

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE FÍSICA

Evely Alves Oliveira

**Análise dosimétrica das exposições ocupacionais em processos de radiodiagnóstico
realizados em equinos**

Uberlândia
2025

Evely Alves Oliveira

Análise dosimétrica das exposições ocupacionais em processos de radiodiagnóstico realizados em equinos.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao instituto de física da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Física Médica

Orientador: Prof. Dr. Lucio Pereira Neves

Uberlândia

2025

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

O48 2025	<p>Oliveira, Evely Alves, 2001- Análise dosimétrica das exposições ocupacionais em processos de radiodiagnóstico realizados em equinos [recurso eletrônico] / Evely Alves Oliveira. - 2025.</p> <p>Orientador: Lucio Pereira Neves. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em Física Médica. Modo de acesso: Internet. Inclui bibliografia.</p> <p>1. Física médica. I. Neves, Lucio Pereira, 2001-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Graduação em Física Médica. III. Título.</p> <p>CDU: 61:53</p>
-------------	--

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

Evely Alves Oliveira

Análise dosimétrica das exposições ocupacionais em processos de radiodiagnóstico realizados em equinos.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao instituto de física da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Física Médica

Banca Examinadora:

Lucio Pereira Neves – Doutor (UFU)

Lucas Wilian Gonçalves de Souza - Doutor (UFU)

Tainara Gabrieli Zandoná – Mestre (UFU)

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. 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.

RESUMO

A utilização da radiação ionizante em procedimentos de radiodiagnóstico veterinário, especialmente na área de equinos, representa um risco significativo aos profissionais expostos. Embora existam normas regulamentadoras e equipamentos de radioproteção, estudos apontam que as diretrizes legais não são praticadas como deveriam, ocasionando em exposições acidentais e registros de doses superiores aos limites recomendados pela CNEN. Assim, a simulação computacional por Monte Carlo apresenta-se como uma ferramenta eficaz para estimar, de forma precisa e segura, as doses absorvidas pelos tecidos, sem a necessidade de exposição real. Neste trabalho foi criado um cenário típico de exame radiográfico realizado em cavalos, contendo um indivíduo que opera uma máquina de raio x portátil e o animal. A partir do comando *Tally F6* do código MCNP 6.2, foram obtidas informações da quantidade de energia (em MeV) depositada nos tecidos (em g) do profissional, primeiramente com ausência de qualquer tipo de EPI e EPC e posteriormente com um avental pumbífero e um anteparo de vidro suspenso de chumbo protegendo o IOE. Ao comparar os resultados, foi constatado que o uso correto dos equipamentos de radioproteção pode reduzir a dose em 89%. Além disso, foi observado que a máquina de raio x também pode ser uma barreira entre o profissional e a radiação espalhada. Logo, torna-se indispensável que veterinários expostos a radiação sejam bem instruídos acerca das normas de radioproteção, além da implementação de fiscalizações para garantir o cumprimento das diretrizes.

Palavras-chave: radiologia veterinária; Monte Carlo; radiação ionizante; radioproteção; exposição ocupacional.

ABSTRACT

The use of ionizing radiation in veterinary radiodiagnostic procedures, particularly in equine medicine, poses a significant risk to exposed professionals. Although regulatory standards and radioprotection equipment exist, studies indicate that legal guidelines are often not properly followed, leading to accidental exposures and dose records exceeding the limits recommended by CNEN. In this context, Monte Carlo computational simulation emerges as an effective tool for accurately and safely estimating the radiation doses absorbed by tissues without the need for actual exposure. In this study, a typical radiographic examination scenario involving horses was simulated, including an operator handling a portable X-ray machine and the animal. Using the F6 Tally command in the MCNP 6.2 code, data on the amount of energy (in MeV) deposited in the professional's tissues (in grams) were obtained—first without any use of personal or collective protective equipment, and then with the inclusion of a lead apron and a suspended lead glass shield protecting the occupationally exposed individual (OEI). Comparison of the results revealed that proper use of radioprotective equipment can reduce the absorbed dose by up to 89%. Additionally, it was observed that the X-ray machine itself may act as a partial barrier against scattered radiation. Therefore, it is essential that veterinarians exposed to ionizing radiation receive thorough training in radiation protection standards, in addition to the implementation of inspections to ensure compliance with regulatory guidelines.

Keywords: veterinary radiology; Monte Carlo; ionizing radiation; radioprotection; occupational exposure.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Fatores de proteção radiológica.....	16
Figura 2 -	Avental plumbífero.....	17
Figura 3 -	Óculos plumbífero.....	18
Figura 4 -	Protetor de tireóide.....	18
Figura 5 -	Luva plumbífera.....	19
Figura 6 -	Profissional realizando exame radiográfico em um equino.....	23
Figura 7 -	Visão lateral do primeiro cenário montado, mostra o posicionamento do profissional (a) sem EPI, cavalo (b) e equipamento de raio X portátil (c) que realiza uma radiografia na cabeça do equino.....	24
Figura 8 -	Visão lateral do segundo cenário utilizado evidenciando os equipamentos de radioproteção: avental plumbífero (a) e vidro plumbífero (b).....	24
Figura 9 -	Visão superior do cenário sem equipamentos de radioproteção, demonstrando o grande volume de radiação retro espalhada que vai em direção ao cilindro.....	26
Figura 10 -	Visão lateral do cenário com equipamentos de radioproteção, demonstrando que a radiação espalhada não atinge o cilindro.....	27
Figura 11 -	Visão diagonal posterior do primeiro cenário mostrando que o aparelho de raio X portátil absorve parte da radiação espalhada que poderia atingir o veterinário.....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Limites anuais de dose dos IOEs e do público, estabelecidos pela CNEN.....	17
Tabela 2 -	Resultados do <i>Tally</i> F6 e suas respectivas incertezas nos cenários simulados com e sem o uso dos equipamentos de radioproteção.....	25

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
EPC	Equipamento de Proteção Coletiva
EPI	Equipamento de Proteção Individual
ICRP	Comissão Internacional de Proteção Radiológica
ICRU	Comissão Internacional de Unidades e Medições de radiação
IOE	Indivíduo Ocupacionalmente Exposto
MCNP	Monte Carlo N-Particle

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.2 JUSTIFICATIVA	13
2 OBJETIVOS.....	15
2.1 OBJETIVO GERAL	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 Princípios básicos de Proteção Radiológica	16
3.2 Grandezas de radioproteção.....	19
3.2.1 Dose absorvida (D).....	19
3.2.2 Dose equivalente (H_T).....	19
3.2.3 Dose efetiva (E).....	20
3.3 Método de Monte Carlo	20
4 METODOLOGIA.....	22
4.1 MCNP 6.2	22
4.2 Cenários de exposição.....	22
4.2.1 Cenário 1	23
4.2.2 Cenário 2	23
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	25
6 CONCLUSÃO.....	29
REFERÊNCIAS.....	30

1 INTRODUÇÃO

A medicina radiodiagnóstica se baseia na diferença de absorção da radiação pelos diferentes tecidos do corpo, uma vez que possuem diferentes fatores de atenuação devido suas composições distintas. Apesar dos benefícios, é importante considerar que a exposição prolongada ou repetida à radiação ionizante pode apresentar riscos tanto para os pacientes como também para os indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE). Entre os possíveis danos podem ser citados: dores, inflamações na pele, tumores, úlceras, e em alguns casos, morte (Linton, 1995).

Atualmente, as máquinas de raios X são equipadas com filtros e configuradas de forma a atingir a dose e tempo de exposição adequados para gerar a imagem (Kemerink, 2011). Devido a crescente utilização da radiação ionizante, foram criadas entidades para regulamentar seu uso de forma a proteger os IOE, pacientes, público em geral e o meio ambiente dos possíveis malefícios. Dessas organizações regulamentadoras, pode-se citar a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), que publicou em 1973 as “Normas Básicas de Proteção Radiológica” (CNEN, 1973), o que foi considerado o marco inicial na proteção radiológica brasileira.

Em 2014, houve a incorporação das recomendações da publicação ICRP-60 de 1990 (ICRP, 1991), pela norma CNEN-N-3.01, sendo seu nome atualizado para “Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica” (CNEN, 2014). A última atualização ocorreu em 2023, com o lançamento da norma CNEN NN 6.14 intitulada “Requisitos de Radioproteção e Segurança Radiológica na Obtenção de Imagens Humanas Para Fins de Segurança Pública” (CNEN, 2023).

Em um primeiro momento a preocupação com o uso da radiação ionizante estava direcionada somente à medicina. No entanto, nos anos de 1950 foram documentados vários casos de lesões ocasionadas pelo uso de raios-X nas mãos de médicos veterinários, incluindo queimaduras até amputação de dedos (Schnelle, 1968). Nota-se que o radiodiagnóstico no ambiente veterinário é especialmente preocupante, como é o caso de profissionais que atuam com equinos. Como a contenção do animal durante o exame é feita pelo próprio médico veterinário, isso resulta em grande proximidade ao feixe primário de radiação (Ellis, 2019). Além do fato que devido aos movimentos dos equinos, frequentemente é necessário repetir as radiografias, o que leva a um aumento ainda maior da exposição desses profissionais (Surjan, 2015).

Em 1953 foi fundada a Sociedade Americana de Radiologia Veterinária, com direcionamento aos veterinários da área. Também foi instituída “Os Educadores na Ciência

Radiológica Veterinária” em 1956, uma organização para garantir o ensino nas faculdades de veterinária sobre práticas seguras no uso de radiação (Schnelle, 1968). Atualmente a RDC 611/2022 (ANVISA, 2022) determina que todos IOEs, incluindo os profissionais da veterinária, devem utilizar dosímetros e equipamentos de proteção individual (EPI).

Um estudo, realizado em 2009, analisou a rotina de veterinários e mostrou ser comum a contenção manual dos animais durante os exames radiológicos. Além disso, os profissionais relataram que exposições acidentais são frequentes e não são todos que utilizam dosímetros. Dentre os IOE que fazem o uso, alguns acusaram leitura de dose superior a 20mSv/ano (EPP; Waldner, 2017), que é o limite estabelecido pela CNEN (CNEN, 2014). Outro estudo constatou que cerca de 94% dos procedimentos de radiodiagnóstico necessitam de contenção manual do animal (Mayer *et al.*, 2017). De forma a minimizar os possíveis danos causados pelos raios-X, é indispensável o uso de EPIs como protetor de tireóide e óculos e avental pumblíferos (ICRP, 1991).

Apesar da notável relação entre o uso inadequado dos equipamentos de proteção e as altas doses recebidas pelos trabalhadores, muitos profissionais não utilizam nenhum EPI (Mayer *et al.*, 2017). Isso ocorre devido à falta de treinamento e educação em segurança radiológica, o que leva a falta de compreensão das exigências legais (Surjan *et al.*, 2015). Assim, torna-se indispensável um constante monitoramento da dose ocupacional, para que seja possível garantir a saúde e segurança dos IOEs.

Estudos capazes de realizar um panorama das doses ocupacionais recebidas nos processos radiológicos da medicina veterinária em equinos podem ser realizados com o uso de câmeras de ionização e dosímetros, a partir de técnicas de dosimetria. Porém, além dos elevados custos, fatores como o conhecimento das doses em cada órgão limitariam os resultados. Como alternativa, a simulação computacional Monte Carlo se mostra extremamente eficaz, uma vez que custo razoável de implementação e é capaz de estimar com precisão as doses recebidas em cada tecido, sem a necessidade de procedimentos reais de exposição (Yoriyaz, 2009).

1.2 JUSTIFICATIVA

Os médicos veterinários utilizam radiação ionizante diariamente em exames de diagnóstico, no caso do trabalho com equinos, a dificuldade relacionada ao tamanho do animal e o manuseio do equipamento radiográfico torna a exposição profissional ainda maior. Como grande parte desses trabalhadores não utilizam os equipamentos de proteção, esse trabalho buscou quantificar a dose a que esses profissionais estão expostos quando não utilizam os EPI

durante exames radiográficos em equinos em relação à quando fazem o uso. Através da simulação computacional de Monte Carlo foi possível obter a quantidade de energia (em MeV) depositada em uma unidade de massa (em g) por cada partícula-fonte, o que possibilita avaliar o risco sem necessidade de uma exposição real.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Realizar simulações de Monte Carlo para determinar a quantidade de radiação ionizante que os profissionais estão expostos durante um procedimento diagnóstico de raios X em equinos, além de avaliar o impacto do uso dos equipamentos de radioproteção na dose recebida.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar a literatura acerca da radiologia veterinária, dosimetria e proteção radiológica;
- Utilizar o código de transporte de radiação SpekCalc para criar o espectro de raios-x;
- Usar modelos virtuais de simuladores previamente desenvolvidos para simular os IOE durante procedimentos de radiodiagnóstico realizados em equinos;
- Realizar simulações com e sem equipamentos de proteção individual e coletiva;
- Avaliar qual o impacto dos EPI na exposição à radiação ionizante do IOE.

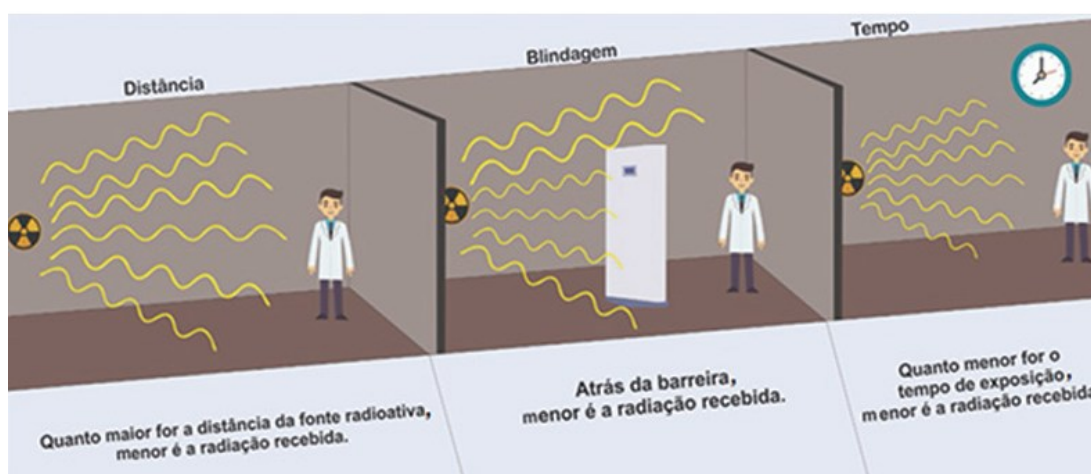
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Princípios básicos de Proteção Radiológica

Os princípios básicos de proteção radiológica são: Justificação, Otimização e Limitação de Doses (BRASIL, 1998), conforme descrito abaixo:

1. Princípio da justificação: exposições de pacientes e profissionais a radiação ionizante durante procedimentos médicos devem ser justificados. Uma avaliação de riscos e benefícios deve ser feita de forma individual, de maneira que as vantagens superem os possíveis malefícios.
2. Princípios da otimização: também chamado de ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*), preconiza que toda dose recebida por pacientes deve ser “tão baixa quanto razoavelmente exequível” (ICRP, 2007). Para auxiliar na manutenção de doses baixas, existem três fatores de proteção, representados na Figura 1, sendo eles: tempo, distância e blindagem.

Figura 1: Fatores de proteção radiológica



Fonte: Dorow (2019, p.26).

3. Princípio da limitação de doses: determina limites de dose anuais para cada tipo de público, a fim de diminuir riscos de reações teciduais (BRASIL, 1998). A Tabela 1 demonstra os limites anuais de dose dos IOEs e do público.

Os valores apresentados na Tabela 1, que correspondem aos limites anuais de dose estabelecidos pela CNEN, referem-se à média das doses efetivas recebidas ao longo dos últimos cinco anos. Embora o limite anual recomendado para a dose efetiva seja de 20 mSv, é estipulado que nenhum profissional pode exceder 50 mSv em um único ano.

Durante a prática clínica a blindagem é realizada por meio de equipamentos de radioproteção individual (EPI) e coletiva (EPC). Entre os principais utilizados estão o avental, óculos, protetor de tireoide plumbífero, luvas plumbíferas e anteparo de vidro suspenso.

Tabela 1 - Limites anuais de dose dos IOEs e do público, estabelecidos pela CNEN

Grandeza	Órgão	IOE	Público
Dose Efetiva	Corpo inteiro	20 mSv	1 mSv
Dose equivalente	Cristalino	20 mSv	15 mSv
	Pele	500 mSv	50 mSv
	Mãos e pés	500 mSv	---

Fonte: CNEN (2014, p.18).

O avental (Figura 2) é uma espécie de colete de chumbo, protege o tronco e os órgãos vitais. Os óculos (Figura 3) são de vidro com grande percentual de chumbo em sua composição. O protetor de tireoide (Figura 4) tem formato de colar e veste o pescoço para blindar a glândula tireoidiana. As luvas (Figura 5) protegem as mãos, especialmente em procedimentos com exposição direta ao feixe primário de radiação. O anteparo de vidro suspenso, feito de vidro e chumbo, não fica preso diretamente a uma pessoa, sendo uma barreira no espaço (EPI, 2024).

Figura 2 - Avental plumbífero



Fonte: EPI (2022).

Figura 3 - Óculos plumbífero



Fonte: Tenório *et al.*, (2022).

Figura 4 - Protetor de tireóide



Fonte: Tenório *et al.*, (2022).

Figura 5 - Luva plumbífera



Fonte: Tenório *et al.*, (2022).

3.2 Grandezas de radioproteção

As grandezas de radioproteção relevantes para este trabalho são dose absorvida, dose equivalente e dose efetiva.

3.2.1 Dose absorvida (D)

Grandeza dosimétrica fundamental expressa por:

$$D = \frac{d\varepsilon}{dm} \quad (1)$$

Onde $d\varepsilon$ é a energia média depositada pela radiação em um volume elementar de matéria de massa dm . A unidade no sistema internacional é o joule por quilograma ($J \cdot Kg^{-1}$), que recebe a denominação especial gray (Gy) (CNEN, 2014, p.4).

3.2.2 Dose equivalente (H_T)

Dose em um tecido ou órgão T definida pela expressão:

$$H_T = \sum_R W_R D_{T,R} \quad (2)$$

Onde $D_{T,R}$ é a dose absorvida média no volume de um órgão ou tecido T específico, devido à radiação R incidente no corpo ou emitida por radionuclídeos incorporados e W_R é o fator de peso para a radiação R. A unidade no sistema internacional é o joule por quilograma ($J \cdot Kg^{-1}$), que recebe a denominação especial sievert (Sv) (CNEN, 2014, p.4).

3.2.3 Dose efetiva (E)

Grandeza definida pela expressão:

$$E = \sum_T W_T H_T \quad (3)$$

onde H_T é a dose equivalente no tecido ou órgão T e W_T é o fator de peso do respectivo órgão ou tecido. A unidade no sistema internacional é o joule por quilograma ($J \cdot Kg^{-1}$), que recebe a denominação especial sievert (Sv) (CNEN, 2014, p.4).

3.3 Método de Monte Carlo

O método de Monte Carlo nasceu durante o Projeto Manhattan, na Segunda Guerra Mundial. O objetivo era auxiliar a tomada de decisões e atualmente é amplamente utilizado em diversas áreas como uma ferramenta matemática (IBM cloud education, 2020; Metropolis, 1987; Yoriyaz, 2009). Na física médica, este método opera um papel importante para calcular doses sem a necessidade de realizar exposições reais a radiação ionizante, tornando possível avaliar diferentes cenários que seriam difíceis de replicar na prática (IBM cloud education, 2020; Yoriyaz, 2009).

Trata-se de uma técnica estatística que utiliza amostragens aleatórias sucessivas para realizar simulações computacionais baseadas em funções de distribuição de probabilidade. No contexto da simulação de transporte de radiação, os fenômenos físicos são modelados por meio de funções densidade de probabilidade, as quais estabelecem a probabilidade de ocorrência de determinados eventos ao longo do processo (Yoriyaz, 2009).

Dessa forma, as partículas sofrem uma série de interações com o ambiente, podem perder energia, mudar de direção e dar origem a outras partículas. Essas informações são armazenadas como sua história, que considera todos os eventos individuais desde a emissão pela fonte até sua absorção ou saída do sistema. Para simular essas histórias, são consideradas as seções de choque diferenciais dos mecanismos de interação, as quais possibilitam determinar

as funções densidade de probabilidade das variáveis aleatórias que caracterizam a trilha (Salvat *et al.*, 2006). Para atingir resultados com menor taxa de incerteza estatística, é utilizado um maior número de histórias simuladas (Yoriyaz, 2009).

4 METODOLOGIA

4.1 MCNP 6.2

O código computacional de Monte Carlo utilizado foi o MCNP6.2, que realiza simulações de transporte de radiação. Essa versão 6.2 contém os recursos mais recentes e correções de bugs para o MCNP (Werner *et al.*, 2018).

O arquivo de entrada do MCNP é estruturado em três blocos, nos quais as linhas de código são denominadas “cartões”. O primeiro bloco é responsável pelas definições dos volumes geométricos, definidos como células. Cada cartão desse bloco especifica o identificador do material, sua densidade, a unidade de medida correspondente e as superfícies que delimitam a célula. O segundo bloco, denominado bloco de superfícies, contém os cartões que definem as superfícies utilizadas para delimitar as células descritas no primeiro bloco. O usuário pode especificar as dimensões e o tipo de superfície da modelagem geométrica pretendida. Por fim, o bloco de dados une os parâmetros fundamentais para a simulação. Este inclui definições sobre a fonte, direção das partículas, espectros, composição química dos materiais, *tallies* (grandezas físicas calculadas pelo código), tabela de resultados, número de histórias simuladas, entre outros aspectos essenciais para a execução da simulação e análise dos resultados (Werner *et al.*, 2018).

4.2 Cenários de exposição

Neste trabalho foi recriado um ambiente comum de uma radiografia realizada em um equino, no qual o exame é realizado por um único profissional que segura o equipamento de raio X portátil (Figura 6). Foi utilizada uma tensão de 70 kVp para realizar o exame (Manso-Díaz; López San Román; Weller, 2018). A sala simulada apresenta as dimensões de $4 \times 4.5 \times 2.4$ m³, o profissional e o paciente foram representados por um objeto simulador simplificado, um cilindro com 170 cm de altura e 12 cm de raio e o cavalo por um paralelepípedo medindo $51.296 \times 166.432 \times 204.288$ cm³ (Souza, 2024), ambos preenchidos com água.

O equipamento de raio X é do modelo Gierth HF-300. O tubo de raio X, especialmente desenvolvido para os modelos portáteis, possui alvo de Tungstênio e filtração de alumínio de 3,5 mmAl (Canon electron tubes & devices co., LTD., 2018) e apresenta ângulo anódico de 12°. O tamanho do campo de visão dos raios X utilizada foi de 35×43 cm² e a distância foco-filme de 47 cm (Manso-Díaz; López San Román; Weller, 2018), foram simuladas 1E9 histórias

de partículas. Para avaliar os resultados da exposição do profissional, quando há ou não o uso adequado dos equipamentos de radioproteção, foram gerados dois cenários.

Figura 6 - Profissional realizando exame radiográfico em um equino



Fonte: Moore Equine Dental Services (2023).

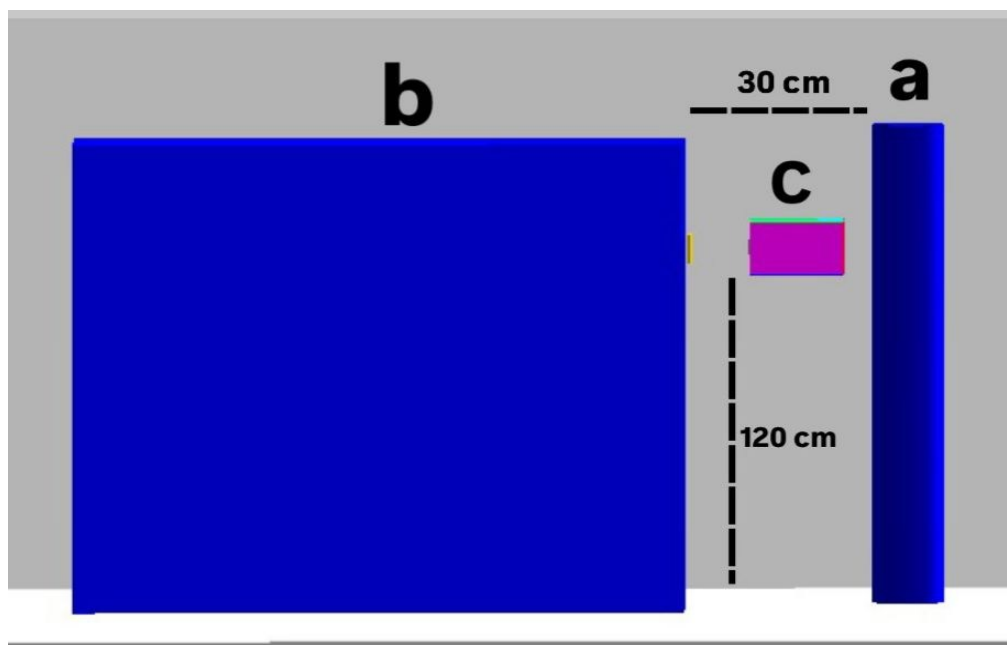
4.2.1 Cenário 1

Esse cenário simula a situação em que o profissional não está utilizando equipamentos de radioproteção. Como mostra a Figura 7, o operador do tubo (a) foi posicionado a 30 cm do cavalo (b). O equipamento de raio X portátil (c) está a 120 cm em relação ao chão e realiza o exame na cabeça do equino. O espectro do feixe foi gerado utilizando o software SpekCalc (Poludniowski *et al.*, 2009).

4.2.2 Cenário 2

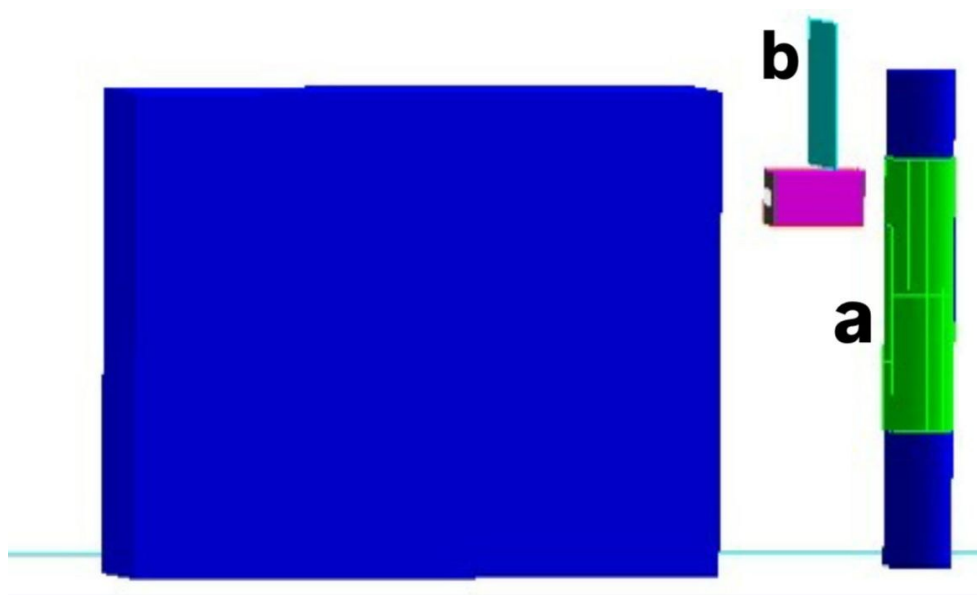
Nesse cenário foram mantidos todos os componentes do cenário anterior e suas posições, porém foram adicionados um EPI e um EPC. Conforme pode ser observado na Figura 8, ao redor do profissional foi adicionado um avental plumbífero (EPI), com espessura de 0.05 cm de chumbo, posicionado entre 50 cm e 143 cm de altura do IOE. Além disso, também foi introduzido um anteparo suspenso de vidro plumbífero (EPC), com dimensões de $50 \times 45 \times 0,05 \text{ cm}^3$ e disposto entre o veterinário e o paciente.

Figura 7 – Visão lateral do primeiro cenário montado, mostra o posicionamento do profissional (a) sem EPI, cavalo (b) e equipamento de raio X portátil (c) que realiza uma radiografia na cabeça do equino



Fonte: autor.

Figura 8 – Visão lateral do segundo cenário utilizado evidenciando os equipamentos de radioproteção: avental plumbífero (a) e vidro plumbífero (b)



Fonte: autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As simulações foram realizadas pelo Método Monte Carlo, em sua versão MCNP 6.2, sendo empregadas 10^9 histórias (WERNER *et al.*, 2018). A Tabela 2 demonstra os resultados obtidos nas simulações quando há ou não o uso dos equipamentos de radioproteção. Os valores apresentados são do *tally* F6, sendo este um comando do MCNP 6.2 que mede a quantidade de energia (em MeV) depositada em uma unidade de massa (em g) por cada partícula-fonte. Os números representam o valor obtido para o cilindro inteiro, sendo equivalente a energia que seria recebida por todo o corpo do profissional.

Tabela 2 – Resultados do *Tally* F6 e suas respectivas incertezas nos cenários simulados com e sem o uso dos equipamentos de radioproteção

	<i>Tally</i> F6 (Mev/g/source-particle)	Incerteza
Sem proteção	2,87E-9	0,0005
Com proteção	3,11E-10	0,0014

Fonte: a autora.

Ao realizar uma análise comparativa do resultado para os dois cenários, fica evidente que uma energia maior foi depositada quando não houve utilização do EPI e EPC. Logo, como já era esperado, o uso de equipamentos de radioproteção pelo indivíduo reduz o impacto da exposição à radiação ionizante. A equação (4) foi utilizada para definir a redução percentual do *Tally*.

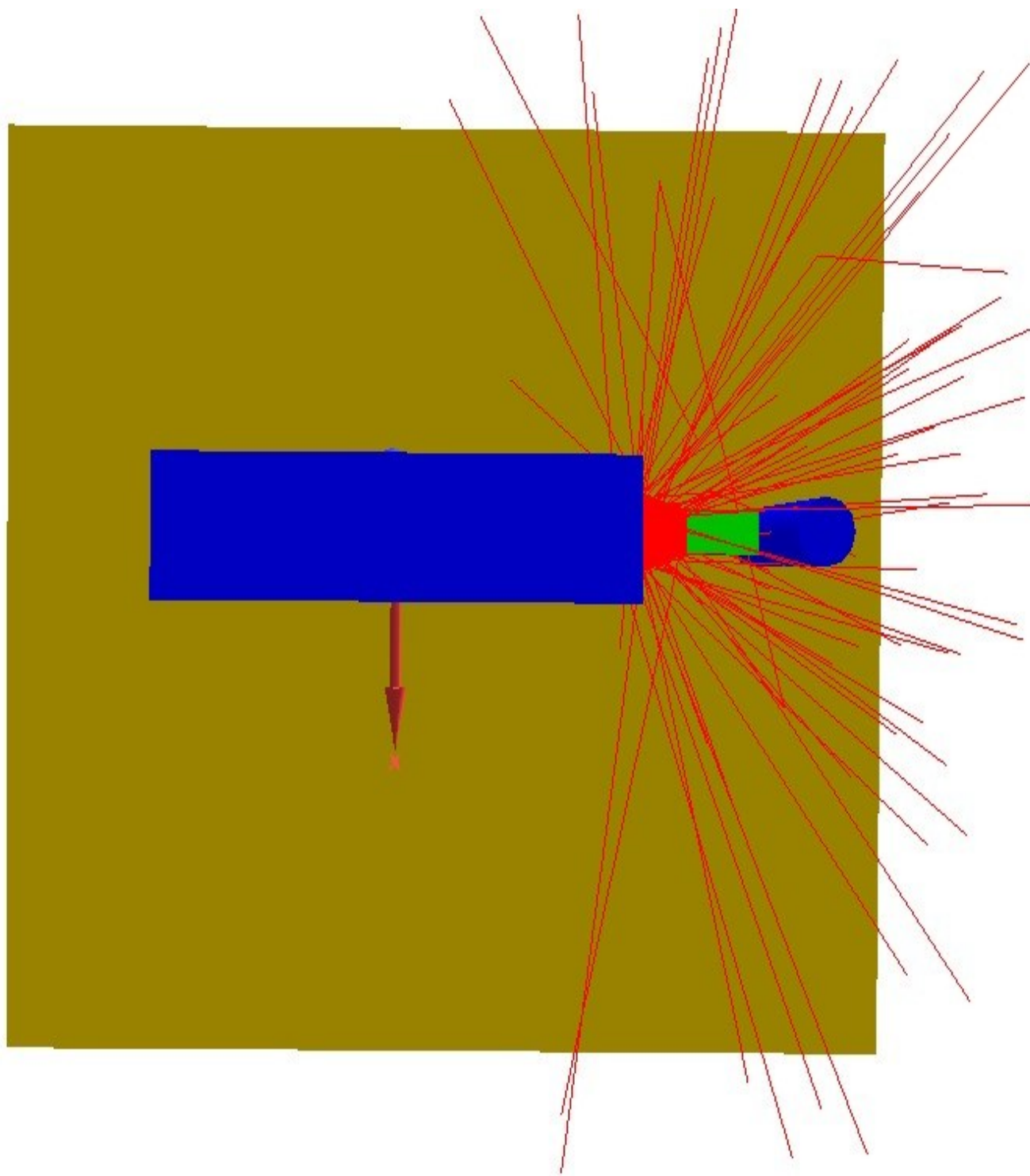
$$redução = \left| \frac{F6 - F6_{EPI}}{F6} \right| \times 100 \quad (4)$$

Onde $F6$ representa o valor do *Tally* para o cenário sem proteção e $F6_{EPI}$ para o cenário com proteção.

Dessa forma, conclui-se que a utilização do avental plumbífero e do anteparo de vidro suspenso diminuiu a energia depositada em 89%. A Figura 9, visão superior do primeiro cenário, demonstra a grande intensidade de radiação espalhada (fótons que ao interagir com átomos ou partículas de um meio, mudam de direção), que vai em direção ao cilindro. Enquanto

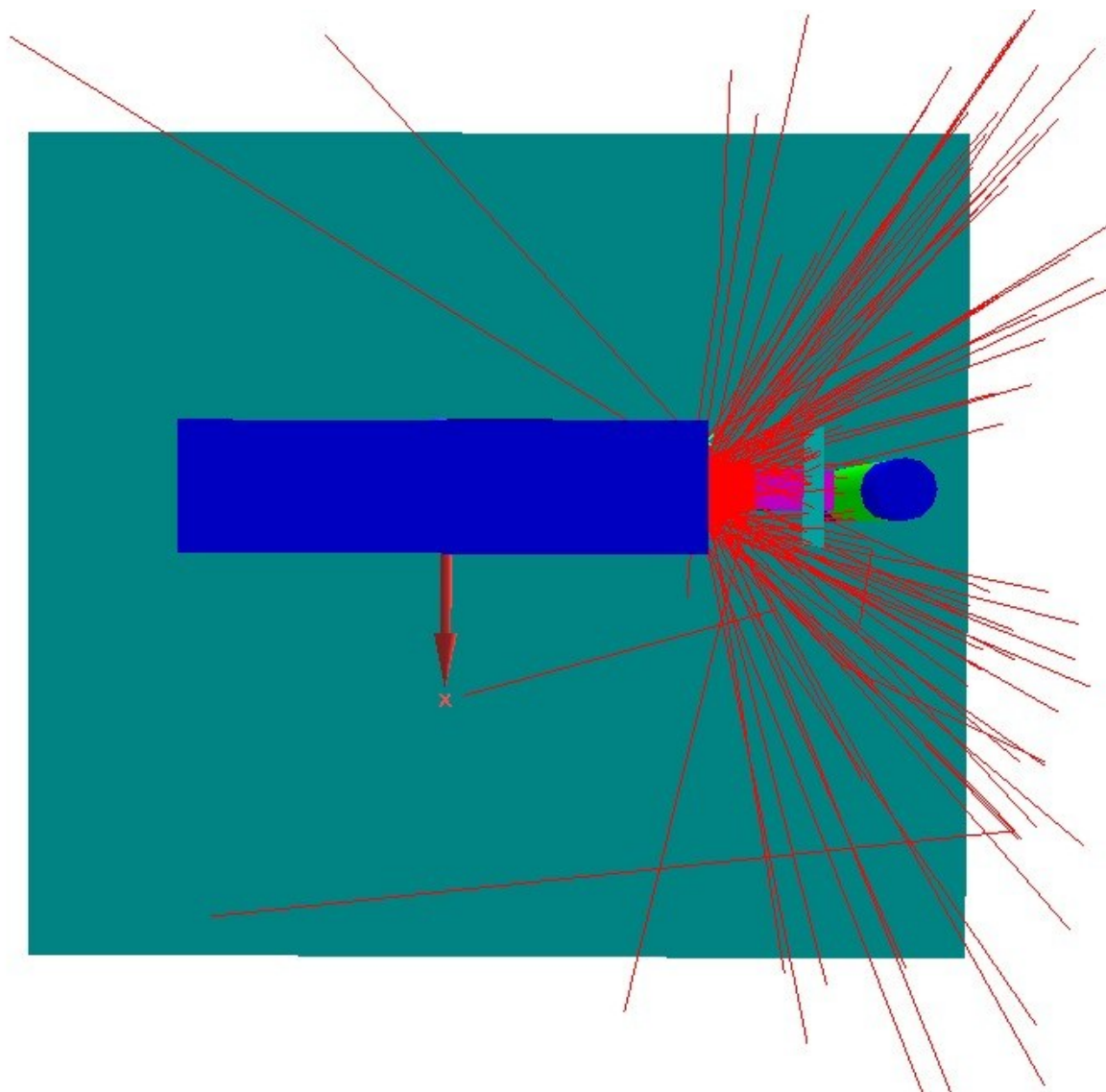
na Figura 10, visão posterior do segundo cenário, é possível perceber que o profissional é protegido pelos equipamentos.

Figura 9 – Visão superior do cenário sem equipamentos de radioproteção, demonstrando o grande volume de radiação retro espalhada que vai em direção ao cilindro



Fonte: a autora.

Figura 10 – Visão superior do cenário com equipamentos de radioproteção, demonstrando que a radiação espalhada não atinge o cilindro



Fonte: a autora.

Ao observar o caminho dos fótons que foram espalhados, também é possível ver que o aparelho de raio X portátil bloqueia parte dessa energia que poderia atingir o profissional. Conforme é possível ver nas Figuras 9 e 10, existe uma grande quantidade de radiação que atravessa o cilindro, exceto na região onde o aparelho fica disposto no caminho entre os fótons e o veterinário. Isso é devido ao protetor plumbífero presente no aparelho, comumente presente em equipamentos radiográficos portáteis.

Dessa forma, o próprio aparelho protege o veterinário, podendo ser utilizado, eventualmente, como um escudo de maneira intencional em um momento que não há

equipamentos de proteção individual ou coletiva disponíveis. Entretanto é importante destacar que este não é um substituto eficaz destes equipamentos.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho de conclusão de curso foram realizadas simulações computacionais de procedimentos rotineiros da radiologia veterinária, utilizando o código de Monte Carlo MCNP 6.2. O objetivo foi quantificar a exposição dos médicos veterinários à radiação ionizante durante radiografias em equinos, além de avaliar o impacto do uso de EPI e EPC na dose recebida. Para fins comparativos, foram analisados dois cenários: no primeiro, o profissional não utiliza equipamentos de radioproteção; no segundo, ele veste um avental plumbífero e se posiciona atrás de um anteparo de vidro com chumbo suspenso.

Assim, constatou-se uma redução de 89% da exposição do IOE quando os EPI e EPC foram adicionados ao cenário. Também foi possível verificar que o equipamento de raio X portátil absorve uma porção da radiação espalhada que iria em direção ao profissional.

Logo, com este trabalho foi verificado que o uso de EPI e EPC pelo indivíduo reduz significativamente a exposição a radiação ionizante, sendo indispensável para uma rotina segura de trabalho. Como as exigências legais de radioproteção ainda não são cumpridas em sua totalidade, urge a necessidade de educar os veterinários sobre a importância de atender as diretrizes, além implementar fiscalizações para garantir a preservação da saúde dos profissionais.

REFERÊNCIAS

- ANVISA. **Resolução n.º 611, de 9 de março de 2022**. [S.l.: s.n.], mar. 2022. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-rdc-n-611-de-9-de-marco-de-2022-386107075>. Acesso em: 18 fev. 2025.0
- BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria n.º 453, de 1º de junho de 1998**. Diretrizes de proteção radiológica em radiodiagnóstico médico e odontológico. Brasília, 1998.
- CANEVARO, Lúcio. Radiation Exposure to Personnel Obtaining Equine Appendicular Radiographs Using a Handheld Generator. **Revista Brasileira de Física Médica**, v. 3, n. 1, p. 101-115. DOI: <https://doi.org/10.29384/rbfm.2009.v3.n1.p101-115>. Disponível em: <https://www.rbfm.org.br/rbfm/article/view/50>. Acesso em: 18 fev. 2025.
- CANON ELECTRON TUBES & DEVICES CO., LTD. **Stationary anode X-ray tube: D-205B / D-205BS**. Japão, 2018. Disponível em: <https://etd.canon>. Acesso em: 10 mar. 2025.
- CNEN. **Norma CNEN NN 3.01**. [S.l.: s.n.], abr. 2014. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/acesso-rapido/normas/grupo-3#1>. Acesso em: 18 fev. 2025.
- CNEN. **Resolução n.º 6, de junho de 1973**. [S.l.: s.n.], jun. 1973. Disponível em: https://www.gov.br/cnen/pt-br/acesso-a-informacao/atos-normativoscnen/comissao_deliberativa/resolucoes/1973/1973. Acesso em: 10 fev. 2025.
- CNEN. **Norma CNEN NN 6.14**. [S.l.: s.n.], set. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/acesso-rapido/normas/grupo-6/grupo6-nrm614.pdf>. Acesso em: 8 jan. 2025.
- DOROW, P. F. C. M. **Proteção radiológica no diagnóstico e terapia**. Florianópolis: IFSC, 2019. Disponível em: <https://www.ifsc.edu.br/documents/30701/523474/PROTE%C3%87%C3%83O%20RADIOLOGICA%20ebook%20final.pdf/10be750c-0d7c-484f-8baf-c33053f203cd>. Acesso em: 20 mar. 2025.
- ELLIS, Katherine L.; MORTON, Alison J.; HERNANDEZ, Jorge A.; WINTER, Matthew D. Radiation Exposure to Personnel Obtaining Equine Appendicular Radiographs Using a Handheld Generator. **Journal of Equine Veterinary Science**, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2018.11.013>
- EPI RADIOLOGIA: **Conheça os Principais Equipamentos de Proteção Radiológica**. Belo Horizonte: Protec, 2022. Disponível em: <https://proteg.net.br/epi-radiologia-conheca-os-principais-equipamentos-de-protecao-radiologica/>. Acesso em: 10 fev. 2025.
- EPP, Terry; WALDNER, Cheryl. Occupational health hazards in veterinary medicine: physical, psychological, and chemical hazards. **The Canadian Veterinary Journal**, v. 53, 2012.
- POLUDNIOWSKI, Gavin; LANDRY, Guillaume; DE BLOIS, Francois; EVANS, Philip M.; VERHAEGEN, Frank. SpekCalc: a program to calculate photon spectra from tungsten anode X-ray tubes. **Physics in Medicine & Biology**, v. 54, p. N433–N438, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/0031-9155/54/19/N01>. Acesso em: 27 fev. 2025.

MANSO-DÍAZ, Gabriel; LÓPEZ SAN ROMÁN, Javier; WELLER, Renate. Capítulo 14: Head. In: MANSO-DÍAZ, Gabriel; LÓPEZ SAN ROMÁN, Javier; WELLER, Renate (ed.). **A practical guide to equine radiography**. Sheffield: 5m Publishing, 2018. Disponível em: https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781789180671_A45346292/preview-9781789180671_A45346292.pdf. Acesso em: 08 abr. 2025.

MAYER, Megan N.; KOEHNCKE, Norman K.; BELOTTA, Amanda F.; CHEVELDAE, Ian T.; WALDNER, Cheryl L. Use of personal protective equipment in a radiology room at a veterinary teaching hospital. **Veterinary Radiology Ultrasound**, v. 59, p. 137-146, dez. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/vru.12583>. Acesso em: 27 fev. 2025.

METROPOLIS, Nicholas. The Beginning of the Monte Carlo Method. **Los Alamos Science Special Issue**, 1987. Disponível em: <https://library.lanl.gov/cgi-bin/getfile?00326866.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2025.

IBM. **O que é Simulação de Monte Carlo?** IBM Cloud Education, 2020. Disponível em: <https://www.ibm.com/br-pt/topics/monte-carlo-simulation>. Acesso em: 25 fev. 2025.

SALVAT, Francesc; FERNÁNDEZ-VAREA, José M.; SEMPÁU, Josep. Penelope-2006: A code system for monte carlo simulation of electron and photon transport. In: CITESEER. **Workshop proceedings**. [S.l.], 2006. v. 4, n. 6222, p. 7.

SCHNELLE, George B. The history of veterinary radiology. **Veterinary Radiology**, v. 9, p. 5-10, jan. 1968. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1740-8261.1968.tb01080.x>. Acesso em: 20 fev. 2025.

SOUZA, Lucas. Monte Carlo evaluation of occupational exposures in equine radiology procedures. **PPUFU - Portal de Periódicos da Universidade Federal de Uberlândia**, [s.d.]. DOI: <https://doi.org/10.14393/ufu.te.2024.704>. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2024.704>. Acesso em: 10 mar. 2025.

SURJAN, Yvette; OSTWALD, Paul; MILROSS, Christine; WARREN-FORWARD, Helen. Radiation safety considerations and compliance within equine veterinary clinics: Results of an Australian survey. **Radiography**, ago. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.radi.2014.11.007>. Acesso em: 17 jan. 2025.

TENÓRIO, Abraão Myller de Freitas; COSTA, Angleanny Andreza da Silva; MOURA NETO, Edvaldo Albuquerque; SILVA, Thamyres Pollyane Maria Broca da. A importância da proteção radiológica nos setores de radiodiagnóstico. Recife: O Autor, 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Radiologia) – **Centro Universitário Brasileiro – UNIBRA**. Disponível em: <https://www.grupounibra.com/repositorio/RADI/2022/a-importancia-da-protecao-radiologica-nos-setores-de-radiodiagnostico6.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2025.

ICRP. **The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**. ICRP Publication 103, 2007. Disponível em: <https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20103>. Acesso em: 24 fev. 2025.

ICRP. **Radiation protection: 1990 recommendations of the International Commission on Radiological Protection**. [S.l.]: Pergamon Press, 1991.

KEMERINK, Martijn; DIERICH, Tom J.; DIERICH, Julien; HUYNEN, Hubert J.M.; WILDBERGER, Joachim E.; VAN ENGELSHOVEN, Jos M. A.; KEMERINK, Gerrit J. Characteristics of a First-Generation X-Ray System. **Radiology**, maio 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1148/radiol.11101899>. Acesso em: 13 mar. 2025.

LINTON, O. W. Medical applications of X rays. **Beam Line**, v. 25, 1995.

SANTIN FILHO, Osvaldo. Breve histórico dos cem anos da descoberta dos raios X: 1895-1995. **Química Nova**, v. 18, p. 574-583, jan. 1995.

WERNER, Christopher J.; BULL, Joseph S.; SOLOMON, Charles J.; BROWN, Forrest B.; MCKINNEY, Gregg W.; RISING, Michael E.; DIXON, David A.; MARTZ, Roger L.; HUGHES, Henry G.; COX, Lawrence J.; ZHUKOV, Igor G.; FENSIN, Michael L.; ARMENDARIZ, Melissa; SWIFT, Charles M.; FRANKE, Brian C.; WEMPLE, Charles A. **MCNP Version 6.2 Release Notes**. Los Alamos National Laboratory, p. 1-27, 5 fev. 2018. Office of Scientific and Technical Information (OSTI). Disponível em: <https://doi.org/10.2172/1419730>. Acesso em: 15 fev. 2025.

YORIYAZ, Helio. Método de Monte Carlo: princípios e aplicações em Física Médica. **Revista Brasileira de Física Médica**, v. 3, n. 1, p. 141-149, 2009. Disponível em: <https://www.rbfm.org.br/rbfm/article/view/52/v3n1p141>. Acesso em: 22 jun. 2024.