

COMBUSTÍVEIS PARA REATORES HÍBRIDOS

Antonio T. e Silva e Ubiratan C. de Souza

Departamento de Reatores
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP)
Caixa Postal 11049 - Pinheiros
05422-970 - São Paulo - SP - Brasil
e-mail: teixeira@net.ipen.br

RESUMO

Este trabalho apresenta análises térmica e termo-hidráulica de dois tipos de núcleos propostos para um reator amplificador de energia rápido utilizando, respectivamente, combustíveis de óxidos mistos e metálico. O combustível de óxidos mistos é do tipo $\text{ThO}_2 + 0,1^{233}\text{UO}_2$ e o combustível metálico é do tipo $^{232}\text{Th} + 30\%\text{TRU}$. Os resultados destas análises permitem estabelecer parâmetros que serão necessários para uma posterior análise do desempenho sob irradiação destes combustíveis no reator.

Palavras chaves: Amplificador de energia rápido, combustíveis de óxidos mistos, combustíveis metálicos, análise térmica, análise termo-hidráulica.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem sido considerada a idéia de se utilizar nêutrons ultra-rápidos oriundos da reação de “spallation” de prótons de aceleradores para transmutar núcleos de meia vida longa em núclídios estáveis ou de meia vida curta. Alternativamente à utilização de sistemas híbridos (combustível + acelerador) para queimar actínídeos (transurânicos - TRU), foi verificado que um sistema físsil sub-crítico com uma fonte externa de nêutrons de “spallation”, além da transmutação, proporcionaria um ganho líquido de energia (energia gerada no sistema menos energia necessária para operar o acelerador). Além disso, o sistema seria regenerador e ao se desligar a fonte externa (acelerador), a reação em cadeia cessaria (segurança intrínseca). Sistemas híbridos (acelerador de prótons + reator subcrítico) poderiam ser utilizados para gerar energia.

Em 1995, Carlos Rubbia e colaboradores [1] propuseram um reator Amplificador de Energia Rápido (AE) (“Fast Energy Amplifier”) que utiliza nêutrons ultra rápidos oriundos de uma única fonte de “spallation” de prótons de um acelerador. O sistema sub-crítico é embebido em chumbo líquido, que também é o refrigerante. O AE utiliza um acelerador de prótons de 1 GEV para produzir uma fonte de nêutrons no reator por meio de reações de “spallation”. Desta forma, o sistema é considerado “source driven” e o arranjo de núcleos físeis e férteis é projetado de tal forma que se mantenha sempre subcrítico durante o ciclo de vida do reator. O nível de potência é controlado pela intensidade do feixe de prótons produzido pelo acelerador para manter a reação em cadeia. O chumbo

líquido mantém as características de um sistema ultra-rápido, no que tange a energia do nêutron. A principal virtude do AE é o fato de que a probabilidade de fissão dos transurânicos é muito grande para todos os elementos por causa do espectro de nêutrons muito duro, somente levemente moderados num meio de números atômicos altos. Em conseqüência, a incineração torna-se um processo muito eficiente. Na proposta de Rubbia e colaboradores, o combustível inicial no núcleo é do tipo $(\text{ThO}_2 + 0,1^{233}\text{UO}_2)$, tendo também um núcleo adicional regenerador de ThO_2 para produção de ^{233}U a ser utilizado como combustível nos próximos carregamentos do núcleo. Os elementos transurânicos não podem ser introduzidos no AE sem uma mistura prévia com um elemento fértil.

Em 1997, Carlos Rubbia e colaboradores [2] apresentaram um nova versão para o AE, específica para o caso da Espanha, onde a principal função do reator seria a incineração de rejeitos não desejáveis de Reatores de Água Leve (“Light Water Reactors” – LWR). Para este reator, o tório foi escolhido como combustível, no lugar do urânio, desde que o elemento fissionável produzido é o ^{233}U em vez de plutônio adicional. No fim do ciclo, o urânio é facilmente separado dos transurânicos pela mesma instalação de reprocessamento usada para preparar o combustível LWR. O ^{233}U produzido é preservado para futura operação do AE para geração de energia ou ligado com o urânio recuperado dos LWR para produzir novos combustíveis LWR. Para esta nova proposta, os combustíveis de óxidos mistos foram substituídos por combustíveis metálicos.

Combustíveis metálicos foram intensamente estudados no projeto do “Integral Fast Reactor” [3]. Eles

possibilitam a utilização de processos de fabricação e reciclagem compactos. A fabricação é feita por processos de injeção em molde em forno a vácuo. A reciclagem é realizada por via seca, eletrodeposição, usando a tecnologia de sais fundidos, denominada pelos americanos de piroprocesso. Nesses processos, a geração de rejeitos é menor comparativamente aos usados no caso da fabricação e reciclagem dos óxidos mistos. Estes últimos utilizam a tecnologia do pó e a reciclagem usa a via úmida que contamina os reagentes químicos utilizados. Os combustíveis metálicos apresentam ainda as seguintes vantagens: 1) maiores queimas (valores testados no EBR-II atingiram queimas de 20%at., correspondendo a 200 GWD/Ton; 2) a densidade do combustível metálico é alta; 3) alta condutividade térmica que garante temperaturas centrais mais baixas, com a mesma relação $T_{\text{max}}/T_{\text{fusão}}$ dos óxidos, para a mesma potência; 4) o reator pode operar com varetas combustíveis falhadas. A tecnologia amplamente testada no EBR-II para o combustível U-xPu-10Zr pode ser facilmente extrapolada para combustíveis com tório que é mais favorável a altas temperaturas [2], desde que: 1) U-20Pu-10Zr é líquido a 1068 °C, enquanto, por exemplo, TH-20Pu é líquido a 1450 °C; 2) interações metalúrgicas combustível revestimento ocorrem a temperaturas mais altas.

Este trabalho desenvolve análises térmica e termo-hidráulica para os dois tipos de núcleos propostos acima para o AE utilizando óxidos mistos e metálico e funcionando, respectivamente, para geração de energia e incineração de rejeitos indesejáveis. Estas análises fornecem as bases necessárias para uma análise do desempenho sob irradiação no reator destes combustíveis, análise esta em desenvolvimento no Departamento de Reatores do IPEN-CNEN/SP.

2. PRINCIPAIS PARÂMETROS DO NÚCLEO E DO SISTEMA DE RESFRIAMENTO PRIMÁRIO DO AE

As Tabelas 1 e 2 apresentam os parâmetros do núcleo e do sistema de resfriamento primário para o AE. A segunda coluna das tabelas acima apresenta os parâmetros propostos por Rubbia e colaboradores para o AE funcionando para geração de energia (produção) [1] e a terceira coluna os parâmetros propostos por Rubbia e colaboradores para o AE funcionando como incinerador para o AE [2]. Nota-se na terceira coluna da Tabela 1 que a quantidade de tório foi minimizada, para reduzir a fração de nêutrons produzindo ^{233}U , desde que é assumido que o propósito principal do AE é a incineração em vez da geração de energia. Em consequência, a massa total que era da ordem de 28 toneladas foi reduzida para cerca de 10 toneladas. O núcleo regenerador foi também removido. Os principais resultados destas modificações são: 1) uma maior fração de nêutrons escapa do núcleo. Esses nêutrons em excesso podem ser usados para eventualmente incinerar produtos de fissão (^{99}Tc e ^{129}I); 2) o ciclo de queima é reduzido de 5 anos para 2 anos para uma queima de 120 GWD/Ton; e 3) a potência produzida no combustível é da ordem de 160 W/g, bastante aceitável para combustíveis metálicos. A geometria da vareta combustível (“pin”) foi modificada

(Figuras 1a e 1b) para deixar um espaço maior em volta do núcleo para incineração dos produtos de fissão (^{99}Tc e ^{129}I).

FIGURA 1-a

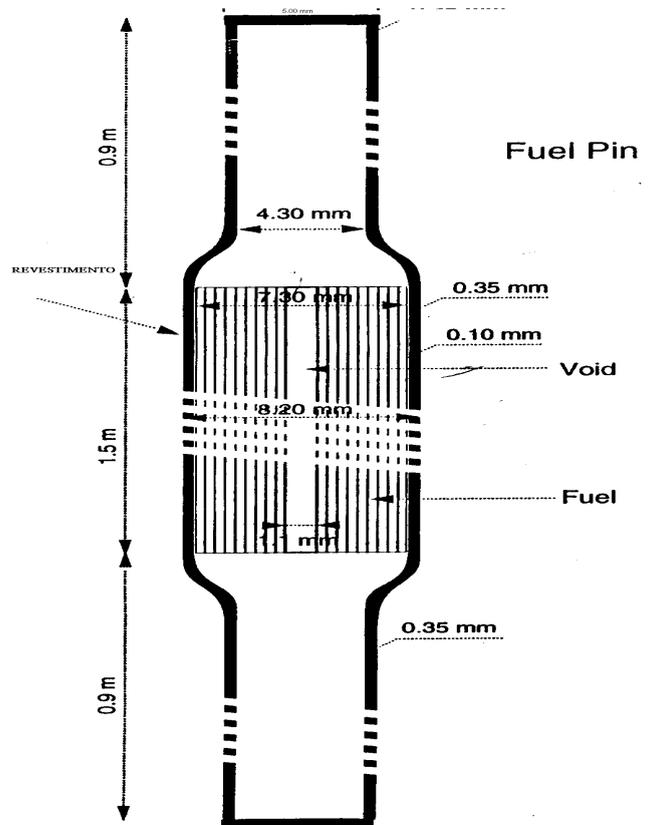


FIGURA 1-b

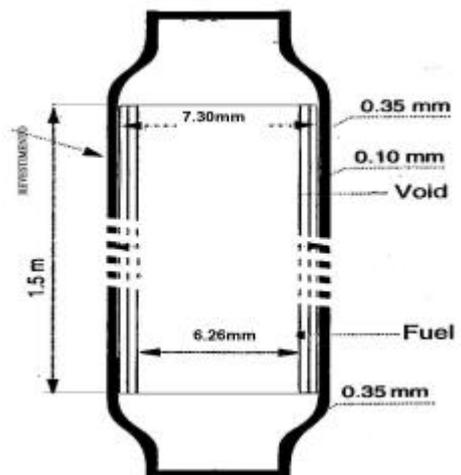


FIGURA 1: Varetas Combustíveis (“pins”) propostas para o AE: 1-a) vareta combustível de óxidos mistos para geração de energia; 1-b) vareta combustível de combustível metálico para incineração.

TABELA 1: Principais Parâmetros do Núcleo do AE Funcionando para Geração de Energia (Produção) e Incineração (Caso da Espanha) [1, 2].

	Produção	Incineração
Potência térmica/unidade (MW)	1500	1500
Refrigerante	Chumbo líquido	Chumbo líquido
<i>Vaso Principal</i>		
Altura (m)	30	30
Diâmetro (m)	6	6
Material	HT-9	HT-9
Espessura da parede (mm)	70	70
<i>Núcleo Combustível (interno e externo)</i>		
Mistura inicial do combustível	ThO ₂ + 0,1 ²³³ UO ₂	²³² Th+30% TRU
Massa inicial de combustível (ton)	28,4	9,2
Material do revestimento	HT-9 baixa ativação	HT-9 baixa ativação
Potência específica (W/g)	52,8	163
Densidade de potência (W/cm ³)	176 (média), (340 máxima)	176 (média), 305 (máxima)
Temperatura máxima no revestimento	707°C	658°C
<i>Núcleo regenerador</i>		
Mistura inicial de combustível	ThO ₂	-
Massa Inicial de Combustível (ton)	5,6	-
Material do revestimento	HT-9 baixa ativação	-
<i>Varetas combustíveis (“pins”)</i>		
Material do revestimento	HT-9	HT-9
Diâmetro externo (mm)	8,2	8,2
Espessura do revestimento (mm)	0,35	0,35
Folga combustível-revestimento (mm)	0,1	0,1
Diâmetro do combustível (mm)	7,3	anel de 0,52 mm de espessura
Diâmetro do vazio interno no combustível (mm)	1,1	6,26
Material do revestimento	HT-9	HT-9
Comprimento ativo (cm)	150	150
Comprimento do plenum superior + inferior (cm)	180	-
Diâmetro externo do plenum (mm)	5,0	-
Densidade de potência na vareta combustível (W/cm ³)	523,3	1977,8
<i>Elementos combustíveis (“Bundles”)</i>		
Configuração	Hexagonal	Hexagonal
Número de voltas hexagonais (núcleo interno, externo)	10, 11	10, 11
Número de “pins” em cada “bundle”(núcleo interno, externo)	331, 397	331, 397
“Pitch” entre “pins” (núcleo interno, externo) (mm)	12,43, 11,38	12,43, 11,38
Número de elementos	120 (30, 90)	120 (30,90)

TABELA 2: Principais Parâmetros do Sistema de Resfriamento Primário [1], [2].

	Convecção Natural	Convecção Natural
Método de bombeamento	Convecção Natural	Convecção Natural
Altura da coluna de convecção (m)	25	25
Pressão primária gerada por convecção (bar)	0,65	0,54
Trocadores de calor (MW)	4 x 375	4 x 375
Temperatura de entrada no núcleo (°C)	400	400
Temperatura de saída no núcleo (°C)	600	562
Fluxo de refrigerante no núcleo (ton/s)	53,6	50,6
Velocidade do refrigerante no núcleo, média (m/s)	1,50	1,38

O plenum superior e o plenum inferior, totalizando 180 cm na vareta, foram removidos e este espaço que era dedicado para armazenar gases na vareta do AE para geração de energia (Figura 1-a) foi substituído por um vazio central no combustível metálico (Figura 1-b). Este vazio central tem um diâmetro de 6,26 mm, sendo o combustível dentro da vareta posicionado em um anel circular de 0,52 mm de espessura circundando o revestimento. O vazio central maior no combustível tem também a vantagem de reduzir a temperatura máxima na vareta. O vazio central maior no combustível e o ciclo de queima menor reduzem consideravelmente a pressão na vareta combustível devido à formação de gases de fissão, parâmetro importante na análise de desempenho do combustível sob irradiação.

O sistema de resfriamento primário do AE proposto no caso da incineração é substancialmente similar ao proposto para a geração de energia. A altura total do núcleo é ainda 1,5 m, mas o plenum superior e o plenum inferior da vareta foram removidos, assim como o combustível regenerador (ThO₂). Desde que as quedas de pressão no plenum não estão mais presentes, a circulação natural é aumentada. Em consequência disso, o resfriamento é mais efetivo e a temperatura de saída deverá ser menor no caso do AE para incineração. Em vista da menor temperatura de saída, a pressão primária gerada por convecção será reduzida.

3. ANÁLISES TÉRMICA E TERMO-HIDRÁULICA DOS COMBUSTÍVEIS PROPOSTOS.

A Tabela 3 apresenta as principais equações e a definição dos símbolos e variáveis utilizados nos cálculos térmico e termo-hidráulico dos núcleos propostos, sendo o núcleo do AE para geração de energia denominado de Núcleo 1 e o núcleo para incineração denominado de Núcleo 2. Uma análise de canal médio e uma análise de canal quente foram desenvolvidas para os dois núcleos propostos.

Como a potência térmica do AE (1500 MW) é a mesma para os dois núcleos, a potência média por vareta combustível (q) é praticamente a mesma, totalizando nos dois núcleos cerca de 32,9 KW. Para a análise de canal quente foi utilizado os fatores de pico $f_q = 1,932$ e $f_q = 1,733$, respectivamente, para os Núcleos 1 e 2, valores estes advindos do cálculo neutrônico dos reatores [1, 2] e fornecendo uma potência térmica máxima na varetas combustíveis de 63,6 KW e 57,0 KW.

Aplicando-se as equações de 1 a 8 da Tabela 3, foi possível calcular as temperaturas nas varetas combustíveis dos dois núcleos analisados. As Tabelas 4 e 5 apresentam as temperaturas atingidas na análise de canal quente, para os núcleos envolvidos, no refrigerante chumbo, no revestimento e no combustível. Os resultados para o Núcleo 1 apontam uma potência linear máxima na vareta combustível (q^{max}) de 52,1 KW/m e um fluxo de calor máximo na superfície da vareta combustível (q''^{max}) de 202,2 W/cm². Para o Núcleo 2, estes valores reduzem-se, respectivamente, para 46,7 KW/m e 181,2 W/cm². Da Tabela 4, nota-se que a temperatura do refrigerante na saída do Núcleo 1 é de 650,4 °C, cerca de 38,5 °C maior que a

obtida no Núcleo 2, 611,9 °C, mostrando que o resfriamento é mais efetivo neste último. A velocidade calculada no canal quente do Núcleo 1 é de 2,02 m/s e a do Núcleo 2 de 2,14 m/s, sendo a queda de pressão gerada no sistema primário pelo bombeamento convectivo reduzida de $\Delta P = 0,65$ bar no Núcleo 1 para $\Delta P = 0,54$ bar no Núcleo 2.

As quedas de temperatura no revestimento do combustível foram determinadas utilizando uma condutividade térmica $K_c = 16,96$ W/m°C para o revestimento de aço HT-9 nos dois núcleos. Para o combustível metálico, a sua alta condutividade térmica ($K_{\text{comb metálico}} = 8,47$ W/m°C) comparada à condutividade térmica do combustível de óxidos mistos utilizada ($K_{\text{comb óxidos}} = 2,50$ W/m°C) determina menores temperaturas no combustível. Para o Núcleo 1, a máxima temperatura atinge $TC_{\text{max}} = 2324$ °C e no Núcleo 2 cerca de $TC_{\text{max}} = 1074$ °C, obtendo uma relação $T_{c_{\text{max}}}/T_{\text{fusão}}$ de, respectivamente, 0,70 e 0,74 para os combustíveis analisados.

4. CONCLUSÕES

Está em andamento no IPEN-CNEN/SP um estudo comparativo do desempenho sob irradiação de combustíveis de óxidos mistos do tipo ThO₂ + 0,1²³³UO₂ e de combustível metálico do tipo ²³²Th + 30%TRU utilizados em dois tipos de núcleos de Amplificadores de Energia Rápido (AE). Para a determinação de parâmetros de projeto importantes para esta análise, foram desenvolvidas neste trabalho análises térmica e termo-hidráulica dos dois tipos de núcleos acima, gerando as seguintes conclusões:

1. A alta densidade do combustível metálico permite a alocação de um vazio interno no combustível, gerando varetas combustíveis onde um plenum para coleta de gases não é necessário. A retirada desse plenum reduz a perda de pressão no núcleo, diminuindo a pressão do sistema primário a ser gerada pelo bombeamento convectivo. A pressão interna gerada na vareta combustível sob irradiação não deve favorecer efeitos adversos, visto que em combustíveis metálicos deste tipo valores da ordem de 20%at. foram atingidos, correspondendo a 200 GWD/Ton;
2. A alta condutividade térmica do combustível metálico garante menores temperaturas nesta vareta combustível quando comparadas com as temperaturas obtidas nas varetas combustíveis com óxidos mistos. O fluxo de calor e as temperaturas obtidas nas varetas com combustível metálico favorecem a utilização do aço HT-9 como material de revestimento.

TABELA 3: Equações e Definição das Variáveis e Símbolos Utilizados nos Cálculos Térmico e Termo-hidráulico dos Núcleos com Combustíveis de Óxidos Mistos e Metálico do AE.

$$q'(z) = q'_{\max} [1 - b (z - z_{\text{mid}})^2] \quad (1)$$

$q'(z)$ = distribuição axial da potência linear na vareta combustível (W/m)
 q'_{\max} = potência linear máxima na vareta (W/m)
 z_{mid} = altura da metade da vareta combustível (m)
 b = parâmetro dado pela forma da distribuição de potência na vareta combustível

$$T_{\text{chumbo}}(z) = T_{\text{chumbo,ent}} + (q'_{\max} / \dot{f}a \nu \rho C_p) [z - (b/3)(z - z_{\text{mid}})^3 - (b/3) z_{\text{mid}}^3] \quad (2)$$

T_{chumbo} = temperatura do refrigerante (°C)
 $T_{\text{chumbo,ent}}$ = temperatura do refrigerante na entrada do comprimento ativo da vareta combustível no núcleo (°C)
 $\dot{f}a$ = área de escoamento do canal refrigerante (m²) [$\dot{f}a = (3^{1/2} / 2) \text{pitch}^2 - \Pi r_e^2$]
 ν = velocidade do refrigerante (m/s²)
 ρ = densidade do refrigerante (Kg/m³)
 C_p = Calor específico do refrigerante (Joule/Kg°C)

$$T_{\text{out rev}}(z) = T_{\text{chumbo}}(z) + [q''(z) / h] \quad (3)$$

$q''(z)$ = fluxo de calor na superfície da vareta combustível (W/m²)
 h = coeficiente de transferência de calor local (W/m²°C)

$$h = Nu K_L / d_e \text{ e } Nu = 4,82 + 0,0185 (\nu \rho C_p d_e / k_L)^{0,827} \quad (4)$$

Nu = número de Nusselt
 K_L = Condutividade térmica do chumbo (W/m°C)
 d_e = diâmetro efetivo = $(4\dot{f}a / 2\Pi r_e)$ (m)
 r_e = raio externo da vareta combustível (m)

$$T_{\text{ext rev}}(z) = T_{\text{chumbo,ent}} + (q'_{\max} / \dot{f}a \nu \rho C_p) [z - (b/3)(z - z_{\text{mid}})^3 - (b/3) z_{\text{mid}}^3] + (q''_{\max} / h) [1 - (b/3)(z - z_{\text{mid}})^2] \quad (5)$$

$T_{\text{ext rev}}$ = temperatura na superfície externa do revestimento (°C)

$$T_{\text{int rev}}(z) = T_{\text{ext rev}}(z) + (e / K_c) (q''_{\max}) [1 - (b/3)(z - z_{\text{mid}})^2] \quad (6)$$

$T_{\text{int rev}}$ = temperatura na superfície interna do revestimento (°C)
 K_c = condutividade térmica do material de revestimento (W/m°C)
 e = espessura do revestimento (m)

$$T_{\text{ext comb}}(z) = T_{\text{int rev}}(z) + (q''_{\max} / K_{\text{comb}}) [1 - (b/3)(z - z_{\text{mid}})^2] \quad (7)$$

$T_{\text{ext comb}}$ = temperatura na superfície externa do combustível (°C)
 K_{comb} = Condutividade térmica do combustível (W/m°C)

$$T_{\text{int comb}}(r,z) = T_{\text{ext comb}}(z) + [q'''(z) / 4K_{\text{comb}}] (r_1^2 - r^2) \quad r_2 \leq r \leq r_1 \quad (8)$$

$T_{\text{int comb}}$ = temperatura na superfície interna do combustível (°C)
 $q'''(z)$ = densidade de potência na vareta combustível (W/m³)

$$\Delta P = K \Delta T h_c g \quad (9)$$

ΔP = diferença de pressão gerada no circuito pelo ação do bombeamento convectivo (bar)
 K = coeficiente de expansão do chumbo (m³°C⁻¹)
 h_c = altura da coluna de chumbo (m)
 g = aceleração da gravidade (m/s²)
 ν = $(q / \dot{f}a \Delta T \rho C_p)$ (10)

TABELA 4: Temperaturas no Núcleo do AE com Combustível de Óxidos Mistos ($\text{ThO}_2 + 0,1^{233}\text{UO}_2$).
(Canal Quente e Velocidade do Refrigerante de 2,02 m/s).

Z (m)	$q'(z)$ (KW/m)	Temperatura no Refrigerante (°C)	Temperatura Externa do Revestimento (°C)	Temperatura Interna do Revestimento (°C)	Temperatura Máxima no Combustível (°C)
0,075	28,4	407,6	459	482	1.384
0,450	47,4	465,4	552	589	2.098
0,600	50,9	494,6	587	628	2.248
0,675	51,8	509,8	604	645	2.294
0,750	52,1	525,2	620	662	2.319
0,825	51,7	540,6	635	676	2.324
1,050	47,4	585,0	671	709	2.217
1,350	33,3	633,6	694	721	1.782
1,425	28,4	642,8	694	717	1.619
1,500	22,8	650,4	692	710	1.435

TABELA 5: Temperaturas no Núcleo do AE com Combustível Metálico ($^{232}\text{Th} + 30\% \text{TRU}$)
(Canal Quente e Velocidade do Refrigerante de 2,14 m/s).

z (m)	$q'(z)$ (KW/m)	Temperatura no Refrigerante (°C)	Temperatura Externa do Revestimento (°C)	Temperatura Interna do Revestimento (°C)	Temperatura Máxima no Combustível (°C)
0,075	25,4	406,4	451	471	710
0,450	42,5	455,3	530	564	963
0,600	45,6	480,1	560	597	1.026
0,675	46,4	492,9	574	612	1.048
0,750	46,7	505,9	588	625	1.064
0,825	46,4	518,9	600	638	1.074
1,050	42,5	556,5	631	665	1.064
1,350	29,9	597,7	650	674	955
1,425	25,4	605,5	650	670	909
1,500	20,4	611,9	648	664	856

5. REFERÊNCIAS

[1] Rubbia, C. et al, **Conceptual Design of Fast Neutrons Operated High Power Energy Amplifier**, CERNA/AT/95-44(ET), September, 1995.

[2] Rubbia, C., Buono, S., Kadi, Y. and Rubio, J.A., **Fast Neutron Incineration in the Energy Amplifier as Alternative Geologic Storage Case of SPAIN**, CERN/LHC/97-01 (EET), February, 1997.

[3] Hannum, W. H. editor. **The Technology of the Integral Fast Reactor and its Associated Cycle**. Progress in Nuclear Energy, V. 31(1/2), 1997.

ABSTRACT

This paper presents thermal and thermal-hydraulics analysis for two core types proposed for a Fast Energy Amplifier utilizing, respectively, mixed oxides and metallic fuels. The mixed oxide fuels is of type $\text{ThO}_2 + 0,1^{233}\text{U}$, and the metallic fuel is of type $^{232}\text{Th} + 30\% \text{TRU}$. The analysis results permit to establish the necessary design parameters to be utilized in an irradiation performance analysis of these fuels.