

Aplicação do Método Monte Carlo na análise das doses de radiação emitidas por um equipamento de raios X didático

Paula de Cássia Justino
Instituto de Física
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brasil
ORCID: 0000-0003-0524-9609

Samara Pavan Souza
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Biomédica
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brasil
ORCID: 0000-0003-0941-0340

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

William de Souza Santos
Instituto de Física
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brasil
ORCID: 0000-0002-3828-5000

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 — O equipamento de raios X didático está presente em muitas universidades, sendo utilizado na aprendizagem da física, nas mais diversas áreas de estudo. Neste trabalho, serão analisadas computacionalmente as doses de radiação envolvidas em uma unidade de raios X didático, por meio da determinação dos coeficientes de conversão da dose equivalente e da dose efetiva, durante a operação do equipamento por uma mulher adulta. Para este propósito, foram utilizadas simulações de Monte Carlo (código MCNPX) e um objeto simulador antropomórfico virtual feminino FASH3, portando um dosímetro localizado no tórax. Os resultados deste estudo mostraram que a mama e a pele obtiveram maiores coeficientes de conversão para dose equivalente, em relação aos demais órgãos estudados. Observou-se que os coeficientes de conversão são baixos, devido à blindagem do vidro plumbífero da unidade de raios X didático, tornando-o seguro de operar, como já era esperado.

Palavras-chave — Raios X Didático, Simulação de Monte Carlo, Objeto Antropomórfico Virtual, Dosimetria.

Abstract — The didactic x-ray equipment is present in many universities, being used in physics teaching, in several areas of study. In this work, the radiation doses emitted by a didactic X-ray unit will be computed by determining the conversion coefficients of the equivalent and effective doses of an adult woman operating the didactic equipment. For this purpose, Monte Carlo simulations (MCNPX code) and a female FASH3 virtual anthropomorphic phantom were used, using a chest dosimeter. The results of this study showed that the breast and skin obtained the highest conversion coefficients for equivalent dose when compared to the other studied organs. It was observed low conversion coefficients, given the lead glass shield of the didactic X-ray unit, making it safe to operate, as expected.

Keywords — Didactic X-ray, Monte Carlo Simulation, Virtual Anthropomorphic phantom, Dosimetry.

I. INTRODUÇÃO

O físico alemão Wilhelm Conrad Röntgen foi quem descobriu os raios X em 1895, enquanto fazia experimentos

com tubos de raios catódicos [1]. Os raios X são radiações eletromagnéticas de alta energia que não sofrem desvios com o campo magnético e podem atravessar diversos materiais. Os raios X podem ser produzidos de duas maneiras distintas: *bremstrahlung* (radiação de freamento) ou desexcitação atômica (radiação característica) [2].

Quando os elétrons são acelerados em alta velocidade e se chocam em um alvo metálico, eles interagem com o núcleo dos átomos que compõem este alvo, sendo desviados, e perdendo sua energia na forma de calor e fótons de raios X de freamento, processo chamado de *bremstrahlung* [3]. O outro processo de produção de raios X ocorre quando um elétron incide no átomo e remove um elétron orbital. Neste caso, é criada uma vacância, sendo que um elétron de uma camada mais externa vai ocupar esta vacância, emitindo nessa transição um fóton. A radiação emitida é denominada de radiação característica [4].

Para regulamentar os princípios de radioproteção, é necessária a definição de grandezas dosimétricas, a fim de avaliar os efeitos da interação da radiação com a matéria e, até mesmo, definir limites de dose. A dose absorvida é a grandeza física fundamental em dosimetria. Ela é definida como sendo a quantidade de energia absorvida por um tecido ou órgão, por unidade de massa. A unidade de dose absorvida é o gray (Gy), que equivale a J/kg no SI [3]. A grandeza mais importante em proteção radiológica é a dose equivalente (H_T), obtida multiplicando-se a dose absorvida D no tecido ou órgão exposto, pelo fator de peso (w_R), que depende do tipo de radiação. Para avaliação em tecidos ou órgãos, utiliza-se a dose efetiva (E), obtida pelo produto da dose equivalente e um fator de peso do tecido ou órgão (w_T), este associado ao órgão exposto à radiação. Essas duas grandezas de proteção, têm como unidade o sievert (Sv) [2].

Em um trabalho experimental, realizado na Universidade Federal de Uberlândia, foi utilizado um equipamento de raios X didático, a fim de determinar os valores de taxas de dose absorvidas. Para esta finalidade foi utilizado um capacitor como dosímetro, para obter a corrente de saturação. A taxa de dose absorvida, calculada para o os

valores máximos de tensão e de corrente deste equipamento de raios-X, foi de 3,70 mGy/s [5].

Atualmente, aliado aos trabalhos experimentais, alguns estudos computacionais estão sendo elaborados com a intenção de melhorar os resultados experimentais obtidos. Neste sentido, o método Monte Carlo é uma ferramenta muito importante e utilizada em todas as áreas de Física Médica. Com o avanço da tecnologia, os computadores se tornaram mais eficientes, resultando em um uso maior da ferramenta Monte Carlo. Este código por meio de métodos estatísticos simula o transporte de radiações ionizantes, determinando valores de energia depositada na matéria, dentre outras grandezas [6].

Verificando o grande número de pessoas (estudantes, professores e profissionais) que operam este aparelho de raios X didático para experimentos e estudos, e a versatilidade do Método Monte Carlo, este trabalho tem como objetivo determinar computacionalmente os coeficientes de conversão para doses equivalente e efetiva, considerando uma mulher adulta, representada por um objeto simulador virtual feminino FASH3, operando uma unidade de raios-X didático, marca PHYWE XR 4.0, modelo 09057-99.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

A. Equipamento de raios X didático PHYWE XR 4.0

A unidade de raios-X didático é utilizada em universidades, onde os conceitos envolvidos na produção de raios X são estudados e aplicados em física, química, biologia, medicina, ciências materiais e geociências.

O equipamento tem tensão variável de 0 a 35 kV, controlando o poder de penetração da radiação, ao passo que a corrente de emissão dos elétrons varia de 0 até 1.0 mA [7]. Neste equipamento é permitido a utilização de diferentes materiais anódicos. Neste trabalho foi utilizado o ânodo de cobre com angulação de 19° e tensão no tubo de 35 kV.

B. Objeto antropomórfico virtual FASH3

Desenvolvido na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), FASH é um simulador virtual humano adulto, baseado na ICRP 89 (International Commission on Radiological Protection), projetado usando superfícies de malhas poligonais, construídos com diferentes softwares de modelagens anatômicas 3D e voxelização. Os objetos simuladores computacionais são importantes na proteção radiológica, radiologia, radioterapia e medicina nuclear, pois são utilizados para determinação de doses absorvidas ou equivalentes para órgãos e tecidos radiosensíveis [8].

A mulher, neste trabalho, foi representada por um objeto simulador antropomórfico feminino adulto FASH3 (Female Adult meSH), modelado para representar uma mulher adulta de referência.

C. Software de Simulação Monte Carlo

O Método Monte Carlo pode simular o transporte de radiações por meio de experimentos probabilísticos. O que se espera para a solução do problema simulado com o código MCNP [9] é uma boa estimativa do valor exato, com mínimas incertezas, à medida que se aumenta o número de

história das partículas simuladas. O código MCNPX pode realizar simulações para o transporte de nêutrons, fótons e elétrons [6].

Durante a simulação pelo Método Monte Carlo, a trajetória (história) de uma partícula termina com uma interação, onde esta pode perder energia, mudar sua direção de propagação ou produzir partículas secundárias [6].

Para estimar a dose depositada pelos fótons de raios X nos órgãos e tecidos radiosensíveis do simulador computacional feminino FASH3, foi utilizado o *tally* F6 (MeV/g/partícula) do código MCNPX [9].

Utilizando o software computacional Monte Carlo (MCNPX) [9], foi possível simular um cenário típico de um laboratório didático, contendo um aparelho de raios X, uma mesa e um objeto antropomórfico virtual feminino FASH3, como mostra a Fig 1.

Para o cenário de simulação criado neste trabalho, foram empregadas um total de 1E09 histórias de fótons, para garantir incertezas com valores aceitáveis neste estudo.

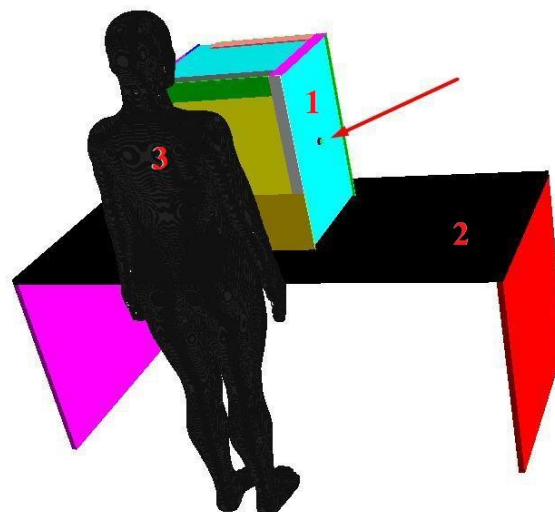


Fig. 1. Cenário de simulação do MCNPX, contendo um aparelho de raios X (1), uma mesa (2) e um objeto antropomórfico virtual feminino FASH3 (3).

D. Software utilizado para gerar o espectro de raios X

O espectro de energia utilizado neste estudo foi determinado usando o software SRS 78 [10], em que é possível selecionar o material do alvo, filtros e sua espessura, além dos fatores da exposição.

Para a simulação do espectro de raios X empregado neste estudo, foram selecionados os seguintes parâmetros: o cobre como material do alvo (ânodo) com angulação de 19°, tensão no tubo de 35 kV e corrente de 1.0 mA. Não houve a utilização de filtros, pois neste equipamento de raios X didático não é permitido colocar filtração adicional. Neste trabalho foi feita uma simulação levando em consideração os parâmetros descritos anteriormente.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste trabalho, por meio de simulação computacional, código MCNPX, foram calculados os coeficientes de conversão de dose efetiva ($CC[E]$) e dose equivalente ($CC[H_T]$) para os órgãos e tecidos do objeto simulador antropomórfico feminino computacional FASH3. Estes coeficientes de conversão relacionam grandezas físicas com grandezas de proteção radiológica. Os valores são importantes pois estimam grandezas dosimétricas em termos de grandezas mensuráveis, a partir da sua multiplicação pela dose correspondente lida por um dosímetro, por exemplo.

A determinação experimental da dose nos órgãos e tecidos é muito complicada e as vezes impossível. Na literatura é comum expressar os resultados da dose como a razão entre uma grandeza dosimétrica e uma grandeza que pode ser facilmente determinada experimentalmente. O resultado desta razão é denominado coeficiente de conversão de dose. Este coeficiente depende de vários parâmetros, tais como tensão no tubo e filtração utilizada [11]. Sendo assim, os valores de dose absorvida são diretamente proporcionais aos coeficientes de conversão.

Na Tabela I são apresentados os valores de $CC[H_T]$ para os diferentes órgãos e tecidos estudados. Os valores de $CC[H_T]$ e $CC[E]$ foram normalizados pela dose absorvida num dosímetro colocado no tórax do objeto simulador computacional FASH3. Este dosímetro está indicado por (4) seguindo a seta vermelha na Fig. 2.

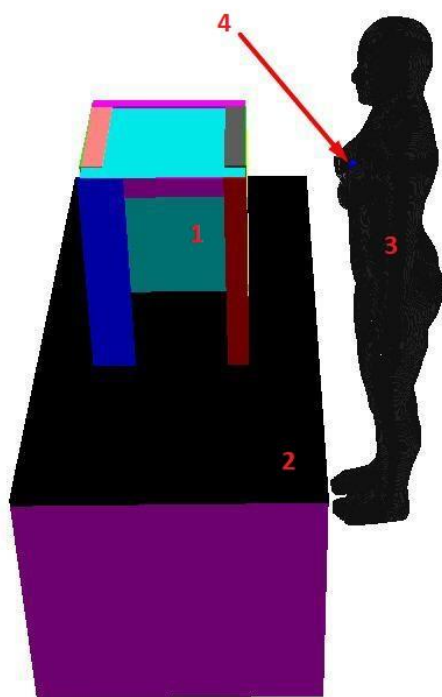


Fig. 2. Cenário de simulação do MCNPX, contendo um equipamento de raios X (1), uma mesa (2), um objeto antropomórfico virtual feminino FASH3 (3) e o dosímetro (4).

A dose depositada, utilizando o *tally* F6 do MCNPX, no dosímetro que estava no tórax do objeto simulador

computacional FASH3, utilizada para normalização dos valores de $CC[H_T]$ e $CC[E]$, foi de $1,52E-09$ (Gy).

TABELA I: VALORES DE $CC[H_T]$ PARA O OBJETO SIMULADOR FASH3 OPERANDO O EQUIPAMENTO DE RAIOS X DIDÁTICO

Órgão	$CC[H_T]$ (Sv/Gy)	Incerteza
Medula óssea	6,8E-02	5,4E-03
Cólon	8,8E-02	1,7E-02
Pulmão	5,1E-02	1,6E-02
Estômago	1,0E-01	2,4E-02
Mamas	6,3E-01	7,7E-03
Demais tecidos ^a	6,3E-03	2,9E-03
Gônadas	8,6E-03	2,5E-01
Bexiga	6,4E-03	1,8E-01
Esôfago	1,3E-02	1,1E-01
Fígado	2,7E-02	2,4E-02
Tireoide	4,2E-01	3,5E-02
Superfície óssea	2,7E-02	5,1E-03
Cérebro	1,1E-02	4,1E-02
Glândulas salivares	1,1E-01	1,9E-02
Pele	6,0E-01	1,8E-03
Cristalino	1,6E-02	1,0E-01

^a Adrenais, região extratorácica, vesícula biliar, coração, rins, nódulos linfáticos, músculos, cavidade oral, pâncreas, útero, intestino delgado e baço.

Pode-se observar que o maior valor de $CC[H_T]$ foi para as mamas, pela proximidade ao equipamento de raios X didático. A pele e a glândula tireoide vem logo em seguida, pois tiveram doses maiores quando comparadas com os outros órgãos, pelo mesmo motivo das mamas, devido ao posicionamento à frente ao equipamento de raios X didático.

Os outros órgãos obtiveram menores valores de $CC[H_T]$ por estarem distantes do feixe de raios X primário ou radiação espalhada provenientes da unidade didática. Pode-se observar também que para alguns órgãos as incertezas encontradas foram grandes. Isto deve-se ao fato de que uma pequena quantidade de radiação interage com determinados órgãos do objeto simulador antropomórfico computacional FASH3, devido à blindagem da fonte pelo vidro plumbífero, e também devido aos tamanhos e localização dos órgãos.

O valor de $CC[E]$ obtido foi de $1,4E-01$ (Sv/Gy). Esta dose efetiva foi obtida como o produto da somatória de todos coeficientes de conversão para doses equivalentes obtidos, pelo fator de peso de cada tecido ou órgão (W_T), analisados para o FASH3.

É importante ressaltar que por ser um trabalho pioneiro, avaliando doses emitidas por um equipamento de raios X didático, não foram encontradas outras publicações na literatura para a comparação de resultados.

IV. CONCLUSÃO

Neste estudo, foi realizada uma análise dosimétrica para uma mulher adulta, quando ela está operando um equipamento de raios X didático PHYWE XR 4.0. Foram determinados os $CC[H_T]$ e $CC[E]$ empregando o código MCNPX, e um objeto simulador antropomórfico virtual feminino adulto FASH3, portando um dosímetro no tórax. Os resultados obtidos mostraram que as mamas e a pele tiveram os maiores valores de $CC[H_T]$ quando comparados com os valores encontrados para os outros órgãos e tecidos do FASH3, devido a posição à frente do equipamento de raios X. As incertezas para os dois tipos de coeficientes de conversão analisados, $CC[H_T]$ e $CC[E]$, foram altas pois o vidro plumbífero presente na face anterior do equipamento de raios X cumpre seu objetivo e blinda a radiação X produzida pelo tubo, fazendo com que pouca radiação saia do equipamento e atinja o objeto simulador computacional. Portanto, pode-se concluir de acordo com os resultados, e como esperado, que é seguro operar o equipamento de raios X didático PHYWE XR 4.0, devido a baixa quantidade de dose depositada no dosímetro, e também, devido aos baixos valores de $CC[H_T]$ e $CC[E]$ obtidos, que são proporcionais aos valores de dose absorvida nos órgãos e tecidos.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela Universidade Federal de Uberlândia, e pelas agências de fomento Brasileiras: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG, Projetos No. APQ-03049-15 e APQ-02934-15) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, Projetos Nos. 421603/2016-0 e 420699/2016-3).

REFERÊNCIAS

- [1] R. A. Martin. A Descoberta dos Raios X O Primeiro Comunicado de Rontgen. Revista Brasileira de Ensino de Física, Dezembro 1998, vol. 20, pp.373-391,
- [2] E. Okuno, E. Yoshimura. Física das Radiações, Oficina de Textos, São Paulo, 2010.
- [3] L. Tauhata, I. Salati, R. Di Prinzio, A. R. Di Prinzio. Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos. 10ª rev. Rio de Janeiro: IRD/CNEN, 2014. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/component/content/article?id=171>. Acessado em 05/07/2019.
- [4] E. M. Yoshimura. Física das Radiações: Interação da radiação com a matéria. Revista Brasileira de Física Médica, 2009, v.3, n.1, p.57-67,
- [5] P. A. F. Costa, A. P. Perini, L. P. Neves. Avaliação da taxa de dose absorvida em um equipamento de raios X didático. Congresso Brasileiro de Metrologia das Radiações Ionizantes 2016. Disponível em https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:48064546. Acessado em 05/07/2019.
- [6] H. Yoriyaz. Método de Monte Carlo: princípios e aplicações em Física Médica. Revista Brasileira de Física Médica, 2009. v. 3, p. 141-149.
- [7] PHYWE Systeme GmbH & Co. KG Robert-Bosch-Breite 10 37079 Göttingen Germany, XR 4.0 expert unit, X-ray unit, 35 kV – 09057-99, 2015, disponível em <https://repository.curriculab.net/files/bedanl.pdf/09057.99/0905799e.pdf>. Acesso em 23/06/2019.
- [8] V. F. Cassola, V. J. De Melo Lima, R. Kramer, H. J. Khoury. FASH and MASH: female and male adult human phantoms based on polygon mesh surfaces: I. Development of the anatomy. 2010. Phys. Med. Biol. 55, 133–162.
- [9] D. B. Pelowitz, MCNPX User's Manual, Version 2.7.0, Report LA-CP-11-00438. Los Alamos National Laboratory. 2011.
- [10] K. Cranley, B. J. Gilmore, G. W. A. Fogarty, L. Desponds. Catalogue of diagnostic x-ray spectra and other data. Institute of Physics and Engineering in Medicine; 1997. Report 78 York: IPEM.
- [11] W. S. Santos, W. Belinato, A. P. Perini, L. V. E. Caldas, D. C. Galeano, C. J. Santos, L. P. Neves. Occupational exposures during abdominal fluoroscopically guided interventional procedures for different patient sizes — A Monte Carlo approach. 2018. Phys Med. 45, 35-43.