

## Caracterização pelo método de monte carlo de um monitor individual de nêutrons de albedo.

**Rosane Moreira Ribeiro<sup>1</sup>, Denison de Souza Santos<sup>1</sup>,**

<sup>1</sup> Instituto de Radioproteção e Dosimetria

E-mail: rosanemrib@gmail.com

**Resumo:** Um dosímetro individual para nêutrons de albedo é simulado com a ferramenta Geant4. Os resultados da simulação são comparados com os resultados de uma intercomparação para códigos de Monte Carlo. As doses são obtidas para dosímetros termoluminescentes irradiados livres no ar e também na superfície de um fantoma de água para diferentes valores de energia de nêutrons.

**Palavras-chave:** Geant4, dosimetria, dosímetro de albedo.

**Abstract:** An individual albedo neutron dosimeter is simulated with the Geant4 tool. The simulation results are compared with intercomparison results for Monte Carlo codes. The doses are obtained for thermoluminescent dosimeters irradiated free in the air and also on the surface of a water phantom for different neutron energy values.

**Keywords:** Geant4, dosimetry, albedo dosimeter.

### 1. INTRODUÇÃO

A grandeza de radioproteção para exposição de corpo inteiro em um campo de radiação ionizante é definida pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) como uma soma ponderada das doses equivalentes nos tecidos e órgãos do corpo, conhecida como Dose Efetiva (ICRP, 2007). Por sua definição, essa grandeza é impossível de ser medida, sendo assim estimada pelas chamadas grandezas operacionais, as quais são definidas pela Comissão Internacional de Unidades e Medidas das Radiações (ICRU), tais quais o equivalente de dose ambiente,  $H^*(10)$ , e o equivalente de dose individual,  $H_p(10)$ . A grandeza  $H_p(10)$  é obtida, em tecido mole, numa profundidade apropriada, nesse caso 10 mm, abaixo de um ponto específico no corpo humano. Esse ponto específico é normalmente tomado com sendo o local onde dosímetro individual é usado. Já o  $H^*(10)$ , em um ponto de um campo de radiação, é o valor que seria produzido pelo correspondente campo expandido e alinhado na esfera da ICRU em uma profundidade de 10 mm, no raio que se opõe à direção do campo alinhado (ICRP, 2007, ISO, 2019). A avaliação da dose efetiva para campos de nêutrons é particularmente desafiadora já que o peso da radiação, usado para calcular a dose equivalente, varia de

uma ordem de grandeza de acordo com a energia do nêutron, assumindo valores que vão de 2 a 20, de acordo com uma função contínua estabelecida pela ICRP. Fontes comuns de nêutrons também mostram geralmente um espectro de emissão variando de um milésimo de elétron-volt até milhões de elétron-volts.

Uma técnica estabelecida para monitoração individual de nêutrons é feita por meio do dosímetro de albedo, onde a dose efetiva é estimada medindo a fração do campo de nêutrons que é refletido pelo corpo, ou “nêutrons de albedo”. Diferentes tipos de dosímetros têm sido desenvolvidos explorando essa técnica, a maioria deles utilizando cristais termoluminescentes como material sensível. O que torna necessário o uso de técnicas de Monte Carlo para descrever a passagem de nêutrons e partículas secundárias nos materiais que compõem estes dosímetros.

Preocupados sobre o uso de códigos confiáveis na dosimetria das radiações, foi tomada uma iniciativa pela Comissão Européia para promover um exercício de intercomparação para códigos de Monte Carlo aplicados em problemas de radioproteção. Um desses problemas (TANNER, 2002) é uma descrição específica de um dosímetro de albedo, onde os participantes deveriam comparar seus resultados para a resposta do dosímetro entre si, e com um valor de referência. O principal objetivo desta parte do presente trabalho é simular o problema proposto para esse exercício com a ferramenta Geant4, que não foi usada por nenhum dos participantes. Ao fazê-lo, pode-se inferir a aplicabilidade do Geant4 em radioproteção para este tipo de simulação em campos de nêutrons.

## 2. METODOLOGIA

A versão 10.5 do Geant4 foi utilizada para as simulações. As mesmas foram executadas com  $10^8$  histórias para nêutrons monoenergéticos com energias que variavam de  $10^{-8}$  a 20 MeV. Foi utilizada a física de alta precisão (HP, do inglês *High Precision*) para nêutrons do Geant4, que descreve interações de nêutrons com energias térmicas até 20 MeV com a opção de espalhamento térmico, para nêutrons com energia abaixo de 4 eV, implementada. Mais detalhes da física utilizada pode ser encontrado em RIBEIRO e SOUZA-SANTOS (2017). A resposta do dosímetro é encontrada pela contagem das reações de captura  ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ , assumindo que a resposta de nêutrons é proporcional ao número das reações de captura desse tipo (TANNER, 2002). Para essa contagem foi utilizado o contador de eventos presente no Geant4 (*CountEvents()*).

Antes de começar os estudos do dosímetro, uma simulação dos cristais LiF-600 e LiF-700, livres no ar, foi feita para verificar se a descrição dos materiais dos cristais termoluminescentes estava correta. Essa simulação calculou a dose em cada um dos cristais para um feixe plano e paralelo de nêutrons com energias que variavam de 1 keV a 10 MeV. Na figura 1 são apresentados os resultados publicados por FURUTA e TANAKA (1972), aos quais os valores encontrados no presente trabalho foram comparados.

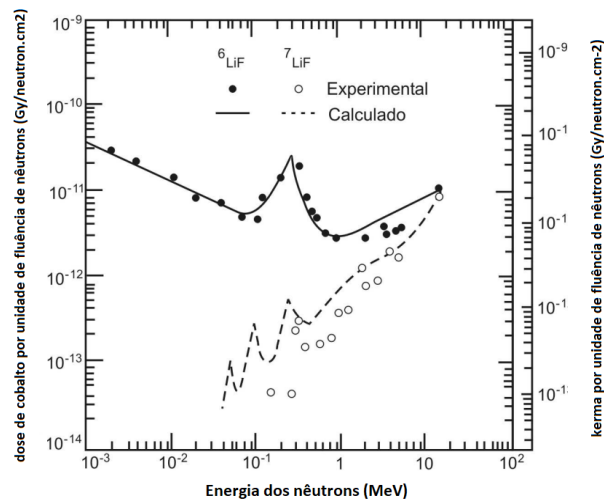


Figura 1: Dose de cobalto por unidade de fluência de nêutrons ( $\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$ ) dos cristais termoluminescentes de  ${}^6\text{LiF}$  e  ${}^7\text{LiF}$  quando expostos a um feixe plano paralelo de nêutrons monoenergéticos (FURUTA e TANAKA,1972).

Então o problema P4 do exercício intercomparação foi resolvido para o dosímetro de albedo. O dosímetro proposto pode ser visto na figura 2. Na figura 2B o fantoma de tronco foi cortado com a ampliação dada no dosímetro aparecendo somente sua parte frontal na figura, mas na simulação ele foi considerado como um todo. O dosímetro tem um par  ${}^6\text{LiF}$  e  ${}^7\text{LiF}$  de cada lado, um par voltado para o feixe de nêutrons incidentes e o outro par voltado para o fantoma *slab* da ISO. Os resultados encontrados neste trabalho foram comparados com os encontrados na intercomparação (CAMMI, 2003), no qual foi utilizado o MCNP-4C, e são mostrados na figura 4.

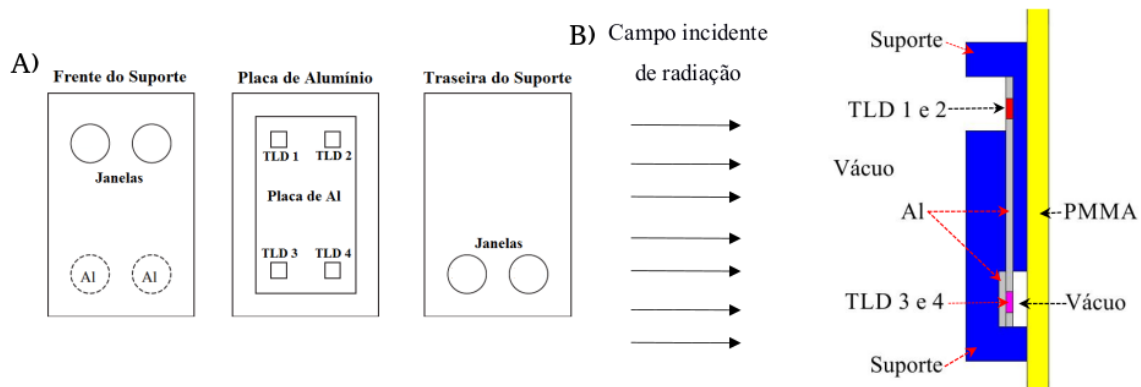


Figura 2: Esquema do dosímetro de albedo do problema P4 da intercomparação QUADOS (A). Esquema da vista lateral do albedo posicionado sobre a face frontal do fantoma *slab* da ISO (B) (FREITAS, 2018).

A figura 3 mostra a comparação das respostas dos cristais de  ${}^6\text{LiF}$  e  ${}^7\text{LiF}$ , obtidas no Geant4 com os dados calculados de FURUTA e TANAKA (1972), valores esses representados pelas linhas cheia e pontilhada na figura 1. As respostas foram normalizadas para a leitura do  ${}^6\text{LiF}$  na energia de  $10^{-3}$  MeV.

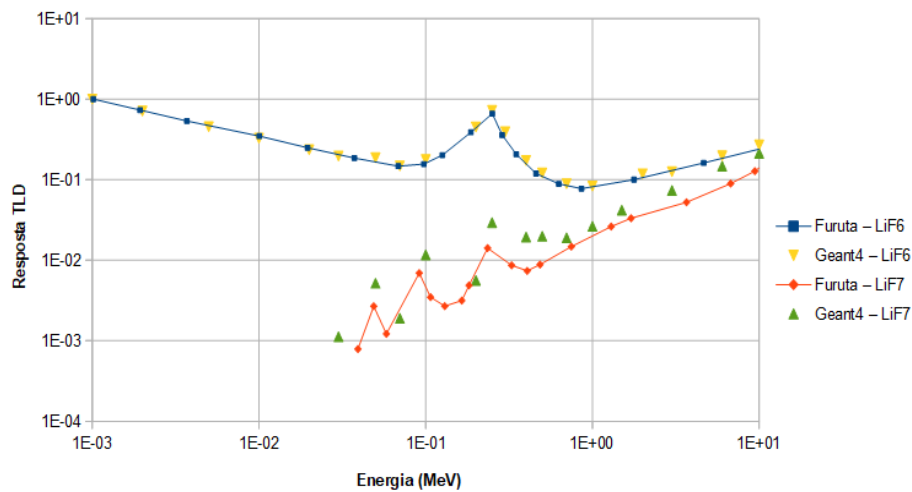


Figura 3: Comparação das respostas normalizadas nos cristais de  ${}^6\text{LiF}$  e  ${}^7\text{LiF}$  quando expostos a feixes planos paralelos de nêutrons, livres no ar.

A figura 4 mostra os resultados para o exercício de intercomparação, problema P4, mostrando a resposta dos 4 cristais de TLD no dosímetro. Os índices com as letras “i” e “a” que acompanham os nomes dos TLD-600 e TLD-700 na figura, indicam para “i” os TLDs para os nêutrons incidentes e “a” os TLDs para os nêutrons de albedo.

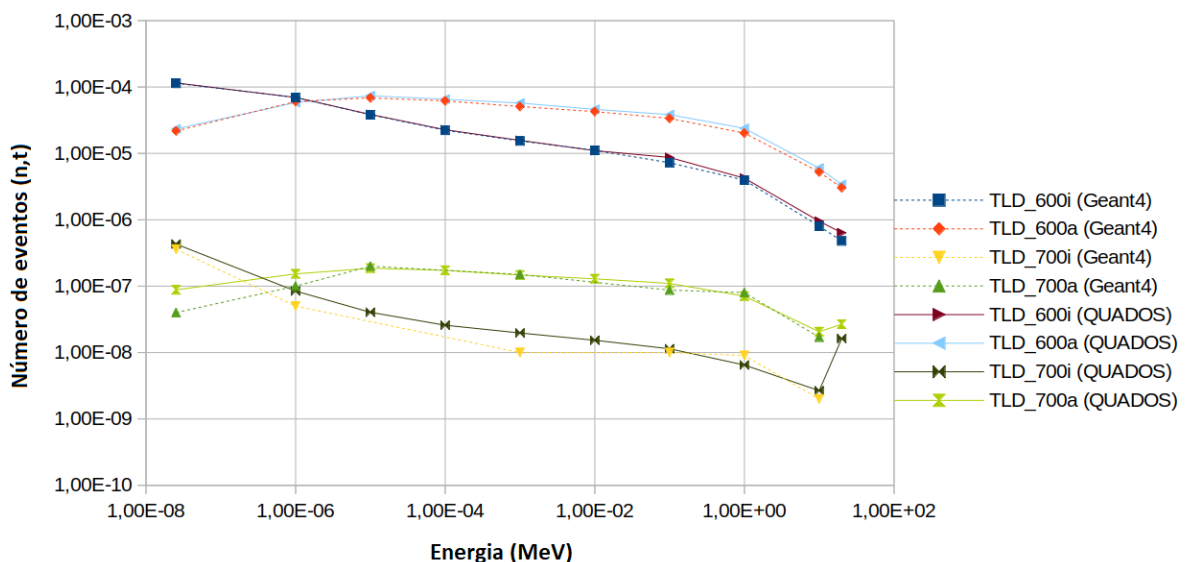


Figura 4: Número de eventos (n,t) no dosímetro de albedo colocado na superfície do fantoma de água e irradiado por um feixe plano e paralelo de nêutrons.

#### 4. CONCLUSÃO

Foi mostrado que a ferramenta Geant4 é adequada para a simulação um dosímetro de albedo para nêutrons de energias variando de  $10^{-8}$  MeV a 20 MeV. Os resultados obtidos neste trabalho serão usados de base para resposta na simulação para diferentes tipos de dosímetro de albedo e para aprofundar o entendimento das interações entre nêutrons e dosímetros individuais, que será um conhecimento valioso no design de novos dispositivos de monitoramento individual.

#### 5. REFERÊNCIAS

Cammi, A.; Garlati, L.. Neutron and/or photon response of a TLD-Albedo personal dosimeter on an ISO slab phantom. In: Intercomparison on the usage of computational codes in radiation dosimetry, Bologna, Italy. QUADOS. 2003. p.189–192.ISBN:88-8286-114-7.

Freitas, Bruno Mendes. Simulação monte carlo da resposta de um monitor individual de nêutrons tipo albedo. 79 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Nuclear, Coppe, Ufrj, Rio de Janeiro, 2018.

Furuta, Y., Tanaka, S., 1972, “Response of 6 LiF and 7 LiF thermoluminescence dosimeters to fast neutrons”, Nuclear Instruments and Methods, v. 104, pp. 36 –374.

ICRP, 2007, “Recommendations of the International Commission on Radiological Protection”, International Commission on Radiological Protection, ICRP, Publication 103. Oxford, Pergamon Press.

ICRP, International Commission on Radiological Protection, [www.icrp.org](http://www.icrp.org), last accessed on August, 10 th , 2020.

ICRU, International Commission on Radiation Units and Measurements – ICRU, [www.icru.org](http://www.icru.org), las accessed on August, 10 th , 2020.

ISO, 2019, “Radiological protection – X and gamma reference radiation for calibrating doseimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy – Part 3: Calibration of area and personal doseimeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence”, ISO 4037-3.

Ribeiro, R.M., Souza-Santos, D., 2017, “Comparison of the neutron ambient dose equivalent and ambient dose absorbed dose calculations with different Geant4 physics lists.” Radiation Physics and Chemistry, v.139, pp. 179 – 183.

Tanner, R. J., 2002, “Neutron and photon response of a TLD-albedo personal doseimeter on an ISO slab phantom”, QUADOS problem description P4. Available at <http://www.nea.fr/download/quados/quados.html>.

#### *Agradecimentos*

Agradecimento ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro.