

DETERMINAÇÃO DO "BLENDING" ÓTIMO PARA O CICLO TANDEM ENTRE ANGRA-I (BRASIL) E EMBALSE (ARGENTINA) ATRAVÉS DO CÁLCULO DO CUSTO DO CICLO

*Luiz Antonio Mai e **José Rubens Maiorino

IPEN/CNEN-SP

Travessa R, 400 - Cidade Universitária
S. Paulo, SP, Brasil

*e-mail: lamai@net.ipen.br **e-mail: maiorino@net.ipen.br

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo determinar, através de cálculo do custo do ciclo do combustível, a porcentagem ideal de urânio natural ("blending") a ser utilizada com combustível irradiado e descontaminado do reator da Usina de Angra-I para uso no reator argentino de Embalse (ciclo Tandem). Este estudo confirma trabalho anterior onde a porcentagem ideal de urânio natural foi determinada minimizando seu uso.

INTRODUÇÃO

Ao longo dos estudos sobre a integração dos ciclos de combustível nuclear entre Brasil e Argentina, o chamado ciclo Tandem, entre o reator de Angra-I (PWR) e o reator de Embalse (CANDU), 3 alternativas foram determinadas que mostraram-se tecnicamente viáveis. Essas alternativas se valem do combustível irradiado e descontaminado do PWR (1), (2), (3). São elas:

- 1-mistura do combustível irradiado no PWR com urânio natural, como sugere a literatura,
- 2-mistura com "tail" do processo de enriquecimento isotópico, e
- 3-mistura com o combustível irradiado e descontaminado do próprio reator CANDU.

No primeiro caso a queima de extração (ou descarga) do combustível do reator CANDU passa para 22.500 MWd/ton representando um ganho de 200% em relação ao combustível de urânio natural usado normalmente. O balanço de massa determinado, que otimiza a utilização de urânio natural, ficou em 62% de combustível irradiado para 38% de urânio natural (1).

No segundo caso, a mistura com "tail" produz um combustível cuja queima de extração é de 22.400

MWd/ton, o que dá aproximadamente o mesmo ganho que no caso anterior. O balanço de massa é de 74% de combustível irradiado para 26% de "tail". Neste caso a função objetiva otimizada foi utilização de (U-Pu)O₂ do PWR (2).

O último caso não apresentou ganho em termos de queima de extração ($Q_{ex} = 7.500$ MWd/ton) e o balanço de massa ficou em 17% de combustível irradiado no PWR e 83% de combustível irradiado no CANDU. A otimização aqui também foi em termos do MOX do PWR (3).

Foi estudado também a possibilidade de fazer uma mistura de urânio natural com combustível irradiado e descontaminado do próprio reator CANDU, porém esse tipo de mistura não apresentou vantagem nem sob o ponto de vista de economia de urânio natural nem com relação à queima de descarga.

Examinando-se esses valores, nota-se vantagens e desvantagens de cada tipo de ciclo Tandem, comparativamente entre si e em comparação com o ciclo de urânio natural. Por exemplo, no primeiro caso houve uma grande economia de urânio natural com relação ao ciclo tradicional do CANDU. No segundo caso esta economia foi ainda maior porém com maior utilização de combustível irradiado. No último caso, apesar da reutilização de combustível irradiado no sistema dos dois reatores ser

maior que nos casos anteriores, não apresentou vantagens em termos de queima de descarga.

A argumentação que justifica uma tomada de decisão sobre qual alternativa de ciclo Tandem mais adequada, ou mesmo a decisão de não se fazer nada, é muito difícil analisando-se apenas sob estes aspectos. Deve-se ter em mente também algumas outras variáveis tais como: vantagem estratégica (como por exemplo a economia de "yellow cake"), custo do ciclo de combustível e fatores de ordem ambiental.

Atualmente os coreanos, possuidores dos dois tipos de reatores (PWR e CANDU), conjuntamente com canadenses e americanos, estudam a integração dos ciclos desses reatores de modo direto. Isso quer dizer que não há a etapa de descontaminação química do combustível irradiado no PWR. Este é o chamado ciclo DUPIC ("Direct Use of PWR fuel in CANDU") (4) que é uma alternativa para Angra-I/Embalse a ser considerada futuramente. A vantagem deste ciclo com relação ao ciclo Tandem é que, no ciclo DUPIC, não existem restrições quanto a chamada proliferação nuclear (salvaguardas).

Em termos estratégicos de economia de urânio natural, o interesse nas misturas determinadas anteriormente é evidente. Os fatores ambientais, tais como atividade e toxicidade dos rejeitos, podem ser determinados diretamente a partir do código ORIGEN2 (5), uma vez definida uma mistura. Conclusões preliminares apontam para vantagens significativas neste aspecto. Assim, o ponto que no momento é necessário analisar, diz respeito aos custos dos ciclos de combustíveis. Este é um dos objetivos deste trabalho.

DESCRIÇÃO DOS CICLOS DE COMBUSTÍVEIS

No estudo completo sobre a viabilidade técnico-econômica da implantação de um ciclo Tandem entre os reatores de Angra-I e Embalse, estão sendo estudados 3 alternativas de ciclos:

- 1- Ciclo Tandem-1 ($MOX^{PWR} + U_{nat}$)
- 2- Ciclo Tandem-2 ($MOX^{PWR} + \text{"tail"}$)
- 3- Ciclo Tandem-3 ($MOX^{PWR} + MOX^{CAN}$)

Para o caso em que o gerenciamento do combustível nuclear do reator PWR é do tipo lotes com o mesmo número de elementos combustíveis e a composição é sempre a mesma a cada período de irradiação. Pode-se, então, determinar de maneira genérica o custo do ciclo do PWR em equilíbrio. Os principais processos do ciclo que contribuem para o custo em reatores PWRs são:

- Obtenção de "Yellow Cake" (U_3O_8)
- Conversão a UF_6
- Enriquecimento Isotópico
- Reconversão a UO_2

- Fabricação de E.C.
- Estocagem Fria (antes da irradiação)
- Estocagem Quente (depois da irradiação)

Para o caso do ciclo do reator CANDU de urânio natural, as etapas são as mesmas que o PWR, com exceção do enriquecimento.

Nos vários ciclos Tandem, outros processos são necessários, tais como:

- Transporte de Combustível Irradiado
- Descontaminação
- Transporte de MOX

A figura 1, da página seguinte, mostra o fluxograma das alternativas de ciclos Tandem estudados mais os ciclos tradicionais do PWR e do CANDU (marcados em destaque).

Observa-se no fluxograma, além dos vários processos e dos reatores, 3 chaves (CH). Essas chaves representam, quando se fecha apenas uma delas, um tipo de ciclo Tandem. Assim, fechando-se a chave 1 (CH1), o ciclo Tandem considerado é o correspondente ao combustível MOX (PWR) + U_{nat} (Tandem-1). A chave 2 (CH2) fechada é o ciclo Tandem de MOX (PWR) + "tail" (Tandem-2) e, por fim, fechando-se a chave 3 (CH3), o ciclo Tandem considerado é o MOX (PWR) + MOX (CANDU) (Tandem-3).

O PROGRAMA P4C

Para se analisar estas opções de ciclos sob o ponto de vista de custos, elaborou-se o programa de computador P4C (Programa de Cálculo de Custo do Ciclo de Combustível) que, através de balanço de massa, atualiza temporalmente os custos parciais.

No balanço de massa considerou-se perdas de 1% na fabricação dos elementos combustíveis e de 0,5% na conversão e reconversão de combustível. Para o PWR existe a fase de enriquecimento, que no caso de Angra-I é de 3,4% em U_{235} . Para o "tail" restante considerou-se enriquecimento entre 0,2 e 0,3%. A variação do enriquecimento do combustível está, no P4C, entre 2 e 4%. A determinação do trabalho separativo (SW) é calculado via interpolação bidimensional.

Em trabalhos anteriores foram determinados os fluxos de massa na entrada do reator CANDU que otimizavam a utilização do urânio natural para o caso do ciclo Tandem-1 (1) e otimizavam MOX advindo do PWR para os casos de ciclo Tandem-2 e Tandem-3 (2) (3). Esses fluxos de massa são mostrados na tabela 1 a seguir, junto com a massa de UO_2 dos ciclos tradicionais de Angra-I e Embalse. Essas massas, mais os dados físicos dos reatores e os dados temporais das etapas dos ciclos

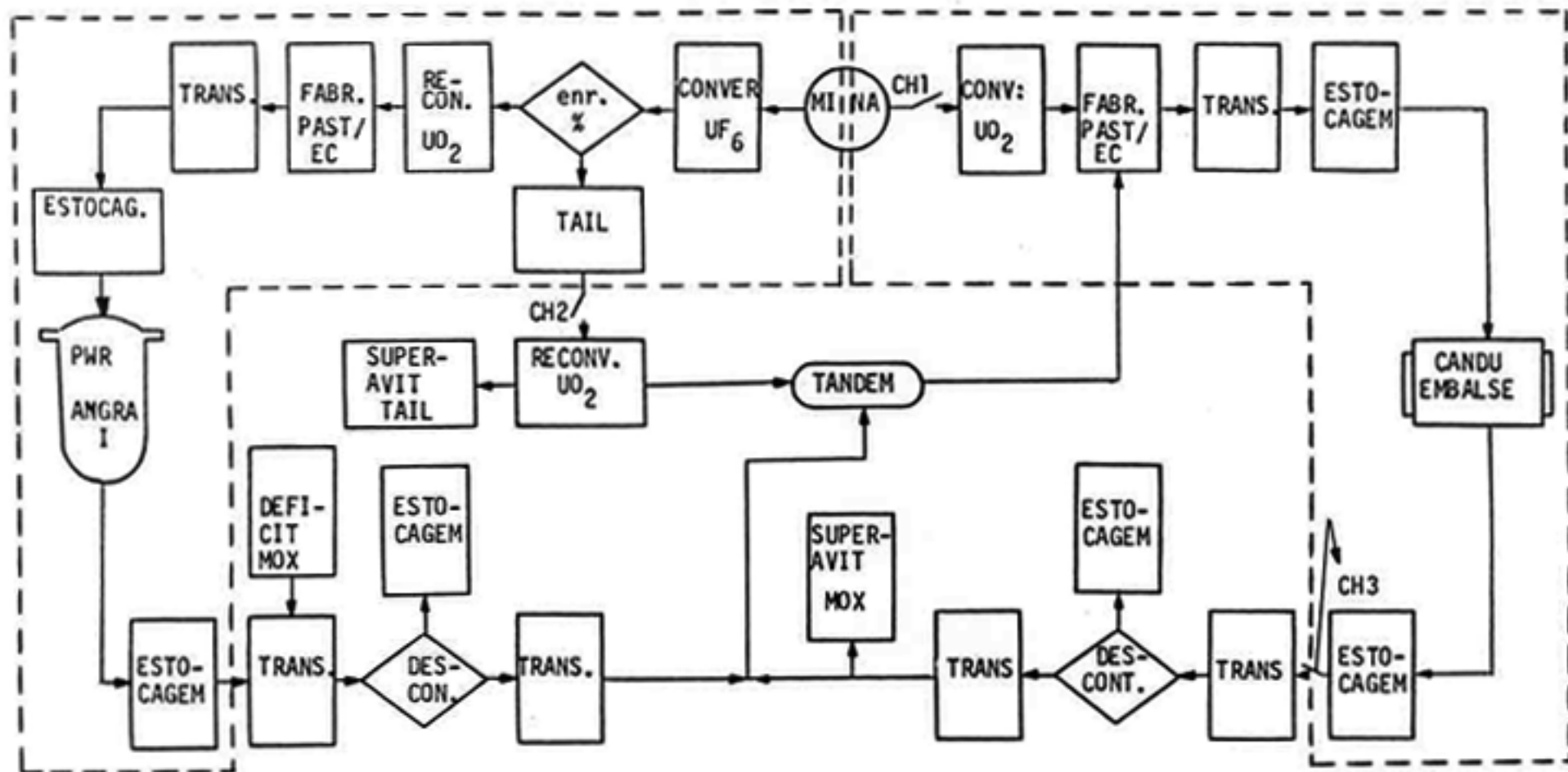


Figura 1. Fluxograma das Várias Etapas do Ciclos de Combustíveis Estudados

Tabela 1. Fluxos de Massa na Entrada dos Reatores Para os Vários Ciclos Considerados (ton/a.)

COMB.	TANDEM-1	TANDEM-2	TANDEM-3	ANGRA-I	EMBALSE
UO ₂	12,16	-	-	15,70	94,16
MOX ^{PWR}	19,84	23,7	19,55	-	-
MOX ^{CANDU}	-	-	95,45	-	-
"TAIL"	-	8,3	-	-	-

com seus dados econômicos, são as variáveis de entrada do programa P4C. Outros dados de entrada do programa são: "burnup" de extração, potência térmica, fator de carga médio, número de zonas (PWR), eficiência térmica e taxa de juros.

DETERMINAÇÃO DO "BLENDING" ÓTIMO

O programa P4C foi validado para cálculos de reatores tipo CANDU, com casos conhecidos (6) de ciclos Tandem e também para reatores tipo PWR (7).

Para determinar-se o "blending" que minimiza os custos do ciclo Tandem entre os reatores de Angra-I e

Embalse, através do programa P4C, é necessário levantar-se duas curvas de custos de ciclo versus "blendings". A primeira curva leva em conta os custos parciais (etapas do ciclo) do ciclo Tandem (figura 2) e a outra os custos parciais do ciclo normal de urânio natural (figura 3). A partir dessas duas curvas é traçada então uma terceira que corresponde à ponderação no "blending" entre as duas anteriores. Isso é necessário para evitar que custos de descontaminação de combustível, por exemplo, seja considerado para o caso do ciclo simples de urânio natural. Os pontos da curva ponderada foram determinados conforme expressão abaixo:

$$C3 = (\% \text{ BLENDING}) C1 + (1 - \% \text{ BLENDING}) C2,$$

onde:

C3-Custo do Ciclo Ponderado

C1-Custo Tandem-1 (valores Ciclo Tandem)

C3-Custo Tandem-1 (valores Ciclo U_{nat})

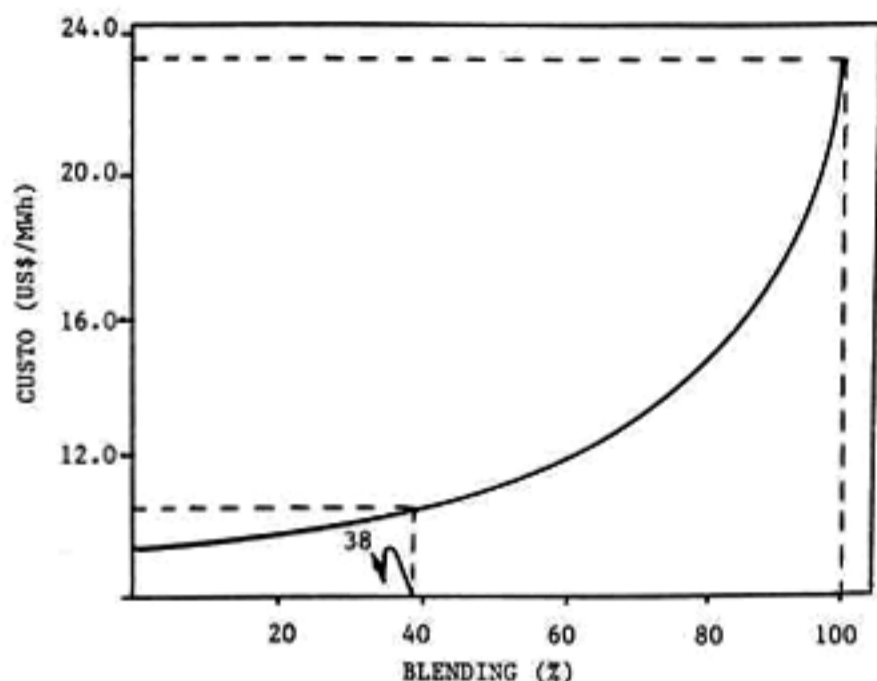


Figura 2. Custo do Ciclo Tandem-1 Calculado Pelo Programa P4C (Valores do Ciclo Tandem)

A figura 4, mostra esta curva ponderada. Os valores unitários dos custos parciais do ciclo são os constantes da referência 1.

Observa-se, na figura 4, que a curva apresenta um ponto de mínimo entre os "blendings" de 30 e 40%. Esta é justamente a faixa onde está o ponto ótimo de "blending" (38%) que otimiza a utilização de urânio natural determinada na referência 1. Este fato é coerente, pois um dos itens que mais contribuem para os custos do ciclo é,

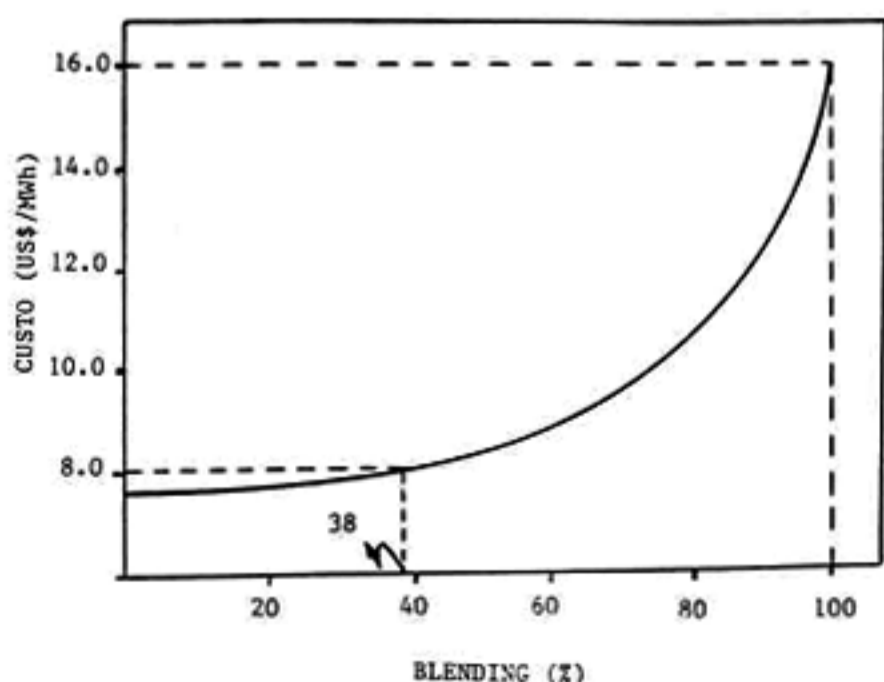


Figura 3. Custo do Ciclo Tandem-1 Calculado Pelo Programa P4C (Valores de Ciclo U_{nat})

juntamente com o processo de descontaminação química, o gasto com compra de "Yellow Cake".

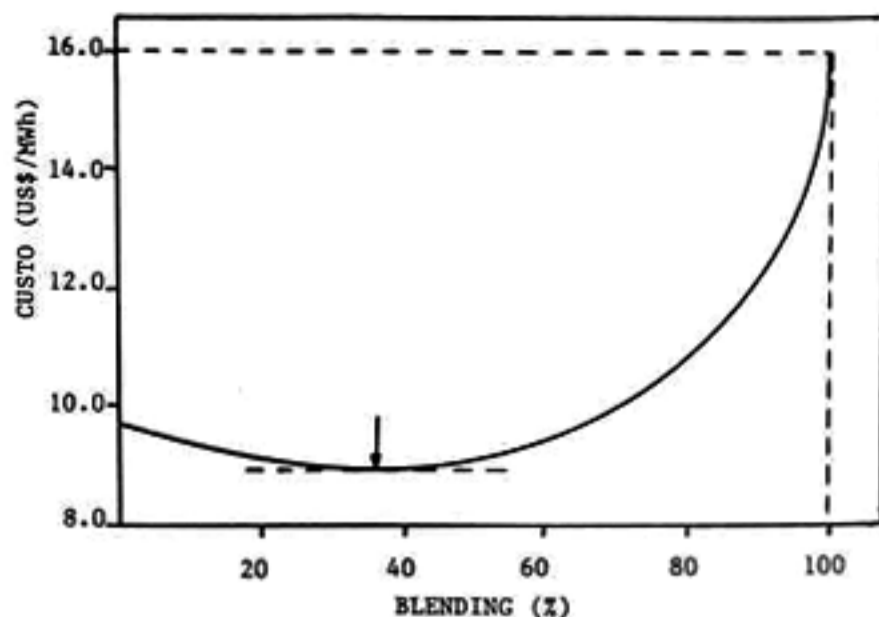


Figura 4. Custo do Ciclo Tandem-1 Com Valores Ponderados

A curva acima, com valores ponderados, é a que melhor representa os custos do ciclo Tandem-1 em função do "blending", mesmo considerando que etapas do ciclo não tenham seus custos alterados de forma proporcional ao "blending", como foi considerado aqui. Considerando os custos parciais separadamente, os resultados ficarão, obviamente, melhores. Foi por esse motivo que considerou-se uma faixa ótima e não o ponto de ótimo do custo do ciclo. O que se procurou demonstrar aqui é que, através do cálculo do custo do ciclo de combustível Tandem, também é possível determinar-se seu "blending" de urânio natural ótimo.

O mesmo estudo está sendo atualmente realizado com relação aos ciclos Tandem-2 e Tandem-3. Resultados preliminares confirmam as conclusões do presente trabalho.

CONCLUSÕES

Este trabalho procura demonstrar que, através do cálculo do custo do ciclo do combustível Tandem (Angra-I/Embalse), é possível determinar-se a porcentagem de "blending" (U_{nat}) ótimo a ser utilizada. Concluiu-se que a porcentagem ideal está compreendida entre 30 e 40% em U_{nat} . Este percentual confirma resultados anteriores onde a otimização se procedeu em termos da utilização de urânio natural e confirma também ser a compra do "yellow cake" uma das etapas mais caras do ciclo do combustível nuclear.

REFERÊNCIAS

- [1] Tumini, L. L. et alli, Study of a Tandem Fuel Cycle Between a Brazilian PWR (Angra-I) and an Argentinian CANDU (Embalse), Ann. Nucl. Energy Vol. 22, No 1, pp. 1-10, 1995.

[2] Mai, L. A., **Determinação da razão de Diluição e Fluxo de Massa Com Urânio Empobrecido**, Relatório Interno COPESP - R41101220008, 1994.

[3] Mai, L. A., **Determinação da razão de Diluição e Fluxo de Massa Com MOX do CANDU**, Relatório Interno COPESP - R40000989004, 1994.

[4] Park, H. S., **Informativo do "Korea Atomic Energy Research Institute" sobre o Ciclo DUPIC - "draft" mandado pessoalmente**, 1995.

[5] Croff, A. G., **Origen2.1 Isotope Generation and Depletion Code, CCC-371 RSIC**, 1991.

[6] Passadore, D. J., **Desarrollo de un Código de Calculo del Ciclo de Combustibles y Evaluacion de Ciclos Avanzados Para las Centrales de Potencia Argentinas**, Trabalho Especial Para a Engenharia Nuclear, Centro Atômico de Bariloche, Argentina, 1992.

[7] Mascarenhas, H. A., **NUCOST 1.0 - Código de Cálculo de Custo de Geração Nucleoelétrica**, CDTN, Minas Gerais, 1989.

ABSTRACT

The objective of this work is to determine by means of a fuel cycle cost calculation, the ideal percentage of natural uranium (blending) to be used with irradiated and descontaminated fuel of Angra-I reactor. This blending will be used in the argentinian reactor of Embalse (Tandem cycle). This work confirm previos study where an ideal percentage of natural uranium was determined by minimizing its use.