

## AVALIAÇÃO TEÓRICA PARA A DETERMINAÇÃO DE UM ESPECTRO DE NÊUTRONS CONVENIENTE À TÉCNICA DO BNCT

Margaret de Almeida Damy \*, Miriam Medeiros da Silva \*\* e José Rubens Maiorino \*

\* COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - SP

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

Departamento de Tecnologia de Reatores

Divisão de Física de Reatores

\*\* COORDENADORIA PARA PROJETOS ESPECIAIS

Departamento de Sistemas Nucleares

Divisão de Física de Reatores

### RESUMO

Cálculos de transporte utilizando um código unidimensional foram realizados para determinar um espectro neutrônico conveniente à técnica do BNCT (Boron Neutron Capture Therapy). O critério utilizado na determinação deste espectro é denominado Figura de Mérito e foi baseado nas taxas de reação do  $^{10}\text{B}$  no tecido normal e tumoral e na taxa de reação  $(n,\gamma)$  dos elementos que constituem o tecido. Chegou-se a conclusão de que nêutrons com energias acima de 1 MeV não são convenientes para a técnica e que nêutrons térmicos só são convenientes no tratamento de tumores superficiais.

### ABSTRACT

Transport calculations using a one-dimensional neutral particle transport code have been made to determine a suitable neutron spectrum for Boron Neutron Capture Therapy (BNCT). The criteria used to determine this spectrum was based in the  $^{10}\text{B}$  capture rate by the tumor and by the healthy tissue, and in the  $(n,\gamma)$  reaction rate of the elements that compound the healthy tissue. After evaluating some neutron spectra, we conclude that neutrons above 1 MeV are not suitable for BNCT and thermal neutrons are only convenient for the treatment of superficial tumors.



Verifica-se que a intensidade de um feixe de nêutrons térmicos decai pela metade após penetrar cerca de 1,8 cm no tecido [3], o que dificulta a utilização da técnica do BNCT para tumores profundos. Assim, estudos com feixes de nêutrons epitérmicos vêm sendo realizados, tendo sido comprovado sua maior penetrabilidade no tecido [4]. Vários trabalhos [3,5] mostram que nêutrons epitérmicos com energias aproximadamente entre 10 eV e 0,5 keV são mais convenientes à técnica do BNCT.

## 2. DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

Neste trabalho foram avaliadas as contribuições de 6 grupos de nêutrons monoenergéticos à técnica do BNCT e a partir dos resultados obtidos estimou-se um espectro adequado à técnica. Também foi avaliado o fluxo neutrônico necessário para se obter uma fluência térmica de  $3,2 \times 10^{12}$  n/cm<sup>2</sup> a 2,4 cm da superfície de irradiação, o que conduza a um fluxo incidente com penetrabilidade suficiente aos propósitos terapêuticos deste tratamento [4].

O modelo de cabeça utilizado foi do tipo placa com 23 cm de altura, considerando um bucking transversal de 17 cm [5]. Fixou-se o tamanho do tumor em 5 cm e os cálculos foram efetuados para tumores em várias profundidades, pois o espectro otimizado varia com a localização do tumor. A figura 1 apresenta um esquema geométrico do problema, que consiste de 3 regiões: região do tecido normal antes de chegar a superfície do tumor (região 1), região do tecido tumoral (região 2) e região do tecido normal após os 5 cm de tumor (região 3). Na região 1,  $x$  representa cada uma das profundidades de tumor que foram consideradas.

A composição para o tecido utilizada (em peso: 74% de oxigênio, 15,4% de carbono, 10,4% de hidrogênio e 0,2% de sódio) foi obtida da referência 3 e considerou-se como na literatura [5,6], a presença de 30  $\mu$ g de <sup>10</sup>B por grama de tecido tumoral e 10  $\mu$ g de <sup>10</sup>B por grama de tecido normal. As seções de choque foram colapsadas na estrutura de grupos de energia da tabela 1 com o código AMPX-II [7], a partir da biblioteca de dados VITAMIN-C.

Primeiramente construiu-se uma fonte de nêutrons unitária, isotrópica e monoenergética para cada um dos 6 grupos de nêutrons, separadamente. Para avaliar a contribuição de cada uma destas 6 fontes à técnica propriamente dita, calculou-se a taxa de

produção de partículas  $\alpha$ ,  ${}^7\text{Li}$  e raios  $\gamma$  no tecido normal e no tecido tumoral.

Para os cálculos das taxas de reação  $(n,\alpha)$  no  ${}^{10}\text{B}$  e  $(n,\gamma)$  nos demais elementos que compõem o tecido (em cada região), utilizou-se o código unidimensional ANISN [8] com aproximações  $P_4$  e  $S_8$  e o problema foi subdividido em 45 intervalos espaciais ("meshes"). Foram simulados tumores de 5 cm localizados à 2,4 ; 3,6 ; 4,8 ; 6,0 e 7,2 cm de profundidade.

Com as taxas de reação calculadas definiu-se um critério de avaliação, denominado Figura de Mérito, para estabelecer um espectro conveniente à técnica do BNCT. Um bom espectro deve fornecer uma taxa de reação  ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$  alta na região do tumor e a soma das taxas de reação  ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$  e  $(n,\gamma)$  no tecido normal deve ser baixa. Assim, definiu-se a seguinte Figura de Mérito (FM):

$$FM = \frac{TR_2}{TR_1 + TR_2 + TR_3 + TR_\gamma}, \quad (1)$$

onde,

$TR_1$  = taxa de reação  $(n,\alpha)$  no  ${}^{10}\text{B}$  na região 1 (tecido normal)

$TR_2$  = taxa de reação  $(n,\alpha)$  no  ${}^{10}\text{B}$  na região 2 (tumor)

$TR_3$  = taxa de reação  $(n,\alpha)$  no  ${}^{10}\text{B}$  na região 3 (tecido normal)

$TR_\gamma$  = taxa total de reação  $(n,\gamma)$  nos elementos que constituem o tecido :  
 ${}^1\text{H}, {}^{12}\text{C}, {}^{16}\text{O}, {}^{23}\text{Na}$ ,

de maneira que quanto maior o valor da Figura de Mérito, mais eficaz é a técnica do BNCT.

Então, para cada profundidade de tumor e para cada fonte unitária incidente calculou-se o valor da Figura de Mérito. Os resultados encontram-se na Tabela 2.

Construiu-se dois espectros de fonte baseados na Figura de Mérito, para tumores localizados a 2,4 ; 3,6 e 4,8 cm de profundidade, a fim de comparar-se a eficiência de ambos. O primeiro espectro foi construído normalizando-se os valores de Figura de Mérito obtidos e o outro normalizando-se a Figura de Mérito após excluir-se os grupos de maior e menor energia (grupos 1 e 6). O espectro em 6 grupos de energia é apresentado na tabela 3 e o espectro em 4 grupos de energia na tabela 4. Um bom indicativo de que a exclusão do grupo 6 (térmico) melhoraria a eficiência da técnica é devido ao fato de nêutrons térmicos

não conseguirem atingir tumores mais profundos, e nêutrons do grupo 1 (1 à 5 MeV) não serem satisfatoriamente espalhados para os grupos de menor energia.

Para ambos os espectros plotou-se o fluxo de nêutrons por grupo em função do comprimento da cabeça, conforme ilustram respectivamente as figuras 2, 3 e 4. Para cada um dos espectros calculou-se também as taxas de reação  $(n,\alpha)$  no  $^{10}\text{B}$  para o tumor (região 2) e para o tecido normal (regiões 1 e 3), e a taxa total de reação  $(n,\gamma)$  na cabeça. Estes resultados encontram-se nas tabelas 5 e 6.

Avaliou-se também o fluxo incidente necessário para se obter uma fluência térmica de  $3,2 \times 10^{12}$  n/cm<sup>2</sup> a 2,4 cm da superfície de irradiação e na superfície do tumor, para os seguintes tempos de irradiação: 2,6 ; 3,0 e 5,0 horas. Utilizou-se nestes cálculos o espectro em 6 grupos de energia.

Primeiramente calculou-se para cada tempo de irradiação o fluxo necessário para fornecer a fluência desejada e normalizou-se para este valor o fluxo obtido a profundidades analisadas. Este mesmo fator de normalização foi utilizado na determinação do fluxo incidente. Os resultados encontram-se na tabela 7.

### 3. CONCLUSÃO

Analisando o fluxo neutrônico fornecido pelo programa ANISN, por grupo de energia e em cada intervalo espacial ("mesh"), verificou-se que o fluxo de nêutrons térmicos na região do tumor devido a cada uma das fontes avaliadas é superior ao fluxo de nêutrons nos demais grupos. Este fato constitui uma grande vantagem à técnica do BNCT.

Pelo perfil de fluxo, vê-se também que os nêutrons de fonte incidentes nos grupos 2, 3, 4, 5 e 6 são rapidamente atenuados, representando a menor contribuição ao fluxo total de nêutrons no tumor. Porém, em relação à fonte incidente no grupo 1, o fluxo de nêutrons neste grupo permanece alto ao longo do comprimento da cabeça, se comparado ao grupo térmico. Isto prejudica a terapia, pois é de interesse que o número de nêutrons térmicos seja o maior possível na região do tumor. Deste modo é justificável a exclusão de nêutrons com energias superiores a 1 MeV (grupo 1) do espectro de fonte a ser utilizado para a técnica do BNCT.

Da Figura de Mérito obtida (tabela 2), verifica-se que para tumores localizados a partir de 6,0 cm de profundidade, a técnica do BNCT é menos efetiva. Nestes casos, a taxa de reação  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  devido a fontes incidentes nos grupos 4, 5 e 6 é maior no tecido normal (região 1) que no tumor (região 2), o que indica que a dose a ser absorvida no tecido normal, que é proporcional à taxa de reação, é maior do que aquela absorvida pelo tecido tumoral. Também da tabela 2 observa-se que o espectro conveniente para tumores a 6,0 e 7,2 cm de profundidade possui mais nêutrons com energias acima de 1 MeV. Estes fatos comprometem a eficiência da técnica do BNCT.

Das figuras 1, 2 e 3 constata-se que os espectros em 4 grupos de energia, para as profundidades de 2,4; 3,6 e 4,8 cm respectivamente, fornecem um fluxo térmico maior na região do tumor do que os espectros em 6 grupos de energia, sendo portanto mais adequados a esta terapia.

Os espectros estudados em 4 grupos de energia, fornecem em média uma taxa de reação  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  que é 15% maior na região do tumor que as obtidas com os espectros em 6 grupos, conforme mostra a tabela 5. Porém, para algumas profundidades, o espectro em 4 grupos de energia resulta num aumento desta taxa na região do tecido normal, o que não é significativo se comparado ao aumento da taxa de reação  $(n,\alpha)$  no  $^{10}\text{B}$  na região do tumor.

Além disso, verifica-se também que a taxa de reação  $(n,\gamma)$  não aumenta significativamente para o espectro em 4 grupos, em relação ao espectro em 6 grupos.

Com relação ao fluxo de nêutrons necessário à técnica do BNCT, os valores calculados são da ordem de  $10^8$  (tabela 7) e portanto plenamente viáveis para um reator de pesquisas.

#### 4. Referências Bibliográficas

- [1] Mill, A. "Tumours in the neutron trap" New Scientist, pg.56, nov. 1969.
- [2] Hatanaka, H. "Neutron-Capture Therapy" Physics in Medicine & Biology Encyclopedia, McAlainh Pergamon, pg.514.
- [3] Fairchild, R.G. "Development and Dosimetry of an 'Epithermal' Neutron Beam for Possible use in Neutron Capture Therapy" Phys. Med. Biol., 10 nº4, 491 (1965).

- [4] An, S. et al. "Development Studies Regarding the Construction of Epithermal-Enriched Neutron Field for Medical Purposes at the University of Tokyo YAYOI Fast Reactor" Nucl. Technol., 48, 204 (1980).
- [5] Oka, Y. et al. "A Design Study of the Neutron Irradiation Facility for Boron Neutron Capture Therapy" Nucl. Technol., 55, 642 (1981).
- [6] Oka, Y. and An, S. "Conceptual Design of a Nuclear Reactor Facility for Boron Neutron Capture Therapy".
- [7] Greens, N.M. et al. "AMPX-II Modular Code System for Generation Coupled Multigroup Neutron Gamma-Ray Cross-Section Libraries from a ENDF Format, PS-73" Tennessee (1976).
- [8] ANISN "Multigroup One-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code System with Anisotropic Scattering" ORNL-CCC 254, jun.1973.

Tabela 1 - Estrutura de Grupos de Energia Utilizada

	Grupo	Energia Inferior [MeV]	Energia Superior [MeV]
N E U T R O N S	1	1,0	5,0
	2	0,5	1,0
	3	0,1	0,5
	4	0,01	0,1
	5	$0,5 \times 10^{-6}$	0,01
	6	0	$0,5 \times 10^{-6}$
G A M M A S	7	10,0	14,0
	8	5,0	10,0
	9	2,0	5,0
	10	1,0	2,0
	11	0,5	1,0
	12	0,01	0,5

Tabela 2 - Figura de Mérito em Função da Profundidade do Tumor

Grupo que Contém a Fonte (Limites de Energia)	Figura de Mérito em Função da Profundidade do Tumor				
	2,4 cm	3,6 cm	4,8 cm	6,0 cm	7,2 cm
1 (1,0 à 5,0 MeV)	0,117	0,114	0,105	0,093	0,080
2 (500 keV à 1 MeV)	0,141	0,127	0,024	0,085	0,065
3 (100 à 500 keV)	0,148	0,123	0,096	0,071	0,051
4 (10 à 100 keV)	0,146	0,113	0,082	0,057	0,038
5 (0,5 eV à 10 keV)	0,136	0,099	0,068	0,046	0,030
6 (0 à 0,5 eV)	0,088	0,053	0,032	0,019	0,012

Tabela 3 – Espectro de Fonte em 6 Grupos de Energia

Grupo de Energia	Espectro Normalizado para cada Profundidade de Tumor		
	2,4cm	3,6cm	4,8cm
1	0,15	0,18	0,26
2	0,18	0,20	0,08
3	0,19	0,20	0,24
4	0,19	0,18	0,20
5	0,18	0,16	0,16
6	0,11	0,08	0,08

Tabela 4 – Espectro de Fonte em 4 Grupos de Energia

Grupo de Energia	Espectro Normalizado para cada Profundidade de Tumor		
	2,4cm	3,6cm	4,8cm
2	0,25	0,28	0,09
3	0,26	0,27	0,36
4	0,25	0,24	0,30
5	0,24	0,21	0,25

Tabela 5 – Taxa de Reação ( $n, \alpha$ ) no  $^{10}\text{B}$  por Região

Profundidade do Tumor [cm]	Região	Taxa de Reação ( $n, \alpha$ ) no $^{10}\text{B}$		Diferença entre os 2 Espectros
		Espectro em 6 Grupos	Espectro em 4 Grupos	
2,4	1	$3,48 \times 10^{-3}$	$3,15 \times 10^{-3}$	11%
	2	$1,57 \times 10^{-2}$	$1,77 \times 10^{-2}$	13%
	3	$1,92 \times 10^{-3}$	$2,04 \times 10^{-3}$	6%
3,6	1	$4,84 \times 10^{-3}$	$4,96 \times 10^{-3}$	3%
	2	$1,22 \times 10^{-2}$	$1,40 \times 10^{-2}$	15%
	3	$1,41 \times 10^{-3}$	$1,41 \times 10^{-3}$	0%
4,8	1	$6,23 \times 10^{-3}$	$7,16 \times 10^{-3}$	15%
	2	$8,90 \times 10^{-3}$	$1,05 \times 10^{-2}$	18%
	3	$9,52 \times 10^{-4}$	$8,21 \times 10^{-4}$	16%

Tabela 6 - Taxa Total de Reação (n,  $\gamma$ ) na Cabeça

Profundidade do Tumor [cm]	Taxa Total de Reações (n, $\gamma$ )	
	Espectro em 6 Grupos	Espectro em 4 Grupos
2,4	$9,69 \times 10^{-2}$	$1,01 \times 10^{-1}$
3,6	$9,41 \times 10^{-2}$	$1,01 \times 10^{-1}$
4,8	$1,71 \times 10^{-1}$	$1,05 \times 10^{-1}$

Tabela 7 - Fluxo Incidente Necessário à Técnica do BNCT

Localização do Tumor [cm]	Profundidade de Normalização [cm]	$\phi$ térmico não Normalizado [n/cm.s]	Fluxo Incidente em Função do tempo de Irradiação [nêutrons/cm.seg]		
			2,6 Hs	3,0 Hs	5,0 Hs
2,4	2,4	$7,89 \times 10^{-1}$	$4,1 \times 10^8$	$3,6 \times 10^8$	$2,2 \times 10^8$
3,6	2,4	$7,59 \times 10^{-1}$	$4,2 \times 10^8$	$3,7 \times 10^8$	$2,2 \times 10^8$
	3,6	$6,63 \times 10^{-1}$	$4,8 \times 10^8$	$4,2 \times 10^8$	$2,6 \times 10^8$
4,8	2,4	$7,55 \times 10^{-1}$	$4,2 \times 10^8$	$3,7 \times 10^8$	$2,3 \times 10^8$
	4,8	$5,23 \times 10^{-1}$	$6,1 \times 10^8$	$5,4 \times 10^8$	$3,3 \times 10^8$

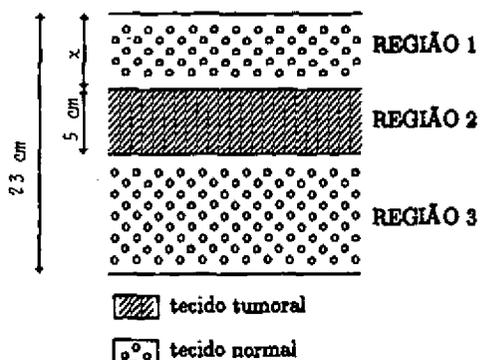


Figura 1. Esquema geométrico do problema

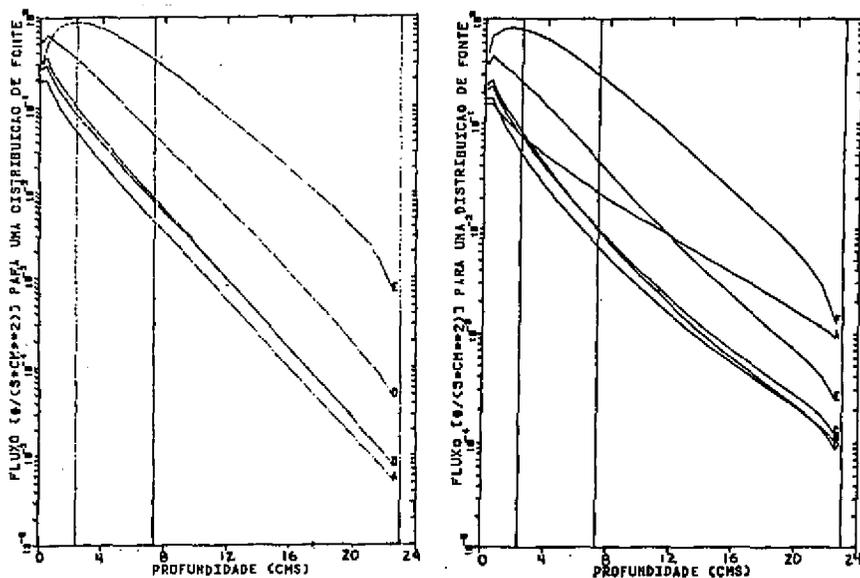


Fig.2 Perfil de Fluxo (tumor a 2,4cm) obtido com a Fonte em 4 e em 6 Grupos

116

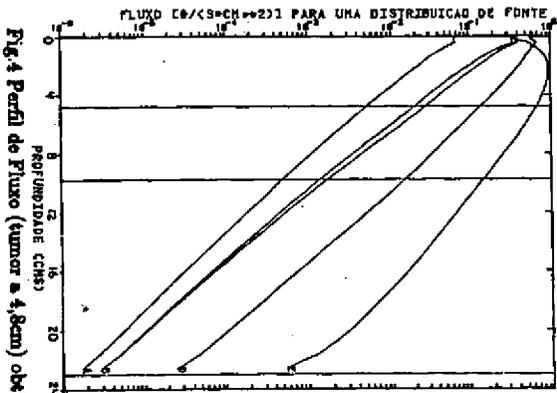


Fig. 4 Perfil de Fluxo (tumor a 4,8cm) obtido com a Fonte em 4 e em 6 Grupos

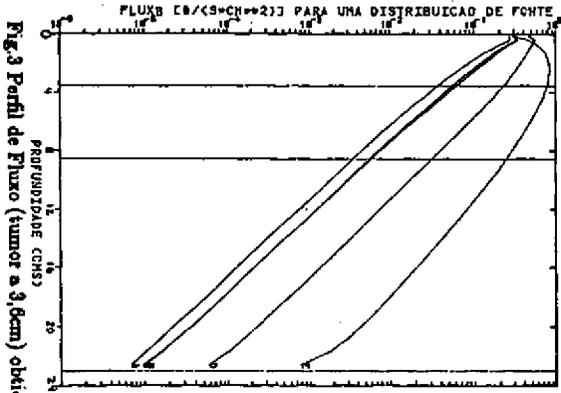
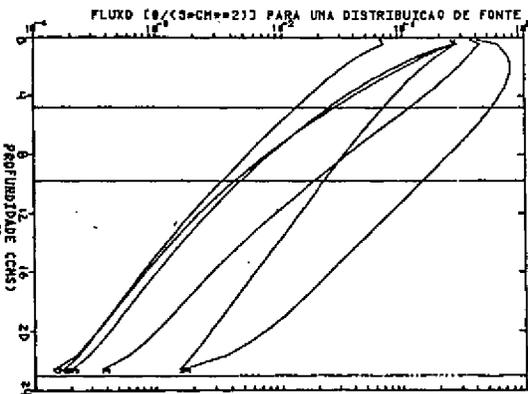


Fig. 3 Perfil de Fluxo (tumor a 3,6cm) obtido com a Fonte em 4 e em 6 Grupos

