

Uso do MCNP para comparação das respostas de dose depositada nos TLD 100, TLD 600 e TLD 700 em campos de irradiação devido a fontes de ^{60}Co e $^{241}\text{AmBe}$

Use of MCNP to compare the response of dose deposited in the TLD 100, TLD 600 and TLD 700 in radiation fields due to ^{60}Co and $^{241}\text{AmBe}$ source

Tássio A. Cavalieri, Vinícius A. Castro e Paulo T. D. Siqueira

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares da Comissão Nacional de Energia Nuclear (IPEN- CNEN) – São Paulo (SP), Brasil.

Resumo

O sucesso da Terapia por Captura de Nêutron por Boro (BNCT - *Boron Neutron Capture Therapy*) depende da habilidade de entregar um adequado campo de irradiação nas células alvo. Os feixes de nêutrons utilizados no BNCT são comumente originados de reatores nucleares e, portanto, não há apenas nêutrons na faixa térmica, há também nêutrons de outras faixas energéticas, e alto componente de gama. Então a caracterização e a dosimetria dos feixes são, conseqüentemente, um dos procedimentos essenciais a serem superados para a aplicação correta desta técnica. Um dos métodos atualmente utilizados na caracterização de campos mistos (campos contendo nêutron e gama) encontra-se no uso de pares de detectores com respostas distintas para cada componente do campo. Mas esta técnica precisa de um melhor entendimento de como cada dosímetro termoluminescente (TLD) se comporta em campos mistos ou em campos puros. Este trabalho apresenta o resultado de um conjunto de simulações realizadas para analisar as respostas de três comuns tipos de TLDs – TLD 100, TLD 600 e TLD 700 – submetidos a diferentes campos de irradiação provenientes de uma fonte de Cobalto e de uma fonte de Americio-Berílio dentro de um cilindro de parafina. É também um possível método para a realização das seleções e calibrações destes TLDs.

Palavras-chave: método Monte Carlo, nêutrons, dosimetria termoluminescente, fótons, terapia por captura de nêutron por Boro.

Abstract

The successes of Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) depend on the ability to deliver an adequate irradiation field to the target cells. Neutron beams used in BNCT are mostly driven from reactors and therefore, not only have a neutron energy range which far exceeds the thermal region but also do have a great gamma component. Beam characterization and dosimetry are consequently one of the essential procedures to be overcome to properly apply this technique. One of the methods currently used in mixed field (field containing both neutron and gamma) characterization, lies on the use of a pair of detectors with distinct responses to each beam component. But this technique needs to be better understood of how each thermoluminescent dosimeter (TLD) behaves in a mixed field or in a pure field. This work presents the results of a set of simulations performed in order to analyze the response of three ordinary types of TLDs - TLD 100, TLD 600 and TLD 700 – submitted to different irradiation fields from a Cobalt source and an Americium-Beryllium source inside a paraffin disk. And is also a possible method for performing the selection and calibration of these TLDs

Keywords: Monte Carlo method, neutrons, thermoluminescent dosimetry, photons, boron neutron capture therapy.

Introdução

A Terapia por Captura de Nêutron por Boro (BNCT - *Boron Neutron Capture Therapy*) é uma técnica de micro-radio-terapia bimodal, que consiste em entregar certa quantidade de átomos de Boro nas células cancerígenas, e então expor a região a uma irradiação com campo de nêutrons térmicos. Assim, a energia proveniente da reação $B(n,\alpha)Li$ é depositada nas células ao redor do átomo de Boro, fazendo com que estas sejam destruídas ou enfraquecidas¹.

Para o correto funcionamento da técnica de BNCT, um fluxo suficiente de nêutrons térmicos deve ser entregue na região do tumor, sem haver altos fluxos de outras faixas energéticas de nêutrons e de radiação gama. Então se faz necessário a correta caracterização do campo de irradiação.

Uma instalação de BNCT foi construída no reator IEA-R1 no IPEN/CNEN em São Paulo². Como em qualquer instalação de BNCT, seu campo de irradiação tem que ser caracterizado, e para isso se faz o uso dos dosímetros termoluminescentes (TLD).

Porém, antes de utilizar este dosímetro para a realização da caracterização do campo de irradiação, é necessário entender como o TLD responde a diferentes campos de irradiação, além de realizar a sua seleção e a calibração.

Portanto o objetivo deste trabalho é analisar como a dose é depositada no TLD 100, TLD 600 e TLD 700 devido a duas fontes distintas (^{60}Co e $^{241}AmBe$), e propor então um método para a realização da seleção e calibração destes TLDs utilizando estas fontes.

Material e Métodos

Este trabalho é todo baseado em simulações realizadas pelo código de Monte Carlo MCNP5³. As simulações representam os TLDs imersos em campos de irradiação de duas fontes diferentes: ^{60}Co e $^{241}AmBe$. Estes casos foram estudados na tentativa de criar um método para analisar as respostas dos TLDs, a reprodutibilidade das respostas de cada TLD e criar uma metodologia para a calibração destes TLDs. Para a realização deste trabalho as bibliotecas utilizadas pelo MCNP5 foram: ENDF-VI.0, ENDF-VI.1, ENDF-VI.6 e ENDF/B-VI.

Os três diferentes tipos de TLD (TLD 100, TLD 600 e TLD 700) foram simulados como sendo cristais de $0,32 \times 0,32 \times 0,089$ cm, conforme os vendidos pela *Harshaw Chemical Co*. Este tipo de TLD é do tipo $LiF:Mg,Ti$, e a diferença entre cada um dos tipos está nas diferentes concentrações dos isótopos de Lítio (6Li e 7Li) presente em cada um, sendo que o TLD 100 tem a abundância natural dos isótopos de Li (7,5% de 6Li), o TLD 600 é enriquecido com 6Li (95,6%), e o TLD 700 é enriquecido com 7Li (99,93%)⁴.

Os TLDs foram simulados como sendo formados por Flúor e Lítio, nas devidas proporções de cada isótopo de Lítio em cada tipo de TLD.

Simulação com fonte de ^{60}Co

Nesta simulação, os TLDs estavam colocados dentro de um suporte de acrílico que continha 9 TLDs em uma matriz 3×3 cm, com dimensões de $11 \times 3,4 \times 1$ cm, onde os TLDs da linha central se encontravam exatamente na altura média da fonte (Figura 1). A distância entre cada TLD era de 0,8 cm, e a distância entre o suporte e a fonte era de 11 cm.

A fonte foi simulada como sendo cilíndrica e com emissão isotrópica, conforme espectro mostrado na Tabela 1.

Simulação com fonte de $^{241}AmBe$

A fonte de AmBe é uma fonte de campo misto (nêutrons e gama) com predominância de emissão de nêutrons rápidos. E como a sensibilidade a nêutrons dos TLDs vem da presença do isótopo 6Li , e este tem uma alta seção de choque para nêutrons térmicos, tanto a fonte como os TLDs foram simulados no interior de um cilindro de parafina com 9 cm de raio e 10 cm de altura, que serviria para diminuir a energia dos nêutrons (Figura 2).

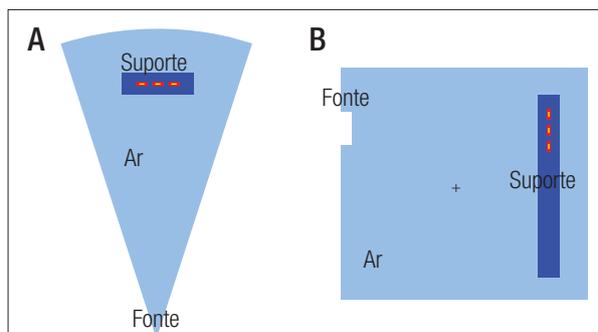


Figura 1. Geometria da simulação com fonte de ^{60}Co .

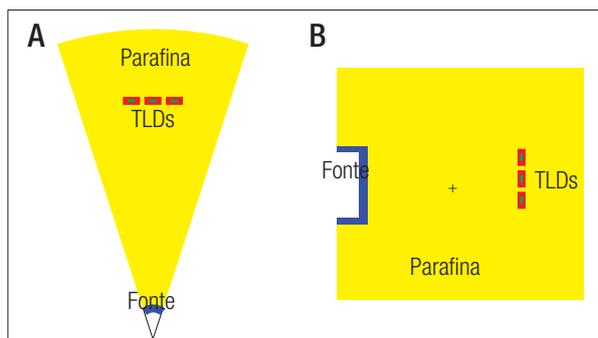


Figura 2. Geometria da simulação com fonte de $^{241}AmBe$.

Tabela 1. Espectro de emissão de raios gama da fonte de ^{60}Co ⁵.

Energy (keV)	Intensity (Yield %)
346.93	0.0076
826.28	0.0076
1173.237	99.9736
1332.501	99.9856
2158.77	0.00111
2505	2.0E-06

Os TLDs foram simulados estando em uma matriz 3x3 há 6 cm da fonte, com a linha central exatamente na altura média da fonte.

Esta fonte emite fótons com energia de 4,4 MeV⁶, e seu espectro de emissão de nêutrons está representado na Figura 3⁷. Porém as interações dos nêutrons com a parafina geram fótons, que também foram considerados para o cálculo de dose depositada por fótons no TLD.

Tallies das simulações

O interesse das simulações era identificar a dose depositada em cada TLD devido aos nêutrons e aos fótons.

Para o caso da dose depositada devido aos fótons foi utilizado a o *tally* *F8³, que fornece a energia depositada (MeV) por fóton simulado.

Já para o caso da dose devido aos nêutrons, foi utilizado o *tally* F4 com o cartão FM para a reação (n,³H) no átomo de Lítio³, o que fornecia a dose (MeV) por nêutrons gerados.

Resultados

Simulação com fonte de ^{60}Co

A deposição de dose devido aos fótons se mostrou semelhante nos três tipos de TLD, não havendo discrepâncias entre eles. E a dose depositada devido à posição ocupada pelo TLD no suporte está representada na Tabela 2, com a intensidade de dose depositada relativa à posição central.

Simulação com fonte de $^{241}\text{AmBe}$

A dose depositada nos TLDs devido aos fótons é proveniente tanto da própria emissão de fótons gerados pela fonte, como pela geração de fótons devido à interação dos nêutrons com a parafina. Porém, a maior parte da dose de fótons depositada vem da própria produção da fonte, sendo que os fótons da interação dos nêutrons são desprezíveis.

Como no caso da fonte de Cobalto, a dose depositada nos TLDs pelos fótons é semelhante para os três tipos de TLD, e a dose em cada um dos nove TLDs simulados relativo ao TLD central está representado na Tabela 3.

Como era esperada, a dose depositada pelos nêutrons foi diferente em cada tipo de TLD. A Tabela 4 mostra a dose depositada em cada tipo de TLD em relação à dose depositada pelos nêutrons no TLD 100.

A dose em cada TLD da matriz 3x3 cm é diferente. Porém quanto menor a resposta de certo tipo de TLD para nêutrons, maior é a diferença de dose depositada nos diferentes TLD da matriz: no caso dos TLDs 700 a diferença de dose entre diferente TLDs com o TLD central chega a 4,5%; para os TLDs 100 a diferença chega a 2,8%; e nos TLDs 600, 2,5%.

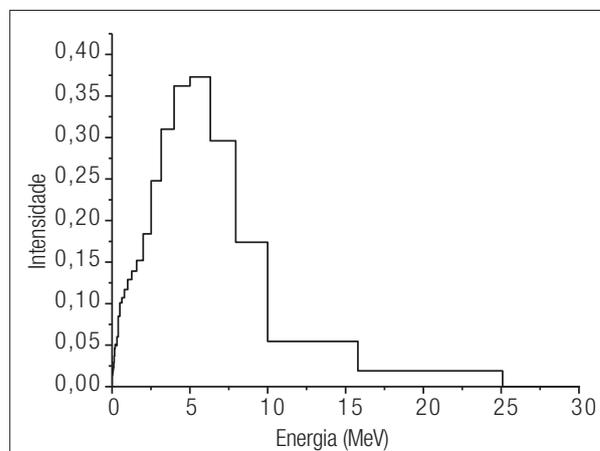


Figura 3. Espectro energético dos nêutrons da fonte de AmBe.⁷

Tabela 2. Energia depositada pelos fótons, da fonte de ^{60}Co , relativa à energia depositada no TLD central.

Energia depositada pelos fótons do Co		
0,95±0,02	0,96±0,02	0,97±0,02
0,95±0,02	1,00±0,02	0,97±0,02
1,01±0,02	0,96±0,02	0,97±0,03

Tabela 3. Energia depositada pelos fótons, devido a fonte de $^{241}\text{AmBe}$, relativa à energia depositada no TLD central.

Energia depositada pelos fótons do AmBe		
0,98±0,01	0,97±0,01	0,98±0,01
1,00±0,01	1,00±0,01	1,00±0,01
0,97±0,01	0,99±0,01	0,99±0,01

Tabela 4. Dose depositada pelos nêutrons da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ em cada tipo de TLD, relativa a dose depositada no TLD 100.

TLD 100	TLD 600	TLD 700
1,00±0,01	3,50±0,03	(3,00±0,05)E-04

Discussão e Conclusões

Nas simulações para a fonte de ^{60}Co , a diferença entre as doses devido a fótons nos TLDs podem ser consideradas praticamente as mesmas, não importando o tipo de TLD e sua posição no suporte (Tabela 2).

Sendo assim, um sistema contendo uma fonte de ^{60}Co no centro de um anel, e os suportes de TLDs colocados ao redor deste anel, serviria para a realização da seleção para fótons destes TLDs. A calibração também poderia ser feita deixando os TLDs expostos por diferentes tempos.

Para o caso do sistema criado para a fonte de AmBe, a dose devido aos fótons foram muito semelhantes entre os TLDs de tipos diferentes. E a dose depositada devido

a posição dos TLDs na matriz 3x3 cm dentro do cilindro de parafina pode também ser considerada a mesma para todas as posições do suporte, segundo a simulação.

Considerando a dose devido aos nêutrons na simulação com a fonte de AmBe, foi possível analisar que grande parte da dose depositada, 90%, era devido aos nêutrons térmicos, o que já era o esperado, uma vez que a sensibilidade a nêutrons dos TLDs vem da presença do isótopo ^6Li que tem alta seção de choque para nêutrons térmicos.

E a dose em cada diferente tipo de TLD foi diferente, uma vez que cada tipo de TLD tinha uma concentração diferente do isótopo ^6Li (Tabela 3).

Em comparação ao TLD 100 e TLD 600, a resposta do TLD 700 a nêutrons é desprezível. Porém se o TLD 700 for utilizado como sendo um dos pares de detectores para a dosimetria de campos mistos, e estes campos conterem uma alta componente de nêutrons em relação aos fótons, esta técnica pode superestimar a dose gama e subestimar a dose de nêutrons, uma vez que o TLD 700 não é totalmente invisível aos nêutrons.

Já ambos os TLDs, TLD 100 e TLD 600, mostraram uma alta dependência com os nêutrons, porém se for analisado a relação da deposição de dose destes TLDs com a concentração do isótopo ^6Li , é possível verificar que a deposição de dose no TLD 600 não é tão mais alta quanto maior é sua concentração de ^6Li em relação ao TLD 100. O TLD 600 apresenta uma deposição de dose 3,5 vezes maior que a do TLD 100, enquanto a sua concentração de ^6Li é 12,75 maior que no TLD 100.

Esta diferença entre concentração e resposta entre o TLD 100 e TLD 600, vem da autoblindagem do TLD devido a presença do ^6Li . O TLD 600 sofre uma maior autoblindagem pois há nele mais átomos de ^6Li , o que está de acordo com o observado no trabalho realizado por Méndez et al⁸.

Então, como o TLD 100 apresenta também uma boa resposta a nêutrons térmicos, o método de utilização de pares de detectores para dosimetria de campos mistos poderia ser realizado com o par TLD 100 – TLD 700, no lugar do par TLD 600 – TLD 700 mais comumente utilizados.

Quando comparadas as respostas dos TLDs da matriz devido aos nêutrons, o TLD 700 é o que apresenta a maior discrepância, porém como sua sensibilidade a nêutrons é

muito baixa em relação aos fótons, esta discrepância não será importante na resposta final deste TLD.

Já para o TLD 100 e TLD 600 a discrepância é menor, mas é possível ver que dependendo da posição do TLD na matriz ele pode receber mais ou menos dose, chegando a diferenças de quase 3%. Esta diferença não é muito significativa quando forem levadas em conta todas as incertezas a que o TLD estará exposto em todo seu ciclo de tratamento – leitura – irradiação.

Portanto sistema para irradiação com o AmBe proposto por este trabalho pode ser utilizado para a realização dos selecionamentos e calibrações dos TLDs para nêutrons e fótons.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

Referências

1. Sweet WH. Early history of development of boron neutron capture therapy of tumors. *J Neurooncol.* 1997;33:19-26.
2. Ferreira Jr DBM, Zahn GS, Rogero JR, Maiorino JR, Damy MA, Camillo MAP, et al. Estudo para a implantação de uma instalação de NET no reator IEA-R1 do IPEN-CNEN/SP.6ª CGEN, 1996; Rio de Janeiro; Brasil.
3. X-5 Monte Carlo Team. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, User's Guide; 2003.
4. McKeever SWS, Moscovitch M, Townsend PD. Thermoluminescence Dosimetry Materials: Properties and Uses. Ashford: Nuclear Technology Publishing; 1995.
5. Nuclear Data Evaluation Lab [homepage on the Internet]. Korea: Korea Atomic Energy Research Institute. c 2000. [cited 2011 Jul 22]. Available from: <http://atom.kaeri.re.kr/>
6. Vega-Carrillo HR, Manzanares-Acuña E, Becerra-Ferreiro AM, Carrillo-Nuñez A. Neutron and gamma-ray spectra of $^{239}\text{PuBe}$ and $^{241}\text{AmBe}$. *Appl Radiat Isot.* 2002;57:167-70.
7. International Atomic Energy Agency. Compendium of Neutron Spectra and Detector Responses for Radiation Protection Purpose Vienna; 2001.
8. Méndez R, Iñiguez MP, Barquero R, Mañanes A, Gallego E, Lorente A, et al. Response components of LiF:MG,Ti around a moderated AM-Be neutron Source. *Radiat Prot Dosimetry.* 2002;98(2):173-78.