

Dosimetria Ocupacional em Radiodiagnóstico Equino

Evelly Alves Oliveira
Faculdade de Engenharia Elétrica
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Biomédica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brazil
ORCID: 0009-0004-7139-3558

Lucas Wilian Gonçalves de Souza
Instituto Federal de Educação, Ciência
e Tecnologia do Triângulo Mineiro –
Campus Avançado Campina Verde
Campina Verde, Brazil
ORCID: 0000-0002-1645-1112

Resumo— O uso de raios X em procedimentos de radiodiagnóstico veterinário, particularmente em equinos, pode apresentar riscos ocupacionais significativos, frequentemente exacerbados pela adesão insuficiente às diretrizes de radioproteção estabelecidas. Para investigar quais são as doses recebidas pelos profissionais, este estudo utilizou simulações computacionais aplicando o método de Monte Carlo. Um cenário radiográfico equino típico foi modelado usando o código MCNP 6.2, envolvendo um operador, uma máquina de raios X portátil e um equino. A deposição de energia (MeV/g) no corpo do profissional foi quantificada, comparando as condições sem equipamento de proteção individual (EPI) e coletiva (EPC) com aquelas que incluíam um avental plumbífero e um anteparo de vidro plumbífero suspenso. Os resultados demonstraram que o uso apropriado do equipamento de radioproteção pode reduzir a energia recebida em 89%. Além disso, observou-se que a própria máquina de raios X portátil oferece alguma atenuação da radiação espalhada. Esses resultados ressaltam a importância da educação sobre as diretrizes de radioproteção para veterinários, sendo necessário implementar treinamentos e rotina de inspeção para garantir o cumprimento rigoroso dos protocolos de segurança.

Palavras-chave— Exposição ocupacional, Radiação ionizante, Radiologia veterinária, Radioproteção, Simulação Monte Carlo.

Abstract— The use of X-rays in veterinary radiodiagnostic procedures, particularly in equines, presents significant occupational hazards, often exacerbated by insufficient adherence to established radiation protection guidelines. To investigate the doses received by professionals, this study employed computational simulations using the Monte Carlo method. A typical equine radiographic scenario was modeled using the MCNP 6.2 code, involving an operator, a portable X-ray machine, and an equine. The energy deposition (MeV/g) in the professional's body was quantified, comparing conditions without personal (PPE) and collective protective equipment (CPE) to those that included a lead apron and a suspended leaded glass shield. Results demonstrated that the appropriate use of radiation protection equipment can reduce the received energy by 89%. Furthermore, it was observed that the portable

X-ray machine itself provides some attenuation of scattered radiation. These findings underscore the importance of educating veterinarians on radiation protection guidelines, necessitating the implementation of training and routine inspections to ensure rigorous adherence to safety protocols.

Keywords— Occupational exposure, Ionizing radiation, Veterinary radiology, Radiation protection, Monte Carlo simulation

I. INTRODUÇÃO

O radiodiagnóstico é uma tecnologia fundamental na medicina moderna, uma vez que possibilita a visualização de estruturas internas do paciente sem procedimentos invasivos. A formação da imagem ocorre com base na absorção diferenciada da radiação ionizante pelos tecidos corporais, o que permite identificar patologias e lesões ósseas. Contudo, apesar das vantagens do uso da radiação, a exposição contínua e prolongada dos indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE) pode trazer riscos à saúde [1]. Os efeitos adversos podem variar de manifestações leves, como dores e inflamações cutâneas, até condições mais severas como úlceras, desenvolvimento de neoplasias e em situações extremas, óbito [2]. A fim de mitigar a ocorrência desses efeitos, os equipamentos de raios X modernos são configurados com filtros e parâmetros que visam otimizar a dose e o tempo de exposição necessários para a aquisição da imagem [3].

No Brasil, a proteção radiológica foi formalmente iniciada em 1973, com a publicação das “Normas Básicas de Proteção Radiológica” pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), com diretrizes voltadas apenas para a medicina humana convencional [4]. O público veterinário só foi contemplado nas normas em 2023, com a publicação da CNEN NN 6.14 [5]. O radiodiagnóstico em ambientes veterinários apresenta particularidades que aumentam ainda mais os riscos aos IOE. A necessidade de contenção manual

do animal, realizada em cerca de 94% dos procedimentos, posiciona o médico veterinário em uma proximidade perigosa em relação ao feixe primário de radiação [6]. Em 1950, houve registros de lesões nas mãos de veterinários que manipulavam raios X, resultando em queimaduras e até amputação de dedos [7]. No caso de animais de grande porte, como equinos, ainda há a dificuldade de lidar com um animal forte e arisco.

Um estudo que analisou a rotina de veterinários, mostrou que exposições acidentais são frequentes e reportou leituras de dose superiores ao limite anual de 20 mSv [8]. Esse limite é estabelecido para os IOE pela CNEN NN 3.01 (2014) [9], norma de proteção radiológica geral, e adotado também no contexto veterinário em conformidade com a NN 6.14 [5]. Embora equipamentos de proteção individual (EPI) sejam essenciais para minimizar os danos, muitos profissionais optam por não os utilizar [6]. Essa negligência é atribuída a falta de treinamento da equipe e a uma compreensão insuficiente das exigências legais em segurança radiológica [10]. Assim, um monitoramento contínuo da dose ocupacional é imprescindível para assegurar a saúde dos IOE.

De forma a investigar qual é o risco real que os médicos veterinários estão expostos, este trabalho buscou analisar a dose ocupacional nesse cenário. A quantificação da dose recebida pelos IOE pode ser realizada com câmaras de ionização ou dosímetros pessoais, contudo, esses métodos apresentam dificuldades práticas. Além de um custo elevado, também apresentam limitações nas informações detalhadas sobre as doses recebidas em órgãos específicos. Também existe o empecilho ético de realizar exposições reais de profissionais para fins exclusivos de pesquisa, assim, a simulação computacional por Monte Carlo surge como uma alternativa eficaz. Esse método oferece um custo-benefício favorável, além da capacidade de estimar com precisão as doses absorvidas em cada tecido, eliminando a necessidade de exposições reais [11].

II. METODOLOGIA

A. MCNP 6.2

A investigação da dose ocupacional foi realizada por meio de simulação computacional, com uso do código de Monte Carlo MCNP 6.2, que tem a capacidade de simular transporte de radiação [12].

O arquivo de entrada do MCNP é composto de três blocos, sendo as linhas do código chamadas de “cartões”. O primeiro bloco apresenta as características dos volumes geométricos, definidos como células. Cada cartão desse bloco tem especificações sobre o identificador do material, sua

densidade e a respectiva unidade de medida, e por fim, as superfícies que delimitam as células. Já o segundo bloco define as superfícies utilizadas para delimitar as células descritas no bloco anterior, nele o usuário pode especificar as dimensões e o tipo de superfície da modelagem geométrica desejada. O terceiro bloco inclui definições sobre a fonte de radiação, direção de partículas, espectros de raios X, composição química dos materiais, *tallies* (grandezas físicas calculadas pelo código), tabela de resultados, número de histórias simuladas, entre outros aspectos essenciais para a simulação e análise dos resultados [12].

B. Cenários de exposição

Uma vez compreendida a metodologia de simulação no MCNP 6.2 e definidos os parâmetros necessários para a modelagem geométrica, foi possível criar um cenário virtual que represente uma situação prática. Para cumprir os objetivos deste trabalho, foi construído um ambiente virtual que imita um típico cenário de radiografia equina, conforme visto na Figura 1, no qual um único profissional segura o aparelho de raios X portátil e realiza todo o exame.



Fig. 1 Veterinário realizando radiografia na cabeça de um equino.
Fonte: [13]

Na simulação foi utilizado um equipamento de raios X portátil do modelo Gierth HF-300. O Tubo de raios X possui alvo de Tungstênio, filtro de alumínio com 3,5 mm e ângulo anódico de 12° [14]. O tamanho do campo de visão dos raios X utilizada foi de 35×43cm², e a distância foco filme de 47 cm [15]. A sala de exame apresenta as dimensões de 4x4,5x2,4 m³, o veterinário foi representado por um cilindro com 170 cm de altura e 12 cm de raio, enquanto o animal por um paralelepípedo medindo 51.296×166.432×204.288 cm³ [16], ambos compostos integralmente por água. Foram

simuladas 1E9 histórias de partículas e o espectro do feixe foi gerado com o software SpekCalc [17].

Esse modelo composto integralmente por água é uma simplificação comumente utilizada em simulações iniciais, pois facilita a construção geométrica e reduz a complexidade computacional. A escolha da água como material é justificada por esta apresentar composição e densidade próximas ao tecido mole humano e animal, tornando-a material de referência em física médica nos protocolos de dosimetria [18,19]. Embora seja um ótimo material simulador, essa abordagem não reproduz a heterogeneidade real dos tecidos, podendo resultar em superestimativa ou subestimativa das doses absorvidas em órgãos críticos. Assim, os resultados devem ser interpretados como uma aproximação inicial, adequada para avaliar tendências gerais de exposição.

Para mensurar o impacto da utilização ou ausência de equipamentos de radioproteção na exposição ocupacional do profissional, foram realizadas duas simulações: sem e com EPI e EPC.

Na primeira simulação, exposta pela Figura 2, o veterinário não utiliza dispositivos de proteção. Nessa configuração, o operador do tubo (a) está a uma distância de 30 cm do cavalo (b). O equipamento portátil de raios X (c) está a 120 cm de altura e efetua a radiografia na cabeça do cavalo. Na segunda geometria foram mantidos todos os elementos da anterior, porém houve a adição de um EPI e um EPC. Foi incluído um avental plumbífero (EPI), com espessura de 0,05 cm de chumbo e posicionado entre 50 cm e 143 cm da altura do IOE. Ademais, entre o cavalo e o profissional foi introduzido um anteparo suspenso de vidro plumbífero (EPC), com dimensões 50×45×0,05 cm³. A Figura 3 mostra a configuração do cenário com os dispositivos de radioproteção.

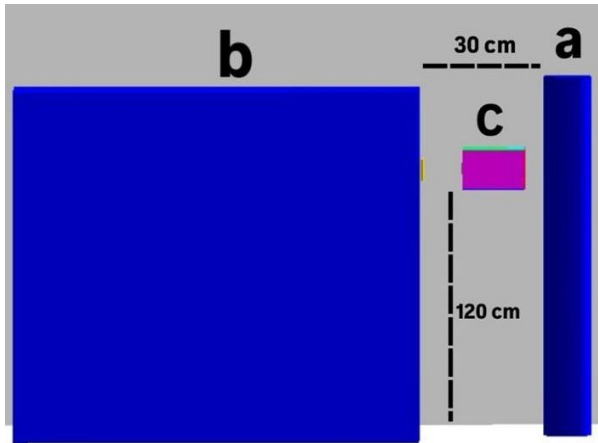


Fig. 2 Vista lateral da primeira geometria simulada, evidencia o posicionamento do: (a) veterinário, (b) equino e (c) equipamento de raios X portátil. Fonte: autoria própria

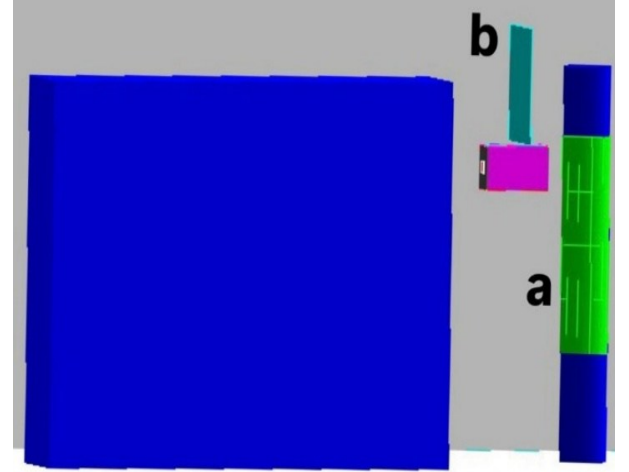


Fig. 3 Vista lateral da segunda geometria simulada, evidencia os EPI e EPC: (a) avental plumbífero e (b) vidro plumbífero. Fonte: autoria própria

C. Análise dos Resultados

Para avaliar a energia depositada na região de interesse, foi utilizado o *tally* F6 do código MCNP 6.2, que fornece valores em MeV/g, considerando cada partícula-fonte. Os valores obtidos foram convertidos em coeficientes de conversão para dose absorvida (CC) utilizando a equação (1), na qual F6(paciente) é a energia depositada no profissional e F6(Kerma) o valor de kerma no ar.

$$CC(Gy/mGy) = \frac{F6(paciente)}{F6(Kerma)} \quad (1)$$

Para avaliar o impacto causado pelo uso dos EPIs, foi calculada a redução percentual da dose absorvida por meio da equação (2):

$$redução = \left| \frac{CC - CC_{EPI}}{CC} \right| \times 100 \quad (2)$$

em que CC é o valor do coeficiente de conversão para dose absorvida para o cenário sem proteção e CC_{EPI} para o cenário com proteção.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores apresentados a seguir correspondem ao cilindro completo, indicando a energia total que seria absorvida pelo corpo inteiro do IOE. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos do *tally* F6 para as geometrias simuladas, bem como os valores de coeficiente de conversão para dose absorvida

correspondentes e suas respectivas incertezas relativas. O valor simulado de kerma foi de $3,61 \times 10^{-6}$, enquanto o valor real não pode ser obtido, uma vez que este estudo se restringiu ao ambiente virtual e não foram encontrados dados referentes a equipamentos semelhantes na Literatura. Logo, os valores de dose absorvida não puderam ser determinados, uma vez que seu cálculo depende também da informação do kerma real. Ainda assim, os CC apresentados neste trabalho podem ser utilizados em conjunto com medidas experimentais de kerma no ar para estimar a dose absorvida em um procedimento real com cenários semelhantes.

Tabela 1 Energia depositada por partícula (F6), coeficiente de conversão para dose absorvida por partícula-fonte (CC) e incertezas relativas (%) correspondentes nas geometrias simuladas com e sem utilização dos dispositivos de proteção

Configuração	Tally F6 (Mev/g/part) ±Incerteza(%)	CC (Gy/mGy) ±Incerteza(%)
Sem proteção	$2,87 \times 10^{-9} \pm 0,05\%$	$7,94 \times 10^{-1} \pm 0,05\%$
Com proteção	$3,11 \times 10^{-10} \pm 0,14\%$	$8,59 \times 10^{-2} \pm 0,14\%$

Ao comparar os dados da Tabela 1, torna-se claro que a falta do avental plumbífero e anteparo de vidro suspenso ocasionou uma maior deposição de energia. Assim, conforme previsto, o uso de equipamentos de radioproteção pelo indivíduo diminui os riscos da exposição à radiação ionizante.

Portanto, é possível concluir que o uso do EPI e EPC reduziu a deposição de energia em 89%. A Figura 4, visão lateral da simulação com a segunda geometria, mostra o grande volume de fótons espalhados que vão em direção ao profissional.

Observou-se ainda que o aparelho de raios X portátil bloqueia uma parcela dos fótons que poderiam atingir o veterinário. Isso se deve ao fato que o aparelho foi simulado composto integralmente de chumbo, trazendo uma proteção efetiva ao profissional. Na realidade, é comum que aparelhos portáteis de radiografia contenham blindagem plumbífera, podendo ser utilizados de maneira intencional como forma de barreira. No entanto, é imprescindível enfatizar que este não substitui os equipamentos de radioproteção, podendo ser apenas uma blindagem extra.

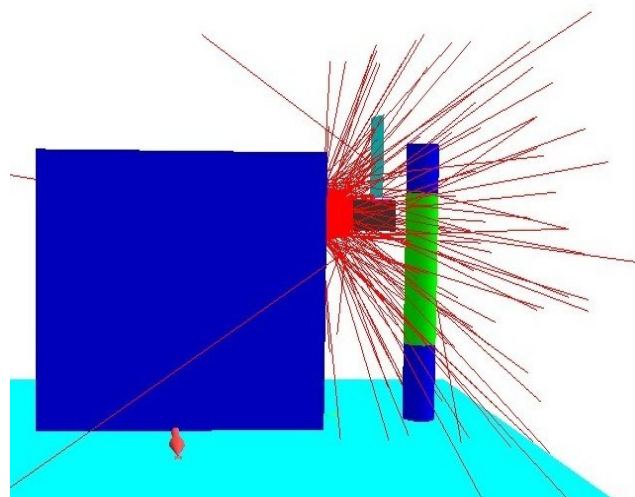


Fig. 4 Vista lateral da simulação feita com a segunda geometria, demonstrando a grande quantidade de radiação espalhada

IV. CONCLUSÃO

Neste estudo foram realizadas simulações computacionais, com o código de Monte Carlo MCNP 6.2, de exames radiográficos em equinos. O objetivo foi investigar qual o risco que os médicos veterinários são expostos nesse contato rotineiro com a radiação ionizante. Além disso, foi avaliado qual o impacto do uso de EPI e EPC na deposição de energia. Para isso foram analisados dois cenários: no primeiro, o veterinário não utiliza equipamentos de radioproteção; no segundo, o IOE veste um avental plumbífero e posiciona-se atrás de um anteparo suspenso de vidro plumbífero.

Dessa maneira, foi constatada uma diminuição de 89% da exposição do profissional quando os EPI e EPC foram adicionados a geometria. Além disso, verificou-se que o equipamento de raios X portátil também pode ser utilizado como barreira aos fótons espalhados, uma vez que possui uma estrutura plumbífera interna.

Esta redução significativa da exposição em 89%, reforça que a adoção de EPI e EPC é indispensável para mitigar a exposição ocupacional à radiação ionizante, sendo essencial para uma rotina profissional segura. Frente ao cenário em que as exigências legais de radioproteção ainda não são plenamente atendidas, destaca-se a urgência de promover a educação dos veterinários sobre a importância da adesão às diretrizes, além de implementar fiscalizações rigorosas para garantir a saúde desses profissionais.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Uberlândia e ao CNPq, pelo apoio financeiro para realização deste trabalho de pesquisa. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelos projetos que contribuíram para o desenvolvimento do trabalho: FAPEMIG - APQ-02934-15, FAPEMIG - APQ03049-15, CNPq-421603/2016-0, CNPq-420699/2016-3, CNPq-14520/2020-1, CNPq 312160/2023-2 e CNPq-312124/2021-0. L.W.G.S agradece à Capes pela bolsa de doutorado. Este trabalho faz parte do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia –Instrumentação Nuclear e Aplicações na Indústria e Saúde (INCT.INAIS), projeto CNPq 406303/2022-3.

CONFLITO DE INTERESSES

Os autores declaram que não possuem conflitos de interesses.

REFERÊNCIAS

1. Lima RS, Afonso JC, Pimentel LCF. Raios-X: fascinação, medo e ciência. *Quim Nova*. 2009;32(1):263–270. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/xtjYm7RZvYjTyGf5zJJgCQ/>
2. Linton OW. Medical applications of X rays. *Beam Line*. 1995;25(2). Disponível em: <https://www.slac.stanford.edu/pubs/beamline/25/2/25-2-linton.pdf>
3. Kemerink M, Dierichs TJ, Dierichs J, Huynen HJM, Wildberger JE, Van Engelshoven JMA, Kemerink GJ. Characteristics of a first-generation X-ray system. *Radiology*. 2011;260(2):496–502. doi:10.1148/radiol.11101899
4. CNEN. Resolução CNEN/CD nº 06, de 19 de junho de 1973 – Normas Básicas de Proteção Radiológica. Revogada pela Resolução CNEN/CD nº 12/1988. 1973. Disponível em: https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-a-informacao/atos-normativos-cnen/comissao_deliberativa/resolucoes/1973/rs_cnened_06_1973.pdf
5. CNEN. Norma CNEN NN 6.14 – Radioproteção em Radiodiagnóstico Veterinário. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/normas/grupo-6/grupo6-nrm614.pdf>
6. Mayer MN, Koehncke NK, Belotta AF, Cheveldae IT, Waldner CL. Use of personal protective equipment in a radiology room at a veterinary teaching hospital. *Vet Radiol Ultrasound*. 2017;59(2):137–146. doi:10.1111/vru.12583
7. Schnelle GB. The history of veterinary radiology. *Vet Radiol*. 1968;9(1):5–10. doi:10.1111/j.1740-8261.1968.tb01080.x
8. Epp T, Waldner C. Occupational health hazards in veterinary medicine: physical, psychological, and chemical hazards. *Can Vet J*. 2012;53(2):151–157. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22851776/>
9. CNEN. Norma CNEN NN 3.01 – Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica. 2014. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/normas/grupo-3#1>
10. Surjan Y, Ostwald P, Milross C, Warren-Forward H. Radiation safety considerations and compliance within equine veterinary clinics: results of an Australian survey. *Radiography*. 2015;21(3):266–271. doi:10.1016/j.radi.2014.11.007
11. Yoriyaz H. Método de Monte Carlo: princípios e aplicações em Física Médica. *Rev Bras Fis Med*. 2009;3(1):141–149. Disponível em: <https://www.rbfm.org.br/rbfm/article/view/52/v3n1p141>
12. Werner CJ, Bull JS, Solomon CJ, Brown FB, McKinney GW, Rising ME, Dixon DA, Martz RL, Hughes HG, Cox LJ, Zhukov IG, Fensin ML, Armendariz M, Swift CM, Franke BC, Wemple CA. MCNP version 6.2 release notes. *Los Alamos Natl Lab*. 2018;1–27. doi:10.2172/1419730
13. Moore Equine Dental Services. How to take dental X-rays on a horse [Internet]. YouTube; 2023. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=Ty79Z5k3Q6o>
14. Canon Electron Tubes & Devices Co. Stationary anode X-ray tube: D-205B/D-205BS. Japan; 2018. Disponível em: https://etd.canon/en/product/pdf/xray/PE-D-205B_BS_2018-11.pdf
15. Manso-Díaz G, San Román JL, Weller R. Head. In: Manso-Díaz G, San Román JL, Weller R, editors. *A practical guide to equine radiography*. Sheffield: 5m Publishing; 2018. p. 203–218. Disponível em: <https://online.flipbuilder.com/ulbm/hccs/>
16. Souza L. Monte Carlo evaluation of occupational exposures in equine radiology procedures. *PPUFU – Portal de Periódicos da Universidade Federal de Uberlândia*. (s.d.). doi:10.14393/ufu.te.2024.704
17. Poludniowski G, Landry G, De Blois F, Evans PM, Verhaegen F. SpekCalc: a program to calculate photon spectra from tungsten anode X-ray tubes. *Phys Med Biol*. 2009;54(19):N433–N438. doi:10.1088/0031-9155/54/19/N01
18. ICRU. Tissue substitutes in radiation dosimetry and measurement. ICRU Report 44. Bethesda, MD: International Commission on Radiation Units and Measurements; 1989.
19. IAEA. Absorbed dose determination in external beam radiotherapy: an international code of practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water. Technical Reports Series No. 398. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2000. Disponível em: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS398_scr.pdf

Enter the information of the corresponding author:

Author: Evely Alves Oliveira
Institute: Instituto de Física
Street: Av. João Naves de Ávila
City: Uberlândia
Country: Brasil
Email: evelyalves@icloud.com