

UMA PROPOSTA ALTERNATIVA PARA O “ENERGY AMPLIFIER”

Sérgio Anéfalos Pereira e Adimir dos Santos

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP
Centro de Engenharia Nuclear – Div. de Física de Reatores
Av. Prof. Lineu Prestes 2.242
05508-000 Butantã, São Paulo, SP, Brasil

RESUMO

Este trabalho introduz algumas mudanças qualitativas no conceito de Rubbia [3], como mais de um ponto de espalação, para se reduzir as exigências na energia do próton e corrente do acelerador, e principalmente para tornar a distribuição da densidade de potência mais homogênea (plana) ao longo do núcleo. O núcleo subcrítico, que no conceito de Rubbia é um arranjo hexagonal de varetas imerso num refrigerante de chumbo líquido, é substituído por um conceito de calândria de chumbo sólido com os elementos combustíveis em canais refrigerados por Hélio. Este conceito permite a utilização do ciclo termodinâmico direto (Brayton), que é mais eficiente que o ciclo de vapor. Esta concepção propõem simplificações no complexo do acelerador, tornando esta configuração mais realista em relação ao estágio atual dos aceleradores. Finalmente, a utilização do gás hélio como refrigerante, quando comparado com chumbo líquido, é mais realístico, pois os reatores refrigerados a gás tem uma tecnologia mais estabelecida e eficiente do ponto de vista termodinâmico, permitindo simplificações no projeto e a utilização de processos de alta temperatura, como a produção de hidrogênio.

Keywords: energy amplifier, transmutation, ADS, spallation.

I. INTRODUÇÃO

No desenvolvimento dos reatores nucleares de potência, várias concepções foram idealizadas, culminando no elenco de reatores em operação na época atual. Os atuais reatores térmicos nucleares comerciais possuem ciclo aberto e têm produzido uma grande quantidade de rejeitos, principalmente os actínídeos transurânicos. Estes dois pontos têm gerado preocupações com relação à utilização das reservas naturais (Urânio), e principalmente a necessidade de repositórios finais de estocagem com uma capacidade temporal segura de milhares de anos. Estas preocupações aliadas à questão da segurança dos atuais reatores, têm sido o ponto fraco para o desenvolvimento da energia nuclear, e motivo de críticas por parte da comunidade científica, bem como da opinião pública.

A associação de um acelerador de partículas a um meio multiplicador de nêutrons, que forma o que é chamado de Reator Híbrido, assim como a utilização do ciclo de combustível Tório-Urânio, parece oferecer interessantes soluções para se resolver estes dois problemas. Tal arranjo tem sido divulgado recentemente por diversos físicos, mais enfaticamente por C. Rubbia. Idéias similares foram propostas inicialmente há mais de 50 anos [1].

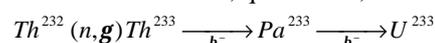
É também conhecido o fato de que o ciclo de combustível do Tório pode diminuir consideravelmente a produção de rejeitos transurânicos. A implementação deste ciclo pode ser feita de maneira mais fácil usando reatores híbridos, devido ao aumento da economia de nêutrons destes sistemas quando comparados com os reatores críticos

clássicos [2]. Os reatores híbridos são considerados alternativas viáveis para os Reatores Rápidos Regeneradores e para os Reatores à Fusão. Estas idéias são fundamentadas no fato de que a razão captura-fissão para actínídeos como o Np , Am , etc é muito favorável à fissão para energias na faixa de keV-MeV. Embora diminuindo significativamente a toxicidade radiológica dos rejeitos, ainda há a necessidade de repositórios definitivos na escala geológica.

II. AMPLIFICADOR DE ENERGIA

Essencialmente, o conceito de Rubbia [3] consiste em bombardear uma mistura baseada em chumbo líquido utilizando um acelerador de prótons de 1 GeV e corrente da ordem de 12,5mA.

A fissão que ocorre é resultado da interação dos nêutrons gerados nas cascatas intranucleares através dos prótons do acelerador. Ou seja, o sistema utiliza um acelerador de prótons de 1 GeV para produzir uma fonte de nêutrons no reator (sub-crítico) por meio de reações do tipo espalação (“*spallation*”). A reação depende do contínuo bombardeamento do alvo pelos prótons. Isto faz com que os nêutrons da reação de espalação incidam no Tório, que é fértil, e o transforme em U^{233} , que é fissil, através da reação:



As reações de fissão no Th^{232} e U^{233} geram outros nêutrons, iniciando assim uma reação em cadeia, embora

sub-crítica, cuja energia liberada é proporcional à intensidade do feixe de prótons do acelerador. Devido a este fato, simplesmente desligando o acelerador, as reações cessam, portanto não há a necessidade de barras de controle. Esta característica trás uma consequência de segurança imediata. O reator opera abaixo da criticidade, eliminando assim a possibilidade de acidentes severos de excursão de potência.

III. CONCEITO ALTERNATIVO

Basicamente propomos três inovações em relação ao conceito apresentado acima [4,5]: 1) **A utilização de mais de uma fonte de espalação.** O objetivo é estabelecer a melhor relação entre energia e corrente ($E_p \times I_p$) do acelerador para se obter a melhor distribuição espacial e energética dos nêutrons. Com mais de um ponto de espalação, podemos distribuir melhor a queima e temperatura, de modo a não sobrecarregar a região central do núcleo, fazendo com que o combustível seja queimado por igual, dentro do possível, em todo o núcleo, e também simplifica os requisitos do acelerador; 2) **Utilização de chumbo sólido** entre os elementos combustíveis e chumbo líquido apenas na região de espalação. Nos canais de espalação, o chumbo seria mantido líquido e em circulação para evitar danos e aquecimento induzidos pelas partículas e produtos da reação, além da necessidade de um sistema de purificação para os produtos de espalação. Fora da região de espalação o chumbo permanecerá sólido, e 3) **Refrigeração por He**, que aproveitando a alta temperatura (800°C), utilizaria turbinas a gás (ciclo Brayton) que além da geração de eletricidade, poderia ser utilizado na produção de H_2 via Metano. Além da circulação do He nos canais combustíveis, seria necessária a refrigeração através de canais entre os elementos para manter uma temperatura adequada e o Pb sólido.

IV. METODOLOGIA DE CÁLCULO

O transporte de prótons é efetuado com o programa LAHET [6], o qual define a magnitude e a região da fonte de espalação. A solução do sistema de equações acopladas para nêutrons e gamas será feita com o código de Monte Carlo MCNP-4C conforme mostrado na Fig. 1.

O programa LAHET é um código de Monte Carlo para transporte e interação de núcleons, píons, múons, íons leves e anti-núcleons em geometria complexa. Ele também pode ser usado, sem a parte de transporte de partículas, para a geração de seções de choque de produção de partículas. O sistema de códigos baseado no LAHET foi chamado de *LAHET Code System (LCS)*. O módulo da trajetória de partículas usa o modelo e geometria do código MCNP, também de LANL [7].

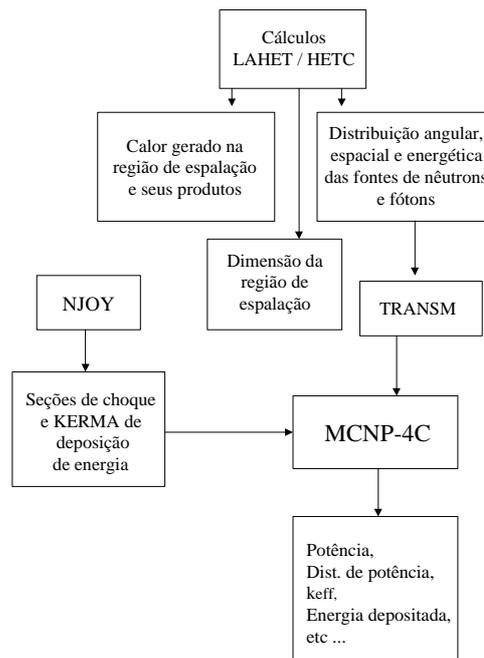


Figura 1. Diagrama em Blocos da Metodologia a ser Empregada nos Cálculos e Simulações.

Consequentemente, as opções de plotagem do MCNP podem ser utilizadas para o LAHET. O transporte de partículas carregadas levam em conta o freamento contínuo e espalhamento múltiplo, ambos adaptados a geometria do MCNP. Além disso, o arquivo de histórias pode ser usado para gerar uma fonte de superfície para um próximo cálculo do LAHET, e no caso de um problema envolvendo a reação nêutron/píon, o arquivo de histórias pode ser usado também como uma fonte para o cálculo do transporte de múons.

O MCNP (*Monte Carlo N-Particle*) é um código multi-propósito que pode ser usado para o transporte de nêutrons, fótons, elétrons e também o acoplamento entre nêutron/fóton/elétron, incluindo a capacidade de calcular autovalores para sistemas multiplicativo [7]. O código trata de geometrias de células tridimensionais. Seções de choque pontuais são usadas, sendo que para nêutrons, todas as reações para o cálculo envolvendo uma dada seção de choque está contido na biblioteca (como por exemplo ENDF/B-VI). Para fótons, o código leva em conta o espalhamento coerente e o incoerente, a possibilidade de emissão de fluorescência após absorção fotoelétrica, absorção de produção de pares com a emissão local de radiação de aniquilação, e *bremstrahlung*. Um modelo de freamento contínuo é usado para o transporte de elétrons, que inclui pósitrons, raios-x k, e *bremstrahlung* mas não inclui campos externos ou auto-induzidos.

Temperatura no Chumbo. A proposta alternativa assume que o chumbo deve ser mantido sólido, e consequentemente deve-se garantir que sua temperatura próximo do elemento combustível seja menor do que a temperatura de fusão do chumbo ($T_{f_{Pb}}=328^\circ\text{C}$). Para isso, adotamos uma análise unidimensional de transferência de calor por

radiação, condução e convecção. A partir da Fig. 2, pode-se calcular a temperatura de interesse T_1 .

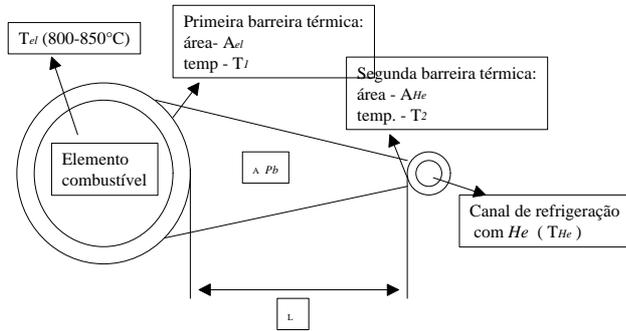


Figura 2. Representação da Abordagem Utilizada para o Cálculo das Temperaturas.

Utilizando a aproximação unidimensional, têm-se as equações abaixo:

$$q = s (T_{el}^4 - T_1^4) A_{el} \quad (\text{radiação}) \quad (1)$$

$$q = k_{pb} \frac{T_1 - T_2}{L} A_{pb} \quad (\text{condução}) \quad (2)$$

$$q = h (T_2 - T_{He}) A_{He} \quad (\text{convecção}) \quad (3)$$

onde q é o calor transmitido, s é a constante de Stefan-Boltzmann, T_1 é a temperatura da superfície do elemento combustível, T_2 é a temperatura da superfície do canal de refrigeração de He, A_{el} , A_{pb} e A_{He} são as áreas da superfície do elemento combustível, área média do chumbo e área da superfície do canal de refrigeração, respectivamente, k_{pb} é a condutividade térmica do chumbo, L é a distância e h é o coeficiente de transferência de calor local, T_{el} e T_{He} são as temperaturas do elemento combustível e do canal refrigerante, respectivamente. Têm-se então 3 equações e 3 incógnitas, Q , T_1 e T_2 . Resolvendo este sistema de equações, pode-se calcular a temperatura T_1 , sendo que o vínculo desejado é $T_1 \leq 328^\circ\text{C}$.

V. "BENCHMARKS"

A realização de "benchmarks" é uma etapa importante do trabalho pois é a única maneira de avaliarmos com qualidade e segurança os dados nucleares utilizados em nossos cálculos, ou seja, nossas bibliotecas nucleares. Para tal, modela-se e simula-se experimentos reais e compara-se os resultados da simulação como os dados experimentais. No nosso caso, os dados nucleares que foram muito pouco utilizados, e portanto pouco testados são referentes à dois elementos: U^{233} e Th^{232} .

Entre as várias categorias de problemas existentes para se qualificar as bibliotecas de dados nucleares, podemos destacar três que se encaixam no nosso trabalho:

1) geração da fonte de nêutrons e/ou gamas, 2) problemas de fonte fixa e 3) cálculo da criticidade. As duas primeiras categorias serão exploradas no item ADS.

Os experimentos em reatores nucleares envolvendo estes dois elementos (U^{233} e Th^{232}) não são comuns, existindo muito poucas opções na literatura. Para a verificação dos dados do Th^{232} simulamos o experimento THOR, e para os dados do U^{233} simulamos os experimentos JEZEBEL e JEZEBEL23.

O experimento THOR [8] consiste de uma esfera de Plutônio (5,1% Pu^{240}) metálica centrada em um cilindro equilátero (53,3cm) de Tório metálico. O modelo esférico equivalente é um núcleo de raio 5,310cm centrado em outra esfera refletora de raio interno 5,310cm e raio externo de 29,88cm. Os resultados experimentais e os calculados são mostrados na Tabela 1.

TABELA 1. Experimento THOR

Grandeza medida	Resultado experimental	Resultado Calculado ^(a)
Fator de multiplicação	1,000 ± 0,001	0,9960 +/- 0,0030
$\sigma_f(\text{Th232}) / \sigma_f(\text{U238})$	0,26 ± 0,01	0,2500 +/- 0,0040
$\sigma_{n,\gamma}(\text{Th232}) / \sigma_{n,\gamma}(\text{U238})$	1,20 ± 0,06	1,2900 +/- 0,0004
$\sigma_{n,2n}(\text{Th232}) / \sigma_{n,2n}(\text{U238})$	1,04 ± 0,03	1,0900 +/- 0,0040

^(a) dados obtidos com a biblioteca ENDF-B/VI

O experimento JEZEBEL [8] tem várias configurações. As configurações calculadas neste estudo foram a 11, 21, 22, 31, 32 e 61 e também o experimento JEZEBEL-23. O experimento JEZEBEL-23 consiste de uma esfera de Urânio (98,13 % U^{233}) metálico, e foi especificamente idealizado e realizado para testar as seções de choque de fissão do U^{233} . A região única, geometria e composição uniforme facilitam a simulação. Os resultados experimentais e os calculados são mostrados na Tabela 2.

TABELA 2. Resultados do Fator de Multiplicação para o Experimento JEZEBEL

Experimento	Resultado Experimental	Resultado Calculado ^(b)
JEZEBEL23	1,000 +/- 0,001	0,9945 +/- 0,00006
Caso 11	1,000 +/- 0,001	0,99326 +/- 0,0004
Caso 21	1,000 +/- 0,001	0,99536 +/- 0,0004
Caso 22	1,000 +/- 0,0011	0,99757 +/- 0,0004
Caso 31	1,000 +/- 0,001	0,99654 +/- 0,0004
Caso 32	1,000 +/- 0,001	0,99771 +/- 0,0004
Caso 61	1,000 +/- 0,0014	1,00134 +/- 0,0004

^(b) dados obtidos com a biblioteca ENDF-B/VI

ADS. Os cálculos descritos neste item têm dois objetivos principais. Primeiro, testar as bibliotecas de dados nucleares, e segundo, entender o funcionamento e tornar o sistema LCS operacional. Para tal, reproduziu-se vários estudos relativos à concepção de Rubbia, calculando-se algumas grandezas principais e comparando-as com os resultados publicados. Os resultados obtidos nesta primeira análise mostram uma concordância excelente, com valores muito próximos, como mostra a Tabela 3. A análise do feixe de prótons com várias energias e a multiplicidade de nêutrons correspondente é mostrada na Tabela 4.

TABELA 3. Comparação dos Resultados de Parâmetro de Configuração do EA Calculados com FLUKA e LCS

	FLUKA	LCS
Potência térmica gerada por unidade	1500 MW	1576 MW
K_{eff}	0,98	0,967
Potência específica	52,8 W/g	53 W/g
Densidade de potência	523 W/cm ³	527 W/cm ³
N_{233}/N_{232}	0,105	0,107
Temperatura máxima do encamisamento	707 °C (Pb)	706 °C (Pb)

TABELA 4. Comparação entre Resultados Obtidos com o Código FLUKA e LCS no Estudo do Feixe de Prótons

Energia do próton (MeV)	Multiplicidade n_o , (n/p)		Rendimento Integrado S_o , (n/seg.mA)	
	FLUKA	LCS	FLUKA	LCS
100	0,399	0,321	2,49E+15	2,00E+15
150	0,898	0,835	5,61E+15	5,21E+15
200	1,788	1,627	1,12E+16	1,02E+16
250	2,763	2,664	1,73E+16	1,66E+16
300	4,156	3,883	2,60E+16	2,42E+16
350	5,291	5,272	3,31E+16	3,29E+16
400	6,939	6,784	4,34E+16	4,23E+16
1000	----	28,76	----	1,79E+17

VI. RESULTADOS

O fator de multiplicação (k_{eff}) varia de acordo com a geometria empregada devido a vários fatores. Entre os fatores responsáveis por esta variação estão a quantidade de material físsil e a posição relativa deste material no núcleo. Realizou-se uma série de estudos para avaliar sua variação em diferentes geometrias. A imprecisão nos dados nucleares e utilização dos códigos de Monte Carlo, têm associada uma imprecisão de 1% (1000 pcm) no cálculo do k_{eff} . Em conjunto com o Efeito Protactínio [9] estabeleceu-se um valor seguro de referência para a reatividade que é por volta de 0,97.

Em função disto, foi definido o elemento combustível como mostra a Fig. 3.

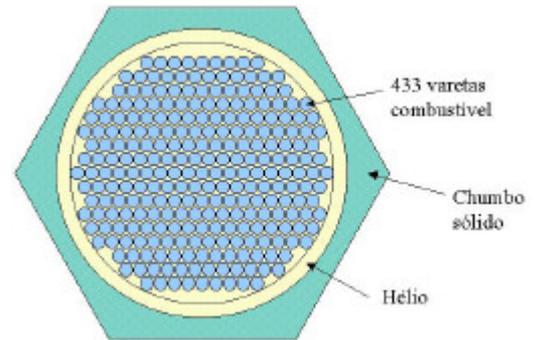


Figura 3. Representação do Elemento Combustível Cilíndrico com uma Distribuição Hexagonal das Varetas de Combustível.

A potência do reator está associada a alguns fatores como a geometria do núcleo, quantidade de combustível e características do acelerador, como corrente de operação e energia do próton. Outra característica importante é a distribuição da densidade de potência ao longo dos elementos do núcleo. O ideal é que esta distribuição seja a mais plana possível, fazendo com que o combustível seja consumido por igual. Para a análise da distribuição da densidade radial de potência a maneira de se verificar a homogeneidade da potência ao longo do raio do núcleo é através do fator de pico. O fator de pico é definido como a razão entre o valor máximo da potência em um ponto do reator e o valor médio da potência do núcleo. O estudo da potência tem como objetivo determinar uma configuração apropriada, em função do número e distribuição as fontes de espalção, assim como uma relação ideal entre corrente do acelerador (I_p) e energia do próton (E_p).

Calculou-se a potência total do reator em função do número de fontes de espalção e também sua relação com a corrente do acelerador. Os cálculos foram feitos utilizando prótons com energia de 500 MeV. Uma dificuldade existente na comparação entre a potência nas várias configurações analisadas é o fato do k_{eff} não ser constante. Podemos corrigir parcialmente este aspecto definindo ΔI , a variação da amplificação como:

$$\Delta I = \frac{1 - k_{eff}}{1 - k_{effr}} \quad (4)$$

onde I é a amplificação, k_{eff} é o fator de multiplicação do caso em estudo e k_{effr} é o valor de k_{eff} referência, que é calculado com a fonte na região central. Multiplicando-se a potência por este fator, elimina-se parcialmente sua dependência com o k_{eff} . Este resultado é mostrado na Tabela 5.

TABELA 5. Variação da Potência para 1, 2, 3, 4 e 5 Regiões de Espalção em Função da Posição das Fontes ao longo do Raio do Núcleo ($\sigma = 4\%$). Os Resultados não Dependem do Fator de Multiplicação – k_{eff} ($\sigma = 0,03\%$)

Número de fontes de espalção	k_{eff}	Potência (MWth/mA)	Potência corrigida por DI
1	0,96410	44,08	44,08
2	0,96242	31,14	32,59
3	0,94632	21,61	32,32
4	0,93598	17,44	31,09
5	0,90197	10,82	29,55

Nota-se que as potências finais para os casos com 2, 3 e 4 fontes de espalção são muito próximas. A configuração com 3 fontes foi escolhida por apresentar algumas vantagens. Em relação ao caso de 4 fontes, 3 fontes apresenta uma potência maior, uma distribuição simétrica das fontes no núcleo e a utilização de um acelerador a menos (o que implica em menos gastos em manutenção e consumo elétrico, menor investimento inicial, etc). Em relação ao caso com 2 fontes, o principal fator diferencial é a distribuição simétrica das fontes desta configuração, tornando assim mais viável a homogeneização da distribuição radial da potência, representada por um fator de pico da ordem de 2.

A configuração final tem três fontes de espalção dispostas na posição 4 (do centro para a borda) em um núcleo composto de 5 anéis de combustível totalizando 106 elementos combustíveis. A massa de combustível foi aumentada por igual em todo o núcleo através do aumento do diâmetro do elemento combustíveis. As grandezas são mostradas na Fig. 4.

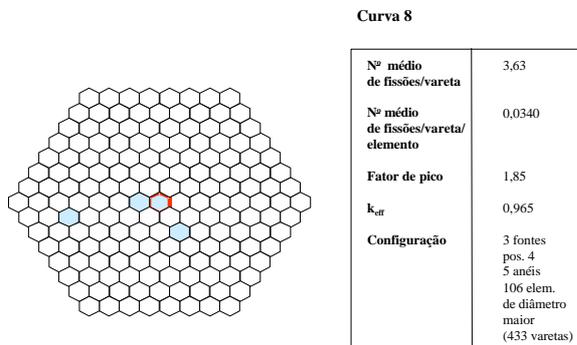


Figura 4. Descrição do Núcleo Referente a Geometria Final da Proposta.

A distribuição da densidade radial de potência para a configuração final da proposta alternativa é mostrada na Figura 5.

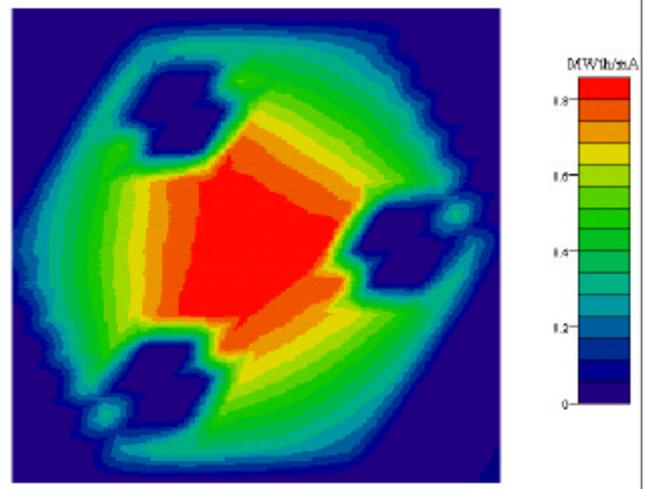


Figura 5. Distribuição da Densidade Radial de Potência do Conceito Proposto com Três Fontes de Espalção. Os Valores de Potência são por Elemento Combustível.

VII. CONCLUSÕES

A metodologia adotada reproduziu com grande sucesso os problemas padrões analisados e com uma boa margem de incerteza. A refrigeração com hélio se mostrou eficiente e a utilização de chumbo sólido entre os elementos combustíveis se mostrou possível pois a refrigeração do mesmo, com canais de hélio, é eficiente mantendo as temperaturas atingidas pelo chumbo ($260 \pm 52^\circ \text{C}$) abaixo do seu limite de fusão (328°C).

Obeve-se um fator de pico menor que 2,0 sendo que com uma fonte no centro o fator de pico é de cerca de 7,0. O fator de multiplicação - k_{eff} - obtido é da ordem de 0,965 e o ganho do sistema extrapolado para a energia do próton de 1 GeV chega a cerca de 110, o que é muito próximo do que o obtido por Rubbia (120).

As características finais da concepção com 3 fontes de espalção são apresentadas na Tabela 6.

TABELA 6. Resumo das Características da Configuração Final

Núcleo do reator	
Potência térmica total (MWth)	105
Ganho	70
k_{eff}	0.965
Potência específica (W/g)	2.58
Densidade de potência (W/cm ³)	25.82
Fator de pico radial	1.854
$\sigma_a(U^{233}) / \sigma_c(Th^{232})$	0,126

Os dados são para $E_p=500$ Mev e $I_p=1$ mA, por acelerador. Com esses dados pode-se escalonar a potência em função da corrente (relação linear), bem como extrapolar, como foi efetuado para outras energias do próton.

REFERÊNCIAS

- [1] Lewis, W. B., **report AECL-968** (1952).
- [2] Bowman, C. D. et. alli.: **Nuclear Energy Generation and Waste transmutation using an accelerator-driven intense thermal neutron source**. NIM, section A, 320, pg. 336-367, 1992.
- [3] Rubbia, C.; Rubio, J. A.; Buorno, S.; Carminati, F.; Fiétier, N.; Galvez, J.; Gelès, C.; Kadi, Y.; Klapisch, R.; Mandrillon, P.; Revol, J. P. and Ch. Roche.: **Conceptual Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier**. European Organization for Nuclear Research CERN/AT/95-44(ET),1995.
- [4] J. R. Maiorino, S. A. Pereira, A. T. Silva and A. Santos, **Alternative concept for a fast energy amplifier accelerator driven reactor**. Revista Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento, Vol.1, No.1, 2001.
- [5] J. R. Maiorino, S. A. Pereira, A. T. Silva and A. Santos, **New proposal for the fast energy amplifier**. Radiation Physics and Chemistry 61, pg. 789-790, 2001.
- [6] Prael, R. E. and Lichtenstein, H.: **User guide to LCS: the LAHET Code System**, Los Alamos National Laboratory Report LA-UR-89-3014, 1989.
- [7] Group X-6, **MCNP – A General Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport**, LA-7396-M Revised, Los Alamos National Laboratory (April 1981).
- [8] “**Cross Section Evaluation Working Group Benchmark Specification**”, ENDF-202 (BNL-19302), Brookhaven National Laboratory.
- [9] Ganesan, S., **A Review of the Current Status of Nuclear Data for Major and Minor Isotopes of Thorium Fuel Cycle**, Proceedings of Physor 2000, May 7-11,2000, in Pittsburgh, PA.

ABSTRACT

This paper introduces some qualitative changes in the Rubbia's concept [3] such as more than one point of spallation, in order to reduce the requirement in the energy and current of the accelerator, and mainly to make a flatter neutron distribution. The subcritical core which in the Rubbia's concept is an hexagonal array of pins immersed in a liquid lead coolant is replaced by a concept of a solid lead calandria with the fuel elements in channels cooled by

Helium. This concept allows the utilization of a direct thermodynamic cycle (Brayton), which is more efficient than a vapour cycle. Although the calculations to demonstrate the feasibility of the alternative concept are underway, these ideas do not violate the basic physics of the EA, as showed in this paper, with evident advantages in reducing the requirements in the accelerator complex which is more realistic in today accelerators technology. Finally, the utilization of He as coolant compared with liquid lead is closer to the proved technology given by the know how of gas cooled reactors and more efficient from the thermodynamic point of view, allowing simplification and the utilization in other process, besides electricity generation, as hydrogen generation.