

# Comparação da eficiência de diferentes materiais de dosímetros LOE com simulação Monte Carlo

Paula de Cássia Justino  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Biomédica  
Faculdade de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de Uberlândia  
Uberlândia, Brasil  
ORCID: 0000-0003-0524-9609

Isabella Pereira Tobias  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Biomédica  
Faculdade de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de Uberlândia  
Uberlândia, Brasil  
ORCID: 0000-0003-2811-1119

Selma Terezinha Milagre  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Biomédica  
Faculdade de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de Uberlândia  
Uberlândia, Brasil  
ORCID: 0000-0002-0807-9839

Lucio Pereira Neves  
Instituto de Física  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Biomédica  
Faculdade de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de Uberlândia  
Uberlândia, Brasil  
ORCID: 0000-0001-9152-7972

Walmir Belinato  
Departamento de Ensino  
Instituto Federal de Educação,  
Ciência e Tecnologia da Bahia  
Vitória da Conquista, Brasil  
ORCID: 0000-0002-6648-8622

Ana Paula Perini  
Instituto de Física  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Biomédica  
Faculdade de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de Uberlândia  
Uberlândia, Brasil  
ORCID: 0000-0003-3398-3165

**Resumo** — As simulações computacionais são amplamente utilizadas nos dias de hoje, principalmente nas áreas médicas onde se utilizam radiação ionizante para tratamentos e diagnósticos. Neste trabalho, utilizou-se o código de Monte Carlo MCNP 6.2 para comparar a eficiência de alguns dosímetros LOE com diferentes dopantes. Pode-se perceber que a resposta dos dosímetros à radiação depende da quantidade de dopantes e do material escolhido para essa finalidade. O material  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  mostrou uma deposição energética maior em todas as tensões testadas neste trabalho (25 kV, 50 kV, 75 kV e 100 kV) em comparação com os outros dois materiais avaliados neste trabalho: BeO e  $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Ce},\text{Li}$ .

**Palavras-chave** — Dosimetria, Simulação de Monte Carlo, Dosímetro LOE.

**Abstract** — Computer Simulations are widely used today, especially in medical areas where ionizing radiation is used for treatments and diagnostics. In this work, we use the MCNP 6.2 Monte Carlo code to compare the efficiency of some OSL dosimeters with different dopants. It may be seen that the dosimeters response to radiation depends on the number of dopants and the material chosen for this purpose. The material  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  showed a higher energy deposition in all the tube voltages tested in this work (25 kV, 50 kV, 75 kV and 100 kV) compared to the other two materials evaluated in this work: BeO and  $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Ce},\text{Li}$ .

**Keywords** — Dosimetry, Monte Carlo Simulation, Dosimeter OSL.

## I. INTRODUÇÃO

O indivíduo ocupacionalmente exposto (IOE) utiliza de dosimetria pessoal para o monitoramento externo da taxa de exposição ou dose de radiação absorvida no corpo inteiro, órgão ou tecido, durante sua jornada de trabalho. Para escolher um dosímetro, deve-se analisar se os modelos são adequados para a aplicação, seja para o tipo e as energias de radiação utilizadas [1]. Segundo a RDC N° 330, os dosímetros individuais devem ser utilizados por apenas 30 dias, sendo trocados mensalmente e enviados para laboratórios autorizados para leituras e calibrações [2].

Os materiais que geram sinais dosimétricos, muitas vezes são materiais tecido-equivalente, a fim de imitar a interação da radiação com os tecidos humanos. A busca por materiais para serem utilizados em dosimetria para um intervalo grande de energias é constante, pois estes dosímetros podem ser utilizados para diferentes aplicações, como monitoração ambiental e na dosimetria clínica, onde a monitoração de doses em procedimentos médicos precisa ser eficaz desde as doses baixas como no radiodiagnóstico, até as mais altas aplicadas em radioterapia [3].

O dosímetro de radiação é um instrumento que avalia direta ou indiretamente quantidades relacionadas à radiação ionizante como dose absorvida. Para funcionar como um dispositivo efetivo de medição da radiação, deve ser possível realizar a leitura da dose absorvida pelo material pelo qual o dosímetro é constituído [4]. No caso deste trabalho, o fenômeno físico que permite essa análise é a luminescência.

A luminescência estimulada pela absorção de energia óptica é chamada de luminescência opticamente estimulada (LOE). Os materiais dosimétricos mais recorrentes no uso da técnica LOE e, testados nesse artigo, são  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ , BeO e  $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Ce},\text{Li}$ .

No Brasil, o número de processos envolvendo doses de radiação tem crescido [5] e é possível observar o uso cada vez maior de radiações ionizantes para diagnóstico e tratamento médico [6].

Sabendo da obrigatoriedade do uso de dosímetro pessoal pelos profissionais de saúde que trabalham com radiação ionizante e a versatilidade do código Monte Carlo, o objetivo deste trabalho foi avaliar computacionalmente os valores de energia depositados nos materiais de dosímetros LOE, a fim de comparar a eficiência energética destes diferentes materiais para cada tipo de modalidade do Radiodiagnóstico (Mamografia, Raios-X Convencional e Fluoroscopia) com simulação Monte Carlo.

## II. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho, foram empregados os seguintes materiais: o software de simulação de Monte Carlo

MCNP 6.2 e o software gerador de espectro de raios X *SpekCalc*.

#### A. Software de Simulação Monte Carlo

O MCNP 6.2 [7,8] é um software que utiliza processos estocásticos por meio de experimentos probabilísticos e, é caracterizado por simular o transporte de nêutrons, fótons, elétrons, prótons e íons pesados na matéria. Para estimar as grandezas dosimétricas, o software precisa gerar muitas partículas que descreverão trajetórias aleatórias no material de interesse. Quanto mais partículas geradas, maior será a garantia de incertezas menores e de que o maior número de eventos individuais, também chamados de história da partícula, sejam simulados. Então, é simulado desde a emissão da partícula até sua morte, que ocorre quando a partícula é absorvida ou escapa do material. As interações dessa partícula dentro do material podem produzir partículas secundárias, perder energia e mudar sua direção de propagação no material [9].

O código de Monte Carlo MCNP 6.2 foi aplicado para estimar a deposição de energia de fótons e elétrons nos diferentes materiais de dosímetros LOE. Para isso foi utilizado o tally F6, e um total de 1E09 histórias de partículas, com o intuito de obter resultados com precisão e satisfatórios.

#### B. Software utilizado para gerar o espectro de raios X

O software *SpekCalc* foi utilizado neste estudo com o intuito de simular espectros de raios X emitidos por tubos com ânodo de tungstênio (W). O programa é amplamente empregado em pesquisas na área de Física Médica, principalmente no radiodiagnóstico, onde houve a necessidade de avaliação dos parâmetros de emissão de raios-X nos equipamentos utilizados, seja a camada semirredutora (CSR) ou as energias espectrais. Para simulação, abrange as tensões do tubo de 40 a 300 kVp, ângulos do anódicos de 6 a 30 graus, além de muitos materiais para filtração do feixe como ar, água, Be, Al, Cu, Sn e W [10,11].

Para este estudo, foram inseridos no software para obtenção do espectro, informações sobre os espectros de mamografia, raios X convencional e fluoroscopia. Para mamografia, uma tensão no tubo de 25 kV, ânodo fixo de W com angulação de 16° e uma filtração total de 0,43 mm-Al; para o raios-X convencional, as tensões de 50 e 75 kV, 2,5 mm-Al de filtração total e ânodo com angulação de 12°. Por fim, para a fluoroscopia, também foi empregado ânodo com 12°, tensão de 100 kV e 0,6 mm-Al de filtração total.

#### C. Metodologia

Os diferentes dosímetros LOE escolhidos são amplamente testados na literatura pela sua eficiência. A proporção dos elementos em cada dosímetro e a quantidade de dopantes foram extraídas da literatura: MgB<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Ce,Li [12], Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C [13] e BeO [13], dados apresentados na Tabela I.

TABELA I. VALORES DAS PROPORÇÕES DOS COMPONENTES E DOPANTES DOS DOSÍMETROS LOES

Materiais	Proporção dos elementos (%)		Dopantes (%)	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub>	52,92	C
O <sub>3</sub>		47,07		
BeO	Be	36,0	-	
	O	64,0		
MgB <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	Mg	13,2	Ce	0,5
	B <sub>4</sub>	24,0		
	O <sub>7</sub>	62,3	Li	0,5

Na Fig. 1, está representado o cenário computacional simulado neste trabalho, onde a fonte de raios-X está posicionada a 60 cm da amostra do dosímetro LOE. Os dosímetros LOEs simulados são discos de 7 mm de diâmetro e 0,2 mm de espessura [14].

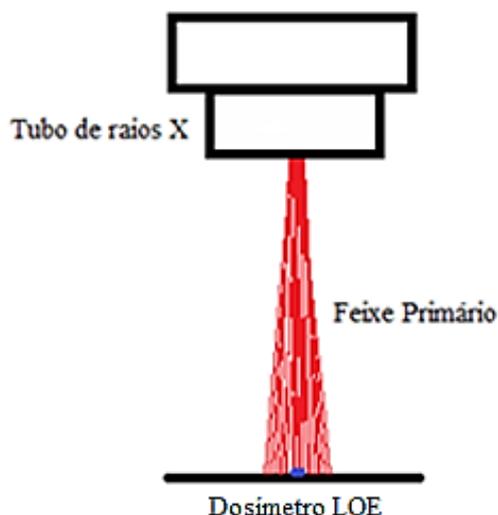


Fig. 1. Representação do cenário de simulação computacional.

### III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela II apresenta os resultados de deposição de energia e suas respectivas incertezas, com tensões distintas predominantes de cada modalidade do radiodiagnóstico, após a simulação Monte Carlo dos dosímetros LOE com diferentes materiais e dopantes.

TABELA II. VALORES OBTIDOS POR MEIO DA SIMULAÇÃO, COM CÓDIGO MONTE CARLO MCNP 6.2, PARA A DEPOSIÇÃO DE ENERGIA EM CADA DOSÍMETRO LOE

Materiais	Tensões (kV)	Deposição energética (MeV/g/source-particle)	Incerteza (%)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :C	25	2,1E-04	0.09
	50	7.4E-05	0.08
	75	5.4E-05	0.09
	100	6.5E-05	0.11
BeO	25	5.4E-05	0.09
	50	1.6E-05	0.08
	75	1.3E-05	0.09
	100	1.6E-05	0.11
MgB <sub>4</sub> O <sub>7</sub> :Ce,Li	25	1.1E-04	0.09
	50	3.6E-05	0.08
	75	2.9E-05	0.09
	100	3.5E-05	0.10

A Fig. 2 mostra a comparação da deposição energética dos diferentes materiais de dosímetro LOE em função das tensões de cada modalidade do radiodiagnóstico.

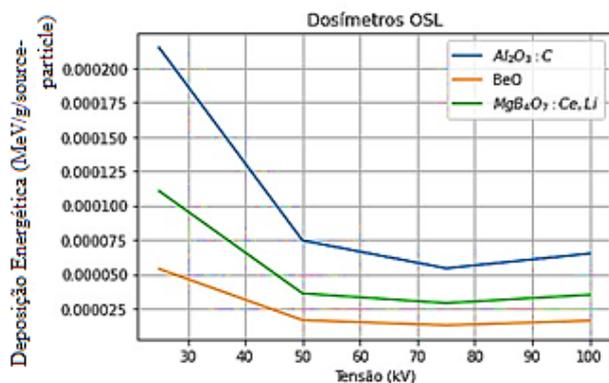


Fig. 2. Comparação dos resultados obtidos entre os três tipos de materiais de dosímetro LOE.

Na Tabela II são apresentados os resultados obtidos por meio de simulação Monte Carlo. Pode-se observar que os valores para a deposição energética para cada material e diferentes tensões, apresentaram valores semelhantes, havendo uma deposição ligeiramente elevada na menor tensão de 25 kV, que seria na modalidade de mamografia, para o material Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C e o MgB<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Ce,Li.

De modo geral, o Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C mostrou uma deposição energética maior em todas as tensões empregadas neste trabalho (25 kV, 50 kV, 75 kV e 100 kV) em comparação com os outros dois materiais BeO e MgB<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Ce,Li. O que é possível de ser observado na Fig. 2.

A Fig. 2 mostra a representação gráfica da comparação entre os três materiais analisados. As curvas são semelhantes. O material MgB<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Ce,Li mostrou ter valores de deposição de energia maiores que o BeO, visto que foi desenvolvido depois que os outros dois materiais e dopantes e, está em testes nacionais no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) sobre sua eficiência dosimétrica e implantação no mercado [12].

O dosímetro que mostrou a menor deposição de energia foi o BeO. Este resultando é esperado e condiz com a literatura, uma vez que não há dopantes nesse material e ainda está em testes para encontrar os melhores materiais dopantes que possam aumentar a sensibilidade deste material à dependência energética [15].

#### IV. CONCLUSÃO

Neste trabalho, os dados de três dosímetros com formato de um disco foram analisados. Cada dosímetro tem em sua composição diferentes materiais como: Alumínio, Oxigênio, Berílio, Magnésio, Boro, Cério e Lítio. Todos os dosímetros obtiveram resultados de deposição energética significativos em todos os níveis de energia testados. As curvas relacionando as tensões do tubo de raios-X com a deposição energética para cada dosímetro se mostraram bem parecidas. O dosímetro Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C foi o mais sensível à radiação, considerando todas as tensões avaliadas neste trabalho, em comparação aos outros dois materiais testados. O dosímetro que se mostrou menos sensível foi o BeO, este resultado condiz com o esperado, uma vez que não há dopantes nesse material.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Agência de Fomento Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), Projetos APQ-03049-15 e APQ-02934-15. A aluna Paula de Cássia Justino recebe bolsa de Mestrado da FAPEMIG. Isabella Pereira Tobias agradece o apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES) pela bolsa (No. 88887.509814/2020-00). Lucio Pereira Neves agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela Bolsa PQ-2 (No. 314520/2020-1).

#### REFERÊNCIAS

- [1] Tauhata, L.; Salati, I; Di Prinzio, R.; Di Prinzio A.R. Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos. Rio de Janeiro: Instituto de Radioproteção e Dosimetria, Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2003.
- [2] Brasil MS/Anvisa. Agência Nacional de Vigilância Sanitária – Ministério da Saúde. Resolução da Diretoria Colegiada - RDC Nº 330, 20/12/2019. Brasil - Dezembro, 2019.
- [3] de Souza Lalic, S., do Nascimento Souza, D., Baffa, O., & d'Errico, F. Novos Materiais Dosimétricos para Aplicações em Física Médica. Revista Brasileira de Física Médica, v. 13, n. 1, p. 24-33, 2019. (2019).
- [4] Podgorsak, Ervin B. "Review of radiation oncology physics: a handbook for teachers and students." Vienna, Austria: IAE Agency (2003).
- [5] Esteves, Sérgio Carlos Barros, Antonio Carlos Zuliani de Oliveira, and Luís Fernando de Andrade Feijó. "Braquiterapia de alta taxa de dose no Brasil." Radiologia Brasileira 37.5 (2004): 337-341.
- [6] Pinho, Kátia Elisa Prus, et al. "Avaliação de meios de contraste submetidos à radiação ionizante." Radiologia Brasileira 42.5 (2009): 309-313.
- [7] Werner, C.J. et al., "MCNP6.2 Release Notes", Los Alamos National Laboratory, report LA-UR-18-20808 (2018).
- [8] Werner, C. J. (editor). "MCNP Users Manual - Code Version 6.2", Los Alamos National Laboratory, report LA-UR-17-29981. 2017.
- [9] Yoriyaz, H. Método de Monte Carlo: princípios e aplicações em Física Médica. Revista Brasileira de Física Médica. 2009; 3: 141-9.
- [10] Poludniowski, Gavin G.; Evans, Philip M. Calculation of x - ray spectra emerging from an x - ray tube. Part I. Electron penetration characteristics in x - ray targets. Medical physics, v. 34, n. 6Part1, p. 2164-2174, 2007.
- [11] Poludniowski, Gavin G. Calculation of x - ray spectra emerging from an x - ray tube. Part II. X - ray production and filtration in x - ray targets. Medical physics, v. 34, n. 6Part1, p. 2175-2186, 2007.

- [12] Souza, L. F., Novais, A. L., Antonio, P. L., Caldas, L. V., & Souza, D. N. Luminescent properties of MgB<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Ce,Li to be applied in radiation dosimetry. *Radiation Physics and Chemistry*, v. 164, p. 108353, 2019.
- [13] Benali, A. H., Ishak-Boushaki, G. M., Nourredine, A. M., Allab, M., & Papadimitroulas, P. (2017). A comparative evaluation of luminescence detectors: RPL-GD-301, TLD-100 and OSL-AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: C, using Monte Carlo simulations. *Journal of Instrumentation*, v. 12, n. 07, p. P07017, 2017.
- [14] Jursinic, Paul A. Characterization of optically stimulated luminescent dosimeters, OSLDs, for clinical dosimetric measurements. *Medical physics*, v. 34, n. 12, p. 4594-4604, 2007.
- [15] Yukihiro, Eduardo G.; Mckeever, Stephen WS. *Optically stimulated luminescence: fundamentals and applications*. John Wiley & Sons, 2011.