

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE FÍSICA

AZONTÈ MAHUDIN VITAL OPPORTUN MEVI

Análise dosimétrica computacional das exposições ocupacionais em processos de radiodiagnóstico realizados em pequenos animais

Uberlândia

2024

AZONTÈ MAHUDIN VITAL OPPORTUN MEVI

Análise dosimétrica computacional das exposições ocupacionais em processos de radiodiagnóstico realizados em pequenos animais

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. Me. Lucas Wilian Gonçalves de Souza

Uberlândia

2024

AZONTÊ MAHUDIN VITAL OPPORTUN MEVI

Análise dosimétrica computacional das exposições ocupacionais em processos de radiodiagnóstico realizados em pequenos animais

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:

Lucas Wilian Gonçalves de Souza - Me. (UFU) - Presidente

Samara Pavan Souza – Ma. (UFU)

Válter José Coutinho Júnior – Me. (UFU)

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo
estímulo, carinho e apoio.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me guiar e cuidar em cada passo da minha vida.

Aos meus pais Tadégnon Emmanuel Mevi e Mondoukpè Gisèle Aguigui, por ser sempre minha fonte de motivação, pelo apoio e carinho. Agradeço vocês por ter me deixado ir tão longe de vocês apesar da saudade e sempre estar presente por mim e meus irmãos. Admiro vocês. Aos meus irmãos, Eric, Prince, Fidèle, Charbel, Patient pelo carinho, amo vocês.

Ao Prof. Dr. Lucio Pereira Neves, por toda atenção, confiança, por acreditar em mim desde o início desta caminhada e apoio nesses anos de graduação. Agradeço também Profa. Dra. Ana Paula Perini, pelo apoio.

Ao meu orientador, Me. Lucas Wilian Gonçalves de Souza, por ter me ensinado tantas coisas, pela paciência e sempre estar disposto a ajudar.

Aos meus amigos, Prince Pacome Djigla e Leonardo Silva Vieira pelo companheirismo.

A todos os professores do Instituto de Física INFIS e colegas, que colaboraram diretamente ou indiretamente para minha formação.

A todos que por um gesto, umas palavras, um sorriso, alegraram meus dias durante esta jornada.

Este trabalho foi realizado com o apoio financeiro das agências de fomento Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por meio das bolsas de Produtividade em Pesquisa 312124/2021-0 (A.P.P.) e 312160/2023-2 (L.P.N.), pelo Projeto UNIVERSAL 407493/2021-2; e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), por meio dos projetos APQ-04215-22, APQ-01254-23 e APQ-04348-23. Este trabalho é um resultado do Projeto de Iniciação Científica Voluntária (DIRPE/PIVIC Nº 292/2022). O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Este trabalho é parte do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Instrumentação Nuclear e Aplicações na Indústria e Saúde (INAIS) 406303/2022-3.

“Quem nega o próprio passado se torna um brinquedo à mercê dos caprichos do progresso. O passado é o alicerce sem o qual a existência se converte em uma aventura.” le gon a bégayé (Apollinaire AGBAZAHOU, 2012, p.67)

RESUMO

Neste trabalho são apresentados os resultados da avaliação computacional das exposições à radiação ionizante dos profissionais que realizam procedimentos com animais de pequeno porte. Foi utilizado o código MCNP6.2 para simular o ambiente de exame, com um paciente deitado na mesa de exame. Nos cenários simulados, a profissional manuseia um raio X portátil, com e sem o uso de EPIs. Os resultados obtidos mostram uma diminuição percentual da exposição da IOE de até 99.8 % dos órgãos/tecidos completamente protegidos pelo EPI. Com os órgãos/tecidos parcialmente protegidos, observamos considerável redução de até 83.7%. Esses resultados evidenciam a importância dos EPI em proteção radiológica.

Palavras-chave: Radiologia Veterinária. Monte Carlo. Radiação Ionizante. Exposição Ocupacional.

ABSTRACT

This paper presents the results of a computational evaluation of the exposure to ionizing radiation of professionals who perform procedures on small animals. The MCNP6.2 code was used to simulate the examination environment, with a patient lying on the examination table. In the simulated scenarios, the professional handles a portable X-ray, with and without the use of PPE. The results obtained show a percentage reduction in IOE exposure of up to 99.8% of the organs/tissues completely protected by the PPE. With the organs/tissues partially protected, we observed a considerable reduction of up to 83.7%. These results highlight the importance of PPE in radiological protection.

Keywords: Veterinary Radiology. Monte Carlo. Ionizing radiation. Occupational Exposure.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Representação do efeito fotoelétrico	15
Figura 2 -	Representação do efeito Compton	16
Figura 3 -	Lesão na pele em homem de 40 anos submetido a múltiplas coronariografias. Aproximadamente 18 a 21 meses depois do procedimento, evidencia-se necrose dos tecidos	17
Figura 4-	A opacidade no cristalino radioinduzida em um especialista em Radiologia Intervencionista submetido a altos níveis de radiação espalhada, utilizando um angiógrafo não otimizado com tubo de raios X acima da mesa.	18
Figura 5-	- Representação esquemática dos efeitos diretos e indiretos da radiação no DNA e os tipos de danos que essas interações podem causar na molécula.	19
Figura 6-	Representação esquemática dos tipos de aberrações cromossômicas instáveis e estáveis e da formação de micronúcleo.	20
Figura 7-	Fatores da proteção radiológica	22
Figura 8-	Avental de chumbo ou plumbífero	23
Figura 9-	Protetor de tireoide	23
Figura	Óculo plumbífero	24
10-		
Figura 11-	Fotografias que mostram o posicionamento da unidade de raios-X portátil para obter imagens odontológicas de um cão adulto.	27
Figura	Visão lateral do cenário simulado mostrando o profissional sem EPI, o	28
12-	equipamento de raio X e o animal	
Figura	Imagem mostrando com detalhe o equipamento de raio-X	29
13-		
Figura	Visão lateral do cenário simulado mostrando o profissional com EPI, o	30
14-	equipamento de raio X e o animal	
Figura	Visão lateral do cenário sem EPI mostrando que a mesa absorve parte dos	32
15-	raios x que poderiam atingir a região inferior do corpo.	
Figura	Vista superior, mostrando que o escudo de proteção contra radiação	33
16-	espalhada do equipamento de raios X protege a profissional.	

Figura 17-	Imagem mostrando que o protetor plumbífero dos raios x bloqueia parte da radiação que seria retroespalhada para a profissional.	33
Figura 18-	Visão lateral do cenário com EPI	35
Figura 19-	Redução dos valores do Tally devido ao uso dos EPI. Observa-se que órgãos/tecidos não completamente protegidos pelo avental sofreram as menores reduções.	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Os limites de dose anual dos IOEs e do público	21
Tabela 2 -	Os valores de fator de ponderação segundo o tipo de radiação e faixa de energia	25
Tabela 3 -	Fator de ponderação do tecido	26
Tabela 4 -	Resultados do Tally e respectiva incerteza para os órgãos/tecidos para o cenário sem uso de EPI.	31
Tabela 5 -	Resultados do Tally e respectiva incerteza para os órgãos/tecidos para o cenário com uso de EPI.	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MCNP	Monte Carlo N-Particle
IOE	Individuo Ocupacionalmente Exposto
EPC	Equipamento de Proteção Coletiva
EPI	Equipamento de Proteção Individual
ICRP	International Commission on Radiological Protection

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo geral	14
2.2 Objetivos específicos	14
3 REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1 Física das radiações	15
3.1.1 Efeito fotoelétrico	15
3.1.2 Efeito Compton	16
3.2 Proteção radiológica	16
3.2.1 Efeitos biológicos	16
3.2.2 Princípios e os fatores de proteção radiológica	20
4 METODOLOGIA	26
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
5.1 Resultados do cenário de exposição sem uso de EPI	31
5.2 Resultados do cenário de exposição com uso de EPI	34
6 CONCLUSÃO	37
REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

Desde a descoberta de raio X em 1895 pelo físico alemão Wilhelm Konrad Röntgen, a radiação ionizante desempenha um importante papel na medicina. De fato, ela permite através da radiologia, a obtenção de informações diagnósticas de estruturas internas de forma minimamente invasiva (Thrall, 2014). Além dos exames de diagnósticos por imagem, as radiações ionizantes são também aplicadas em tratamentos (Gomes e Pinhal, 2016).

Como em medicina humana, a radiação é também importante em medicina veterinária. Através dos exames radiológicos, os profissionais dessa área acompanham a evolução, remissão e cura de várias patologias evitando o sacrifício do animal. Na radiologia veterinária, a atuação dos profissionais se assemelha muito com a radiologia pediátrica, pois os pacientes não são colaborativos e necessitam de acompanhamento. Nesse caso, são necessários dois acompanhantes para a contenção física ou a utilização da contenção química (anestesia) em diversas técnicas de posicionamento (Andrade, 2007). O que leva estes dois acompanhantes a correr o risco de ser expostos diretamente ao feixe primário de radiação, principalmente quando os pacientes são pequenos, como as aves. E para reduzir o risco da exposição ocupacional, é preciso seguir as normas de radioproteção tanto na medicina veterinária quanto na medicina humana.

Assim, com o objetivo de estudar a exposição à radiação ionizante pode ser usada a dosimetria computacional. A dosimetria computacional consiste na simulação de equipamentos e infraestruturas envolvendo a manipulação de feixes de partículas, de fontes de radiação e de materiais radioativos, e envolve também sistemas de medição de radiações ionizantes. Para realizar as simulações de cálculos dosimétricos, são usados métodos matemáticos, como o Método de Monte Carlo (MMC). Esse método se tornou muito importante na física médica nos últimos 50 anos. Existem muitas aplicações diferentes desta técnica, uma delas é o uso para simular o transporte de radiação, com especial ênfase no transporte envolvendo elétrons e fótons (Rogers, 2006).

Neste trabalho, serão realizadas simulações computacionais de procedimentos comuns de radiologia, utilizando o Método de Monte Carlo por meio do código MCNP para avaliar as doses de radiação que recebem os médicos veterinários durante um exame de raio-x com pequenos animais (Werner *et al.*, 2018). Com objetivo avaliar a exposição ocupacional em procedimentos odontológicos em radiologia veterinária.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Realizar simulações de Monte Carlo para avaliar as quantidades de radiação ionizante que os médicos veterinários podem absorver durante exames radiológicos em pequenos animais.

2.2 Objetivos específicos

- Utilizar o código de transporte de radiação MCNP6.2 para representar os cenários de exposição à radiação;
- Usar simuladores antropomórficos virtuais para simular os indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE) durante os procedimentos médicos;
- Avaliar a importância dos equipamentos de proteção radiológica.

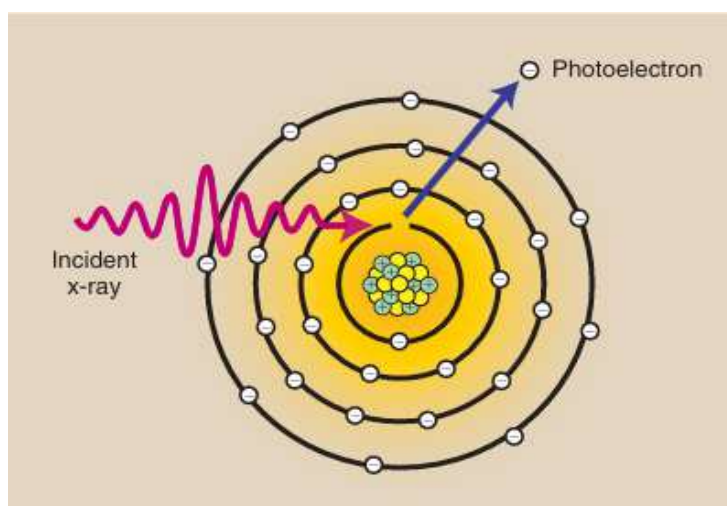
3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Física das radiações

3.1.1 Efeito fotoelétrico

O efeito fotoelétrico é uma interação que ocorre entre o fóton e o átomo: o fóton é absorvido pelo meio, sendo toda ou quase toda a sua energia depositada no meio (Okuno, 2013). Durante essa interação, o fóton interage com o elétron na camada mais interna do átomo. Para esse fenômeno acontecer, os fótons têm que ter uma energia maior que a energia mínima necessária para ejetar os elétrons de sua órbita em torno do núcleo (Bushong, 2017). A Figura 1 mostra como acontece o efeito fotoelétrico.

Figura-1: Representação do efeito fotoelétrico



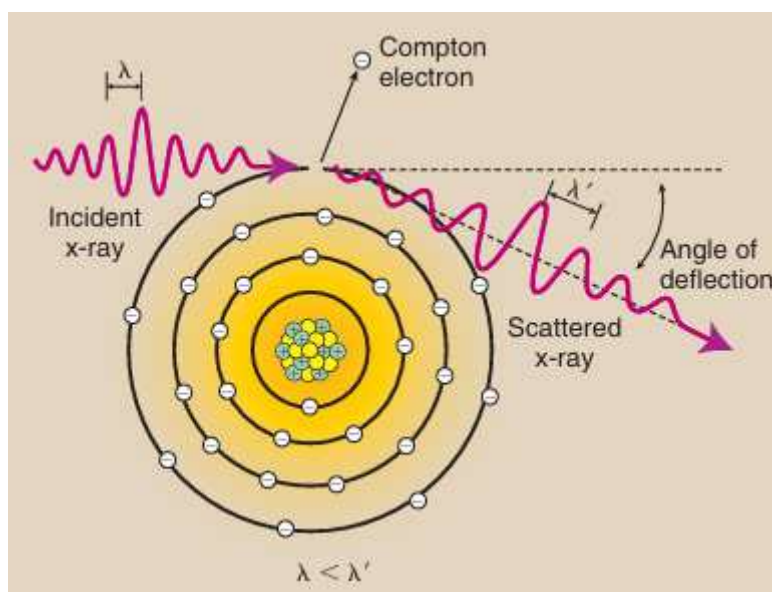
Fonte: Bushong (2017, p. 149)

O efeito fotoelétrico é muito importante para a radiologia, pois é o responsável pela formação da imagem, ou seja, os fótons que saem do tubo de raios X devem atravessar o corpo do paciente, que atenua o feixe nos diferentes tecidos, e formando uma imagem (Bushong, 2017). Contudo, esse efeito também é um dos responsáveis pelos danos das radiações no tecido biológico, pois pode provocar ionização dos átomos e moléculas que constituem o tecido biológico, inclusive o DNA.

3.1.2 Efeito Compton

O efeito Compton ocorre quando um fóton atinge um átomo e transfere parte de sua energia para um elétron (Figura 2). Este processo provoca a ejeção de elétron e o espalhamento do fóton com menor energia (Okuno, 2013). Este fenômeno está representado na Figura 2.

Figura-2: Representação do efeito Compton



Fonte: Bushong (2017, p. 148).

O efeito Compton não é um efeito desejado na Radiologia, pois o fóton que interage por esse efeito não desaparece. Ele perde um pouco da sua energia e é desviado, ou seja, ele vai impressionar o filme. Como a sua direção é aleatória ele apenas vai contribuir para degradar a radiografia por apenas acrescentar ruído e a imagem perde nitidez. Além disso, a radiação espalhada produz uma densidade óptica uniforme na imagem radiográfica o que reduz o contraste da imagem (Bushong. 2017). Ele é responsável pela maior parte da exposição da equipe médica, pois é o responsável pelo espalhamento da radiação.

3.2 Proteção radiológica

3.2.1 Efeitos biológicos

Apesar da radiação ionizante ser benéfica à medicina, ela possui alguns riscos, pois pode apresentar efeitos biológicos para um indivíduo exposto. Esses efeitos podem ser

classificados em duas categorias segundo a dose: reações teciduais ou determinísticos e efeitos estocásticos.

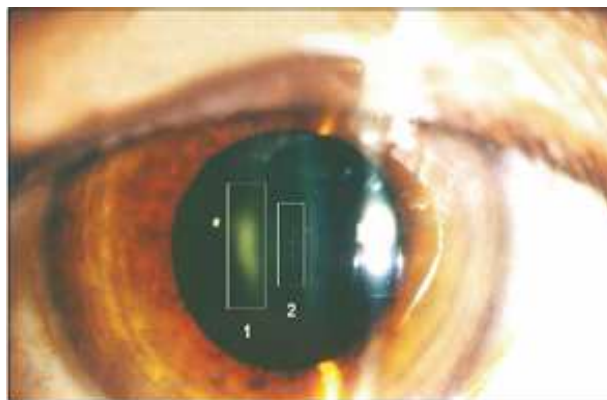
As reações teciduais são causadas devido aos níveis elevados de exposição à radiação, aparecem somente acima da dose limiar e a gravidade do efeito aumenta com a dose. O princípio, neste caso consiste na morte celular, logo se algumas células morrerem, o efeito pode passar despercebido, mas se for em número maior, isso prejudicaria o funcionamento do órgão/tecido. O que pode levar a queimadura que pode ser desde um leve avermelhamento até a formação de bolhas (Okuno, 2013). As Figuras 3 e 4 mostram algumas dessas reações.

Figura 3- Surgimento de lesão na pele em homem de 40 anos após 18-21 meses depois de múltiplas coronariografias.



Fonte: Leyton *et al.* (2014, p. 92)

Figura 4- Opacidade do cristalino de profissional da Radiologia Intervencionista provocada por equipamento não otimizado. Em (1) opacidade subcapsular posterior; e (2), opacidades puntiformes perinucleares



Fonte: Leyton *et al.* (2014, p. 93)

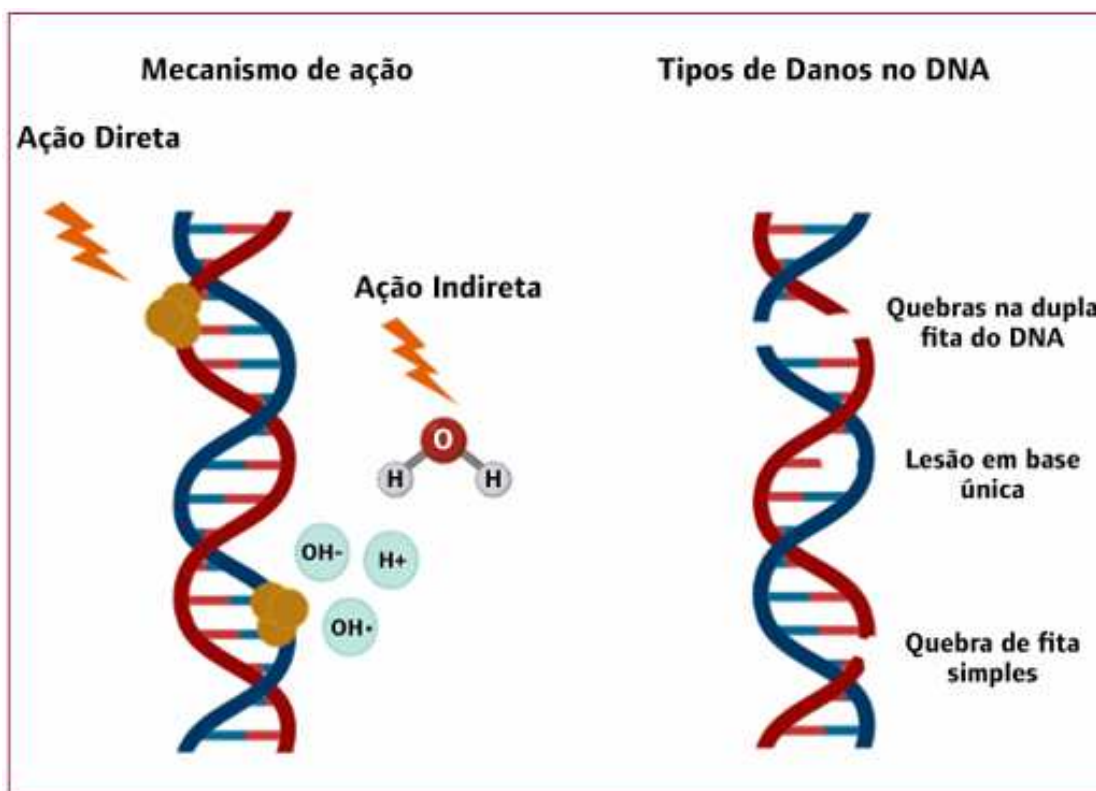
Por sua vez, os efeitos estocásticos ocorrem devido a mutação das células normais e para baixas doses de radiação. Eles não apresentam limiar de dose para sua ocorrência, mas sua probabilidade aumenta com a dose. A gravidade do efeito é independente da dose e pode resultar no câncer (Okuno, 2013).

De acordo com Oliveira *et al.* (2022):

Os danos provocados pela radiação ionizante podem ser diretos, quando há depósito da energia diretamente na molécula de DNA, e/ou indiretos, quando moléculas irradiadas produzem íons que atacam o DNA. O principal processo indireto de dano ao DNA pela radiação ionizante é causado pela radiólise, sendo a radiólise o mais eficiente dos ataques nucleofísicos ao DNA. Na radiólise, a energia depositada nas moléculas de água produz espécies reativas de oxigênio que interagem com o DNA causando lesões potencialmente mutagênicas. Os danos na molécula de DNA, induzidas pelas radiações ionizantes, podem ser lesões em um ou poucos nucleotídeos, quebras de fita simples do DNA ou de dupla fita do DNA (Oliveira *et al.*, 2022, p. 163).

Esses danos são representados na Figura 5.

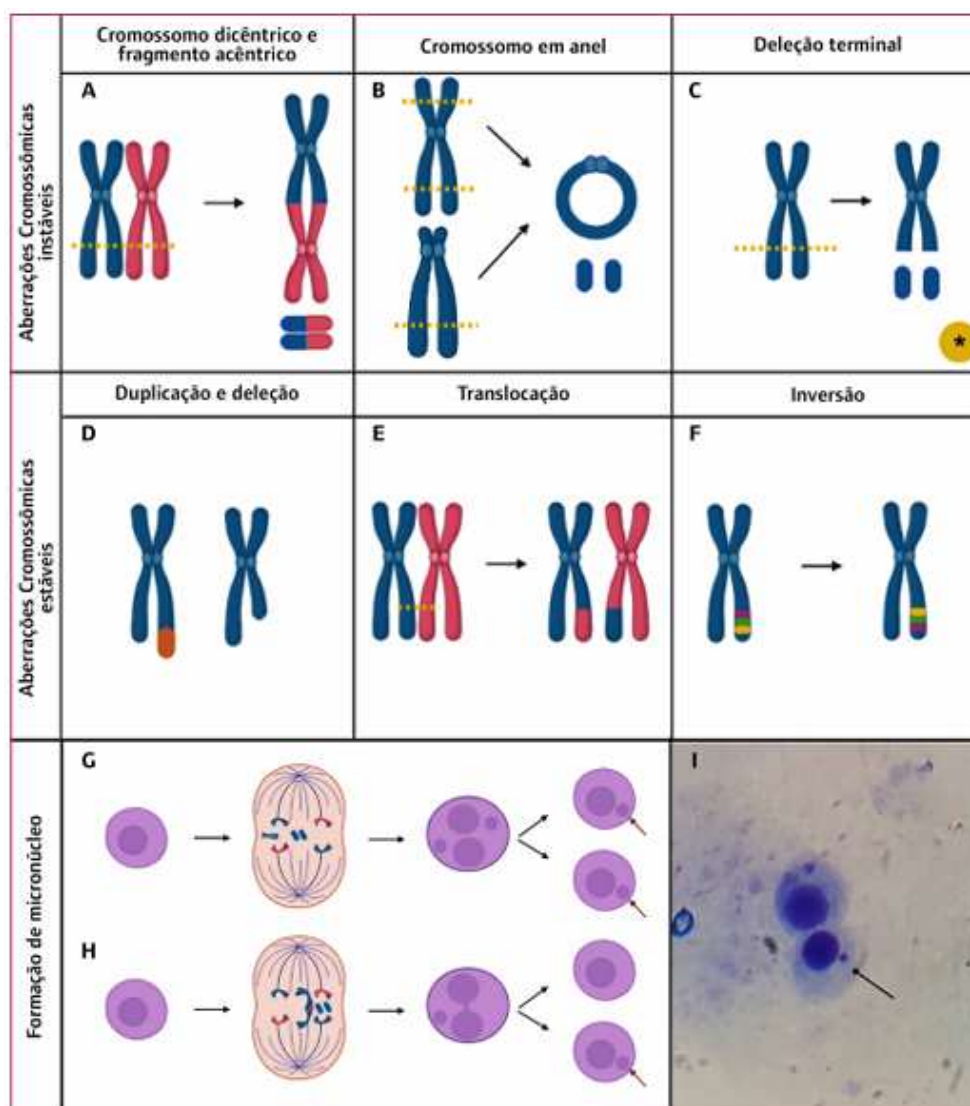
Figura 5- Diagrama dos danos causados pelos efeitos diretos e indiretos das radiações ionizantes no DNA.



Fonte: Oliveira *et al.* (2022, p. 164)

E se esses danos não forem “consertados” pelo organismo podem resultar em mutações perigosas como é explicado na Figura 6.

Figura 6- Representação esquemática dos tipos de aberrações cromossômicas instáveis e estáveis e da formação de micronúcleo.



Fonte: Oliveira *et al.* (2022, p. 166)

Temos outros tipos de classificação de efeitos, baseados no tipo de célula atingida. Assim, os efeitos hereditários são decorrentes dos danos às células reprodutoras e se manifestam nos descendentes do indivíduo irradiado. Enquanto os efeitos somáticos são decorrentes dos danos em qualquer célula no corpo, exceto as reprodutoras e se manifestam no próprio indivíduo irradiado (Okuno, 2013).

3.2.2 Princípios e os fatores de proteção radiológica

Assim, visando o estabelecimento de um padrão apropriado de proteção foram definidas medidas contra os possíveis efeitos que podem ser causados pela radiação ionizante,

sendo elas fundamentadas em três princípios básicos de proteção radiológica (Justificação, Otimização e Limitação) (CNEN, 2014).

O princípio da Justificação preconiza que devem ser avaliados os riscos e os benefícios, assim nenhuma prática envolvendo exposição à radiação pode ser adotada, a menos que ela produza benefício suficiente aos indivíduos expostos ou a sociedade, para compensar o detrimento causado (Soares, Pereira e Flôr, 2011). De acordo com o princípio da Limitação de dose, a exposição à radiação deve ultrapassar os limites de dose permitidas para o local. Por sua vez, o princípio da Otimização, preconiza que a dose deve ser a mais baixa o possível sem reduzir a qualidade diagnóstica da imagem. Este princípio também é conhecido como ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*), que é comumente traduzido para "tão baixo quanto razoavelmente exequível", isso vale tanto para o paciente quanto para os profissionais (Dorow, 2019). A Tabela 1, apresenta os limites de dose anual dos IOEs e do público.

Tabela 1- Os limites de dose anual dos IOEs e do público

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

Fonte: CNEN (2014, p. 13)

Os três fatores de proteção utilizados para ajudar na manutenção de doses de acordo com o princípio ALARA são demonstrados na Figura 7, sendo eles: tempo, distância e blindagem.

Figura 7 – Fatores da proteção radiológica



Fonte: Dorow (2019, p. 26)

O tempo: a dose recebida por irradiação externa de um IOE é diretamente proporcional ao tempo. Logo, quanto menor o tempo de irradiação, menor a dose recebida. A distância: a dose absorvida por uma pessoa depende inversamente do quadrado da distância à fonte de radiação e a pessoa, ou seja, se um indivíduo dobra sua distância em relação a fonte de radiação, sua exposição diminuiu em 4 vezes (Bellintani e Gili, 2002). Por sua vez, a blindagem é feita pelo uso de barreiras entre a pessoa e a fonte de radiação. Geralmente utiliza-se material com alto número atômico e densidade, como o chumbo, para realizar a blindagem de raio-x (Bellintani e Gili, 2002).

Na prática clínica, a blindagem é realizada por meio dos equipamentos de proteção individual (EPI) e coletiva (EPC). Entre esses EPIs, os principais são avental, protetor de tireoide, óculos plumbíferos e luvas plumbíferas. Avental de chumbo ou plumbífero (Figura 8) é uma espécie de manta de chumbo que cobre a região torácica e abdominal dos pacientes e profissionais. Os protetores de tireoide (Figura 9) são geralmente em forma de colar, vestidos no pescoço para proteger a glândula da tireoide. Os óculos plumbíferos (Figura 10) são feitos de vidro com alto percentual de chumbo em sua composição (EPI, 2024).

Figura 8: Avental de chumbo ou plumbífero



Fonte: EPI (2022, p. 1)

Figura 9: Protetor de tireoide



Fonte: EPI (2022, p. 1)

Figura 10: Óculo plumbífero



Fonte: EPI (2022, p. 1)

3.2.2 Grandezas de radioproteção

Na busca de fazer respeitar esses princípios de radioproteção foram definidas as grandezas dosimétricas para uso em proteção radiológica. As grandezas que são mais relevantes neste trabalho são: a dose absorvida, dose equivalente e dose efetiva.

A dose absorvida (D) é uma grandeza física que quantifica a energia cedida à matéria, pela radiação incidente em um volume, incluindo as partículas carregadas e não carregadas. Ela é calculada pela divisão da energia média cedida, dEc , pela unidade de massa, dm (ICRP, 2007).

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

a unidade de medida é o joule por quilograma (J/kg) ou Gray (Gy).

A dose equivalente (H_T) é uma grandeza de proteção que para determiná-la em um tecido irradiado por diversos tipos de radiação (R) é feita a soma do produto entre a dose absorvida média (D) no tecido (T) pelo fator de ponderação da radiação W_R (ICRP, 2007).

$$H_T = \sum_R D \cdot W_R \quad (2)$$

a unidade de medida desta grandeza é (J/kg) ou Sievert (Sv).

O fator de ponderação da radiação é um fator adimensional, é uma estimativa da eficácia por dose unitária da radiação fornecida em relação ao padrão de baixa LET

(Transferência Linear de Energia). Para radiação de fóton e elétron, o fator de ponderação da radiação tem o valor 1 independentemente da energia da radiação e para a radiação alfa o valor 20. Para a radiação de nêutrons, o valor depende da energia e atinge de 5 a 20 (ICRP, 2003). Esses valores estão representados na Tabela 2 (ICRP, 2003).

Tabela 2: Os valores de fator de ponderação segundo o tipo de radiação e faixa de energia

Tipo de radiação e faixa de energia	Fator de ponderação de radiação, W_R
Fótons, todas as energias	1
Elétrons e muons, todas as energias	1
Nêutrons, energia <10 keV	5
Nêutrons, energia 10-100 keV	10
Nêutrons, energia >100 keV-2MeV	20
Nêutrons, energia >2-20 MeV	10
Nêutrons, energia >20 MeV	5
Prótons, exceto prótons de recuo, energia > 2 MeV	5
Partículas alfa, fragmentos de fissão, núcleos pesados	20

Fonte: ICRP (2003, p. 11)

A dose efetiva, E , é uma grandeza de proteção que é a soma das doses equivalente (H_T) em cada órgão ou tecido, multiplicada pelo fator de ponderação do tecido, W_T (ICRP, 2007).

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

sendo a unidade de medida é J/kg ou Sv.

O fator de ponderação tecidual, denotado como W_T , representa a contribuição proporcional de um tecido ou órgão específico para o risco total à saúde resultante da exposição uniforme à radiação em todo o corpo. Este fator reflete a sensibilidade relativa dos diferentes tecidos e órgãos aos efeitos da radiação, fornecendo uma medida do risco de efeitos estocásticos associados à exposição a esse tecido em particular. Quando apenas uma parte do corpo é irradiada, apenas os tecidos correspondentes são considerados no cálculo da dose efetiva. É importante notar que a soma dos fatores de ponderação tecidual é sempre igual a 1,

garantindo que a dose efetiva para todo o corpo seja equivalente à dose equivalente para o corpo inteiro quando exposto uniformemente à radiação externa penetrante (ICRP, 2007). De acordo com a ICRP, os fatores de risco estão na Tabela 3.

Tabela 3: Fator de ponderação do tecido

Tecido	Fator de ponderação do tecido W_T	ΣW_T
Medula óssea (vermelho), cólon, pulmão, estômago, mama, demais tecidos	0,12	0,72
Gônadas	0,08	0,08
Bexiga, esôfago, fígado, tireoide	0,04	0,16
Superfície óssea, cérebro, glândulas salivares, pele	0,01	0,04
Total		1,00

Fonte: ICRP (2007, p. 64)

4 METODOLOGIA

4.1 MCNP6.2

Este estudo utilizou a ferramenta computacional MCNP6.2, que é um código computacional que simula o transporte de radiação pelo Método de Monte Carlo desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Los Alamos em 1972 (Werner *et al.*, 2018). Esta versão 6.2 do MCNP possui os mais recentes desenvolvimentos de recursos e correções de bugs para o MCNP (Werner *et al.*, 2018).

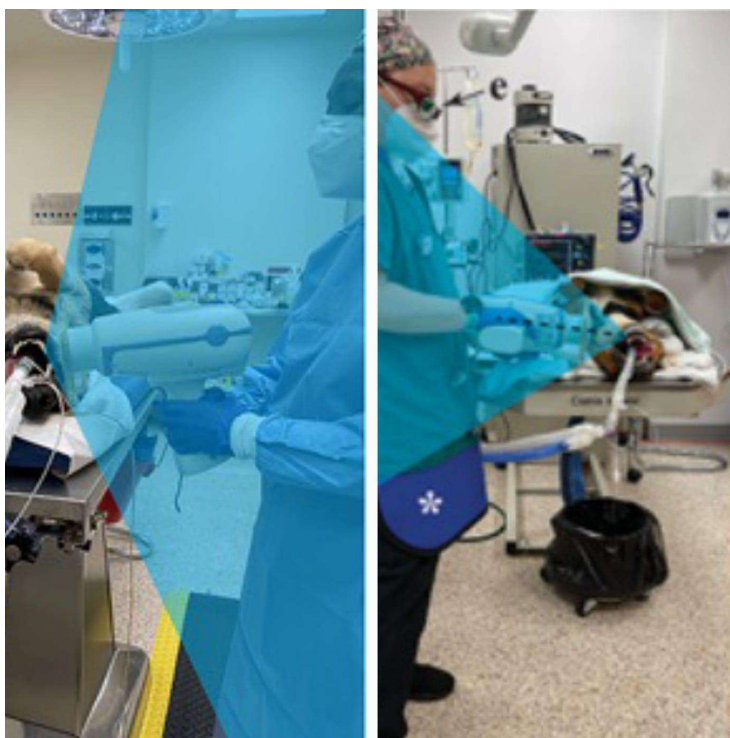
O arquivo da entrada do MCNP é composto de três blocos cujas linhas de código são chamadas de “cartões”. O primeiro bloco é dedicado para as definições dos volumes de geometria denominados células. Em um cartão desse bloco são especificados o identificador do material, sua densidade, unidade de medida da densidade e quais superfícies que delimitam a célula. No bloco de superfícies estão os cartões que definem as superfícies usadas para delimitar uma célula do primeiro bloco. O usuário pode definir o tipo de superfície e suas dimensões. Por fim, no bloco de dados são definidos todos os demais parâmetros importantes da simulação. Geralmente esse bloco é o mais complexo, pois engloba definições de fontes,

direções das partículas transportadas, espectros, composição química dos materiais, *tallies*, definição das tabelas de resultados, número de histórias rodadas etc (Werner *et al.*, 2018).

4.2 Cenário de exposição

Neste trabalho, foi criado um cenário típico de um exame de radiologia veterinária de um cachorro no qual o procedimento é realizado por um profissional (Figura 11) com base em parâmetros encontrados na literatura (Villamizar-Martinez e Losey, 2023). Foi simulada uma sala ($4 \times 4 \times 3 \text{ m}^3$) onde a profissional foi representada pelo objeto simulador virtual feminino FASH desenvolvido com as características físicas e as composições químicas das estruturas do corpo humano pelo Departamento de Dosimetria Computacional da Universidade Federal de Pernambuco (Cassola *et al.*, 2009, Kramer *et al.*, 2009). O paciente, neste caso, o cachorro foi representado por um cilindro preenchido de água posicionado na horizontal sobre a mesa de exames. Foi simulada uma mesa de exame veterinária de marca Canis Major com as características dadas (Midmark, 2017). Foram realizados dois cenários neste trabalho, no primeiro a médica fica sem Equipamento de Proteção Individual (EPI). No segundo cenário a médica usa os EPI: avental, protetor de tireoide e óculos plumbíferos.

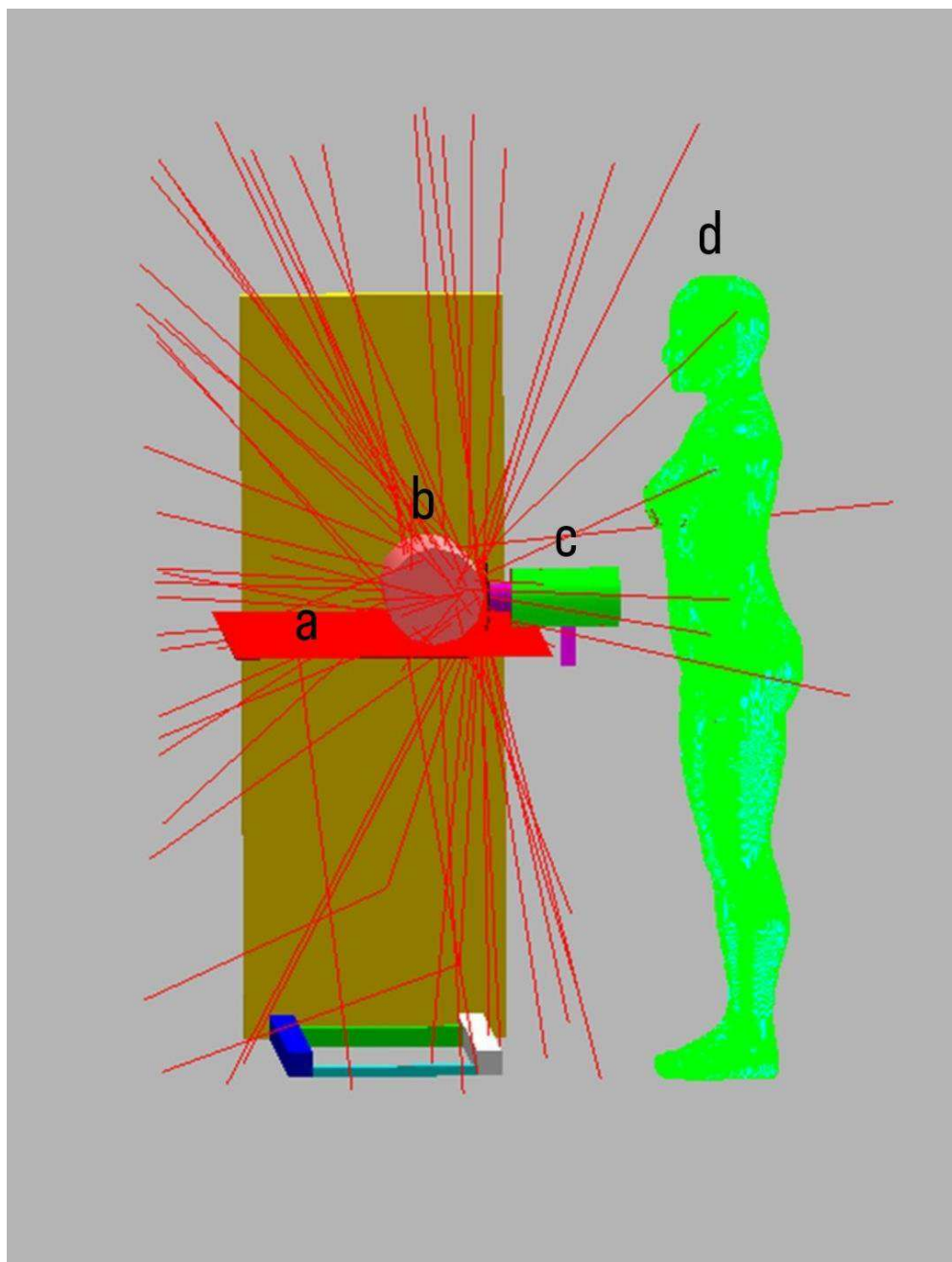
Figura 11: Fotografias que mostram o posicionamento da unidade de raios-X portátil para obter imagens odontológicas de um cão adulto.



Fonte: Villamizar-Martinez e Losey (2023, p. 111)

Na Figura 12 é apresentada uma visão detalhada do cenário de exposição em que a veterinária é representada com o simulador antropomórfico virtual sem EPI. A mesa de exame veterinária (a), o paciente, neste caso, o cachorro (b) o raio X portátil (c) e a médica (d).

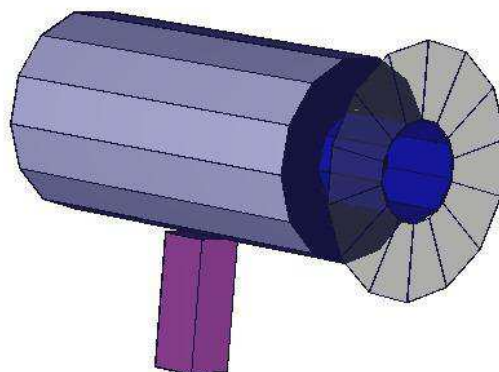
Figura 12: Visão lateral do cenário simulado mostrando o profissional sem EPI, o equipamento de raio X e o animal. A mesa de exame veterinária (a), o paciente (b) o raio X portátil (c) e a médica (d).



Fonte: Autor

O equipamento de raio X simulado (Figura 13) utilizado é um raio X portátil de marca NOMAD Pro caracterizado por uma tensão de 60 kVp e uma corrente de 2,5 mA. O tamanho de campo de raios X é de 6 cm de diâmetro de configuração circular. O raio X tem uma largura de 15 cm, comprimento de 27cm e uma altura de 25cm com alvo de tungstênio e filtração de 1,5 mmAl (Aribex, 2009).

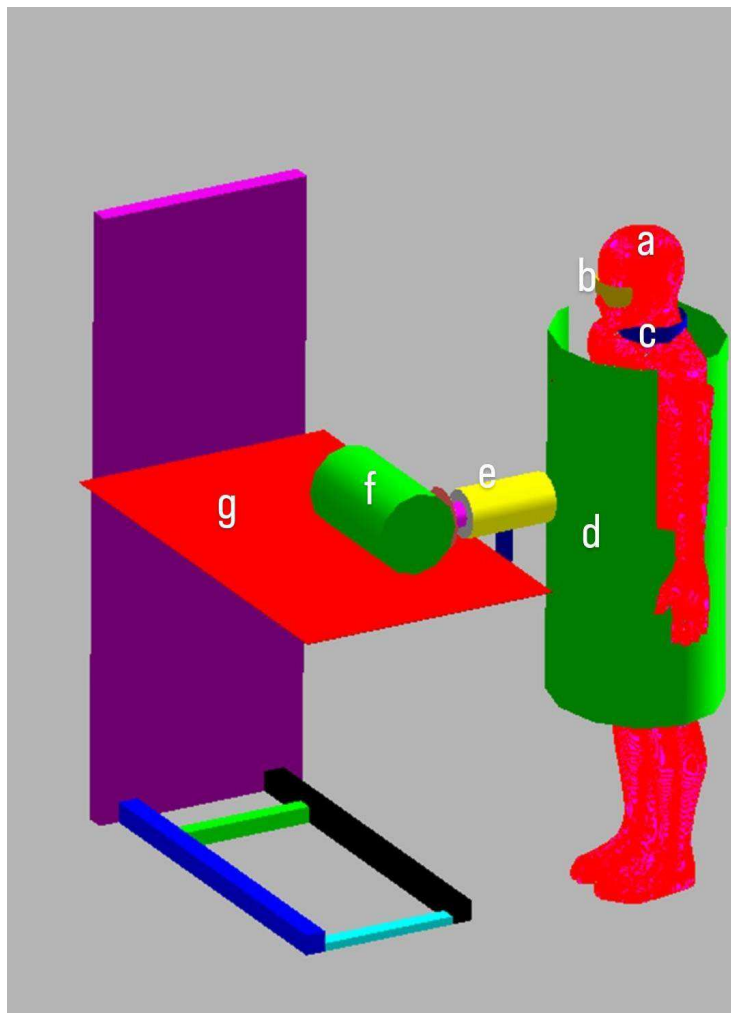
Figura 13: Imagem mostrando com detalhe o equipamento de raio-X



Fonte: Autor

Na Figura 14 é apresentada uma visão detalhada do cenário de exposição em que a médica é representada com o simulador antropomórfico virtual com EPI possuindo equivalência de 0,5 mmPb. A médica (a) utiliza óculos plumbífero (b), protetor de tireoide (c) e avental de chumbo (d). O raio X portátil (e) posicionado na região da boca do animal (f) deitado na mesa de exame (g).

Figura 14: Visão lateral do cenário simulado mostrando a profissional(a) com óculos plumbífero (b), protetor de tireoide (c), avental plumbífero (d); utilizando o equipamento de raio X(e) para realizar exame no animal (f) posicionado sobre a mesa (g).



Fonte: Autor

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As simulações foram feitas pelo Método Monte Carlo com código MCNP6.2, empregando 10^9 histórias, os resultados do cenário de exposição sem o uso de EPI são apresentados na Tabela 4, enquanto os resultados do cenário com uso de EPI são apresentados na Tabela 5. Os valores apresentados são do tally F6, que é o comando do MCNP6.2 que computa a quantidade de energia (em MeV) depositada em uma unidade de massa (em g) por partícula.

5.1 Resultados do cenário de exposição sem uso de EPI

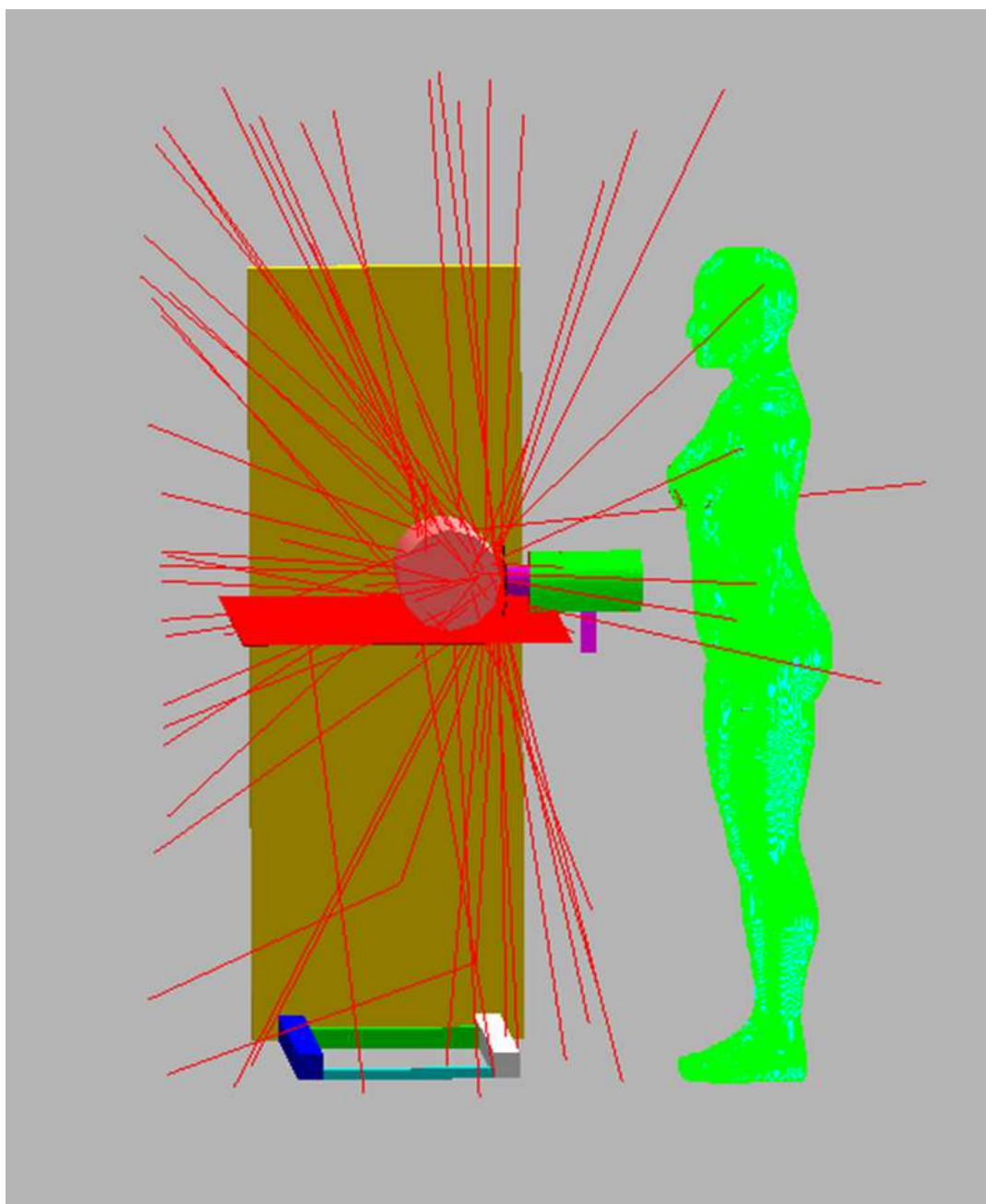
Analisando a Tabela 4, a maior energia depositada no profissional foi na pele, depois na superfície óssea e nos pulmões o que pode ser explicado pelo fato que essas partes estão perto do equipamento de raio X e do paciente. O cristalino, as gônadas e a bexiga são os órgãos/tecidos onde foram depositados menor energia. Com exceção do cristalino, esse valor baixo pode ser explicado devido a proteção que confere a mesa para a parte inferior do corpo da médica, absorvendo uma parte da radiação como ilustra a Figura 15. Assim, a dose de tecidos/órgãos da perna e parte da região pélvica são protegidos, mesmo sem o uso de EPI. Além disso, o próprio equipamento de raio-x dotado de protetor plumbífero impede que parte da radiação de retro espalhar para a profissional como mostra a Figura 16. A Figura 17 mostra que entre o animal e o protetor tem vários traços de partículas, mas entre o protetor e a pessoa não tem muitos traços de partículas.

Tabela 4 – Resultados do Tally e respectiva incerteza para os órgãos/tecidos para o cenário sem uso de EPI.

Órgão/tecido	Tally (MeV/g/source-particle)	Incerteza
Medula óssea	9.74677E-05	0.0020
Cólon	1.06671E-05	0.0080
Pulmões	1.50891E-04	0.0049
Estômago	6.37334E-06	0.0102
Glândulas mamárias	5.80178E-05	0.0038
Demais órgãos e tecidos	6.35222E-05	0.0014
Gônadas	1.81143E-07	0.0524
Bexiga	6.66261E-07	0.0327
Esôfago	8.07071E-07	0.0229
Fígado	7.14787E-05	0.0057
Tireoide	2.87591E-06	0.0138
Superfície óssea	1.31121E-04	0.0019
Cérebro	1.73795E-05	0.0115
Glândulas salivares	3.20441E-06	0.0084
Pele	2.46386E-04	0.0010
Cristalino	1.06194E-07	0.0326

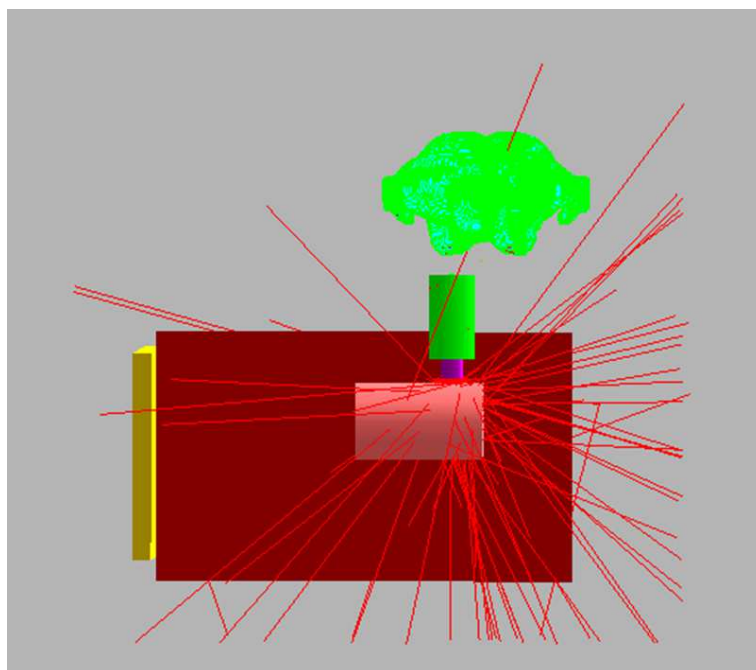
Fonte: Autor

Figura 15: Visão lateral do cenário sem EPI mostrando que a mesa absorve parte dos raios x que poderiam atingir a região inferior do corpo.



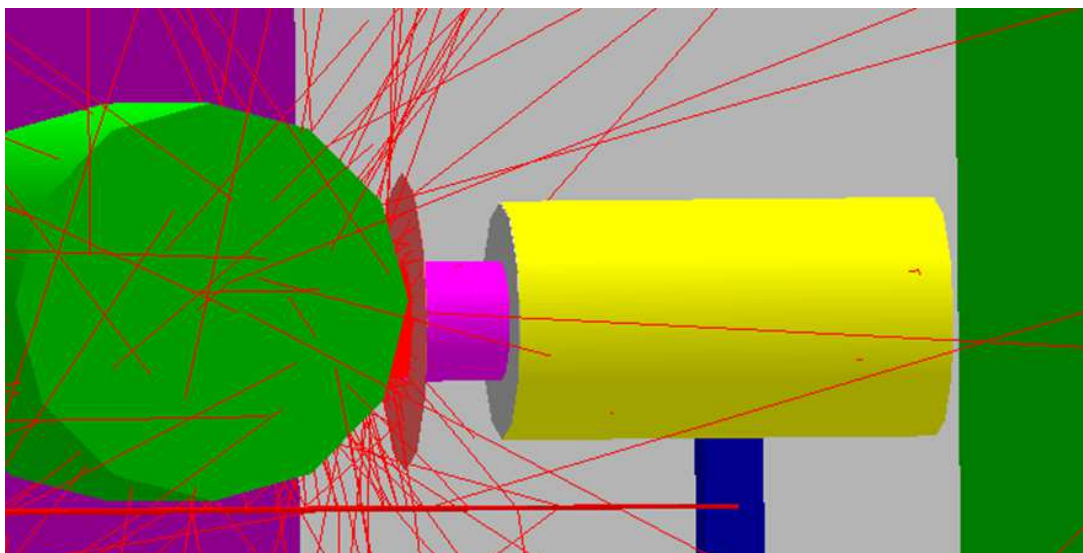
Fonte: Auto

Figura 16: Vista superior, mostrando que o escudo de proteção contra radiação espalhada do equipamento de raios X protege a profissional.



Fonte: Autor

Figura 17: Imagem mostrando que o protetor plumbífero dos raios x bloqueia parte da radiação que seria retro espalhada para a profissional.



Fonte: Autor

5.2 Resultados do cenário de exposição com uso de EPI

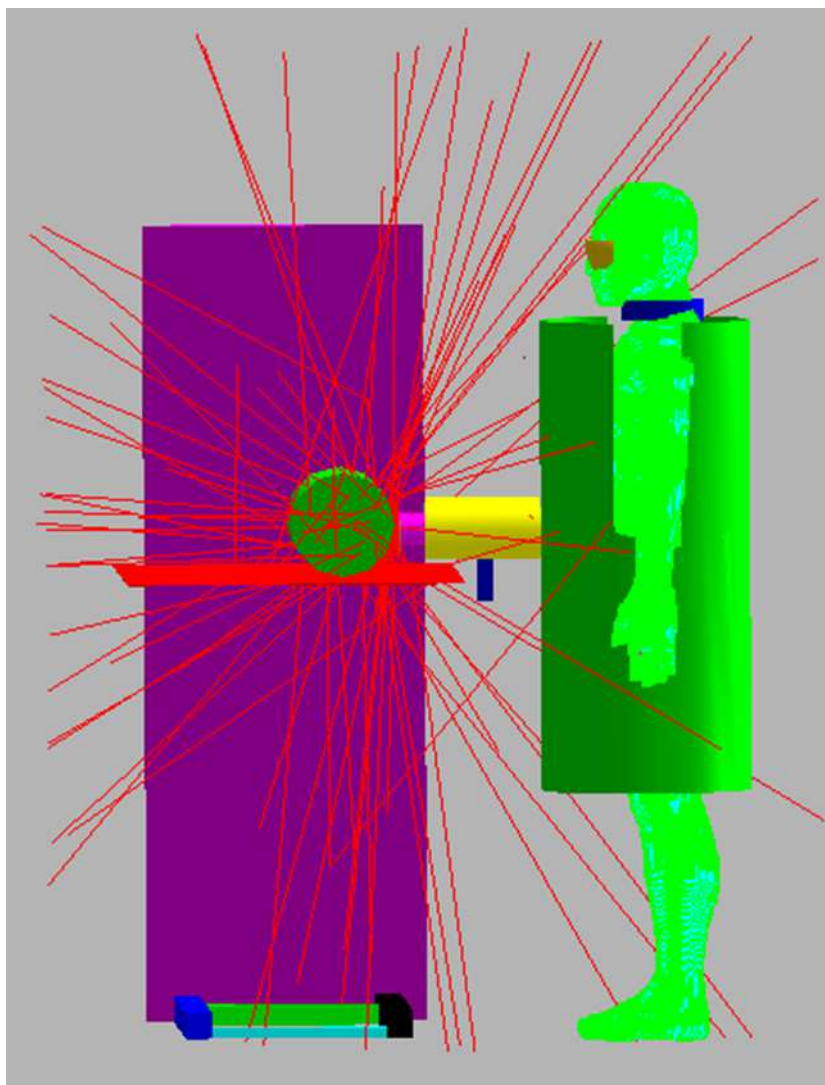
A Tabela 5 apresenta os dados do cenário com uso de EPI. Observa-se que as maiores energias foram depositadas na pele, na superfície óssea e na medula óssea. Esses tecidos receberam as maiores energias devido à proximidade ao paciente e ao equipamento de raio X. Além disso, como observado na Figura 18, a maior parte desses tecidos não estão protegidos pelos EPI. As gônadas, a bexiga e a tireoide são órgãos/tecidos que receberam menos energia neste cenário devido a proteção conferida pelo avental plumbífero e o protetor de tireoide.

Tabela 5 – Resultados do Tally e respectiva incerteza para os órgãos/tecidos para o cenário com uso de EPI.

Órgão/tecido	Tally (MeV/g/spurce-particle)	Incerteza
Medula óssea	2.99544E-05	0.0037
Cólon	4.44025E-08	0.1240
Pulmões	1.60226E-06	0.0484
Estômago	1.64246E-08	0.1938
Glândulas mamárias	1.43574E-07	0.0802
Demais órgãos e tecidos	2.64613E-06	0.0051
Gônadas	3.82983E-10	0.9422
Bexiga	5.96308E-09	0.3153
Esôfago	1.17958E-08	0.1997
Fígado	1.18927E-07	0.1370
Tireoide	7.88809E-09	0.2815
Superfície óssea	3.48611E-05	0.0037
Cérebro	9.37193E-06	0.0156
Glândulas salivares	4.06655E-08	0.0700
Pele	4.02562E-05	0.0025
Cristalino	4.08670E-08	0.0515

Fonte: Autor

Figura 18: Visão lateral do cenário com EPI



Fonte: Autor

Fazendo uma análise comparativa entre os valores das Tabela 4 e 5, percebemos que os valores na Tabela 4 são superiores aos valores da Tabela 5. Então, como já esperado, o uso de EPI por um indivíduo reduz a exposição à radiação. Assim, a Equação (6) foi utilizada para calcular a redução percentual do Tally em cada órgão/tecido estudado.

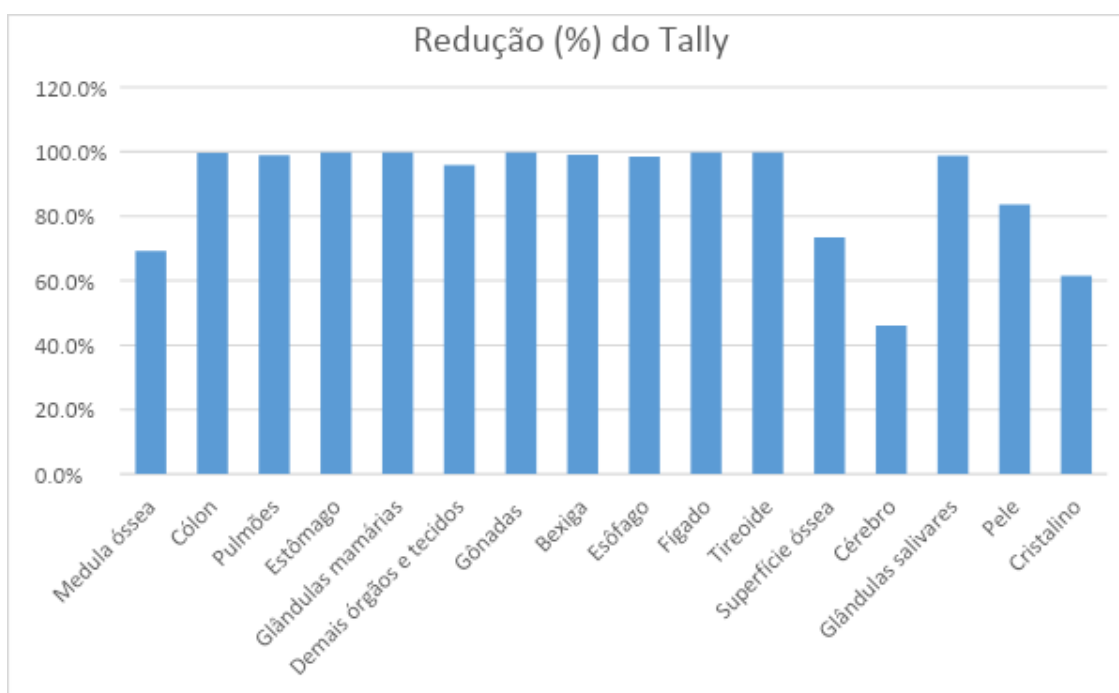
$$\text{redução} = \left| \frac{TS - TEPI}{TS} \right| * 100 \quad (6)$$

onde TS é o valor do Tally para o cenário sem EPI, e $TEPI$ é o valor do Tally para o cenário com EPI.

Os resultados apresentados na Figura 19 mostram a diferença percentual para os cenários de utilização de EPI e não utilização de EPI e analisando esse gráfico, percebe-se que

todos os órgãos/tecidos tiveram uma diminuição de energia depositada de pelo menos 45%. A utilização de EPI diminui a deposição de energia no IOE, de até 99.8% para as glândulas mamárias, gônadas e o fígado. Houve também uma diminuição considerável nas energias depositadas na tireoide e no estômago de 99.7%. Esses órgãos/tecidos com maiores reduções foram totalmente protegidos pelo EPI. Enquanto a pele, a superfície óssea, medula óssea, o cristalino e o cérebro que são parcialmente protegidos, tiveram as menores reduções respectivamente 83.7%, 73.4%, 69.3%, 61.5% e 46.1%. A menor energia foi a do cérebro, pois não tem EPI na simulação, mas ainda teve proteção indireta dos EPI.

Figura 19 – Redução dos valores do Tally devido ao uso dos EPI. Observa-se que órgãos/tecidos não completamente protegidos pelo avental sofreram as menores reduções.



Fonte: Autor

6 CONCLUSÃO

Neste estudo, foram conduzidas simulações computacionais de práticas rotineiras de radiologia veterinária, empregando o Método de Monte Carlo através do código MCNP. O objetivo foi avaliar a quantidade de radiação que médicos veterinários recebem durante exames de raio-x em pequenos animais, com foco na análise da exposição ocupacional em procedimentos odontológicos em radiologia veterinária. Foram simulados dois cenários diferentes, o primeiro com a médica sem EPI e o segundo ela está com EPI (Avental plumbífero, protetor tireoide e óculo plumbífero).

Assim, foi constatado uma diminuição percentual da exposição do IOE na maioria dos órgãos/tecidos analisados no estudo, indo até 99.8 % nos órgãos/tecidos completamente protegidos pelo EPI. Com os órgãos/tecidos parcialmente protegidos, observamos considerável diminuição também indo até 83.7%. Para as outras partes do corpo que não foram protegidos pelo EPI, como o cérebro por exemplo, que teve uma redução de 46.1% pois beneficiou de uma proteção indireta do EPI. Então, com este trabalho, foi provado que o uso de EPI por um indivíduo reduz consideravelmente a exposição à radiação na proteção radiológica. Apesar de que uso de EPI seja eficaz, os IOEs devem fazer uso também de EPC para uma melhor proteção radiológica.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, S. A. F. Atuação do tecnólogo em radiologia na área da medicina veterinária. **Unilus Ensino e Pesquisa**, Santos/SP-Brasil, v. 4, n. 7, p. 23-28, 7 jul. 2007. Disponível em: <http://revista.unilus.edu.br/index.php/ruep/article/view/37/u2007v4n7e37>. Acesso em: 14 mar. 2024.
- ARIBEX. **NOMAD Pro VETERINARY Handheld X-ray System**. Orem: Aribex, 2009. Disponível em: <https://www.celticsmr.co.uk/media/1490/nomad-pro-vet-brochure.pdf>. Acesso em: 02 abr. 2024.
- BELLINTANI, S. A.; GILI, F. N. (org.). **Noções Básicas de Proteção Radiológica**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2002. 57 p. Disponível em: <https://portalidea.com.br/cursos/0c7c17b22e04aaf7d55ac81e5ae666bd.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2024.
- BUSHONG, S. C. **Radiologic Science for Technologists**. 11. ed. Missouri: Elsevier, 2017.
- CASSOLA, V. F.; LIMA, V. J. M.; KRAMER, R.; KHOURY, H. J. FASH and MASH: female and male adult human phantoms based on polygon mesh surfaces. **Physics in Medicine and Biology**, [S.L.], v. 55, n. 1, p. 133-162, 10 dez. 2009. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9155/55/1/009>. Acesso em: 01 abr. 2024.
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **NN 3.01: Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica**. Brasil: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2014. 22 p. Disponível em: <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm301.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2024.
- DOROW, P. F. C. M. (org.). **Proteção Radiológica no Diagnóstico e Terapia**. Florianópolis – SC: IFSC, 2019. Disponível em: <https://www.ifsc.edu.br/documents/30701/523474/PROTE%C3%87%C3%83O%20RADIOL%C3%93GICA%20ebook%20final.pdf/10be750c-0d7c-484f-8baf-c33053f203cd>. Acesso em: 14 fev. 2024.
- EPI RADIOLOGIA: **Conheça os Principais Equipamentos de Proteção Radiológica**. Belo Horizonte: Proteg, 2024. Disponível em: <https://proteg.net.br/epi-radiologia-conheca-os-principais-equipamentos-de-protecao-radiologica/>. Acesso em: 02 abr. 2024.
- GOMES, N. A.; PINHAL JÚNIOR, P. A proteção radiológica dos trabalhadores expostos à radiação ionizante. **Unilus Ensino e Pesquisa**, São Paulo, v. 16, n. 30, p. 1-244, out. 2016. Disponível em: <http://revista.lusiada.br/index.php/ruep/article/view/627/u2016v13n30e627>. Acesso em: 14 mar. 2024.
- ICRP, 2003. **Relative Biological Effectiveness (RBE), Quality Factor (Q), and Radiation Weighting Factor (wR)**. ICRP Publication 92. Disponível em: <https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2092>. Acesso em: 28 fev. 2024.
- ICRP, 2007. **The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**. ICRP Publication 103. Disponível em:

<https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20103>. Acesso em: 04 mar. 2024.

KRAMER, R.; CASSOLA, V. F.; KHOURY, H. J.; VIEIRA, J. W.; LIMA, V. J. M.; BROWN, K. R. FASH and MASH: female and male adult human phantoms based on polygon mesh surfaces. **Physics in Medicine and Biology**, [S.L.], v. 55, n. 1, p. 163-189, 10 dez. 2009. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9155/55/1/010>. Acesso em: 01 abr. 2024.

LEYTON, F.; FERREIRA, E.; BASSO, J.; RIBEIRO, C.; BRUNO, C.; LIMA, F.; RODRIGUES, C. Riscos da radiação X e a importância da proteção radiológica na cardiologia intervencionista: uma revisão sistemática. **Revista Brasileira de Cardiologia Invasiva**, v. 22, p. 87-98, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0104-1843000000015>. Acesso em: 23 fev. 2024.

MIDMARK. **Canis Major Veterinary Tables**. Versailles: Midmark Corporation, 2017. Disponível em: <https://technicallibrary.midmark.com/PDF/003-1729-00.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2024.

OKUNO, E. Efeitos biológicos das radiações ionizantes: acidente radiológico de Goiânia. **Estudos Avançados**, [S.L.], v. 27, n. 77, p. 185-200, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-40142013000100014>. Acesso em: 22 fev. 2024.

OLIVEIRA, L. G.; OLIVEIRA, R. G.; SILVA, L. F. L.; VIANA, M. P.; ANTUNES, R. M. L.; CHAVES, M. L. C.; OLIVEIRA, T. M. Como a genética contribuiu para compreender os efeitos biológicos da exposição humana à radiação ionizante de Césio-137? **Genética na Escola**, v. 17, n. 2, p. 158-167, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.55838/1980-3540.ge.2022.437>. Acesso em: 23 fev. 2024.

ROGERS, D. W. O. Fifty years of Monte Carlo simulations for medical physics. **Physics in Medicine and Biology**, [S.L.], v. 51, n. 13, p. 287-301, 20 jun. 2006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/51/13/r17>. Acesso em: 15 mar. 2024.

SOARES, F. A. P.; PEREIRA, A. G.; FLÔR, R. C. Utilização de vestimentas de proteção radiológica para redução de dose absorvida: uma revisão integrativa da literatura. **Radiologia Brasileira**, v. 44, p. 97-103, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-39842011000200009>. Acesso em: 12 fev. 2024.

THRALL, D. **Diagnóstico de radiologia veterinária**. Brasil: Elsevier, 2014. 864 p.

VILLAMIZAR-MARTINEZ, L. A.; LOSEY, J. Assessment of the Occupational Radiation Dose from a Handheld Portable X-ray Unit During Full-mouth Intraoral Dental Radiographs in the Dog and the Cat – A Pilot Study. **Journal of Veterinary Dentistry**, USA, v. 41, n. 2, p. 106-113, 23 maio 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1177/08987564231175596>. Acesso em: 28 mar. 2024.

WERNER, C. J.; BULL, J. S.; SOLOMON, C. J.; BROWN, F. B.; MCKINNEY, G. W.; RISING, M. E.; DIXON, D. A.; MARTZ, R. L.; HUGHES, H. G.; COX, L. J.; ZHUKOV, I. G.; FENSIN, M. L.; ARMENDARIZ, M.; SWIFT, C. M.; FRANKE, B. C.; WEMPLE, C. A. **MCNP Version 6.2 Release Notes**. Los Alamos National Laboratory, [S.L.], p. 1-27, 5 fev. 2018. Office of Scientific and Technical Information (OSTI). Disponível em: <https://www.osti.gov/biblio/1419730>. Acesso em: 15 mar. 2024.