

IMPLEMENTAÇÃO DE UM CICLO "TANDEM" ENTRE OS REATORES DE ANGRA-I (BRASIL) E EMBALSE (ARGENTINA)

Lisandro Tumini; Pablo Florido; Monica Scaffoni e Maximo Abbate
Centro Atômico de Bariloche - 8400, S.C. de Bariloche, RN, Argentina

Luiz Antonio Mai e José Rubens Maiorino
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
C.X. Postal 11049 (Pinheiros), São Paulo, SP, Brasil

RESUMO

Neste trabalho foram estimados o fluxo de massa, os custos relativos da energia elétrica gerada e a toxicidade dos rejeitos, para um ciclo TANDEM entre os reatores de Angra-I (PWR - Brasil) e Embalse (CANDU-Argentina) e comparou-se os resultados com os respectivos ciclos dos reatores tomados isoladamente. Esses resultados foram obtidos através de cálculos paramétricos cuja função objetiva a ser otimizada foi a utilização de urânio na estratégia binacional.

INTRODUÇÃO

Atualmente muito se vem pesquisando no mundo a respeito da racionalização do uso do combustível nuclear. Os ciclos de combustível que seguem essa tendência são os chamados CICLOS AVANÇADOS. Tais ciclos têm como objetivos principais, além da otimização das reservas de urânio, a diminuição dos resíduos radioativos e também a diminuição do custo da energia elétrica gerada. Recentemente Brasil e Argentina iniciaram estudos neste sentido de modo a utilizar combustível queimado e descontaminado (com o mínimo possível de produtos de fissão) do reator brasileiro de Angra-I (PWR) no reator Argentino de Embalse (CANDU). Nesse processo de descontaminação não são separados os isótopos do urânio dos isótopos do plutônio, formando um combustível conhecido como MOX ("Mixed OXide") com uma porcentagem de aproximadamente 1,5% de isótopos físeis. Esse ciclo de combustível avançado, que envolve um reator PWR e um reator tipo CANDU, foi inicialmente proposto pelos canadenses /1/ e é denominado CICLO TANDEM. A figura 1 apresenta um esquema deste ciclo.

Este trabalho tem como objetivo a determinação, através de método paramétrico, do fluxo de massa, os custos relativos da energia elétrica gerada e toxicidade dos rejeitos de um ciclo TANDEM entre os reatores de Angra-I e Embalse.

Para isso muitos parâmetros tiveram que ser calculados, tais como: composição do combustível queimado em Angra-I para diferentes tempos de resfriamento (1, 3 e 5 anos), razão de diluição ótima em urânio natural para fabricação do MOX de Embalse, queima de extração e reatividade do novo combustível. Foram utilizados os seguintes programas de computador: ORIGEN2.1 /2/ para cálculos de concentrações e toxicidade, WIMS-D/4 /3/ para cálculos celulares e PERCICO /4/ para cálculos de custos.

Foram utilizados também para o trabalho dois conceitos definidos na referência 5 que são o de "Plutônio Equivalente" (Pu^{eq}) e "Fator de Pico Equivalente" ($PFeq$). Através desses conceitos é possível a determinação da queima de extração do combustível MOX e da reatividade inicial do reator CANDU sem a necessidade de um cálculo

celular explícito.

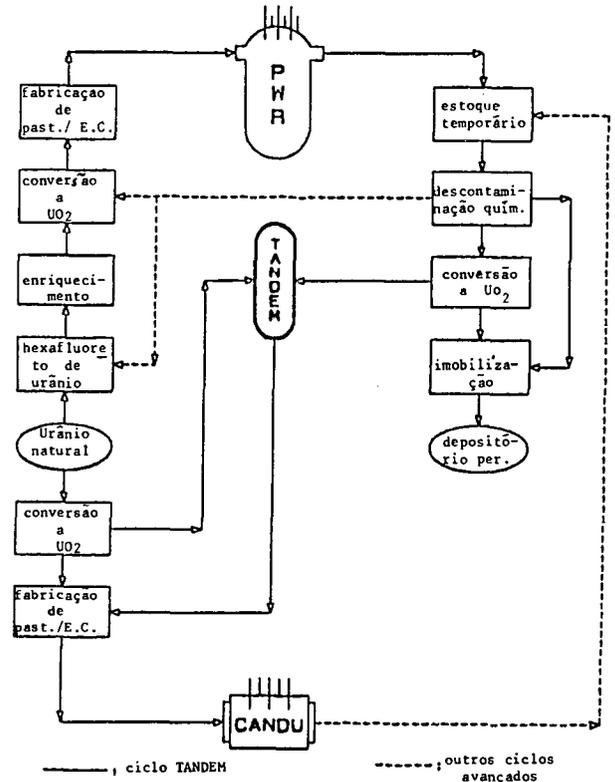


Figura 1 Esquema do ciclo TANDEM

FLUXO DE MASSA

Calculando-se vários valores do fator de multiplicação efetivo (K_{eff}) no início do ciclo através do conceito de $PFeq$ para várias razões de diluição (Θ), determina-se o consumo de urânio no sistema binacional correspondentes a cada Θ . A figura 2 mostra esse consumo normalizado para 1 GWe-ano (assumindo que ambos os reatores tem o mesmo fator de capacidade) como função do K_{eff} inicial para o CANDU.

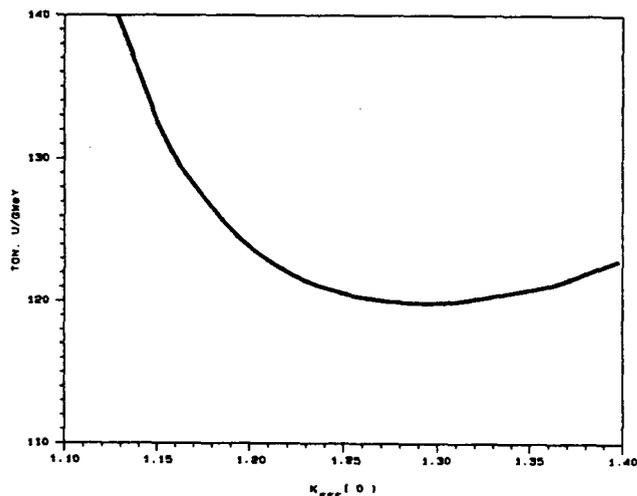


Figura 2 Consumo binacional de urânio vs. K_{eff} inicial

O mínimo valor da curva de consumo de urânio indica o valor ótimo para o fator de multiplicação inicial, que está entre 1,32 e 1,33. Este valor está em acordo com a literatura (referência 1) que indica um $K_{eff} = 1,32763$. Portanto, usando este valor do K_{eff} inicial, as razões de diluição ótimas correspondentes são:

$$\Theta(1 \text{ ano}) = 0,38$$

$$\Theta(3 \text{ anos}) = 0,36$$

$$\Theta(5 \text{ anos}) = 0,34$$

Nota-se que o valor correspondente para um resfriamento de 5 anos está de acordo com o relatado na literatura.

Utilizando-se agora do conceito de Pu^{eq} , os valores da queima de extração calculados foram:

$$Q_{ext} (1 \text{ ano}) = 22.525 \text{ MWD/ton U}$$

$$Q_{ext} (3 \text{ anos}) = 22.686 \text{ MWD/ton U}$$

$$Q_{ext} (5 \text{ anos}) = 22.835 \text{ MWD/ton U}$$

Observa-se um importante aumento na queima de extração (~3x) relativo ao ciclo de urânio natural (~ 7.500 MWD/ton U) e pouca sensibilidade com relação ao tempo de resfriamento.

Calculando-se o valor de K_{eff} real com o programa WIMS-D/4 obteve-se os seguintes resultados:

$$K_{eff} (1 \text{ ano}) = 1,30926$$

$$K_{eff} (3 \text{ anos}) = 1,30998$$

$$K_{eff} (5 \text{ anos}) = 1,30927$$

Esses valores de reatividade são elevados, indicando que alguma modificação deverá ser efetivada no reator CANDU, como por exemplo diferentes estratégias de gerenciamento "in-core" e/ou inclusão de veneno queimável.

A variação de K_{eff} com a queima, calculada com o WIMS-D/4 para combustível MOX com 1 ano de resfriamento ($\Theta = 0,38$) é apresentado na figura 3.

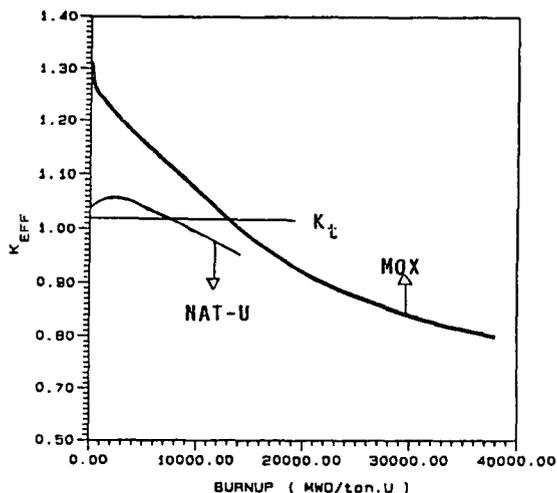


Figura 3 Variação de K_{eff} com a queima para MOX com razão de diluição de 0,38 e para combustível de U natural

Na mesma figura é mostrado também a curva de queima para o combustível de urânio natural e a linha de K_{eff} de trabalho ($K_t = 1,02028$). Usando esse valor de K_t a queima média e a queima de extração dos dois tipos de combustível podem ser determinadas.

Assumindo que a alimentação de equilíbrio de Angra-I é 15,7 ton U/ano, a quantidade de metal pesado (U-Pu) na descarga (considerando uma queima de 33.000 MWD/ton U para Angra-I) será de 14,8 ton HM/ano. A alimentação do CANDU em combustível MOX, para uma queima de 22.500 MWD/ton HM será de 32,0 ton HM/ano com 38% de urânio natural. Esse fluxo de massa é mostrado na figura 4.

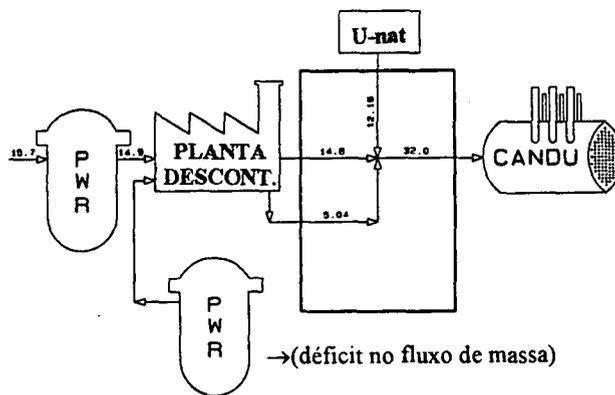


Figura 4 Fluxo de massa entre Angra-I e Embalse em ciclo TANDEM

CUSTO DO CICLO

Através do programa PERCICO foi estimado o custo do ciclo do reator CANDU para várias porcentagens de diluição. A figura 5 abaixo mostra esse perfil.

Pela figura pode-se observar que para as diluições encontradas, o custo do ciclo está em torno de 7,5 mills/kWh, que é aproximadamente igual ao custo do ciclo de urânio natural.

Com esse resultado pode-se prever que com um incremento do custo do urânio natural, o ciclo TANDEM

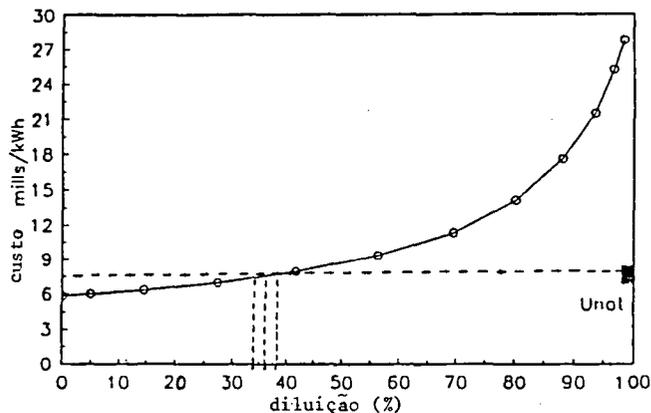


Figura 5 Custo do ciclo do combustível vs razão de diluição

entre Angra-I e Embalse será economicamente interessante. Sob o ponto de vista binacional há uma economia de aproximadamente 50% no suprimento de urânio.

TOXICIDADE

A variação com o tempo da atividade do combustível irradiado e da grandeza "ingestion toxicity" /6/ foram estimadas através do programa ORIGEN2.1. "Ingestion toxicity" (T) é definida como:

$$T = \sum A_i / (\text{mpc}) \quad (1)$$

onde A_i é a atividade dos produtos de fissão i e (mpc) é a máxima concentração permissível. As figuras 6 e 7 mostram a diferença percentual de ambos os parâmetros dos reatores considerados separadamente (Angra-I e Embalse com urânio natural) e em ciclo TANDEM. Nota-se uma diminuição de aproximadamente 20% em ambos os casos.

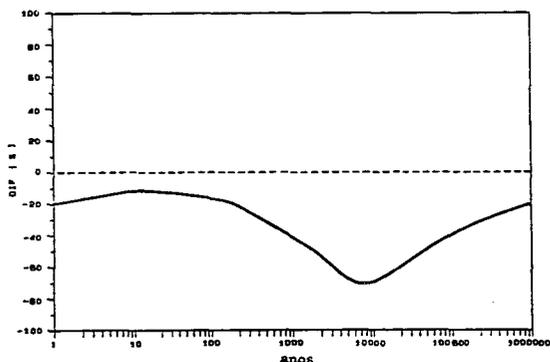


Figura 6 Diferença percentual da atividade do combustível com e sem sinergismo entre os reatores

Devido à grande importância dos actínidos tanto na atividade do combustível irradiado como na grandeza "ingestion toxicity", principalmente para longos tempos, estes já estão sendo considerados em estudos atuais.

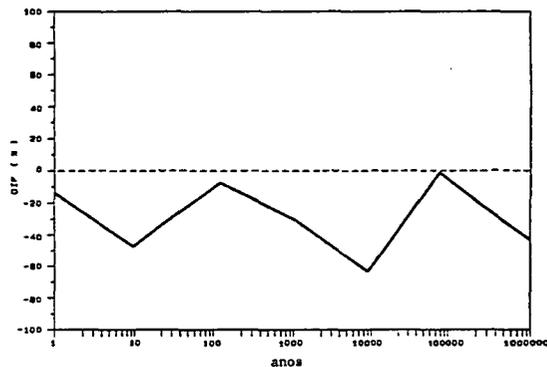


Figura 7 Diferença percentual da "ingestion toxicity" do combustível com e sem sinergismo entre os reatores

CONCLUSÕES

Considerando o objetivo principal do estudo que seria a otimização do consumo de urânio, o ciclo TANDEM confirma ser altamente atrativo.

A razão de diluição ótima depende muito pouco do tempo de resfriamento do combustível, e a partir de 1 ano as variações são insignificantes. O valor de 38% pode ser tomado como referência para minimizar o consumo de urânio.

Utilizado desta razão de diluição, a queima de descarga do reator CANDU operando com combustível MOX é aumentada de cerca de 3 vezes (22.500 MWD/ton HM) fornecendo uma economia de cerca de 50% no consumo de urânio na estratégia binacional.

O custo do ciclo do combustível do reator CANDU de Embalse operando em TANDEM com Angra-I é mantido inalterado (7,5 milhas/kWh).

Finalmente a atividade e a grandeza "ingestion toxicity" dos rejeitos diminuíram em cerca de 20% quando comparadas com os ciclos dos reatores tomados separadamente.

Observa-se também que, devido ao grande excesso de reatividade do combustível MOX como proposto, será necessário alterações na estratégia de gerenciamento "in-core" do reator CANDU e, talvez, a introdução de veneno queimável.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem ao CNPq/RHAE pelo apoio financeiro deste projeto.

REFERÊNCIAS

[1]VEEDER, J. et alii. A Catalog of Advanced Fuel Cycles in CANDU Reactors. AECL 8641, 1985.
 [2]CROFF, A. G. ORIGEN2.1 Isotope Generation and Depletion Code. CCC-371 RSIC, 1991.
 [3]ASKEN, J. R. et alii. A General Discription of Lattice Code WIMS. J. Brit. Energy Soc. (4)564, 1966.

[4]PASSADORE, D. Desarrollo de un Código de Cálculo del Costo de Combustible y Evaluación de Ciclos Avanzados Para Centrales de Potencia Argentinas. Argentine, Engineer's Thesis, Balseiro Institute, 1992.

[5]TUMINI, L. L. P. Análisis de Ciclos Directos Avanzados Para Reactores CANDU. Argentine, Engineer's Thesis, Balseiro Institute, 1993.

[6]BENEDICT, M. et alii. Nuclear Chemical Engineering. McGraw-Hill Book Company, 1981.

ABSTRACT

In this work the mass flow, relative costs of electric energy, and waste toxicity from a TANDEM cycle between the Angra-I (PWR-Brazil) and Embalse (CANDU-Argentine) reactors, were estimated and compared with the isolated reactors cycles. These results were obtained from parametric calculations in which the optimized objective function was the uranium consumption in a two-national strategy.