

## UTILIZAÇÃO DE "TAIL" COMO FATOR DE DILUIÇÃO DE COMBUSTÍVEL IRRADIADO DE ANGRA-1 (PWR) PARA UTILIZAÇÃO NO REATOR DE EMBALSE (CANDU)

Luiz Antonio Mai e José Rubens Maiorino

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, CNEN  
Caixa Postal 11049 (Pinheiros)  
05422-970, São Paulo, Brasil

### RESUMO

Neste trabalho é apresentada uma proposta de utilização do "tail" do processo de enriquecimento isotópico, como fator de diluição do combustível irradiado no reator de Angra-I (PWR) para utilização no reator de Embalse (CANDU). Fez-se, então, uso das mesmas técnicas dos estudos anteriores que utilizavam urânio natural. Para isso foi feita uma parametrização do "tail" dentro dos limites tradicionais de enriquecimento (entre 0,2 e 0,3 %). O estudo mostrou que a utilização de "tail" representou grande economia no suprimento de urânio além de vantagens ambientais e econômicas.

### INTRODUÇÃO

Dentro do programa de colaboração Brasil-Argentina, foi iniciado em 1992 estudos no sentido de integração dos ciclos de combustível entre o reator brasileiro de Angra-I (PWR) e o reator argentino de Embalse (CANDU) através do chamado ciclo TANDEM. A idéia de integração dos ciclos de combustível entre reatores tipo PWR e tipo CANDU foi inicialmente proposta pelos canadenses em 1985 [1]. Essa integração consiste do aproveitamento do plutônio produzido no combustível irradiado e descontaminado (sem os produtos de fissão) de reatores PWRs diluído em óxido de urânio natural em reatores CANDU. Alguns resultados parciais já foram obtidos para o caso específico Angra/Embalse [2], [3], [4] e [5].

Neste trabalho é proposta a utilização, no reator CANDU de Embalse, do "tail" (urânio empobrecido) do processo de enriquecimento isotópico em substituição ao urânio natural como fator de diluição do combustível irradiado e descontaminado advindo do PWR de Angra-I.

O "tail" é constituído de 0,2 a 0,3 % de urânio 235 e 99,8 a 99,7 % de urânio 238 aproximadamente. Esta faixa de variação é a considerada ótima no balanço custo-benefício do enriquecimento. Esse material é normalmente estocado de maneira segura na forma de  $UF_6$  e possui valor comercial principalmente pelo fato de poder ser utilizado em reatores tipo "breeder" como "blanket", com a finalidade de produção de plutônio fissil.

Esse tipo de integração dos ciclos de combustível entre os dois reatores em questão, permite que o reator argentino opere apenas contando com a alimentação de combustível do ciclo do reator brasileiro, pois tanto o "tail"

como o combustível irradiado podem ser originários deste último. Isso representa uma grande economia no suprimento de urânio natural.

A figura 1 a seguir esquematiza este tipo de ciclo.

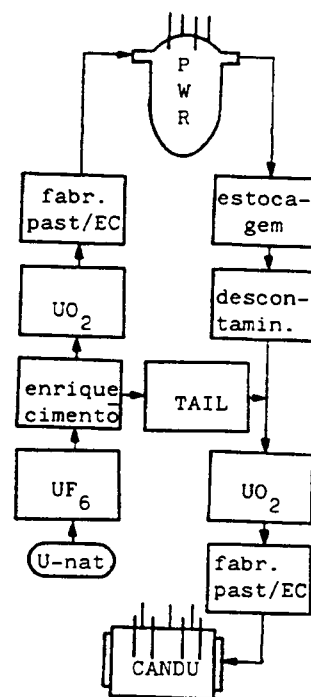


Figura 1. Esquema de Ciclo de Combustível Integrado PWR-CANDU Utilizando-se de "Tail"

Para este trabalho foram utilizados os seguintes programas de computador: ORIGEN2.1 [6] para cálculos de concentrações e WIMS-D/4 [7] para cálculo celular. Foram utilizados também os conceitos de "Plutônio Equivalente", que permite a determinação da queima de descarga do combustível do reator CANDU ( $Q_{ex}$ ) e também do "Fator de Pico Equivalente" [8], que permite a determinação do Fator de Multiplicação Efetivo ( $K_{ef(t=0)}$ ) inicial sem a necessidade de um cálculo celular explícito.

### ANÁLISE

Para este trabalho fez-se uso das mesmas técnicas dos estudos anteriores. A determinação da composição do combustível queimado do reator de Angra-I foi feita utilizando-se do programa ORIGEN2.1 com queima de 33.000 MW d/ton U e com 1 ano de resfriamento. Em seguida essas composições são usadas com "blending" de "tail" parametrizado dentro da faixa ótima (0,2 a 0,3 % de enriquecimento) com intervalos de variação de 0,02 %. Na tabela abaixo são apresentadas as concentrações dos elementos pesados calculadas pelo programa ORIGEN2.1 para o reator de Angra-I.

TABELA 1. Concentrações dos Elementos Pesados de Angra-I com 33.000 MWd/ton U e 1 ano de resfriamento

ISÓTOPO	CONC. (g/EC)
U-235	3.463+3
U-236	1.631+3
U-238	3.711+5
Pu-239	1.974+3
Pu-240	8.930+2
Pu-241	4.438+2
Pu-242	1.652+2

Com as concentrações da tabela acima, fazendo uma mistura ("blending") com o "tail", é possível determinar-se através dos conceitos de "Plutônio Equivalente" e do "Fator de Pico Equivalente" os valores do fator de multiplicação efetivo a queima zero ( $K_{ef(t=0)}$ ) e a queima de descarga do combustível ( $Q_{ex}$ ). Nas tabelas 2 e 3 são mostrados esses valores para os vários "tails" considerados.

A partir de um determinado "blending", o valor calculado de  $Q_{ex}$  é negativo, indicando que o  $K_{ef(t=0)}$  começa a ficar <1.

Nota-se, observando a tabela 2, que  $Q_{ex}$  é decrescente a medida que o valor do "blending" aumenta, para um dado valor do "tail" e que  $Q_{ex}$  é crescente a medida que o valor do "tail" aumenta, para um dado valor do "blending". Nota-se também que há um ganho em  $Q_{ex}$ , com relação ao  $Q_{ex}$  do urânio natural, para qualquer "blending" abaixo de 60%, pois o reator CANDU, quando opera com o seu ciclo normal de urânio natural, tem uma queima de descarga da ordem de 7.500 MWd/ton.

TABELA 2.  $Q_{ex}$  Para Vários "Blendings" (MWd/ton U)

B	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30
0	28.784	28.784	28.784	28.784	28.784	28.784
10	26.306	26.342	26.383	26.425	26.446	26.488
20	23.610	23.703	23.772	23.864	23.933	24.024
30	20.562	20.702	20.830	20.984	21.111	21.263
40	17.144	17.355	17.558	17.789	17.990	18.189
50	13.248	13.535	13.869	14.134	14.428	14.719
60	8.727	9.165	9.597	9.983	10.401	10.814
70	3.248	3.856	4.474	5.032	5.624	6.159
80	-	-	-	-	-	5.354
90	-	-	-	-	-	-
100	-	-	-	-	-	-

TABELA 3.  $K_{ef(t=0)}$  Para Vários "Blendings"

B	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30
0	1.4128	1.4128	1.4128	1.4128	1.4128	1.4128
10	1.3821	1.3824	1.3828	1.3832	1.3835	1.3839
20	1.3485	1.3493	1.3502	1.3510	1.3518	1.3526
30	1.3102	1.3116	1.3130	1.3148	1.3157	1.3171
40	1.2668	1.2694	1.2715	1.2736	1.2751	1.2772
50	1.2180	1.2210	1.2240	1.2270	1.2300	1.2329
60	1.1605	1.1649	1.1692	1.1734	1.1776	1.1817
70	1.0899	1.0962	1.1024	1.1076	1.1143	1.1202
80	0.9985	1.0030	1.0172	1.0261	1.0348	1.0433
90	0.8765	0.8918	0.9065	0.9204	0.9338	0.9467
100	0.6701	0.7013	0.7297	0.7560	0.7801	0.8027

A figura 2 apresenta as curvas correspondentes a  $K_{ef(t=0)} \times$  "Blending", para os 6 valores de "tail" utilizados.

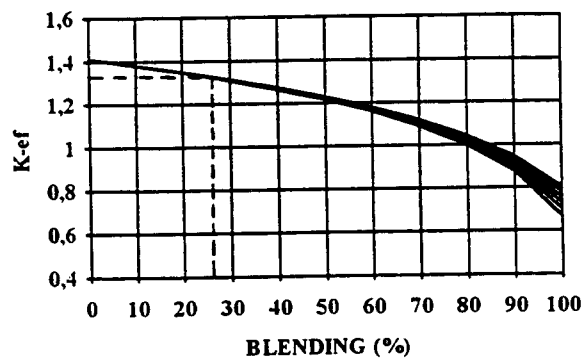


Figura 2.  $K_{ef(t=0)} \times$  "Blending" Para os Vários "Tails"

A medida que a porcentagem de "blending" aumenta, a diferença do  $K_{ef(t=0)}$  entre os valores de "tail" é mais acentuada e até aproximadamente 30-40 % no "blending" não há definição entre as curvas.

Nas tabelas de 4 a 9 são apresentados os valores do consumo de combustível irradiado (MOX) para os vários valores do "tail", o ganho relativo à queima do CANDU utilizando combustível de urânio natural, além da alimentação correspondente ("feed").

TABELA 4. Consumo de "tail" e MOX (ton/a), ganho relativo e "Feed" para "tail" de 0,20 %

B %	CONS. (U)		G.	Feed tonU/a
	TAIL	MOX		
0	0	25.26	3.8	25.26
10	2.74	24.69	3.5	27.43
20	6.20	24.77	3.1	30.97
30	10.66	24.89	2.7	35.55
40	16.70	25.04	2.3	41.74
50	26.66	26.67	1.8	53.35
60	48.00	32.00	1.2	80.00
70	168.00	72.00	0.4	240.00
80	-	-	-	-
90	-	-	-	-
100	-	-	-	-

TABELA 7. Consumo de "tail" e MOX (ton/a), ganho relativo e "Feed" para "tail" de 0,26 %

B %	CONS. (U)		G.	Feed tonU/a.
	TAIL	MOX		
0	0	25.26	3.8	25.26
10	2.74	24.69	3.5	27.43
20	6.00	24.00	3.2	30.00
30	10.29	23.99	2.8	34.28
40	16.00	23.99	2.4	39.99
50	25.26	25.26	1.9	50.52
60	48.00	31.99	1,3	79.99
70	95.98	41.14	0.7	134.12
80	-	-	-	-
90	-	-	-	-
100	-	-	-	-

TABELA 5. Consumo de "tail" e MOX (ton/a), ganho relativo e "Feed" para "tail" de 0,22 %

B %	CONS. (U)		G.	Feed tonU/a.
	TAIL	MOX		
0	0	25.26	3.8	25.26
10	2.74	24.69	3.5	27.43
20	6.00	24.00	3.2	30.00
30	10.66	24.89	2.7	35.55
40	16.70	25.04	2.3	41.74
50	26.68	26.67	1.8	53.35
60	48.00	32.00	1.2	80.00
70	134.40	57.60	0.5	192.00
80	-	-	-	-
90	-	-	-	-
100	-	-	-	-

TABELA 8. Consumo de "tail" e MOX (ton/a), ganho relativo e "Feed" para "tail" de 0,28 %

B %	CONS. (U)		G.	Feed tonU/a.
	TAIL	MOX		
0	0	25.26	3.8	25.26
10	2.74	24.69	3.5	27.43
20	6.00	24.00	3.2	30.00
30	10.29	23.99	2.8	34.28
40	16.00	23.99	2.4	39.99
50	25.26	25.26	1.9	50.52
60	41.14	27.42	1.4	68.56
70	95.98	41.14	0.7	137.12
80	-	-	-	-
90	-	-	-	-
100	-	-	-	-

TABELA 6. Consumo de "tail" e MOX (ton/a), ganho relativo e "Feed" para "tail" de 0,24 %

B %	CONS. (U)		G.	Feed tonU/a.
	TAIL	MOX		
0	0	25.26	3.8	25.26
10	2.74	24.69	3.5	27.43
20	6.00	24.00	3.2	30.00
30	10.29	23.99	2.8	34.28
40	16.70	25.04	2.3	41.74
50	26.68	26.67	1.8	53.35
60	48.00	31.99	1,3	79.99
70	111.99	47.99	0.6	159.98
80	-	-	-	-
90	-	-	-	-
100	-	-	-	-

TABELA 9. Consumo de "tail" e MOX (ton/a), ganho relativo e "Feed" para "tail" de 0,30 %

B %	CONS. (U)		G.	Feed tonU/a.
	TAIL	MOX		
0	0	25.26	3.8	25.26
10	2.74	24.69	3.5	27.43
20	6.00	24.00	3.2	30.00
30	10.29	23.99	2.8	34.28
40	16.00	23.99	2.4	39.99
50	24.00	23.99	2.0	47.99
60	41.14	27.42	1.4	68.56
70	83.99	35.99	0.8	119.98
80	95.98	41.14	0.7	137.12
90	-	-	-	-
100	-	-	-	-

Graficando-se  $K_{ef}(t=0)$  em função do consumo de MOX para cada valor de "tail", obtêm-se curvas com pontos de mínimo bem definidos. Esses mínimos foram determinados graficamente e representam uma minimização do consumo de MOX. A tabela 10 mostra os valores correspondentes de  $K_{ef}(t=0)$  ótimo e também para o caso de "blending" com U-nat. (0,72 %) da referência 2.

tabela 10.  $K_{ef}$  Ótimo Para os Vários "Tails"

"TAIL" %	$K_{ef}$ ÓTIMO
0.20	1.340
0.22	1.335
0.24	1.332
0.26	1.322
0.28	1.320
0.30	1.320
(*) 0.72	1.320

(\*) U natural

Percebe-se, observando a tabela acima, que o valor de  $K_{ef}$  que minimiza o consumo de MOX satura em 1,32 a partir do "tail" de 0,26 %. A média dos valores de  $K_{ef}$  ótimo para os "blendings" estudados é aproximadamente de 1,33. Este ponto é mostrado na figura 2 e corresponde a um "blending" ótimo de 26 %. Este mesmo valor pode ser tomado como o ótimo, independentemente do "tail", pois neste ponto não há uma clara definição entre as 6 curvas, como se pode observar.

A queima de extração que aproximadamente corresponde a esse "blending" é:

$$Q_{ex}(26\%) = 22.400 \text{ MWd/ton.U}$$

Esse valor é ligeiramente inferior à queima de extração com "blending" com urânio natural da referência 2 que é de 22.500 MWd/ton.U.

Com relação à queima de extração e vantagens ambientais (toxicidade de rejeitos), tiradas dos trabalhos anteriores (ciclo TANDEM com "blending" de Urânio natural), valem aqui as mesmas conclusões pela similaridade dos processos, porém, com a vantagem adicional, de se utilizar apenas uma fonte de urânio natural. Isso representa mais 12 ton. U-nat/a de economia no consumo de urânio na estratégia binacional, comparada com o ciclo TANDEM de urânio natural, que já representava cerca de 50% de economia quando comparado com o ciclo normal de urânio natural.

Assumindo que a alimentação de equilíbrio de Angra-I é 15,7 ton. U/a, a quantidade de metal pesado (U-Pu) na descarga (considerando uma queima de 33.000MWd/ton. U) será 14,8 ton. HM/a. A alimentação do CANDU em combustível MOX, para a queima de 22.400 MWd/ton.HM será 32,0 ton HM/a. Esse fluxo de massa é representado esquematicamente na figura 3 a seguir.

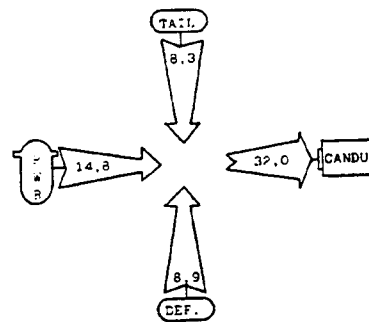


Figura 3. Fluxo de Massa do Ciclo TANDEM com "Blending" de 26 % de "Tail" (ton/a.)

A tabela 11 mostra as porcentagens em peso dos núcleos pesados para "blending" de 26 % de "tail" a 0.20 % enriquecido ("blending" ótimo).

TABELA 11. Porcentagem Em Peso Para "Blending" de 26% de "Tail" a 0.20% enriquecido

NUCLÍDEO	% EM PESO
U-235	0.741
U-236	0.326
U-238	98.227
Pu-239	0.395
Pu-240	0.179
Pu-241	0.089
Pu-242	0.033

Com esses valores da tabela acima calcula-se as concentrações (atm. b/ cm) necessárias para introdução no programa WIMS-D/4 com densidade de MOX de 8,9 g/cm<sup>3</sup>. Com o programa WIMS-D/4 determina-se a curva de queima do reator CANDU utilizando esse tipo de combustível. A figura 4 mostra essa curva.

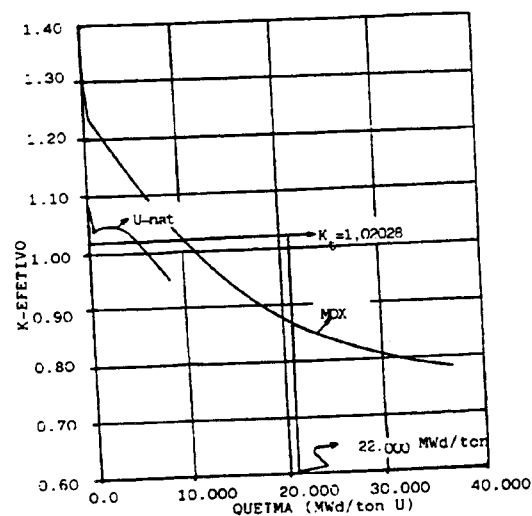


Figura 4. Curva de Queima do CANDU com "Blending" de "Tail" a 26 % e do ciclo de urânio natural

Na mesma figura é mostrada também a curva de queima para o combustível de urânio natural e a linha de  $K_{ef}$  de trabalho ( $K_1 = 1,02028$ ). Usando esse valor de  $K_1$  (fornecida pela Central Nuclear de Embalse), a queima média e a queima de extração dos dois tipos de combustível podem ser determinadas graficamente. Isso é feito utilizando-se da seguinte expressão aproximada:

$$Q_{ex} = 2 Q (K_{ef}=1.02028)$$

Pela figura pode-se notar que esse valor é aproximadamente de 22.000 MWd/ton. U, para o combustível de MOX e "tail", que está aproximadamente de acordo com a previsão através da técnica do Plutônio Equivalente (22.400 MWd/tonU).

### CONCLUSÕES

A parametrização do "tail" dentro dos limites tradicionais de enriquecimento (entre 0,2 e 0,3 % em U-235) mostrou-se irrelevante frente à porcentagem de "blending" determinada que minimiza o consumo de combustível MOX (~ 26 %). Para essa porcentagem não existe definição clara das curvas de  $K_{ef} (t=0)$  versus "blending", correspondendo, em qualquer caso, a  $K_{ef} (t=0) = 1,33$ . Assim tomou-se como base "tail" = 0.20 % para ser usado como "blending".

Além da vantagem de economia de cerca de 12 ton. U-nat/a no consumo de urânio natural, são preservadas as vantagens do tempo de residência do combustível no núcleo (através da queima de extração) e as vantagens ambientais relativas ao ciclo TANDEM com "blending" de urânio natural. Mais ainda, apesar de não ter sido feito nenhum cálculo econômico até o momento com combustível MOX e "tail", é de se prever também vantagens neste campo.

### REFERÊNCIAS

- [1] Vecder, J. et alii. **A Catalog of Advanced Fuel Cycles in CANDU Reactors**, AECL 8641, 1985.
- [2] Tumini, L.L.P. et alii, **Study of a TANDEM Fuel Cycle Between a Brazilian PWR (Angra-I) and an Argentinean CANDU (Embalse)**. Trabalho a ser publicado na "Annals of Nuclear Energy".
- [3] Mai, L.A.; Maiorino, J.R. **Implementação de Um Ciclo TANDEM Entre os Reatores de Angra-I (Brasil) e Embalse (Argentina) - XXI Reunión Anual AATN**, Mar del Plata, Argentina, 1993.
- [4] Mai, L.A., Maiorino, J.R. **Potencial Energético do Combustível Irradiado no Reator Angra-I**, II Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, Campinas, 1994.

[5] Tumini, L.L.P. et alii. **Implementação de Um Ciclo "TANDEM" Entre os Reatores de Angra-I (Brasil) e Embalse (Argentina)**, V CGEN, Rio de Janeiro, 1994.

[6] **ORIGEN2 Isotope Generation and Depletion Code: User's Manual**, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, ORNL-TM-7175, 1982.

[7] Leszczynski, F., **Metodos y Usos delCodigo WIMSd4**, Comision Nacional de Energia Atomica, Centro Atomico de Bariloche, 8400 San Carlos de Barilocho (RN) Argentina, 1990.

[8] Tumini, L. L. P., **Analisis de Ciclos Directos Avanzados Para Reactores CANDU**, Engineer's Thesis, Balseiro Institute, Argentina, 1993.

### ABSTRACT

This work proposes a process to use the tail of isotopic enrichment plant as a factor of dilution (blending) for the burned fuel of Angra-I reactor (PWR) for final utilization in the Embalse reactor (CANDU). It was made use of the same technics in previous works that used natural uranium. For this purpose, it was made a tail parametrization inside of the traditional limits of enrichment (between 0.2 and 0.3%). The study showed that the tail utilization represents great savings for the uranium supplies and environment and economic advantages.