

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

INSTITUTO DE FÍSICA

FÍSICA MÉDICA

GIOVANA APARECIDA DE CAMARGO

**AVALIAÇÃO DAS DOSES E RISCOS DECORRENTES DA AUSÊNCIA
DE RADIOPROTEÇÃO NA MEDICINA VETERINÁRIA**

Uberlândia

2024

GIOVANA APARECIDA DE CAMARGO

**AVALIAÇÃO DAS DOSES E RISCOS DECORRENTES DA AUSÊNCIA
DE RADIOPROTEÇÃO NA MEDICINA VETERINÁRIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Física da Universidade Federal
de Uberlândia como requisito parcial para a ob-
tenção do título de Bacharel em Física Médica.

Orientador: Prof. Dr. Lucio Pereira Neves

Uberlândia

2024

GIOVANA APARECIDA DE CAMARGO

**AVALIAÇÃO DAS DOSES E RISCOS DECORRENTES DA AUSÊNCIA
DE RADIOPROTEÇÃO NA MEDICINA VETERINÁRIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Física da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Física Médica.

Orientador: Prof. Dr. Lucio Pereira Neves

Banca Examinadora

Prof. Dr. Lucio Pereira Neves (orientador)
Universidade Federal de Uberlândia – Uberlândia, MG

Prof. Dr. João Carlos de Oliveira Guerra
Universidade Federal de Uberlândia – Uberlândia, MG

Ma. Tainara Gabrieli Zandoná
PPGEB, Universidade Federal de Uberlândia – Uberlândia, MG

Uberlândia

2024

AGRADECIMENTOS

Testemunho com esse trabalho que até aqui me ajudou o Senhor, e não só me sustentou e me direcionou até esse presente momento, como fez minha vida repleta das mais doces lições e bênçãos. A finalização dessa faculdade, é a prova de mais um dos atos de amor dEle por mim.

Agradeço aos meus preciosos pais, Diva e Osni, que sempre se esforçaram para que eu conquistasse todos os meus sonhos. E me cercaram de incentivo e cuidado nesses anos.

Ao meu amado parceiro de vida, meu noivo Cláudio, uma das maiores dádivas da minha vida. Que esteve diariamente comigo nessa caminhada, me fazendo extremamente amada e feliz.

Aos meus irmãos, Raissa e Jardel, que são bênçãos na minha vida, sempre me rodeando de amor e cuidado. Assim como minha sobrinha, minhas cunhadas, meu cunhado e meus sogros, que mesmo a quilômetros de distância sempre me enchiam de amor e suporte.

Ao meu amigo Gabriel, que sempre se fez presente, e se tornou família para mim. Às minhas amigas de curso, Ingrid e Alessa, tornando tudo leve e divertido até nos momentos mais difíceis.

Ao Wallifer, parceiro de estágio e risadas, por ser um amigo tão especial nessa fase.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Lucio Pereira Neves, por me permitir tantas oportunidades, por tanto conhecimento compartilhado e pela confiança depositada em mim.

Ao Me. Lucas Wilian Gonçalves de Souza por compartilhar seus conhecimentos e me ajudar no processo da simulação desse trabalho.

E a tantos outros professores e físicos médicos que compartilharam sábios conhecimentos para que fosse possível encerrar mais um capítulo da minha educação. Utilizando as palavras de Isaac Newton, se enxerguei mais longe foi porque me apoiei no ombro de gigantes.

Este trabalho contou com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) para os projetos de pesquisa 314520/2020-1 (L.P.N), 312124/2021-0 (A.P.P) e 309675/2021-9 (W.S.S); Projeto UNIVERSAL (407493/2021-2); Projeto MAI/DAI (403556/2020-1). Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelos projetos de pesquisa APQ-04215-22, APQ-01254-23 e APQ-04348-23.

Estes trabalhos fazem parte do Instituto Brasileiro de Ciência e Tecnologia para Instrumentação Nuclear e Aplicações na Indústria e Saúde (INCT/INAIS), projeto CNPq 406303/2022-3.

*“E tudo o que vocês fizerem ou disserem, façam em nome do
Senhor Jesus e por meio dele agradeçam a Deus, o Pai.”*

Bíblia, Colossenses 3:17, NTLH

RESUMO

O radiodiagnóstico em medicina veterinária é amplamente difundido, visto que potencializa melhores diagnósticos e tratamento, pela capacidade de visualização das estruturas anatômicas de maneira não invasiva nos animais (domésticos, silvestres ou de produção). O que na teoria parece um cenário ideal, a realidade revela desafios que necessitam ser superados. Visto que, geralmente, os animais mostram-se inquietos e/ou agressivos durante o procedimento, necessitando de imobilização, e esse papel fica a cargo dos profissionais veterinários. Na literatura encontram-se registros das mãos desses trabalhadores nas radiografias, assim ao serem expostos ao feixe primário da radiação e por não utilizarem equipamentos de radioproteção (por falta de conhecimento ou negligência) intensificam a possibilidade de efeitos deletérios à saúde. Sob essa perspectiva, o objetivo da pesquisa foi determinar as doses recebidas pelos trabalhadores que indispensavelmente permanecem na sala de exame de raio-x, investigando doses com e sem radioproteção. A análise foi feita por dosimetria no Hospital Veterinário da Universidade Federal de Uberlândia e por simulação pelo Método Monte Carlo. Os resultados mostram que a partir do uso de luvas plumbíferas, a radiação espalhada passou de 670,1 nGy para 362,5 nGy, para as extremidades passou de 208,8 μ Gy para 0,5 μ Gy (diminuição de 99,75%) em um raio-x convencional para animal de porte pequeno (50 kV, 200 mA, 63 ms e disparo único) e mostrou-se aumento de energia recebida em casos com maiores tensões. Portanto, provou-se a necessidade de implementação de uma cultura de proteção radiológica bem estabelecida para os profissionais que se expõem a radiação diariamente.

Palavras-chave: proteção radiológica; radiodiagnóstico; medicina veterinária; equipamentos de radioproteção.

ABSTRACT

Radiodiagnosis in veterinary medicine is widespread, as it provides better diagnosis and treatment, due to its ability to visualize anatomical structures in a non-invasive way in animals (domestic, wild or production). What in theory seems like an ideal scenario, in reality reveals challenges that need to be overcome. In general, animals become restless and/or aggressive during the procedure, requiring immobilization, and this role is left to veterinary professionals. In the literature, there are records of the hands of these workers on the radiographs, so by being exposed to the primary radiation beam and not using radioprotection equipment (due to lack of knowledge or negligence), they intensify the possibility of harmful effects on their health. From this perspective, the aim of this study was to determine the doses received by workers who are indispensable in the X-ray examination room, investigating doses with and without radioprotection. The analysis was carried out by dosimetry at the Hospital Veterinário da Universidade Federal de Uberlândia and by simulation using the Monte Carlo Simulation. The results show that, with the use of lead gloves, the scattered radiation went from 670.1 nGy to 362.5 nGy, for the extremities it went from 208.8 μ Gy to 0.5 μ Gy (99.75% reduction) in a conventional small animal X-ray (50 kV, 200 mA, 63 ms and single shot) and there was an increase in the energy received in cases with higher voltage. This proved the need to implement a well-established radiation protection culture for professionals exposed to radiation everyday.

Keywords: radiological protection; radiodiagnosis; veterinary medicine; radioprotection equipment.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1:	Esquema simplificado do tubo de raios X. Fonte: (Silva, 2016, p. 108)	14
Figura 2:	Exposição das mãos de profissionais ao imobilizarem animais em procedimentos de raio-x. Fonte: (Sousa <i>et al</i> , 2021, p. 3)	16
Figura 3:	Luvas plumbífera e sua utilização para a contenção de um animal de porte pequeno. Fonte: (Bellon, 2021, p. 40)	17
Figura 4:	Fotografia da sala de exames de raio-x no HV-UFU, ao lado direito uma imagem mais ampliada do equipamento utilizado. Fonte: A autora (2024)	27
Figura 5:	Ao lado esquerdo a imagem da câmara de ionização (Radcal 10X6-180) e do lado direito o sistema Accu-Gold+. Fonte: (Radcal, 2019; Radcal, 2024b)	27
Figura 6:	Montagem dos cinco casos analisados para a dosimetria no HV-UFU. Fonte: A autora (2024)	28
Figura 7:	Representação geométrica da simulação com o equipamento de raio-x do setor de medicina veterinário. Fonte: A autora (2024)	30
Figura 8:	Representação probabilística do comportamento da radiação durante o exame. Fonte: A autora (2024)	35
Figura 9:	Gráfico dos espectros de intensidade relativa por energia nas tensões de 50 kV, 55 kV, 60 kV, 65 kV e 70 kV identificado respectivamente pelas cores azul, verde, amarelo, laranja e vermelho. Fonte: A autora (2024)	36
Figura 10:	Análise de dose para diferentes posições (nomeadas de A até G) na sala de raio-x do HV-UFU. Fonte: (Silveira, 2023, p. 26)	37

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1:	Valores associados ao fator de peso para o respectivo tipo de radiação. Fonte: (CNEN, 2024, p. 5)	20
Tabela 2:	Valores associados ao fator de ponderação de tecidos. Fonte: (CNEN, 2024, p. 34)	21
Tabela 3:	Valores associados ao fator de ponderação da qualidade em relação a transferência linear de energia (LET). Fonte: (CNEN, 2024, p. 34)	22
Tabela 4:	Doses limites pela Comissão Nacional de Energia Nuclear. Fonte: (CNEN, 2024, p. 18)	26
Tabela 5:	Doses coletadas para cinco situações distintas em um procedimento de raio-x. Fonte: A autora (2024)	31
Tabela 6:	Energia depositada em diferentes tensões obtidas por simulação de Monte Carlo para situação em que a mão é irradiada com utilização de EPI. Fonte: A autora (2024)	33
Tabela 7:	Energia depositada em diferentes tensões obtidas por simulação de Monte Carlo para situação em que a mão é irradiada sem utilização de EPI. Fonte: A autora (2024)	34

LISTAS DE SIGLAS

ALARA -	Tão baixo quanto razoavelmente exequível (As Low As Reasonably Achievable)
ANVISA -	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
CNEN -	Comissão Nacional de Energia Nuclear
D -	Dose absorvida
DNA -	Ácido Desoxirribonucleico
D_{T,R} -	Dose média de energia
E -	Energia depositada na matéria
EPI -	Equipamento de proteção individual
EPC -	Equipamento de proteção coletiva
Gy -	Gray
H*(d) -	Equivalente de dose ambiental na profundidade d
H_p -	Equivalente de dose individual na profundidade d
H_T -	Dose equivalente
HV-UFU -	Hospital Veterinário da Universidade Federal de Uberlândia
ICRP -	Comissão Internacional de Proteção Radiológica (<i>International Commission on Radiological Protection</i>)
ICRU -	Comissão Internacional de Unidades e Medidas das Radiações (<i>International Commission on Radiation Units and Measurements</i>)
IOE -	Indivíduo Ocupacionalmente Exposto
J -	Joule
Kg -	Quilograma
Kv -	Quilovoltagem
kVp -	Pico máximo de energia
LANL -	<i>Los Alamos National Laboratory</i>
LET -	Transferência linear de energia (<i>Linear Energy Transfer</i>)
m -	Massa do volume irradiado
mA -	Miliamperagem
MCNP -	<i>Monte Carlo N-Particle</i>
MMC -	Método Monte Carlo
MS -	Ministério da Saúde
PET -	Polietileno Tereftalato

Q -	Fator peso da qualidade de radiação
R -	Radiação
RBE -	Eficácia biológica relativa (<i>Relative Biological Effectiveness</i>)
RDC -	Resolução de Diretoria Colegiada
SI -	Sistema Internacional de Unidades
Sv -	Sievert
T -	Tecido/órgão
W_R -	Fator peso da radiação
W_T -	Fator de ponderação de tecido/órgão

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	12
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
3.1. Radiação ionizante.....	13
3.2. Diagnóstico por imagem em medicina veterinária	14
3.3. Efeitos biológicos das radiações ionizantes.....	16
3.3.1. Reações teciduais.....	17
3.3.2. Efeitos estocásticos.....	17
3.4. Grandezas Radiológicas	18
3.4.1. Dose absorvida	18
3.4.2. Dose equivalente.....	18
3.4.3. Dose efetiva	19
3.4.4. Equivalente de dose	20
3.5. Proteção Radiológica.....	21
3.5.1. Equipamentos de proteção individual (EPI).....	21
3.5.2. Meios de proteção radiológica.....	22
3.6. Princípios básicos de proteção radiológica.....	23
3.6.1. Justificação	23
3.6.2. Otimização.....	24
3.6.3. Limitação de dose.....	24
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
4.1. Avaliação dosimétrica no HV-UFU	25
4.2. Método Monte Carlo (MMC).....	27
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
REFERÊNCIAS	37

1. INTRODUÇÃO

1895, o ano que mudou permanentemente a medicina. Wilhelm Conrad Roentgen não imaginaria que a descoberta dos raios X por ele realizada traria tantos benefícios para a saúde da sociedade, desde diagnóstico até o tratamento de doenças que antes eram consideradas fatais. Desde então, cada vez mais utilidades foram agregadas ao feixe de radiação, sendo que pela primeira vez era possível avaliar os pacientes sem que houvesse a necessidade de medidas invasivas (Wojcik e Harms-Ringdahl, 2019).

Com a difusão da utilização da radiação no campo clínico, não distante, a área de medicina veterinária adotou o método, para que fosse possível analisar estruturas internas dos animais, através das imagens radiológicas formadas, assim resultando em melhores diagnósticos, prognósticos e planos terapêuticos para os pacientes (Cacau e Souza, 2023). E essa técnica de investigação é indispensável, diante da sua facilidade, rapidez e segurança (Sousa *et al*, 2021).

O que Roentgen e outros entusiastas da época não imaginavam é que a grande heroína, naquele tempo usada na produção de vários tipos de acessórios e até mesmo para tratamentos complexos de doenças, poderiam ocasionar danos biológicos. Essa inversão de papéis, provava que embora a radiação fosse crucial para uma medicina superior, havia necessidade de estabelecer limites para que não houvesse efeitos deletérios à saúde (Wojcik e Harms-Ringdahl, 2019).

Frente a isso, hodiernamente a Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) é a responsável por estabelecer os limites legais das doses que um indivíduo pode receber durante suas práticas (Batista *et al*, 2017). Além disso, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) publicou a lei RDC N° 330/22 que estabelece normas e princípios na proteção radiológica que devem ser executados nas áreas que envolvem radiação ionizante, bem como a medicina veterinária (Brasil, 2022; Cacau e Souza, 2023).

As exigências hodiernamente existentes são para que não haja efeitos biológicos nos profissionais da área de saúde, os quais podem se apresentar de maneira imediata ou tardia, dependendo da dose que for recebida, além disso podem ser classificados como estocástico,

trazendo aumento na probabilidade de incidência de câncer, ou como reação tecidual, tendo como um dos sintomas os eritemas (ESR, 2011).

Embora, o conhecimento e as provas que os riscos existam, uma investigação mais minuciosa em clínicas veterinárias evidenciam que a proteção radiológica não é tão difundida quanto se desejava. O lamentável panorama são profissionais expostos diariamente e repetitivamente aos feixes de radiação, principalmente nas mãos (Cacau e Souza, 2023). Isso ocorre devido ao fato de que os animais precisam ser imobilizados e posicionados corretamente para que seja realizado um exame eficaz, mediante a isso, os profissionais da área veterinária usam força humana para contê-los, e os equipamentos de radioproteção, como a luva plumbífera, dificultam sua prática (Sousa *et al*, 2021).

Mediante aos raios X serem imperceptíveis aos olhos humanos, muitas vezes é encarado como algo inofensivo (Cacau e Souza, 2023). E, verificando o grande número de profissionais em medicina veterinária que não utilizam as vestimentas de radioproteção por desconhecimento ou negligência (Sousa *et al*, 2021), este trabalho busca provar a eficácia do uso de equipamentos de radioproteção em procedimentos de radiodiagnóstico na área veterinária e difundir tais resultados, em continuidade à pesquisas realizadas no HV/UFU (Pasquariello, 2022). Para isso, foram avaliadas as doses que as mãos dos profissionais recebem com e sem a utilização dos equipamentos de proteção individual (EPI) em um aparelho convencional de raio-x e, além disso, foram feitas simulações pelo Método Monte Carlo (MMC) do mesmo ambiente radiológico, ambos para avaliar as doses recebidas e a radiação espalhada.

2. OBJETIVOS

Diante do panorama exposto, o presente trabalho, por meio de dados experimentais e simulações computacionais busca provar a necessidade do uso de equipamentos de proteção radiológica e os riscos de seu mau uso, bem como a ausência deles. Além disso, tem a finalidade de trazer conhecimento e adoção de uma cultura de segurança nos serviços de diagnóstico veterinário, para que os profissionais realizem suas funções com proteção e garantia de sua saúde.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Radiação ionizante

No ano de 1895, o cientista alemão, Wilhelm Conrad Roentgen realizava experimentos com tubo de raios catódicos e notou que ao ligá-lo uma placa que continha material fluorescente passava a brilhar, o fascínio aumentou quando o físico colocou a mão de sua esposa entre o tubo e a placa e percebeu a formação do desenho dos ossos e tecidos dela na chapa, e ali iniciava-se uma era, a primeira radiografia havia sido realizada e a partir de então a medicina nunca mais foi a mesma. Assim, Wilhelm, ainda incerto sobre o que havia descoberto, passou a chamar esse feixe de radiação de raios X, uma vez que a letra “X” é uma incógnita na linguagem matemática (JBPML, 2009).

Hodiernamente, sabe-se que os raios X são um tipo de radiação eletromagnética com energia elevada e origem a partir do freamento de partículas ou pela eletrosfera (Okuno e Yoshimura, 2010). Em um tubo de raios X a radiação é formada pelo aquecimento do filamento (por efeito termiônico), presente no cátodo, que irá emitir elétrons para o ânodo, sendo eles acelerados pela diferença de potencial existente entre os dois, em seguida os elétrons com alta energia chocam-se com o alvo metálico posicionado no ânodo, e a partir desse freamento das partículas que são produzidos os raios X, visto que os elétrons do alvo foram arrancados e geraram, assim, vacâncias, as quais serão preenchidas por elétrons de níveis superior da eletrosfera, e quando saltam para outras camada há a emissão dos fótons (Silva, 2016). E, por fim, os raios X saem do tubo através da janela, e esse feixe é designado como radiação primária utilizada no raio-x convencional (Batista *et al*, 2017), como ilustrado na Figura 1.

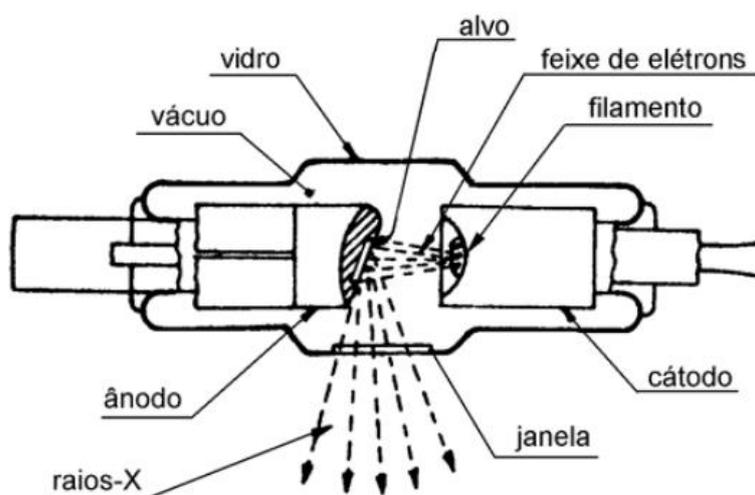


Figura 1: Esquema simplificado do tubo de raios X. **Fonte:** (Silva, 2016, p. 108).

A radiação, portanto, é a uma forma de energia transmitida ao espaço ou ao meio. Podendo ser classificada como ionizante, isto é, que possui energia suficiente para causar ionização no átomo irradiado ou como não ionizante, a qual não é capaz de ionizar por não possuir energia suficiente, assim ocasiona apenas na excitação dos elétrons nos átomos (Okuno e Yoshimura, 2010).

No entanto, além dessa radiação primária existe outro parâmetro a ser analisado em uma situação real: a radiação espalhada, isto é após interagir com o objeto os fótons sofrem espalhamento, que tem como consequência aumento de dose em profissionais e acompanhantes próximos a mesa de exame e também deteriora a qualidade do resultado obtido nas imagens. Existem alguns fatores que podem aumentar a probabilidade da ocorrência desse fenômeno, são eles: a energia de pico máxima ser alto, a espessura anatômica do paciente e, também, a área do campo de irradiação (Soares, 2008).

3.2. Diagnóstico por imagem em medicina veterinária

A radiação ionizante ganhou espaço também nos centros de medicina veterinária, sendo uma ferramenta valiosa para diagnósticos, tratamentos clínicos e cirurgias em animais, garantindo melhor qualidade de vida a eles. Sendo esse método tão crucial quanto o exame físico realizado nas consultas, uma vez que é simples e rápido para análises de casos, isso viabiliza a visualização das estruturas e os órgãos internos sem que haja a necessidade de cortes invasivos no paciente (Cacau e Souza, 2023; Sousa *et al*, 2021).

O diagnóstico por imagem no setor de medicina veterinária já é amplamente utilizado, no entanto a cultura de radioproteção não se mostra tão difusa. Seja por falta de conhecimento ou por negligência, há muitos casos de profissionais que não utilizam vestimentas de radioproteção (Sousa *et al*, 2021).

Quando avalia-se um setor de imagem em que o paciente deve ser posicionado em uma posição específica e de maneira imóvel, e na verdade o que encontra-se são animais agitados, agressivos e/ou muito pequenos, assim é necessário que haja uma contenção desse animal, para que a exposição seja realizada da maneira desejada a fim de obter melhores diagnósticos e evitar repetições de exames, isto é submeter o paciente a doses de radiação além do necessário por não ter conseguido produzir um bom exame anteriormente (Sousa *et al*, 2021).

Garantir a imobilização do animal muitas vezes é papel do profissional do setor, uma vez que os animais podem ferir (seja por mordidas ou arranhões) para se defenderem, assim necessita-se de um profissional capaz e bem treinado (Assis *et al*, 2018). Normalmente o posicionamento das mãos que estão segurando o paciente está sob o feixe primário (Cacau e Souza, 2023). Além disso, diante da dificuldade de conter o animal, segundo os trabalhadores, a utilização de EPI inúmeras vezes é descartada (Sousa *et al*, 2021).

Quanto a isso, na Austrália há provas de que a contenção sem a utilização do EPI expõe diretamente os veterinários, foi analisado diversos casos em que os dedos ou, até mesmo, as mãos completas apareceram nas chapas radiográficas (Hall *et al*, 2013), como é possível observar na Figura 2.

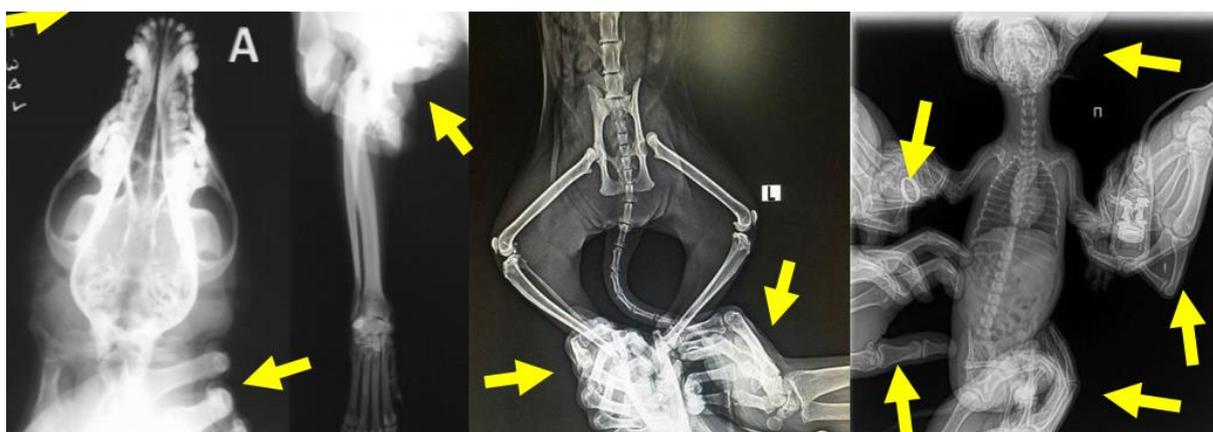


Figura 2: Exposição das mãos de profissionais ao imobilizarem animais em procedimentos de raio-x. **Fonte:** (Sousa *et al*, 2021, p. 3).

A escolha da não utilização das vestimentas de radioproteção, principalmente das luvas plumbíferas (as mãos são irradiadas diretamente nos procedimentos convencionais de radiologia veterinária), podem induzir aos efeitos biológicos da radiação ionizante, aumentando a probabilidade de ocorrência de, por exemplo, casos de cânceres radioinduzidos (Sousa *et al*, 2021).

Para que tais procedimentos sejam feitos com maior garantia de segurança a todos, o Ministério da Saúde (MS) por meio da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) afirma que todos os procedimentos de radiologia veterinária devem obedecer ao disposto na Resolução da Diretoria Colegiada (RDC) 611/22. Em que, as maneiras de proteção para os

profissionais ou para o público devem ser submetidas a obedecer os princípios e os limites de doses estabelecidos (Brasil, 2022).

No entanto, a luva plumbífera, embora seja capaz de reduzir consideravelmente a dose recebida nas extremidades, pode sombrear estruturas, visto que ela possui centímetros de chumbo além das mãos que podem bloquear a visualização de pedaços importantes para um diagnóstico de qualidade (Bellon, 2021), como pode-se notar na simulação de um animal sendo contido na Figura 3.



Figura 3: Luvas plumbífera e sua utilização para a contenção de um animal de porte pequeno.

Fonte: (Bellon, 2021, p. 40).

3.3. Efeitos biológicos das radiações ionizantes

Ao incidir com a matéria a radiação é capaz de realizar ionizações nas moléculas, especialmente a de ácido desoxirribonucleico (DNA), ocasionando danos e alterações em seu funcionamento e em sua estrutura, assim, desencadeando riscos eminentes à saúde (Cacau e Souza, 2023). O dano irá depender do tempo, da dose absorvida e a região que o indivíduo foi exposto. Os resultados dessa exposição podem acontecer em curto prazo, que ocorrem quando a dose é muito elevada (atingindo um número grande de células), ou, até mesmo, anos após o acontecimento (Batista *et al*, 2017). Ademais, quando relacionados à sua natureza, há dois efeitos biológicos possíveis: os estocásticos e as reações teciduais (Cacau e Souza, 2023).

3.3.1. Reações teciduais

As reações teciduais ocorrem diante de casos de acidentes e/ou quando doses elevadas atingem tecidos saudáveis, essa alta dose é capaz de causar a morte simultânea de um vasto número de células de um volume de matéria que, conseqüentemente, resultará na perda ou alteração da sua funcionalidade (Okuno e Yoshimura, 2010).

Ademais, quanto maior for a dose maior, também, será a severidade do quadro, sendo uma relação diretamente proporcional entre gravidade dos efeitos e a dose absorvida pela exposição. Diante de acidentes e tristes casos ao longo da história, foram constatados exemplos desse efeito, tais como: vermelhidão até lesões cutâneas com bolhas, cataratas, náuseas, necroses e podendo, ainda, dependendo da dose ou taxa de dose, ser fatal ao indivíduo exposto. Dessa forma, hodiernamente há limites de dose para que ocorra a reação tecidual, mas cabe destacar que estar abaixo dos limites não impossibilita a ocorrência de efeitos biológicos, apenas possuirá um menor número de células atingidas e entrando, possivelmente, para o segundo tipo de efeito, que é o estocástico (Boittin *et al*, 2015; Okuno e Yoshimura, 2010, p. 213).

3.3.2. Efeitos estocásticos

Quando células normais são atingidas, causando efeitos cancerígenos ou hereditário temos o denominado efeito estocástico. Sendo de cunho probabilístico, o indivíduo exposto pode ou não obter efeitos radioinduzidos, dessa forma, com doses muito baixas há uma probabilidade pequena, e conforme aumenta-se a dose é possível que eleve-se também as chances de ocorrência (Okuno e Yoshimura, 2010).

Esse tipo de risco pode, como já supracitado, acometer à progênie da pessoa irradiada, uma vez que suas células germinativas forem atingidas, sendo esse denominado como efeito hereditário. Ou pode acometer o próprio exposto quando a radiação ionizante atingir suas células somáticas podendo mostrar resultados até mesmo décadas mais tarde, esses são os efeitos cancerígenos (Okuno e Yoshimura, 2010, p. 217). Dependerá, a destarte disso, da radiosensibilidade do tecido por unidade de dose equivalente (Tauhata *et al*, 2014).

Os resultados acontecem de maneira tardia e sem possuir relação de dose e gravidade do dano, como na reação tecidual. A maior preocupação acerca desse efeito é devido ao fato de não possuir nenhum tipo de limiar, sendo assim, qualquer dose absorvida pode resultar em danos estocásticos, assim como a radiação ambiental (Boittin *et al*, 2015).

3.4. Grandezas Radiológicas

Para que seja possível quantificar as doses de radiações recebidas, bem como os riscos e a proteção radiológica a elas associadas, é preciso que haja grandezas dosimétricas (Okuno e Yoshimura, 2010).

3.4.1. Dose absorvida

Quando a radiação interage com a matéria ela transfere sua energia, parte dela pode ser absorvida, por exemplo, por meio da ionização dos átomos que constituem o material e parte perdida por radiação de freamento que escapam do meio (Tauhata *et al*, 2014, p. 151).

A dose absorvida (D) é a grandeza física que tem maior importância no ramo da radiobiologia (Okuno e Yoshimura, 2010), sendo ela o valor de energia média depositada pela radiação no tecido em um determinado volume (equação 1) (Hooser, 2018).

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

Isto é, a razão da energia depositada na matéria (E) pela massa (m) do volume irradiado. Desta forma, a dose absorvida possui como Sistema Internacional de Unidades (SI) o *gray* (Gy), sendo (Dimenstein *et al*, 2022):

$$1 \text{ Gray} = \text{J/Kg}$$

Além disso, essa grandeza pode ser utilizada para qualquer tipo de meio, radiação ou geometria irradiada (Okuno e Yoshimura, 2010).

3.4.2. Dose equivalente

A dose equivalente (H_T) é uma grandeza de proteção radiológica que corresponde a dose média de energia ($D_{T,R}$), que um tecido/órgão (T) recebe quando atingido por uma radiação (R), multiplicada por um fator ponderador tabelado (W_R) (equação 2) (Okuno e Yoshimura, 2010).

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

Os valores de W_R correspondem aos do *relative biological effectiveness* (RBE) que leva em consideração o tipo de radiação, bem como sua respectiva energia, e o dano causado. A Tabela 1 evidencia os, mais habituais, valores correspondentes.

Tabela 1: Valores associados ao fator de peso para o respectivo tipo de radiação.

Tipo de radiação	W_R
Raios X, Radiação γ , elétrons e múons	1
Prótons e pions carregados	10
Nêutrons com energia desconhecida	20
Radiação alfa (α) e íons pesados	20

Fonte: (CNEN, 2024, p. 5).

Além disso, a unidade em SI para a dose equivalente é *sievert* (Sv) (Okuno e Yoshimura, 2010).

Através dessa grandeza é possível limitar as doses que determinado tecido/órgão, assim como mãos e cristalinos, poderão receber e podendo ser, ainda, útil no cálculo de dose efetiva, uma vez que essa grandeza pode ser usada independentemente do tipo de radiação ou tecido (Okuno e Yoshimura, 2010).

3.4.3. Dose efetiva

A dose efetiva (E) é, também, uma grandeza de proteção radiológica, criada para limitar a energia depositada no corpo todo do indivíduo exposto e, conseqüentemente diminuir a chance de efeitos biológicos. Sendo resultado da soma das doses equivalentes (H_T) multiplicadas por um fator (W_T) que corresponde ao órgão irradiado (T), os valores de W_T irão depender da radiosensibilidade dessa matéria (Okuno e Yoshimura, 2010), isto é:

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

A Tabela 2 expõe os valores para o fator de ponderação de tecidos para cada respectivo órgão ou tecido do corpo humano.

Tabela 2: Valores associados ao fator de ponderação de tecidos.

Tecido/órgão irradiado	W_T
Cérebro, glândulas salivares, pele e superfícies ósseas	0,04
Gônadas	0,08
Bexiga, esôfago, fígado e tireoide	0,16
Baço, Coração, Estomago cólon, intestino delgado, mama, medula óssea, mucosa nódulos linfáticos, músculo, oral, pâncreas, próstata, pulmão, rins, supra-renais, tecido extratorácico, timo, útero/colo do útero, vesícula biliar	0,72

Fonte: (CNEN, 2024, p. 34).

Sendo, portanto, uma valiosa forma de ponderar os efeitos pelo tipo de radiação e pela respectiva resposta tecidual. Além disso, possui em SI a unidade denominada como *sievert* (Sv), que corresponde a joule por quilograma (Hooser, 2018).

3.4.4. Equivalente de dose

Existe, ainda, duas grandezas operacionais que são para monitoração externa: equivalente de dose ambiente ($H^*(d)$) e equivalente de dose individual ($H_p(d)$), onde “d” representa a profundidade (CNEN, 2018, p. 1). Ambas levam em consideração um fator peso da qualidade de radiação (Q) ao invés do fator W_R anteriormente citado.

Tabela 3: valores associados ao fator de ponderação da qualidade em relação a transferência linear de energia (*LET*).

LET (keV/μm)	Q
Menor que 10	1
De 10 a 100	$0,32 \cdot LET - 2,2$
Maior que 100	$\frac{300}{\sqrt{LET}}$

Fonte: (CNEN, 2024, p. 34).

A grandeza operacional de dose individual é dado pelo dose absorvida em um ponto, em uma profundidade “d” vezes o fator “Q”. Já a grandeza operacional de dose ambiente é para análise de, por exemplo, locais de trabalho, tendo a mesma equação na sua determinação. No entanto, é correlato a uma esfera com tecido equivalente em uma profundida “d” e com diâmetro de 30 centímetros. Cabe, ainda, destacar que no caso de radiações fortemente penetrantes é utilizado 10 mm como valor de “d” e quando isso é feito o valor pode ser utilizado para estimar a dose efetiva em um indivíduo (CNEN, 2018).

3.5. Proteção Radiológica

Diante da exposição excessiva da radiação no século XX, bem como os efeitos deletérios consequentes de sua utilização, tornou-se imprescindível a admissão de métodos para a proteção radiológica (Sousa *et al*, 2021). A qual é denominada como o conjunto de ações necessárias para garantir a segurança do homem e do ecossistema devido a utilização de radiação ionizante, tais medidas são asseguradas pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) e a Comissão Internacional de Unidades e Medidas de Radiação (ICRU) (Pereira; Kelecom; Pereira, 2015).

3.5.1. Equipamentos de proteção individual (EPI)

Para garantia da saúde do trabalhador existem equipamentos de proteção individual, que são vestimentas, em sua maioria, feitas de chumbo envolto de borracha, com a finalidade de barrar os feixes de radiação primária e secundária. Dentre os principais EPIs, destacam-se os:

óculos de chumbo, aventais plumbíferos, protetores de tireoide e os protetores de gônadas (Tavares, 2020).

A RDC 611/22 impõe que todos os trabalhadores presentes em um procedimento devem estar sempre utilizando equipamentos de proteção individual, ademais, ressalta que quando alguma parte do corpo (inclusive as extremidades) estiver exposta pelo feixe de radiação primária deve haver, no mínimo, 0,5mm de chumbo entre a fonte e o exposto. Bem como, para a radiação secundária deve-se haver, no mínimo, 0,25mm de chumbo (Brasil, 2022, p. 18).

Além de que, tais vestimentas devem passar por avaliações periódicas, a fim de garantir que ainda estão em boa qualidade e exercendo de maneira íntegra sua função (Tavares, 2020). Visto que a má preservação pode tornar o equipamento inadequado para uso, isto pode ocorrer devido a fissuras geradas por trabalhadores ao jogarem ou dobrarem eles depois do uso (Dimenstein *et al*, 2022).

A avaliação da integridade dos EPIs é feita por meio de um equipamento capaz de realizar uma varredura por todo o material, e como resultado na imagem será possível analisar possíveis danos, como fissuras e buracos. E se houver a presença de prejuízo na vestimenta, a mesma não poderá mais ser utilizada no serviço, uma vez que, como supramencionado, o equipamento perdeu sua eficácia (Tavares, 2020).

3.5.2. Meios de proteção radiológica

Existem meios/cuidados de proteção radiológica que devem ser realizados em um ambiente que utilize a radiação ionizante, são esses: a redução do tempo, aumento da distância e a inserção de barreiras atenuadoras (Sousa *et al*, 2021).

Em relação ao primeiro mencionado, isto é, o tempo, deve-se diminuir ao mínimo possível a permanência do trabalhador durante um procedimento, isso porque a dose e o tempo são diretamente proporcionais (equação 4). Sendo assim, quanto menos tempo o indivíduo for exposto, menor são as chances de efeitos biológicos (Pereira; Kelecom; Pereira, 2015, p. 246).

$$Dose = taxa \cdot tempo \quad (4)$$

Ademais, a lei do inverso do quadrado da distância (equação 5) comprova que o afastamento do indivíduo da fonte emissora de radiação, seja este um equipamento ou o próprio paciente, resultará em uma queda nos valores de taxa de dose (Tauhata *et al*, 2014, p. 247).

$$\frac{D_1}{D_2} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 \quad (5)$$

Onde D_1 e D_2 representam as taxas de doses nas respectivas distâncias d_1 e d_2 da fonte. Através disso, podemos fazer a simples suposição de que se uma pessoa posicionar-se dois metros da fonte, fará com que a dose recebida seja um quarto da que seria absorvida caso estivesse apenas um metro da fonte (Dimenstein *et al*, 2022, p. 163).

Além disso há outro fator de grande importância: a blindagem. Sendo essa por meio de EPI/EPC e por blindagens realizadas nas instalações (geometria da sala e espessura das paredes), a qual deve-se realizar cálculos específicos levando em consideração os tipos de radiações que serão utilizadas, o tempo que o equipamento ficará ligado, a carga de trabalho dos IOEs, bem como a classificação da área, os locais adjacentes e a planta de instalação, tudo isso analisando a radiação primária e secundária (radiação espalhada) que haverá em situações possíveis (Dimenstein *et al*, 2022). Cada tipo de radiação, dose e atividade da fonte precisará de um determinado material de blindagem (Tauhata *et al*, 2014).

3.6. Princípios básicos de proteção radiológica

Existem três principais alicerces da proteção radiológica, os quais foram estabelecidos pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) e pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), são eles: a justificção, otimização e a limitação de dose (Batista *et al*, 2017; Pereira; Kelecom; Pereira, 2015).

3.6.1. Justificção

O princípio da justificção diz respeito a argumentação da escolha do método, de diagnóstico ou terapia, utilizando radiação. É necessário que a opção tenha sido analisada mediante a outras alternativas que não possuam radiação ionizante e, especialmente, levando em consideração que os efeitos advindos dessa prática trará mais benefícios do que malefícios ao paciente (CNEN, 2024, p. 16). Os benefícios para a sociedade serão, em sua maioria, superiores, quando forem realizados procedimentos que estejam dentro dos padrões estabelecidos por lei (Dimenstein *et al*, 2022).

3.6.2. Otimização

O segundo princípio assegurado pelos órgãos regulamentadores da radioproteção, é o da otimização. O qual corresponde a menor dose possível sem que haja insuficiência de atingir resultados de interesse (CNEN, 2024, p. 17). Conhecido ainda como princípio ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*), ou seja, manter as exposições tão baixas quanto razoavelmente exequíveis, isso porque não existe uma quantidade de dose que seja livre de danos biológicos, nem tão pouco um limiar para que ocorra efeitos estocásticos, diante disso é necessário que a otimização ocorra em todos os equipamentos e procedimentos que envolvam radiação ionizante (Tauhata *et al*, 2014).

3.6.3. Limitação de dose

A limitação de dose, como próprio nome sugere, é a dose máxima que o indivíduo ocupacionalmente exposto (IOE) deve receber, a análise é feita acerca das doses equivalentes de determinados órgãos/tecidos e da dose efetiva em períodos de tempo estabelecidos por lei. Dessa maneira, toda exposição (que não estiver dentro das circunstâncias especiais preestabelecidas pela CNEN) precisa ser registrada devendo obedecer as doses limites anuais (de janeiro à dezembro) que estão apresentadas na Tabela 4 (CNEN, 2024, p. 18):

Tabela 4: Doses limites pela Comissão Nacional de Energia Nuclear.

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

Fonte: (CNEN, 2024, p. 18).

Ademais, mulheres gestantes ou lactantes deveram estar abaixo do limite de dose para o público, com a finalidade de garantir segurança a ela e ao feto. Cabe, ainda, destacar que tais limites são apenas para profissionais que se submetem frequentemente a possíveis exposições, assim, os pacientes e acompanhantes tornam-se exceção a esse princípio (CNEN, 2024, p. 18; Dimenstein *et al*, 2022).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Avaliação dosimétrica no HV-UFU

Uma das etapas da pesquisa incluía a realização de uma avaliação dosimétrica em exames convencionais realizados em um hospital veterinário. Para tal feito, foi escolhido o Hospital Veterinário da Universidade Federal de Uberlândia (HV-UFU), que está a quase meio século sendo referência em Uberlândia e nas regiões próximas. O HV-UFU possui atendimento amplo de avaliação, diagnóstico e tratamento em animais de pequeno porte, animais silvestres e de produção (Domingos, 2023; HV-UFU, 2011).

Para exames convencionais de radiodiagnóstico o hospital utiliza o equipamento de raios X *Altus* (Figura 4) da antiga marca *Sawae Tecnologia Ltda*, que em 2015 foi comprada pela *Konica Minolta* (Radcal, 2019; Terra, 2016).

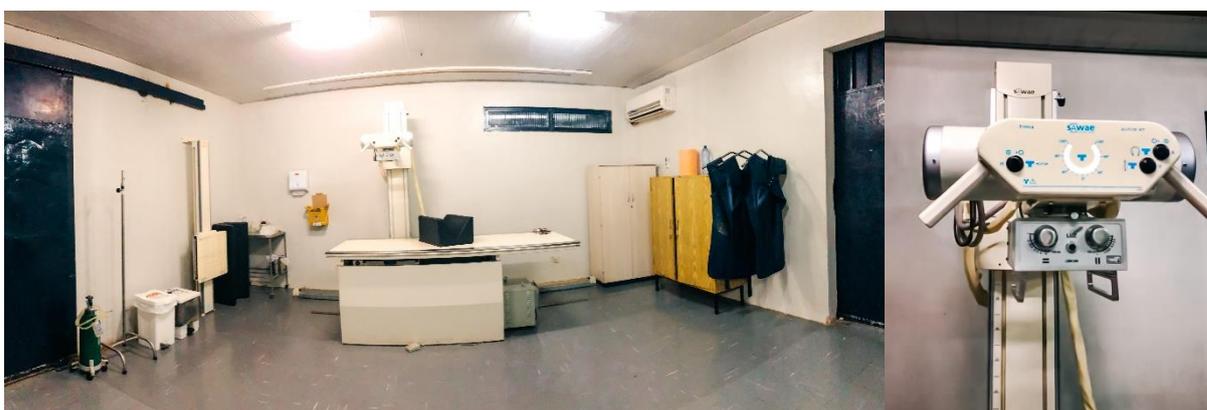


Figura 4: Fotografia da sala de exames de raio-x no HV-UFU, ao lado direito uma imagem mais ampliada do equipamento utilizado. **Fonte:** A autora (2024).

Para que fosse possível a medição das doses na sala de medicina veterinária, utilizou-se uma câmara de ionização para baixos níveis de radiação sendo ela a *Radcal 10X6-180* (Radcal, 2024b), a qual foi conectada ao *Radcal Accu-Gold+* (figura 5) sendo esse um módulo digitalizador capaz de fornecer os parâmetros, por exemplo, de dose, taxa de dose, kV e mA, isso é possível com o uso do *software Accu-Gold* (Radcal, 2019). Sendo assim para a realização do estudo foi conectada a câmara de íons com o *Accu-Gold* e foi conectada esse sistema ao notebook, que por possuir o aplicativo *Accu-Gold 2* (Radcal, 2024a) pode visualizar e registrar todos os parâmetros relacionados a dosimetria.



Figura 5: Ao lado esquerdo a imagem da câmara de ionização (*Radcal 10X6-180*) e do lado direito o sistema *Accu-Gold+*. **Fonte:** (Radcal, 2019; Radcal, 2024b).

Ademais, como objeto simulador foi utilizado uma garrafa de polietileno tereftalato (PET) com dimensões de, aproximadamente, 33 cm de altura e 9 cm de largura, preenchida por água, isso porque os animais podem ter de 50% a 80% de água em sua composição, isso irá variar dependendo de cada animal e de sua espécie (Palhares, 2013). Sendo assim, esse elemento possui maior proximidade com o tecido biológico desses pacientes.

Para o estudo, a garrafa é a simulação de um animal de pequeno porte sendo submetido a um exame convencional de raio-x, estando localizada à 1 metro da saída do tubo de raios X. Além disso, o equipamento foi configurado em 50 kV, 200 mA e 63 ms com disparo único e em foco fino, esses parâmetros foram adotados para todas as medidas com a finalidade de efeitos de comparação da dose em diferentes casos.

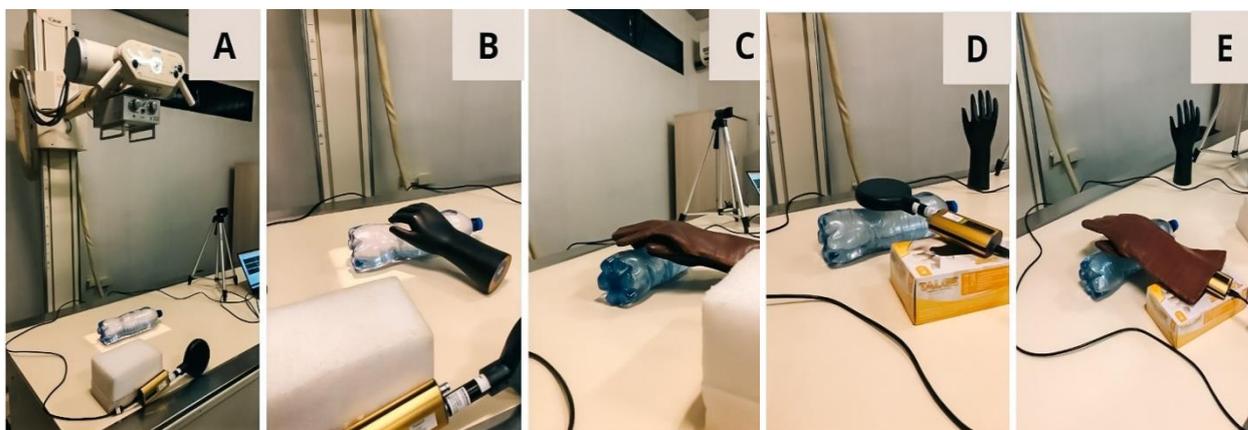


Figura 6: Montagem dos cinco casos analisados para a dosimetria no HV-UFU.

Fonte: A autora (2024).

Onde o primeiro caso (imagem “A”) é analisada a radiação espalhada pelo objeto simulador do animal. Já na imagem “B” em cima da garrafa foi posicionado outro tipo de objeto simulador, sendo esse semelhante em estrutura e composição a uma mão de um humano. E na imagem “C”, colocou-se uma luva plumbífera em cima da garrafa com água. Nas três primeiras posições, o sistema de detecção foi posicionado a 38 cm de onde estaria o animal para captação de radiação espalhada que atingiria o profissional que estivesse de frente a mesa.

Ademais, foram realizadas mais duas medidas, para analisarem a dose recebida com e sem a utilização de EPI quando o profissional se submete ao feixe primário. Uma delas foi colocada o sistema de detecção bem em cima da garrafa (imagem “D”), exatamente onde estava a mão na imagem “B” e a outra a câmara de ionização foi colocada dentro da luva plumbífera (imagem “E”).

4.2. Método Monte Carlo (MMC)

Durante a Segunda Guerra Mundial os entusiastas matemáticos John von Neumann e Stanislaw Ulam criaram o Método de Monte Carlo (MMC) avaliando diferentes impactos de determinadas situações incertas no mundo real (IBM Cloud Education, 2020).

O *software* Monte Carlo está ganhando cada vez mais destaque nos segmentos de pesquisa em ciência, especialmente na área de Física Médica. O método tem como base a simulação computacional por meio de análise de probabilidades, a partir de números aleatórios sequenciais. Dessa forma, pode-se simular o trajeto das partículas de maneira estocástica, levando em conta as interações com o meio desde a emissão pela fonte até ser absorvida, sendo assim a cada colisão será possível analisar cenários distintos. Portanto, a simulação de Monte Carlo permite a análise de possíveis eventos com probabilidades amplas (Yoriyaz *et al*, 2009).

Existem diversos códigos presentes no MMC, o código *Monte Carlo N-Particle* (MCNP) é um exemplo, ele foi desenvolvido pelo *Los Alamos National Laboratory* (LANL), esse *software* é capaz de avaliar o transporte da radiação de fótons, elétrons e nêutrons de forma separada e combinada. Para esse trabalho a versão MCNP 6.2 foi utilizada para construir a sala de exames de medicina veterinária de forma geométrica e para inserir os materiais, descrição da fonte, bem como a localização de cada objeto (Nero, 2019).

Além disso, para a simulação ser executada podem ser inseridos os cartões *tally* que são as grandezas calculadas pelo código. No estudo presente foi utilizado o *tally* +F6 que estima a

quantidade física da energia total de todas as partículas depositadas em um tecido/órgão, tendo como unidade MeV/g/source-particle (Medeiros, 2018; Werner, 2017).

Cada valor registrado de *tally* possuem seus respectivos erros relativos, os quais estão diretamente ligados a qualidade da resposta, logo, erros de 0,5-1 mostram-se resultados não significativos e 0,1-0,2 são casos questionáveis e um resultado confiável, até mesmo para detectores pontuais é necessário que o erro esteja abaixo de 0,05 (Medeiros, 2018). Assim, nesse estudo além da simulação será analisado a qualidade dos resultados por meio do erro percentual fornecido.

Este trabalho é feito para comprovação mútua entre os dados obtidos de forma experimental e os computacionais. Assim, por meio da simulação de Monte Carlo foi feito, por aproximações geométricas, o equipamento de raio-x convencional, como mostra a Figura 7. Além disso, o objeto simulador de um animal de pequeno porte foi adquirido por meio de uma figura cilíndrica e a simulação de uma mão sobre o animal foi caracterizada pela figura retangular posicionada abaixo do feixe primário.

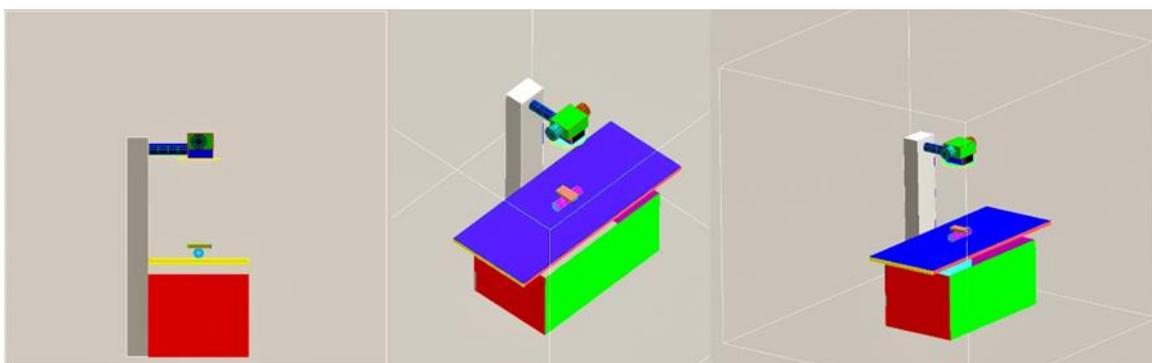


Figura 7: Representação geométrica da simulação com o equipamento de raio-x do setor de medicina veterinário. **Fonte:** A autora (2024).

Como o estudo presente na etapa anterior foi sobre análise dosimétrica em animais de pequeno porte, da mesma maneira foi feito na simulação. Os exames mais comuns nesses pequenos bichos, são radiografias de torác, abdome e de membros, sendo assim as tensões costumam variar de 50 kV a 70 kV (Garofallo, 2024). Dessa forma, todas as situações computacionais foram analisadas para 5 tensões distintas (50 kV, 55 kV, 60 kV, 65 kV, 70 kV) que estão entre as principais tensões aplicadas em um exame de raio-x.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através da dosimetria de um procedimento de rotina realizada no Hospital Veterinário da Universidade Federal de Uberlândia, foram encontrados os valores de dose em cada situação supramencionada. Os valores obtidos encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5: Doses coletadas para cinco situações distintas em um procedimento de raio-x.

Medida	Descrição da situação	Dose registrada
A	Apenas a garrafa de água no feixe primário e a câmara de ionização a 38 cm do objeto simulador	892,9 nGy
B	Objeto simulador de mão humana em cima da garrafa, ambas no feixe primário e a câmara de ionização a 38 cm	670,1 nGy
C	Posicionados no feixe primário: garrafa de água com a luva plumbífera por cima e a câmara de ionização a 38 cm	362,5 nGy
D	Câmara de ionização localizada em cima da garrafa de água, sendo irradiados pelo feixe primário	208,8 µGy
E	Câmara de ionização dentro da luva plumbífera, ambos sendo irradiados pelo feixe primário	518,5 nGy

Fonte: A autora (2024).

Diante desses resultados pode-se analisar dois aspectos valiosos para radiobiologia, bem como para a radioproteção a ser adotada ou enfatizada para os trabalhadores no setor de medicina veterinária, que são a radiação primária e a secundária (isto é a radiação espalhada a partir de um objeto espalhador). Os três primeiros casos analisados registraram o valor de dose absorvida recebida pelo trabalhador, próximo a região do quadril, através da radiação espalhada e os últimos dois casos analisam especificamente a dose recebida pelas extremidades ao serem colocadas sob o feixe primário.

Além de manter as configurações fixas em 50 kV, 200 mA e 63 ms com único disparo e foco fino, foi também medido os valores de temperatura e pressão da sala no momento das medidas que foram, respectivamente: 25,4°C e 915,0 hPa. A fim de ser encontrado os dados

mais corretos e coerentes para o valor de equivalente de dose ambiental ($H^*(10)$), pois cabe destacar que, tais dados interferem nos resultados do estudo.

A situação “A” registrou a medida do equivalente de dose como 892,9 nGy, sendo essa a dose recebida pelo indivíduo que permanece na sala de exame durante a realização do procedimento, e está localizado a cerca de 38 cm do pequeno animal. A segunda análise, situação “B”, o valor registrado como $H^*(10)$ quando o trabalhador está tentando conter o animal, posicionando suas mãos debaixo do feixe primário, foi 670,1 nGy. E se esse mesmo trabalhador permanecer na mesma posição, mas desta vez utilizando uma luva de chumbo haveria uma redução de dose de radiação espalhada para 362,5 nGy. Sendo assim, utilizando a equação 6 conseguimos encontrar o valor percentual dessa variação:

$$\text{Variação}_{\%} = \frac{(\text{Valor}_{\text{final}} - \text{Valor}_{\text{inicial}})}{\text{Valor}_{\text{inicial}}} \cdot 100 \quad (6)$$

Logo, percebe-se que houve uma diminuição em $H^*(10)$ de, aproximadamente, 46% no espalhamento que atingiria o trabalhador, quando, ao conter o animal, o profissional exposto utiliza a luva de chumbo. Sendo assim, a radiação espalhada pelos corpos dos animais será muito menor quando utilizada tal EPI.

Ademais, a situação “C” e “D” analisaram a quantia de dose absorvida pelas mãos dos trabalhadores, que por ser um animal pequeno teriam que expor suas mãos ao feixe primário a fim de um correto diagnóstico. Assim, utilizando a equação 2 com o valor de W_R para fótons (Tabela 1) obteve-se a estimativa de dose equivalente nas mãos dos funcionários.

Quando não houve utilização da proteção nas mãos, o equivalente de dose nas extremidades resultou em 208,8 μSv , no entanto, quando foi utilizado o EPI reduziu-se o equivalente de dose nas mãos para 518,5 nSv. Para melhor análise, colocando na mesma escala de medida, a extremidade seria atingida por, aproximadamente, 0,5 μSv ao invés de 208,8 μSv , consequentemente uma redução de 99,75% (cálculo utilizando a equação 6).

Sendo assim, observando a Tabela 5 nota-se que durante a dosimetria a utilização do equipamento de proteção individual para as mãos ocasionou diminuição da dose absorvida, não só nas mãos, mas também na radiação espalhada na sala de exame.

Se compararmos os dados obtidos com os limites estabelecidos pelo CNEN (Tabela 4) veremos que as doses estão longe de atingir o limiar, no entanto cabe ressaltar que os profissionais com muita frequência, ao longo de suas cargas de trabalho, se expõem por conta da impossibilidade da realização do exame sem seu auxílio (Cacau e Souza, 2023).

Logo, analisando os casos “D” e “E”, se um trabalhador expõe suas mãos ao feixe primário 200 vezes por mês sem a utilização da luva plumbífera, o mesmo já se expôs além do permitido pelos limites da CNEN de dose anual máxima nas mãos, que é 500 mSv (Tabela 4), em contrapartida, se o mesmo profissional utilizar em todos os casos o EPI, seria possível realizar mais de 965000 exames até que se atingisse o limite, cabe destacar que esse cálculo é apenas para animais de pequeno porte, com o equipamento mantendo os parâmetros: 200 mA, 50 kV e 63 ms e com as mãos sempre posicionadas dentro do campo de irradiação do equipamento. Situações distintas, como mudanças no tamanho e espessura do animal, alterações nos parâmetros do exame, bem como a posição das mãos do trabalhador irão ocasionar em doses diferentes.

Posteriormente, por meio da simulação de Monte Carlo utilizando o *tally* +F6, foi possível adquirir os valores de energia média depositada da radiação pela massa para as extremidades do médico veterinário/técnico ao submeter sua mão ao feixe primário. Com isso, foi analisado dois cenários principais: a dose na mão do profissional que está utilizando luva plumbífera e de um que opta por não utilizá-la, os dados encontram-se na Tabela 6 e na Tabela 7 respectivamente, as quais evidenciam os valores de energia média depositada da radiação pela massa e suas respectivas incertezas para cada situação estudada.

Tabela 6: Energia depositada em diferentes tensões obtidas por simulação de Monte Carlo para situação em que a mão é irradiada com utilização de EPI.

Tensão (kV)	Energia depositada (MeV/g/source-particle)	Incerteza (%)
50	1,39E-9	0,37
55	3,13E-9	0,25
60	6,41E-9	0,17
65	1,16E-8	0,12
70	1,88E-8	0,10

Fonte: A autora (2024).

Tabela 7: Energia depositada em diferentes tensões obtidas por simulação de Monte Carlo para situação em que a mão é irradiada sem utilização de EPI.

Tensão (kV)	Energia depositada (MeV/g/source-particle)	Incerteza (%)
50	3,07E-6	0,01
55	2,96E-6	0,01
60	2,87E-6	0,01
65	2,79E-6	0,01
70	2,72E-6	0,01

Fonte: A autora (2024).

Através desses dados podemos analisar a influência da relação de dose com a utilização dos equipamentos de proteção individual. Da mesma forma que obtido experimentalmente, a utilização da luva de chumbo teve como consequência a diminuição em mais de 99% da energia depositada no tecido. Além disso, segundo o manual do código de MCNP 6.2 do MMC os dados que obtiverem incertezas maiores que 5% são considerados inválidos, dessa maneira, analisando os erros obtidos computacionalmente, esse estudo comprova qualidade dos dados, bem como sua confiabilidade (Werner, 2017).

Para melhor visualização aos que desconhecem o comportamento que os raios X são emitidos e espalhados, a Figura 8 evidencia a maneira probabilística que esse feixe pode se comportar e a forma da radiação espalhada na sala antes e após os fótons interagirem com o corpo do paciente. Essa imagem é de extrema importância, uma vez que muitos profissionais de medicina veterinária não veem perigo na radiação por ela ser imperceptível sensorialmente (Cacau e Souza, 2023). No entanto por simulações computacionais podemos ver o cenário de quando irradia-se um pequeno paciente (vale destacar que quanto maior for o paciente maior será a ocorrência de radiação espalhada) (Soares, 2008).

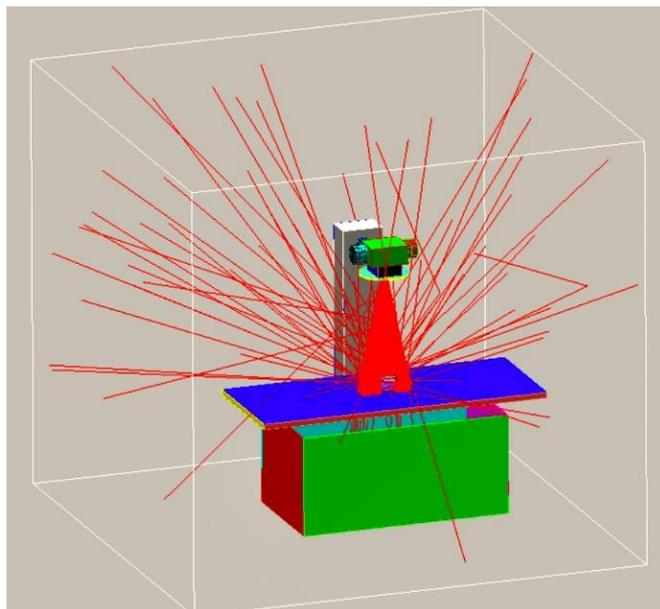


Figura 8: Representação probabilística do comportamento da radiação durante o exame.

Fonte: A autora (2024).

A Figura 9 mostra o gráfico de espectro da intensidade relativa pela energia para análise do comportamento dos feixes de raios X em diferentes tensões. Nesse gráfico pode-se observar que os valores iniciais são praticamente nulos, conforme a energia aumenta chega-se a um pico máximo de energia (kVp), e posteriormente o espectro vai perdendo sua intensidade. Nota-se também, que entre as tensões existe divergência, principalmente, ao fim do espectro, em que devido ao aumento de interação dos elétrons com o alvo do equipamento de raio-x haverá uma geração maior de fótons, assim observa-se na imagem a seguir que o espectro será deslocado para a direita, evidenciando um aumento de energia média (Lucena, 2010).

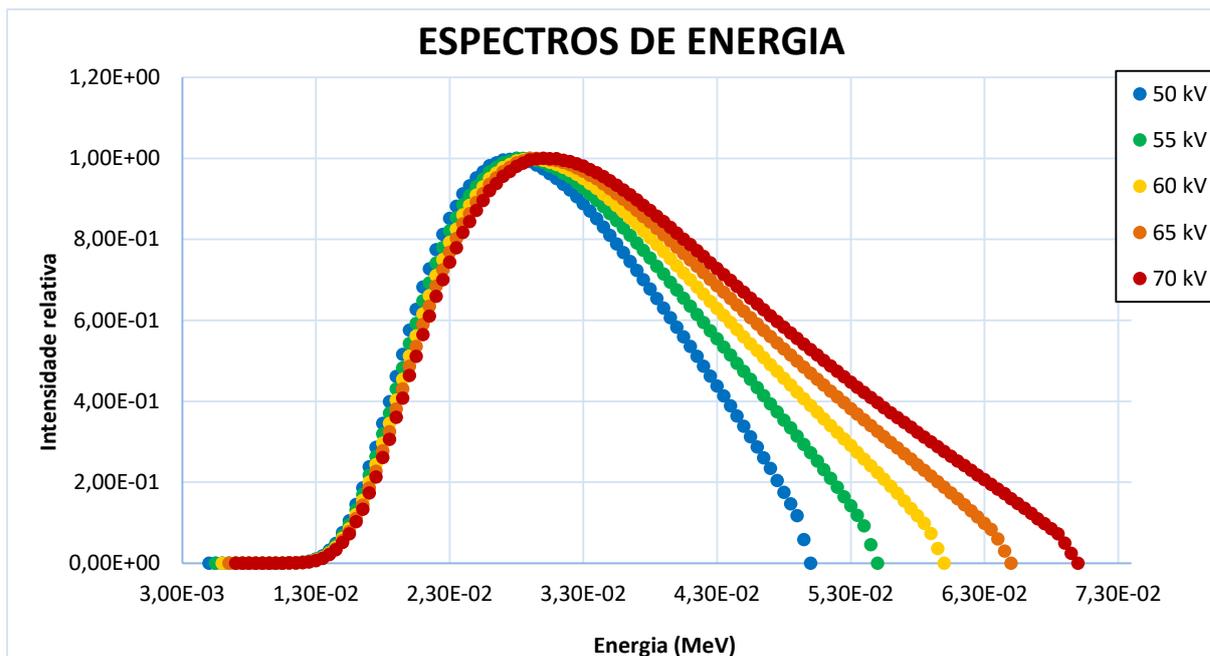


Figura 9: Gráfico dos espectros de intensidade relativa por energia nas tensões de 50 kV, 55 kV, 60 kV, 65 kV e 70 kV identificado respectivamente pelas cores azul, verde, amarelo, laranja e vermelho.

Fonte: A autora (2024).

Assim, pode-se analisar o comportamento da intensidade do feixe de radiação conforme altera-se a energia utilizada. Isso é importante de ser estudado, uma vez que a escolha correta da tensão é essencial em exames radiológicos, fazendo com que o feixe se torne mais penetrante no paciente (além disso a qualidade do feixe está intimamente relacionada com a capacidade de penetrabilidade do feixe) e afetando consequentemente a dose que o paciente irá receber, bem como o profissional que estiver presente na sala de exame, quando necessário. Assim, pode-se notar que conforme a tensão foi aumentada acontecia similarmente um aumento da área debaixo da curva, isso significa um maior número de fótons atingindo o paciente, logo o feixe adquire mais intensidade (Soares, 2008).

Mostra-se comitadamente, que o feixe útil usado em exames radiológicos é da ordem a cima de 20 keV, sendo assim o início da curva, antes de chegar ao valor máximo de pico, é na verdade os raios X removidos através da utilização de filtração adicional (geralmente, de cobre ou alumínio), em que abaixo desse valor os feixes não contribuem para a formação da imagem e podem, ainda, serem somados a dose que esse paciente estará submetido (Dimenstein *et al*, 2022; Soares, 2008).

Além disso, quando analisa-se a localização que esse profissional irá ocupar, um estudo feito no HV-UFU, provou que a posição mais utilizada para contenção (isto é de frente para o tubo de raios X) é também a posição que possui maior chance de danos biológicos, principalmente na tireoide e nas gônadas (Silveira, 2023). As posições analisadas encontram-se na Figura 10, em que a “C” representa uma posição comum dos profissionais e, também, uma posição próxima ao que foi selecionada para os cálculos, na parte experimental e computacional, desse presente trabalho.

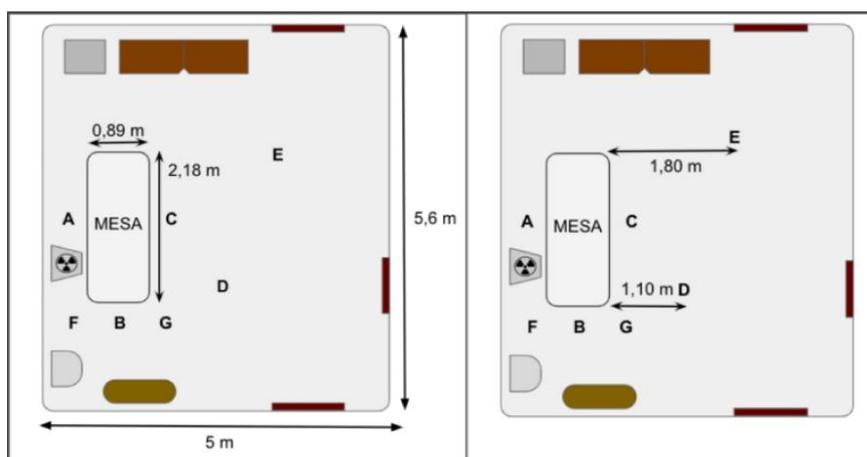


Figura 10: Análise de dose para diferentes posições (nomeadas de A até G) na sala de raio-x do HV-UFU. **Fonte:** (Silveira, 2023, p. 26).

Com todos esses dados levantados urge-se a implementação de uma cultura de segurança nesses setores e a difusão desse conhecimento para todos que trabalham nesse meio, sejam eles veterinários, técnicos e estagiários. Além disso, deve-se sempre durante a realização radiodiagnóstica serem seguidos os princípios básicos de radioproteção, isto é: a justificação, a otimização e a limitação de dose. Bem como, em todos os casos tentar ao máximo diminuir o tempo de exposição, ter constante utilização de blindagens e manter-se o mais longe possível da fonte emissora de raios X. Para que seja possível minimizar os riscos biológicos à saúde desses trabalhadores.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho, foi avaliada as doses recebidas pelos profissionais que expõe-se ao feixe primário durante sua rotina clínica, devido a necessidade de contenção dos animais. Isso foi feito mediante a revisões de literatura, dosimetria no HV-UFU e simulação pelo Método Monte Carlo. Sendo possível, assim, comparar doses de radiação espalhada e primária, estimativa de doses anuais com os níveis aceitos pela CNEN, influência na tensão utilizada e a carência da utilização dos equipamentos de proteção individual.

Através dessa metodologia, constatou-se que as mãos dos profissionais de medicina veterinária recebem 99-99,75% de dose a mais quando optam em não utilizar a luva plumbífera e mostrou-se que apenas utilizando a luva de chumbo a radiação espalhada é cerca de 46% menor. Evidenciou-se, também, que quando o uso dos EPIs é evitado há a possibilidade de ultrapassar os limites de dose nas extremidades imposto pela CNEN e, hodiernamente, o panorama encontrado são profissionais da área veterinária que desconhecem ou ignoram as normas de radioproteção, o que pode ocasionar em efeitos biológicos devido a irradiação frequente que esses indivíduos estão expostos.

Mediante a isso, esse trabalho tem um intuito de enfatizar a necessidade de disseminação de conhecimento para os órgãos de radiodiagnóstico em animais, bem como a adoção de programas e cursos para os trabalhadores que participem de exames que utilizem radiação ionizante. E além de empregar os meios de radioproteção ao serviço, zelar pela periodicidade dos equipamentos e vestimentas para que haja garantia de plena segurança ao realizar os procedimentos de rotina. Faz-se mister, ainda, a inclusão de disciplinas de radiobiologia, física das radiações e proteção radiológica nos cursos técnicos e de graduação desse âmbito, para que os alunos possuam pleno conhecimento dos riscos radioinduzidos, bem como os cuidados e princípios a serem seguidos.

Somente implementando uma cultura de segurança, que exista desde a formação até a fiscalização de sua prática durante o trabalho, haverá mais profissionais qualificados e menos possibilidade de efeitos oriundos da irradiação, preservando assim o bem social e o ambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSIS, D. A. G.; et al. A importância da prática radiológica na medicina veterinária. **Ciência Veterinária UniFil**, v. 1, n. 1, p. 8-12, 2018. Disponível em: <http://publicacoes.unifil.br/index.php/revista-vet/article/view/25/18>. Acesso em: 12 jul. 2024.

BATISTA, V. M. D.; et al. Proteção radiológica na perspectiva dos profissionais de saúde expostos à radiação. **Revista Brasileira de Enfermagem**, v. 72, p. 12-19, 2017.

BELLON, A. M. **Aspectos de proteção radiológica em uma clínica de radiodiagnóstico veterinário**. 2021. 49 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Física Médica) — Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu.

BOITTIN, F. X.; et al. The extent of irradiation-induced long-term visceral organ damage depends on cranial/brain exposure. **PLOS ONE**, v. 10, n. 4, p. e0122900, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0122900>. Acesso em: 16 jul. 2024.

BRASIL. Resolução RDC nº 611, de 9 de março de 2022. Estabelece os requisitos sanitários para a organização e o funcionamento de serviços de radiologia diagnóstica ou intervencionista. **Diário Oficial da União**, seção 1, n. 51, p. 107, 16 mar. 2022. Disponível em: https://antigo.anvisa.gov.br/documents/10181/6407467/RDC_611_2022_.pdf. Acesso em: 13 jul. 2024.

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear. **CNEN NN 3.01**, de 28 de março de 2024. Requisitos básicos de radioproteção e segurança radiológica de fontes de radiação. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/normas/grupo-3/NormaCNENNN3.01.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2024.

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Posição Regulatória 3.01/002**, de 25 de setembro de 2018. Requisitos básicos de radioproteção e segurança radiológica de fontes de radiação. Disponível em: https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/normas/grupo-3/grupo3-pr301_02.pdf. Acesso em: 28 jul. 2024.

CACAU, E. C.; SOUZA, S. S. de. Levantamento de dados sobre as condições de radioproteção veterinária em Manaus. **Brazilian Journal of Health Review**, v. 6, n. 4, p. 15604-15621, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.34119/bjhrv6n4-128>. Acesso em: 13 jul. 2024.

DIMENSTEIN, R.; et al. **Bases físicas e tecnológicas em diagnóstico por imagem**. Comissão de Proteção Radiológica, 2022. E-book. Disponível em: https://cbr.org.br/wp-content/uploads/2023/03/BASES-FISICAS-E-TECNOLOGICAS_CPR_CBR_2022_VERSA_O_CURSO_FM-1.pdf. Acesso em: 10 jul. 2024.

DOMINGOS, C. Hospital Veterinário da UFU e sua importância para Uberlândia e região. **Comunica UFU**, 13 nov. 2023. Disponível em: <https://comunica.ufu.br/noticias/2023/11/hospital-veterinario-da-ufu-e-sua-importancia-para-uberlandia-e-regiao>. Acesso em: 24 jul. 2024.

EUROPEAN SOCIETY OF RADIOLOGY (ESR). White paper on radiation protection by the European Society of Radiology. **Insights into Imaging**, v. 2, n. 4, p. 357-362, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13244-011-0108-1>. Acesso em: 13 jul. 2024.

GAROFALLO, F. Diferença entre kV (quilovoltagem) e mA (miliamperagem) na radiologia veterinária. **Felipe Garofallo**, 2024. Disponível em: <https://www.vetgarofallo.com/post/diferença-entre-kv-quilovoltagem-e-ma-miliamperagem-na-radiologia-veterinária>. Acesso em: 24 jul. 2024.

HALL, A. L.; et al. Occupational exposures to antineoplastic drugs and ionizing radiation in Canadian veterinary settings: findings from a national surveillance project. **Canadian Journal of Public Health**, v. 104, n. 7, p. e460-e465, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.17269/cjph.104.4167>. Acesso em: 13 jul. 2024.

HOOSER, S. B. Radiation emergencies: dogs and cats. **Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice**, v. 48, n. 6, p. 1103-1118, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cvsm.2018.07.009>. Acesso em: 14 jul. 2024.

HOSPITAL VETERINÁRIO. 2011. Disponível em: <http://www.hospitalveterinario.ufu.br/>. Acesso em: 24 jul. 2024.

KONICA MINOLTA comemora primeiro ano de aquisição da Sawae com crescimento em tempos de crise. **Terra**, 8 jul. 2016. Disponível em: <https://www.terra.com.br/noticias/konica-minolta-comemora-primeiro-ano-de-aquisicao-da-sawae-com-crescimento-em-tempos-de-crise,3df986ca04b6a17b986d9218cdf6b8f1r5-qa3v4p.html>. Acesso em: 24 jul. 2024.

LUCENA, R. F. de. **Implantação de um programa de controle de qualidade em equipamentos de raios X por meio de medidores não invasivos**. 2010. 112 p. Dissertação (Mestrado em Física) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MEDEIROS, M. P. C. de. **Modelagem computacional de um acelerador linear e da sala de radioterapia para cálculo da dose efetiva em pacientes submetidos a tratamento de câncer de próstata**. 2018. 234 p. Tese (Doutorado em Física) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/13158/1/MarcosPauloCavaliereDeMedeiros.pdf>.

NERO, R. A. D. **Estudos dosimétricos pelo método de Monte Carlo para irradiação de corpo total**. 2019. 115 p. Dissertação (Mestrado em Física) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

Nossa capa: Wilhelm Röntgen e a criação dos raios X. **Jornal Brasileiro de Patologia e Medicina Laboratorial**, v. 45, n. 1, p. 0, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1676-24442009000100001>. Acesso em: 16 jul. 2024.

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: 24 jul. 2024.

OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. **Física das radiações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

PALHARES, J. C. P. Consumo de água na produção animal. **Embrapa Pecuária Sudeste**, 2013. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/971085/consumo-de-agua-na-producao-animal>. Acesso em: 24 jul. 2024.

PASQUARIELLO, M. M. **Dosimetria ocupacional de médicos veterinários do Hospital Veterinário da Universidade Federal de Uberlândia durante a contenção de animais para a realização de exames radiográficos**. 2022. 44 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Medicina Veterinária) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.

PEREIRA, W.S.; KELECOM, A.; PEREIRA, J. R.S. Comparação entre a norma brasileira de radioproteção e a recomendação da International Commission on Radiological Protection publicadas em 2007. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**, v. 3, n. 2, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.15392/bjrs.v3i1.3>. Acesso em: 16 jul. 2024.

RADCAL. **Accu-Gold+**. Mai. 2019. Disponível em: <https://radcal.com/wp-content/uploads/2016/11/Radcal-Accu-Gold-Plus-Brochure.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2024.

RADCAL CORPORATION. **Accu-Gold 2: user's manual**. Mar. 2024a. Disponível em: https://radcal.com/radcalsoftwareupdate/accugoldv2/Accu-Gold2_manual.pdf.

RADCAL. **10X6-180 The Leakage and Low Level Measurements Chamber**. 6 mai. 2024b. Disponível em: <https://radcal.com/Specifications/IonChambers/10X6/10X6-180.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2024.

SILVA, O. E. da. **Estudo do exchange bias em filmes finos de NiFe/FeMn (bicamadas) e NiFe/IrMn (multicamadas)**. 2016. 195 p. Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/9257>. Acesso em: 15 jul. 2024.

SILVEIRA, G. S. B. da. **Avaliação do equivalente de dose ambiental em uma sala de radiologia veterinária**. 2023. 37 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Física Médica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023.

SOARES, J. C. de A. C. R. **Princípios de física em radiodiagnóstico**. São Paulo: Colégio Brasileiro de Radiologia e Diagnóstico por Imagem, 2008. Disponível em: https://cbr.org.br/wp-content/uploads/2019/06/Apostila-de-Fisica_2008.pdf. Acesso em: 18 ago. 2024.

SOUSA, C. H. de S.; et al. A study to elaborate a technical manual of veterinary radioprotection. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1826, n. 1, p. 012059, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1826/1/012059>. Acesso em: 12 jul. 2024.

TAUHATA, L.; et al. **Radioproteção e dosimetria: fundamentos**. 10. ed. Rio de Janeiro: Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2014. 372 p.

TAVARES, O. J. **Avaliação da proteção radiológica ocupacional em uma sala de radiologia intervencionista**. 2020. 31 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Física Médica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

WERNER, C. J. **MCNP user's manual: code version 6.2**. Manual Rev. 0. Los Alamos National Laboratory, LA-UR-17-29981, 2017.

WOJCIK, A.; HARMS-RINGDAHL, M. Radiation protection biology then and now. **International Journal of Radiation Biology**, v. 95, n. 7, p. 841-850, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09553002.2019.1589027>. Acesso em: 12 jul. 2024.

YORIYAZ, H. Método de Monte Carlo: princípios e aplicações em física médica. **Revista Brasileira de Física Médica**, v. 3, n. 1, p. 141-149, 2009.