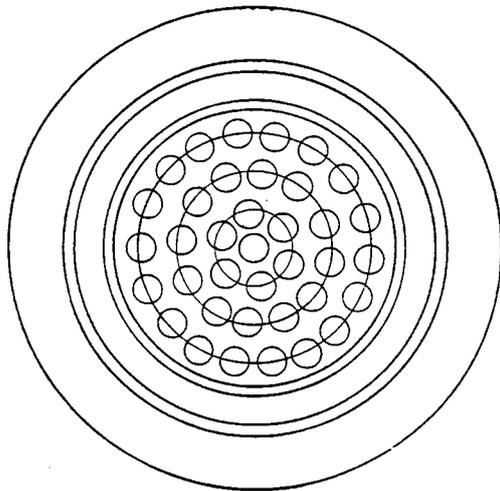


Figura 4 Super-célula definida para o reator CANDU de Embalse

A parametrização da diluição e da queima de descarga é apresentada na tabela 1

Tabela 1 Parametrização proposta para o estudo de combustível MOX no reator CANDU

queima de descarga	razão de diluição
1,0 (atual)	0,7:1,0
	0,9:1,0
	1,1:1,0
	1,3:1,0
	1,5:1,0
	1,7:1,0
	1,9:1,0
0,9	2,1:1,0
	0,7:1,0
	0,9:1,0
	1,1:1,0
0,8	1,3:1,0
	0,7:1,0
	0,9:1,0
	1,1:1,0
	1,3:1,0

Considerou-se, numa primeira aproximação, que o processo de descontaminação tenha uma eficiência de 100 % na eliminação dos produtos de fissão e dos actínides, com excessão logicamente do Pu-239.

A figura 5 mostra as curvas de queima obtidas através do programa WIMS-D/4. Observa-se que o ganho de reatividade é maior para a queima de descarga atual (1,0) e cresce com o aumento da razão de diluição. Porém esse aumento é cada vez menor, sugerindo um ganho limite. Observa-se também que essas curvas têm uma forma semelhante às curvas de queima de reatores PWR.

A diluição ideal, segundo estudos canadenses, é de 1,9:1,0 para a queima de descarga normal do PWR.

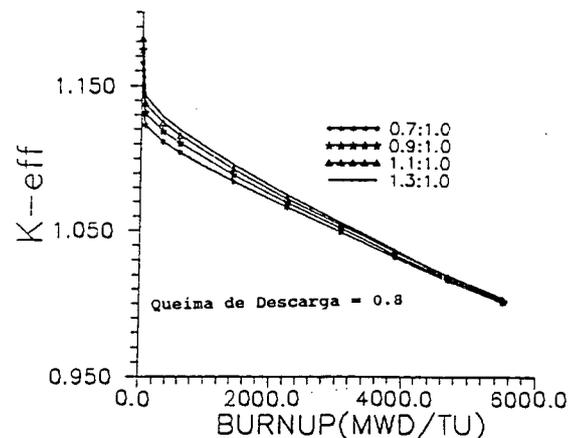
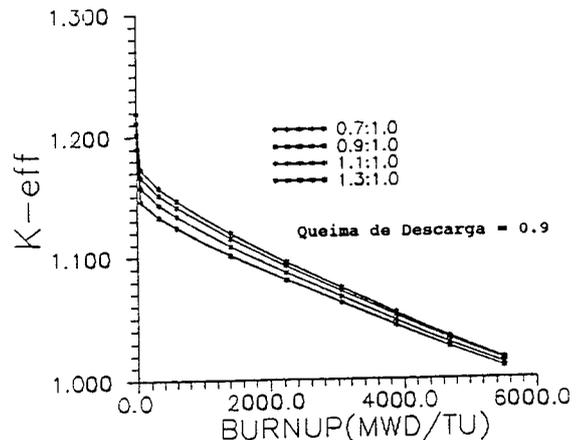
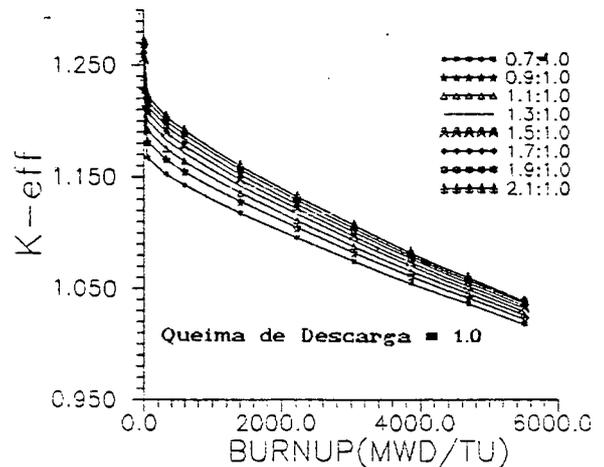


Figura 5 Curvas de queima para várias diluições e queimas de descarga

FLUXO DE MASSA PARA O CICLO TANDEM ENTRE ANGRA-I E EMBALSE

Considera-se aqui a alimentação do CANDU de Embalse em cerca de 77,7 ton/ano de urânio natural e do PWR de Angra-I em cerca de 15,7 ton/ano de urânio enriquecido a 3,4 %. Depois da queima, a quantidade de material pesado, em Angra-I cai para aproximadamente 14,96 ton/ano e durante o processo de

descontaminação química há uma perda de cerca de 1 %, portanto restam aproximadamente 14,8 ton/ano de urânio descontaminado advindo do PWR.

Considerando-se a diluição proposta pelos canadenses de 1,9:1,0, o ganho em "burnup" é de 3 vezes (~ 22.000 MWd/tonU), assim os requisitos de urânio por ano no CANDU de Embalse seria de aproximadamente 25,9 ton (3 vezes menor que com urânio natural).

O fluxo de massa é, portanto, como mostrado na figura 6.

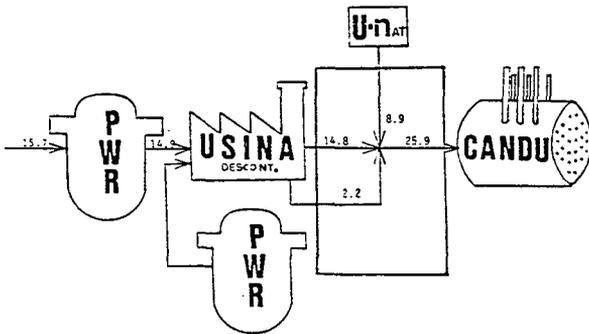


Figura 6 Fluxo de massa num ciclo TANDEM entre Angra-I e Embalse em ton/a

Haveria então um "déficit" de cerca de 2,2 ton/ano de combustível reprocessado. No entanto existe uma relação quase linear entre concentração de material físsil e "burnup". Assim, para zerar o "déficit", a diluição seria aproximadamente 2,0:1,0 e o potencial de queima dos E.C. do CANDU seria multiplicado por 3,5. No entanto há de se considerar detalhadamente variáveis de segurança, operacionabilidade e também a própria economia do processo.

CONCLUSÕES

Estudos canadenses fornecem indicações que o ciclo TANDEM pode se tornar altamente atrativo em termos econômicos, dependendo do valor do urânio no mercado internacional. Além disso há vantagens adicionais especificamente para o Brasil e Argentina, como por exemplo a diminuição do volume de rejeitos radioativos, questões de não-proliferação e inter-relacionamento científico-tecnológico dos países; que fazem do ciclo TANDEM uma opção interessante de investimento.

Devido a necessidade de cálculos envolvendo plutônio, há a necessidade de investimento inicial nas ferramentas de cálculo, pois estas têm-se mostrado ainda não tão precisas.

No caso do fluxo de massa do ciclo TANDEM para o caso específico de Angra-I e Embalse, um estudo preliminar indica um "déficit" de 2,2 ton/ano de combustível descontaminado. Essa diferença poderá, a princípio, ser suprida por estoques de Angra-I ou, eventualmente, por Angra-II. Porém, aumentando-se a porcentagem de diluição de combustível descontaminado é possível, em teoria, zerar esse "déficit", dependendo de variáveis como segurança, operação e da própria economia do processo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Dr. Máximo Julio Abatte e o Eng. Pablo Florido da CNEA da Argentina, pelos dados fornecidos do reator de Embalse e pelas sugestões no manejo do programa WIMS.

REFERÊNCIAS

- [1] MOREIRA, J.M.L. Reatores de pequeno porte no Brasil, relatório interno da Divisão de Física de Reatores do IPEN-CNEN/SP, 1987.
- [2] VEEDER, J. & DIDSBUURY, R. A catalog of advanced fuel cycles in CANDU reactors, AECL 8641, 1985.
- [3] BOCZAR, P.G. & HASTINGS, C.A. AECL 10018, 1989.
- [4] BOCZAR, P.G. et alii Slight enriched uranium in CANDU: an economic first step toward advanced fuel cycles, conference proceedings of Nuclear Power Performance and Safety, IAEA, 1987.
- [5] CRISTALLINI, O. et alii Integração de ciclos de combustíveis HWR/PWR entre Brasil e Argentina, anais do IV congresso geral de energia nuclear (CGEN), RJ, 1992.
- [6] Anais do simpósio sobre importância da energia nuclear no fornecimento de eletricidade após 1990: benefícios e dificuldades, RJ, 1989.
- [7] SANTOS, A. et alii Verificação das bibliotecas JENDL3 e ENDF/B-VI para o ciclo TANDEM, a ser publicado nos anais do IX ENFIR, MG, 1993.
- [8] PICHURSKI, D. Comments on the univac 1110 version of ORIGEN2, Oak Ridge National Lab., 1985.
- [9] FAYERS, F.J. et alii LWRWIMS, a modular computer code for the evaluation of light water reactors lattices, AEEW-R 785, 1972.

ABSTRACT

The present work estimates the TANDEM cycle fuel material balance between the Angra-I PWR in Brazil and Embalse CANDU reactor in Argentina. The analysis considers the discharge burnup of Angra-I and a dilution ratio (decontaminated uranium dioxide from the PWR : natural uranium dioxide) of 1.9:1.0 for the fuel of the Embalse CANDU reactor. Parametric studies involving the MOX fuel have been carried out for different dilution ratios and different PWR discharge burnups.