

EXPERIMENTOS USANDO PHANTOMS DE CABEÇA PARA FINS DOSIMÉTRICOS EM BNCT

Brandes, D.M. F. Júnior, Coelho, P.R.P., Maiorino, J.R.

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Diretoria de Reatores
Comissão Nacional de Energia Nuclear CNEN/SP
Travessa R nº 400-Caixa Postal 11049 -Cep 05422-970
telefone (011) 816 9111, Fax (011) 816 9432
e-mail: dbjunior@gaiavota.ipen.br

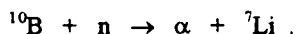
RESUMO

Neste trabalho estudou-se a distribuição de nêutrons proveniente de uma fonte de Am/Be de 2 Ci, através de um Phantom de Cabeça feito de polietileno e preenchido com um fluido de composição semelhante ao tecido humano cerebral. O principal objetivo deste trabalho foi determinar a dose absorvida no Phantom visando a utilização da técnica de BNCT para tratamentos de tumores no cérebro. Os resultados experimentais foram comparados com os teóricos através da utilização do código ANISN/PC.

I. INTRODUÇÃO

A terapia por captura de nêutrons no boro (BNCT) vem se tornando uma forma efetiva de tratamento por radiação de alguns tipos de câncer quando, não é possível o seu tratamento com as modalidades de terapia como a quimioterapia, cirurgia ou técnicas nucleares convencionais.

A técnica de BNCT envolve dois passos: inicialmente uma droga apropriada, portadora de ^{10}B é injetada no paciente, para que se acumule preferencialmente nas células cancerígenas; segue-se então, a exposição do órgão do paciente que contém o tecido cancerígeno a um fluxo de nêutrons gerados por um reator nuclear ou alguma outra fonte de nêutrons, os quais interagem com o ^{10}B através da reação,



As partículas liberadas por esta reação possuem alta transferência linear de energia (LET), liberando 2,33 MeV sob a forma da energia cinética das partículas alfa (^4He) e íons de lítio (^7Li), a qual é transferida num percurso de aproximadamente 9 μm , ou seja, esta energia é depositada "in situ", dentro da célula onde ocorre a reação, proporcionando uma alta probabilidade de destruição das células cancerígenas sem grande dano ao tecido sadio.

A característica do feixe de nêutrons, para o uso em BNCT deve ser tal que, a dose no tecido sadio é minimizada enquanto que a penetração dos nêutrons é

maximizada para permitir o alcance do fluxo de nêutrons em tumores de localização profunda [1].

A primeira característica é alcançada utilizando-se feixes térmicos com energias na faixa de 0,025 eV. Entretanto, este espectro de energia possui baixa penetração impossibilitando o tratamento de tumores profundos sem intervenção cirúrgica, ou seja, para o uso deste espectro de energia, como no caso do Glioblastoma multiforme (tumor cancerígeno no cérebro), deve-se abrir cirurgicamente o crânio do paciente e expor o cérebro ao fluxo de nêutrons térmicos.

Como alternativa, pode-se utilizar feixes epitérmicos com energias na faixa de 0,5 eV a 10 keV que podem penetrar alguns centímetros no tecido antes de formarem um pico térmico, liberando então a dose de radiação necessária para o tratamento[2].

O conhecimento da dose absorvida, que está relacionada com a concentração de ^{10}B , é fundamental para fins de um planejamento da irradiação para fins terapêuticos em BNCT. Normalmente utiliza-se uma razão de concentração de boro de 30 μg ^{10}B por g de tumor para 10 μg de ^{10}B por g de tecido sadio [3].

As principais interações do feixe de nêutrons com o tecido ocorrem através das seguintes reações nucleares:

- 1) $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{D}$
- 2) $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$
- 3) $^1\text{H}(n,n)^1\text{H}$
- 4) $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$

As interações 1 e 2 são mais prováveis com nêutrons térmicos, a interação 3 é mais provável com

nêutrons rápidos e a interação 4 é basicamente devida a neutrons térmicos. A dose total recebida pelo tecido para a terapia por BNCT é formada pela soma das doses provenientes de cada uma das reações acima, adicionada com a dose devido aos raios gama provenientes da fonte de nêutrons [4].

O modelo físico para o cálculo da dose em BNCT consiste na descrição do transporte de nêutrons e de raios gama através de um meio equivalente ao tecido e do cálculo das taxas de reação destas partículas com os elementos que constituem o tecido.

II. OBJETIVO

Atualmente tem sido feito um grande esforço por parte da diretoria R (Reatores) do IPEN para se montar uma instalação para estudos em BNCT no Brasil, utilizando como fonte de nêutrons o reator nuclear IEA-R1. O Bean Hole n° 3 (BH-3) do reator está sendo preparado para tal fim. A partir de uma medição de fluxo anteriormente realizada [5], propôs-se o esquema básico para a instalação a ser montada, o qual pode ser visto na Figura 1.

A instalação a ser montada deverá servir para irradiações de Phantoms, com o objetivo de se determinar os níveis de dose que o órgão de um paciente que contém o tumor estaria exposto quando este fosse submetido à terapia por BNCT. Também deverão ser realizados uma série de ensaios tanto "in vitro" como "in vivo" para estudos de radiobiologia.

O presente trabalho insere-se no esforço de se conhecer e adequar metodologias e protocolos experimentais aos estudos de BNCT utilizando Phantoms de cabeça, que serão utilizados nas instalações do BH-3 assim que estas estejam disponíveis.

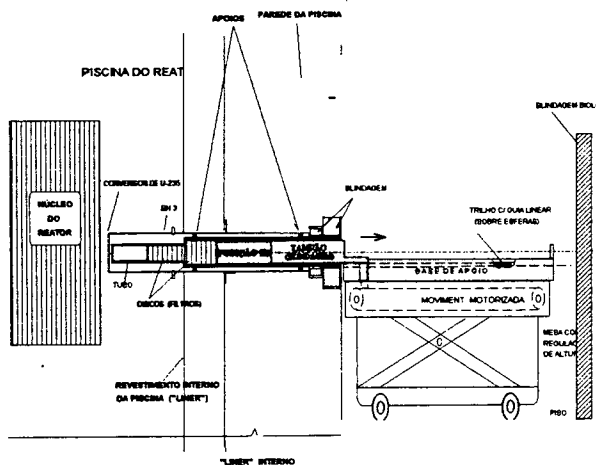


Figura 1- Bancada Experimental para BNCT a Ser Instalada no BH-3 do Reator IEA-R1.

III. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

O Phantom de cabeça utilizado nas medidas experimentais é mostrado na Figura 2. Basicamente o

Phantom é constituído de um cilindro de polietileno com 14 cm de diâmetro externo, 13 cm de diâmetro interno, 18 cm de altura e, 0,5 cm de espessura das paredes laterais e 0,3 cm de espessura da parede da base cilíndrica por onde os nêutrons incidirão. No interior Phantom, ao longo do eixo axial central, foram inseridos "racks", prateleiras, de lucite de modo a fixar as folhas de ativação de ouro, com e sem cobertura de cádmio.

O objetivo de tal arranjo foi medir a variação do fluxo de nêutrons térmicos e epitérmicos provenientes da fonte, à medida estes penetram no Phantom, e converter estes valores para dose absorvida.

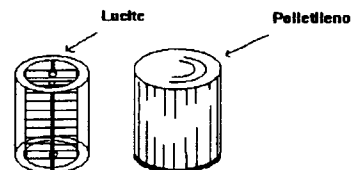


Figura 2- Phantom de polietileno Cilíndrico com "racks" de para a fixação de Folhas de Ativação de Ouro.

O phantom foi preenchido com fluido constituído de uma mistura estequiométrica de água, uréia, glicerol, sacarose e NaCl cuja composição atômica de O, H, C, N, Na e Cl fosse equivalente ao tecido cerebral. Os valores para esta composição foram aproximados para os dados encontrados no ICRU [6] e estão na Tabela 1.

Tabela 1- Percentagem em Massa de Água, Glicerol, Uréia e Sacarose Usada na Mistura de TE (Tecido Equivalente).

Composição Elementar de H, O, C e N na Mistura						
	H%	O%	C%	N%	Mol	%W
ÁGUA	11,11	88,88	0,00	0,00	18,02	63,00
GLICEROL	8,76	52,12	39,13	0,00	92,10	25,00
UREIA	6,71	26,64	20,00	46,65	60,06	5,00
SACAROSE	6,48	51,41	42,11	0,00	342,30	6,50
Soma	10,00	73,65	13,52	2,33		99,50

Foram adicionados 0,5% em massa de NaCl à mistura de TE para completar 100%. A água utilizada foi a deionizada e desmineralizada. O glicerol, a uréia, a sacarose e o NaCl possuíam pureza química superior a 99,9%.

Com o objetivo de se obter um pico de nêutrons térmicos dentro do Phantom, uma fonte de Am-Be de 2Ci foi posicionada à 2 cm da base cilíndrica do phantom. O conjunto foi imerso dentro de um tanque de água para termalizar os nêutrons rápidos provenientes da fonte.

A partir da base cilíndrica do Phantom, frontalmente a fonte, foram fixadas folhas de ativação de ouro nas distâncias de 0,5, 2,0, 3,5, 5,0 e 6,5 cm encaixadas nos "racks" de lucite.

No total, foram efetuadas três irradiações do Phantom, com uma duração de 96 horas cada. Na primeira irradiação foram inseridas folhas de ouro nuas e nas duas irradiações seguintes foram inseridas as folhas de ouro com cobertura de cádmio, em posições intercaladas, para evitar que o cádmio fizesse uma sombra no fluxo de nêutrons e interferisse na ativação das folhas.

As medições das atividades das folhas irradiadas foram realizadas com um detector de NaI, com as folhas posicionadas diretamente sobre este.

IV. MÉTODO COMPUTACIONAL

O código ANISN/PC resolve a equação de transporte de Boltzmann para uma dimensão, para nêutrons e raios gama na geometria plana, esférica ou cilíndrica [7].

Para se determinar teoricamente o fluxo de nêutrons, levando-se em consideração a profundidade que o fluxo de nêutrons de determinada energia alcança no Tecido Equivalente, foi rodado o código ANISN/PC em geometria plana. A ordem de espalhamento utilizada foi a S8, e a biblioteca dos dados nucleares de onde as secções de choque para ^{16}O , ^1H , ^{12}C , ^{14}N e ^{23}Na foram retiradas é a IRAN1.LIB [8]. As estruturas de grupo de energia para nêutrons estão na Tabela 2.

No programa, uma placa de 18,3 cm foi dividida em três zonas, conforme ilustrado na figura 3, as quais foram subdivididas em 48 intervalos "Meshs". A zona nº1, composição e densidade semelhantes a água possui uma extensão de 2 cm com um total de 10 intervalos, a zona nº2 com composição e densidade semelhante ao polietileno de baixa densidade possui 0,3 cm de comprimento e contém 6 intervalos e, por fim, a zona nº3 correspondente ao Tecido Equivalente com 16 cm, possui os 30 intervalos restantes.

No primeiro intervalo da zona nº1 foi colocada uma fonte com uma distribuição de energia equivalente ao espectro de emissão da fonte de Am-Be, conforme ilustrado na tabela 2, e intensidade em partículas/cm².seg equivalente a 2Ci.

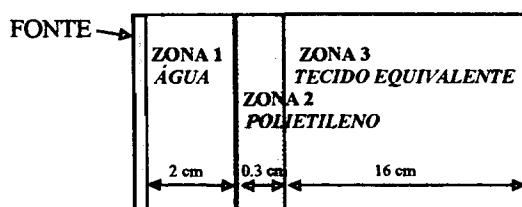


Figura-3. Modelo das zonas do para a entrada de dados no código ANISN.

V. RESULTADOS

Com os fluxos obtidos pelo código ANISN/PC foi obtida a curva para o fluxo de nêutrons térmicos do grupo 22, figura 4. Também foram inseridos neste gráfico os valores dos fluxos térmicos medidos experimentalmente que correspondem a integral de todo

o fluxo até a energia de corte do cádmio que neste caso é de 0,6 eV para uma espessura de 0,5 mm.

Tabela 2 - Estrutura de Grupos de Energia de nêutrons da IRAN1.LIB, espectros da fonte de Am/Be e Fatores de Conversão para Taxa de Dose Absorvida.

Grupo N°	Energia Superior (MeV)	Espectro da fonte Am-Be	Fator (Gy/h)/(n/cm2.seg)
1	1.73E+01	0	2.08E-04
2	5.22E+00	1.59E+01	1.84E-04
3	3.01E+00	9.62E-02	1.41E-04
4	1.00E+00	2.41E-02	1.20E-04
5	4.98E-01	1.48E-02	1.15E-04
6	1.50E-01	5.31E-02	4.07E-05
7	1.43E-01	4.21E-03	2.88E-05
8	5.66E-02	0	5.56E-05
9	5.66E-02	0	5.40E-05
10	5.25E-02	0	4.12E-05
11	2.48E-02	0	2.88E-04
12	2.42E-02	0	1.77E-04
13	2.25E-03	0	1.83E-04
14	2.03E-03	0	1.87E-04
15	1.48E-04	0	2.06E-04
16	1.30E-04	0	2.08E-04
17	1.01E-04	0	2.13E-04
18	2.90E-05	0	2.23E-04
19	1.07E-05	0	2.28E-04
20	3.06E-06	0	2.28E-04
21	1.13E-06	0	2.20E-04
22	4.14E-07	0	2.00E-04

Neste trabalho foi considerado como grupo epitérmico os nêutrons que possuíam energias entre 0,04 eV e 10 eV correspondente aos grupos 19, 20 e 21 para os fluxos calculados teoricamente com o código. Para os valores medidos experimentalmente foi considerada a faixa de energia que vai de 0,06 eV até a energia de 10 eV; isto se deve ao fato de que 95% das reações epitérmicas corresponderem a atividade epitérmica devida a ressonância principal que ocorre a 4,905 eV.

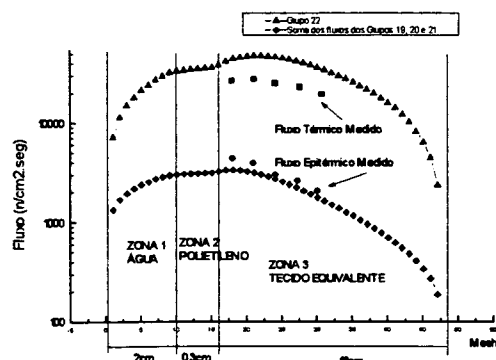


Figura-4 Fluxos Térmicos e Epitérmicos, Teóricos e Medidos Experimentalmente

Os valores da soma dos fluxos dos grupos 19, 20 e 21, considerados epitérmicos, e os valores dos fluxos epitérmicos medidos experimentalmente para as posições onde foram fixadas as folhas de ativação de ouro estão no gráfico da figura 4.

Apenas a título de ilustração os valores para os fluxos de nêutrons térmicos e epitérmicos referentes as posições onde foram fixadas as folhas de ouro dentro do Phantom foram convertidos para taxa de dose absorvida através do programa DOSE.EXE [9] e estão na Tabela 3.

Os fatores de conversão de fluxo para taxa de dose absorvida nos intervalos de energia dos grupos de nêutrons da IRAN1.LIB estão na Tabela 2.

Para os valores do fluxo térmico medidos experimentalmente, foram calculados os fatores de conversão com o programa para o intervalo de energia dos nêutrons que vai de zero até a energia de corte do cádmio; para os nêutrons epitérmicos o fator de conversão foi calculado para o intervalo que vai da energia de corte do cádmio até 10 eV; foi verificado assim variação relativa da taxa de dose absorvida com profundidade do tecido irradiado, "Depth Dose". Estes valores poderão ser comparados com medidas posteriores que podem ser realizadas com dosímetros termoluminescentes.

Tabela-3 Taxa de Dose Absorvida Calculada e Medida Experimentalmente a Partir dos Fluxos nas Posições de Irradiação

Taxa de Dose Absorvida (Gy/h)	Componente Térmico		Componente Epitérmico	
	Calculado	Medido	Calculado	Medido
0,5	9,03	5,56	0,77	1,04
2,0	9,75	5,73	0,72	0,94
3,5	9,48	5,10	0,62	0,71
5,0	8,60	4,80	0,51	0,62
6,5	7,42	4,04	0,41	0,49

VI- CONCLUSÃO

Os resultados preliminares apresentados neste trabalho indicam uma grande variação nos fluxos calculados através do código com os resultados obtidos experimentalmente. Novos casos devem ser testados utilizando o código ANISN/PC, com a geometria do sistema e a intensidade da fonte alteradas para valores mais apropriados.

REFERÊNCIAS

- [1] Robert, G. Z. , Brian, W. M., Gordon, L. B., **Boron Neutron Capture Therapy for the Treatment of Cerebral Gliomas. I: Theoretical evaluation of the efficacy of Various Neutrons Beams**, Medical Physics , Vol 2, Mar/Apr, 1975.
- [2] Damy, M. A. , M. M. da Silva, Maiorino , J. R., **Avaliação Teórica para a Determinação de um**

Espectro de Nêutron Convenientes à técnica de BNCT, Anais do I Encontro Nacional de Aplicação, pg 105-116, Vol I, Recife, PE.

[3] Rogero, J. R., Zahn , G. S., Maiorino , J. R. , Damy, M. A., Camillo, M. A. P., Nascimento, N., Coelho, P. R. P., Pugliesi, R., Mesquita, R. N., Vieira, W. J. and Brandes, D. M. F. Jr., **Estudo para a Implementação de uma Instalação para NCT no Reator IEA-R1 do IPEN-CNEN/SP**, Apresentado ao X ENFIR, Rio de Janeiro, RJ, 1996.

[4] Matsumoto, T., Aizawa, O., Sato, T., **A Method of Dosimetry for Neutron Capture Therapy at the Musashi Institute of Technology Research Reactor**, New England Medical Center&MIT, July 1994.

[5] Bitelli, U., Alves, M. A. P., Coelho ,P. R. P., **Mapeamento do Fluxo de Nêutrons Térmicos no Canal de Irradiação 8 do Reator IEA-R1**, Apresentado ao VII ENFIR , Atibaia, São Paulo, 1991.

[6] International Commission on Radiation Units and Measurement, **Tissue substitute in Radiation Dosimetry and Measurement**, ICRU Report 44.

[7] Engle, W. W. Jr. , **A Users Manual for ANISN, a One Dimensional Discrete Ordinates Transport Code With Anisotropic Scattering**, Union Carbide Corp., Nuclear Division, K-25 Report K-1693(March 1967).

[8] Marshi, M. K. , Maiorino, J. R., Mendonça, A. G. and Santos, A., **IRAN.LIB (Improved Range of ANISN/PC Library): A P-3 Coupled Neutron-Gamma cross-section Library in Isotxs Format to be Used by ANISN/PC**, Ann. Nucl. Energy, Vol.18, No.10, p597-602,1991.

[9] **Neutron end gamm-Ray Flux-to-Dose-Rate Factor**, American National Standard ANSI/6.1.1-1977.

ABSTRACT

In this work it was studied the neutron distribution in a human head phantom made of polyethylene and filled with a liquid which is equivalent to the human brain tissue. With a 2 Ci Am-Be neutron source, absorbed dose distribution in the phantom was determined and the results were used to simulate the BNCT technique for brain tumor treatment. Experimental results were compared to theoretical calculations obtained with the ANISN/PC code.