



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CIÊNCIAS DA SAÚDE DE PORTO ALEGRE
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS DA INFORMAÇÃO E
GESTÃO EM SAÚDE

Gustavo Bernardes da Silva

**Análise do método indireto para a avaliação da qualidade dos equipamentos
radiográficos a partir dos espectros de raios X para aplicações em
radiodiagnóstico**

Porto Alegre

2023

Gustavo Bernardes da Silva

**Análise do método indireto para a avaliação da qualidade dos equipamentos
radiográficos a partir dos espectros de raios X para aplicações em
radiodiagnóstico**

Dissertação no Programa de Mestrado Acadêmico em
Tecnologias da Informação e Gestão em Saúde da
Universidade Federal de Ciências da Saúde de Porto
Alegre.

Orientadora: Prof. Dr. Thatiane Alves Pianoschi
Co-Orientadora: Prof. Dr Viviane Rodrigues Botelho

Porto Alegre

2023

Catálogo na Publicação

BERNARDES DA SILVA, GUSTAVO

Análise do método indireto para a avaliação da qualidade dos equipamentos radiográficos a partir dos espectros de raios X para aplicações em radiodiagnóstico / GUSTAVO BERNARDES DA SILVA. -- 2023.

132 p. : 30 cm.

Dissertação (mestrado) -- Universidade Federal de Ciências da Saúde de Porto Alegre, Programa de Pós-Graduação em Tecnologias da Informação e Gestão em Saúde, 2023.

Orientador(a): Thatiane Alves Pianoschi ;
coorientador(a): Viviane Rodrigues Botelho.

1. Método indireto. 2. Espectros de raios X. 3. Qualidade do feixe. 4. Modelos matemáticos. I. Título.

Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da UFCSPA com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Gustavo Bernardes da Silva

Análise do método indireto para a avaliação da qualidade dos equipamentos radiográficos a partir dos espectros de raios X para aplicações em radiodiagnóstico

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias da Informação e Gestão em Saúde da Universidade Federal de Ciências da Saúde de Porto Alegre como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Tecnologia da Informação e Gestão em Saúde.

Orientador: Prof. Dr. Thatiane Alves Pianoschi

Co-orientador: Prof. Dr. Viviane Rodrigues Botelho

Aprovada em: _____ de _____ de _____.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Alexandre Bonatto

Universidade Federal de Ciências da Saúde de Porto Alegre

Prof. Dr. Cassiana Viccari Sacilotto

Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto

Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Jorge Homero Wilches Visbal

Universidad del Magdalena - Colômbia

AGRADECIMENTOS

Gostaria de iniciar agradecendo a Deus pelo dom da minha vida e por todos os presentes e provações que eu recebi até então nesta trajetória. Em segundo, gostaria de agradecer a minha família, em especial os meus pais e meus irmãos, sem eles não teria chegado até onde cheguei. Por trás de quase toda história bem-sucedida, há uma rede de apoio sólida que, acima de tudo, está sempre torcendo para que o melhor aconteça e acolhendo quando ocorrem deslizos no percurso. Agradeço a minha companheira Evelyn, por ter me apoiado incansavelmente e, por muitas vezes, ter sido tolerante comigo nos momentos que estive mais distante e com sentimentos excessivamente densos, como inseguranças, frustrações e angústias. O teu amor, admiração e apoio foram e são meu combustível diário e sem isso não teria chegado até aqui (Te amo!) (...)

Agradeço as minhas orientadoras, prof^a Dra. Thatiane e prof^a Dra. Viviane por terem acreditado no trabalho e assim termos perseverado juntos ao longo desses anos. Foram anos desafiadores, com muitas mudanças em todas as esferas da minha vida, além de todo um contexto de incerteza e pandemia. Nesse contexto, ingressar no PPGTIG foi muito mais do que dar continuidade a um trabalho e seguir com a formação continuada, foi construir uma jornada de maturidade profissional e pessoal, com profissionais de excelência ao meu lado e com muitos outros desafios que se apresentaram. Ao longo de semanas, fazíamos com consistência um trabalho árduo e desafiador, mas isso foi sendo acompanhado de um outro árduo trabalho e com um conjunto de mudanças significativas na minha vida, que envolvem desde a mudança de moradia (por duas vezes) até tomada de decisões importantes para que hoje eu conseguisse chegar até aqui, concluindo mais esse ciclo acadêmico.

Agradeço a comunidade científica, que lideram um caminho próspero e cheio de descobertas. É necessário expressar gratidão, especialmente em uma época em que o pensamento científico, o senso crítico e a curiosidade estão sendo suprimidos pela disseminação excessiva de informações falsas, falta de discernimento crítico e falta de interesse pelo conhecimento. Parafraseando Sir. Isaac Newton: “se vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes”.

Por fim e não menos importante, finalizo essa seção de agradecimentos com um trecho traduzido de um dos meus poemas favoritos, “The road not taken” de Robert Frost: *“Mais à frente hei de dar, saudoso, o meu relato; / Entre o passado e mim, uma*

distância imensa: / A estrada se partiu no bosque amarelado – Tomei dos dois caminhos o menos trilhado, / E justamente isso fez a diferença.

RESUMO

Este estudo analisou o método indireto de estimação de espectros de raios X, utilizando o modelo proposto por Archer & Wagner (1988), e sua aplicação na avaliação da qualidade dos feixes de raios X em exames radiográficos. Foram coletados dados experimentais e simulados, obtendo curvas de transmissão experimental e espectros em diferentes energias de raios X. Foram aplicados modelos matemáticos e técnicas de interpolação para estimar os coeficientes de atenuação necessários. Os parâmetros de qualidade do feixe, como 1ª Camada Semiredutora (CSR), 2ª CSR e coeficiente de homogeneidade (CH), foram calculados e comparados com os padrões de qualidade estabelecidos. A interpolação de Spline Cúbica apresentou a menor margem de erro na reconstrução dos espectros, superando outros modelos existentes. A análise dos parâmetros de qualidade indicou que a utilização do parâmetro CH pode resultar em uma melhor concordância com os espectros simulados. O método de busca exaustiva revelou incertezas na estimação dos parâmetros do modelo, destacando a necessidade de explorar a relação entre esses parâmetros e os espectros reconstruídos. A filtragem proposta por Archer & Wagner reduziu significativamente os erros nos espectros reconstruídos, especialmente em energias abaixo de 95 kV. Em suma, este estudo proporcionou uma compreensão abrangente do método indireto, suas limitações e possíveis soluções. Sugere-se a incorporação do parâmetro CH em futuras otimizações do modelo. Essas descobertas podem contribuir para o desenvolvimento de uma ferramenta computacional que estime espectros de raios X e parâmetros de qualidade, auxiliando na prática clínica em radiodiagnóstico.

Palavras-chave: espectro de raios X, método indireto, estimação de espectros, qualidade do feixe, exames radiográficos.

ABSTRACT

This study analyzed the indirect method for estimating X-ray spectra using the model proposed by Archer & Wagner (1988) and its application in assessing the quality of X-ray beams in radiographic examinations. Experimental and simulated data were collected, obtaining experimental transmission curves and spectra at different X-ray energies. Mathematical models and interpolation techniques were applied to estimate the necessary attenuation coefficients. Quality parameters of the beam, such as the 1st Half-Value Layer (HVL), 2nd HVL, and coefficient of homogeneity (CH), were calculated and compared with established quality standards. Cubic Spline interpolation showed the lowest reconstruction error compared to other existing models. The analysis of quality parameters indicated that the use of the CH parameter could result in better agreement with simulated spectra. The exhaustive search method revealed uncertainties in estimating the model parameters, emphasizing the need to explore the relationship between these parameters and the reconstructed spectra. The proposed filtering technique by Archer & Wagner significantly reduced errors in the reconstructed spectra, particularly at energies below 95 kV. In conclusion, this study provided a comprehensive understanding of the indirect method, its limitations, and potential solutions. The incorporation of the CH parameter in future model optimizations is suggested. These findings may contribute to the development of a computational tool for estimating X-ray spectra and quality parameters, thereby assisting in clinical practice in radiodiagnostics.

Keywords: *X-ray spectrum, indirect method, spectrum estimation, beam quality, radiographic examinatio*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS.....	19
2.1 OBJETIVO GERAL	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
4.1 ESPECTRO DE RAIOS X	20
4.2 ATENUAÇÃO DO FEIXE DE RAIOS X	22
4.3 CAMADA SEMIRREDUTORA E COEFICIENTE DE HOMOGENEIDADE	24
4.4 QUALIDADES DE RADIAÇÃO DE REFERÊNCIA	25
4.4 MÉTODOS DIRETOS E MÉTODOS INDIRETOS DE ESTIMAÇÃO DE ESPECTROS	27
5 TRABALHOS RELACIONADOS	28
5.1 ESTADO DA ARTE DOS MÉTODOS INDIRETOS	28
5.2 ESTADO DA ARTE DOS MODELOS PARA ESTIMAÇÃO DOS COEFICIENTES DE ATENUAÇÃO	31
6 METODOLOGIA	35
6.1 SÍNTESE DO MÉTODO INDIRETO	35
6.1.1 Dedução matemática do método indireto	36
6.1.2 A Função de transmissão Td de Archer & Wagner (1988)	40
6.2 OBTENÇÃO DE DADOS	42
6.2.1 Dados experimentais	43
6.2.2 Dados simulados	44
6.3 METODOLOGIAS PARA CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO	45
6.3.1 Coeficientes de atenuação a partir de modelos da literatura	46
6.3.2 Coeficientes de atenuação através de interpolação	47
6.4 ANÁLISE DAS METODOLOGIAS PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE (1ª E 2ª CSR E CH)	48
6.4.1 Metodologia de cálculo dos parâmetros de qualidade pelas curvas de transmissão	49
6.4.2 Cálculo dos parâmetros de qualidade a partir do espetro.	50
6.5 ANÁLISE DO MODELO DE ARCHER & WAGNER	50
6.5.1 Problemas de estimação dos parâmetros do modelo	50
6.5.2 Método de busca exaustiva	52
6.5.3 Aplicação da técnica de filtragem de Archer & Wagner (1989)	52

6.5.4 Métricas de análise	53
6.6 ESTIMAÇÃO DOS ESPECTROS A PARTIR DOS DADOS EXPERIMENTAIS	55
7 RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
7.1 DADOS EXPERIMENTAIS	55
7.2 DADOS SIMULADOS	56
7.3 RESULTADOS DA ANÁLISE DOS COEFICIENTES DE ATENUAÇÃO NO MÉTODO INDIRETO	57
7.4 CÁLCULO DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DOS DADOS SIMULADOS	58
7.5 CÁLCULO DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE PELOS ESPECTROS	60
7.6 RECONSTRUÇÕES DOS ESPECTROS PELO MÉTODO BUSCA EXAUSTIVA	64
7.7 APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE FILTRAGEM	68
7.8 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA EM DADOS EXPERIMENTAIS	71
7.8.1 Cálculo dos parâmetros de qualidade	71
7.8.2 Reconstrução espectral pela busca exaustiva com filtragem	75
7.9 CONCLUSÃO	78
8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	79
8.1 ANÁLISE DE IDENTIFICABILIDADE DOS PARÂMETROS DO MODELO	79
8.2 ANÁLISE APROFUNDADA DA CORRELAÇÃO ENTRE O MÉTODO INDIRETO E OS PARÂMETROS DE QUALIDADE	79
8.3 PROPOSIÇÃO DE UMA OTIMIZAÇÃO NÃO LINEAR CONSIDERANDO PARÂMETROS ADICIONAIS	80
8.4 PROPOSIÇÃO DE UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL	80
REFERÊNCIAS	81
APÊNDICE A – CURVAS DE TRANSMISSÃO EXPERIMENTAIS	87
APÊNDICE B – CURVAS DE TRANSMISSÃO E ESPECTROS SIMULADOS	93
APÊNDICE C – MÉTODO DE BUSCA EXAUSTIVA DE DADOS SIMULADOS	93
APÊNDICE D – TÉCNICA DE FILTRAGEM – DADOS SIMULADOS	110
APÊNDICE E – MÉTODO DE BUSCA EXAUSTIVA E TÉCNICA DE FILTRAGEM – DADOS EXPERIMENTAIS	123

REFERÊNCIAS

- ALAM, Md Didarul; NASIM, Syeda S.; HASAN, Samiul. **Recent progress in CdZnTe based room temperature detectors for nuclear radiation monitoring**. Progress in Nuclear Energy, v. 140, p. 103918, 2021.
- AKÇA, Burcu; ERZENEÖĞLU, Salih Z. The mass attenuation coefficients, electronic, atomic, and molecular cross sections, effective atomic numbers, and electron densities for compounds of some biomedically important elements at 59.5 keV. Science and Technology of Nuclear Installations, v. 2014, 2014.
- ANKERHOLD, Ulrike. Catalogue of x-ray spectra and their characteristic data-ISO and DIN radiation qualities, therapy and diagnostic radiation qualities, unfiltered x-ray spectra. 2000.
- ARCHER, Benjamin R.; WAGNER, Louis K. **A Laplace transform pair model for spectral reconstruction**. Medical physics, v. 9, n. 6, p. 844-847, 1982.
- ARCHER, Benjamin R.; WAGNER, Louis K. **Determination of diagnostic x-ray spectra with characteristic radiation using attenuation analysis**. Medical physics, v. 15, n. 4, p. 637-641, 1988.
- ARCHER, B. R.; WAGNER, L. K. A modified x-ray spectra reconstruction technique. Physics in Medicine & Biology, v. 34, n. 4, p. 539, 1989.
- ATTIX, Frank Herbert. **Introduction to radiological physics and radiation dosimetry**. John Wiley & Sons, 2008.
- BAIRD, L. C. X-ray spectra vs attenuation data: A theoretical analysis. Medical physics, v. 8, n. 3, p. 319-323, 1981.
- BERGER, Martin J.; HUBBELL, John Howard. XCOM: **Photon cross sections on a personal computer**. National Bureau of Standards, Washington, DC (USA). Center for Radiation Research, 1987.
- BIRCH, R. Catalogue of spectral data for diagnostic x-rays. Hospital Physicists' Association, v. 8, p. 41, 1979.
- BELL, G. E. Spectral distribution in the continuous X-ray spectrum and the specification of X-ray quality. **The British Journal of Radiology**, v. 9, n. 106, p. 680-688, 1936.
- BRASIL, Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Radiodiagnóstico Médico: Desempenho de Equipamentos e Segurança/Ministério da Saúde**, Agência Nacional de Vigilância Sanitária. – Brasília:

- Ministério da Saúde, 2005. Disponível em: https://www.saude.gov.br/images/imagens_migradas/upload/arquivos/2013-08/manual_radiodiagnostico.pdf. Acesso em: 04 de abril de 2022
- BRASIL, Ministério da Saúde. **DATA SUS: Tabnet. 2020**. Disponível em: <http://tabnet.datasus.gov.br/cgi/tabcgi.exe?sia/cnv/qauf.def>. Acesso em: 20 fev. 2021
- BRASIL. **Resolução RDC Nº 611, de 09 de março de 2022**. Disponível em: <<https://in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-rdc-n-611-de-9-de-marco-de-2022-386107075>> Acesso em: 10 de abril de 2022.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e comunicações. Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Norma CNEN NN 3.01, Resolução 164/14 – Diretrizes básicas de proteção radiológica**. Rio de Janeiro – RJ, 2014.
- COSTA, Alessandro M.; POTIENS, Maria da Penha A. Application of a model based on a pair of Laplace transforms for standard low-energy X-ray beams spectral reconstruction. 2009.
- CORREA, Eduardo de Lima. **Metodologia de controle de qualidade e implantacao de campos padroes de radiacao X, nivel mamografia, seguindo a norma IEC 61267**. 2010.
- CURRY III, T.S.; DOWDEY, J.E.; MURRY, R.C. (1990). **Christensen's Physics of Diagnostic Radiology**. 4.ed. Philadelphia, Lea & Febiger.
- CHAI, Tianfeng; DRAXLER, Roland R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE). **Geoscientific model development discussions**, v. 7, n. 1, p. 1525-1534, 2014.
- CHEN, Suk Chiang; JONG, Wei Loong; HARUN, Ahmad Zaky. **Evaluation of x-ray beam quality based on measurements and estimations using SpekCalc and IPEM78 models**. **The Malaysian journal of medical sciences: MJMS**, v. 19, n. 3, p. 22, 2012.
- CRANLEY, K., Gilmore B, Fogarty G, Desponds L. IPEM report 78: catalogue of diagnostic x-ray spectra and other data. 1997; CD-Rom edition.
- DA SILVEIRA GATTO, Leandro Barbosa *et al.* Comparison of spectra and mean glandular dose (MGD) with tube voltage used in digital mammography for simulated, metrological and clinical cases. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 176, p. 109862, 2021.
- DELGADO, Víctor. Comparison between measured and predicted attenuation curves of x-ray beams. **Medical physics**, v. 26, n. 10, p. 2183-2189, 1999.

- DI CASTRO, E. *et al.* The use of cadmium telluride detectors for the qualitative analysis of diagnostic x-ray spectra. **Physics in Medicine & Biology**, v. 29, n. 9, p. 1117, 1984.
- ESCARPINATI, Mauricio Cunha. Desenvolvimento de um sistema computacional para utilização em procedimentos de controle de qualidade em equipamentos mamográficos. 2007. **Tese de Doutorado**. Universidade de São Paulo
- FRANCISCATTO, Priscila Cerutti. Caracterização das qualidades de radiação X seguindo as recomendações da norma IEC 61267 no laboratório de calibração do IPEN. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2009.
- FERREIRA, Norma Sandra de Almeida. As pesquisas denominadas "estado da arte". **Educação & sociedade**, v. 23, p. 257-272, 2002.
- FIRMINO, Sandro Fernandes. Transmissão e fluência de fótons na área de radiodiagnóstico para diferentes configurações de feixes e blindagens. 2010.
- GREENING, J. R. The determination of x-ray wavelength distributions from absorption data. **Proceedings of the Physical Society**. Section A, v. 63, n. 11, p. 1227, 1950.
- INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS (ICRU). Radiation Quantities and Units, Washington, D.C;1983. (ICRU-33)
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION *et al.* Medical diagnostic X-ray equipment-Radiation conditions for use in the determination of characteristics. **IEC 61267**, 1994.
- HUBBELL, John Howard. Photon mass attenuation and energy-absorption coefficients. **The International Journal of Applied Radiation and Isotopes**, v. 33, n. 11, p. 1269-1290, 1982.
- HUANG, Pin-Hua; KASE, Kenneth R.; BJÄRNGÅRD, Bengt E. Spectral characterization of 4 MV bremsstrahlung by attenuation analysis. **Medical physics**, v. 8, n. 3, p. 368-374, 1981.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61267: **Medical diagnostic x-ray equipment - Radiation conditions for use in the determination of characteristics**. Geneva, 2005.
- KHARRATI, Hedi; ZARRAD, Boubaker. Computation of beam quality parameters for Mo/Mo, Mo/Rh, Rh/Rh, and W/Al target/filter combinations in mammography. **Medical physics**, v. 30, n. 10, p. 2638-2642, 2003.
- KÜNZEL, Roseli *et al.* X-ray spectroscopy in mammography with a silicon PIN photodiode with application to the measurement of tube voltage: X-ray spectroscopy

- in mammography with a silicon photodiode. **Medical physics**, v. 31, n. 11, p. 2996-3003, 2004.
- KÜNZEL, Roseli. Espectrometria de raios X em mamografia aplicada à proteção radiológica. 2006. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- KONKEL, Frank. **What NSA's influence on NIST standards means for feds.** [S. l.], 7 set. 2013. Disponível em: <https://www.nist.gov/pml>. Acesso em: 5 maio 2022.
- LACERDA, Marco Aurélio de Sousa; SILVA, Teógenes Augusto da; OLIVEIRA, Arno Heeren de. Influência da metodologia de avaliação da camada semirredutora em radiologia diagnóstica. **Radiologia Brasileira**, v. 40, n. 5, p. 331-336, 2007
- LEITE, Diego de Oliveira; PRADO, Rogério Junqueira. Espectroscopia no infravermelho: uma apresentação para o Ensino Médio. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 34, 2012.
- LINKE, Arlene. **Espectroscopia de raios X utilizando o espalhamento Compton.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2008.
- MALEZAN, Alex. Reconstrução espectral de tubos de radiação odontológicos usando a transformada inversa de Laplace da curva de atenuação. 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- MANJUNATHA, H. C. *et al.* Empirical formulae for mass attenuation and energy absorption coefficients from 1 keV to 20 MeV. **The European Physical Journal D**, v. 71, n. 9, p. 1-22, 2017.
- OKINO, Hiroki *et al.* Measurement of response function of CdTe detector using diagnostic x-ray equipment and evaluation of monte carlo simulation code. *Nihon Hoshasen Gijutsu Gakkai Zasshi*, v. 70, n. 12, p. 1381-1391, 2014.
- OKUNO, Emico; YOSHIMURA, Elisabeth Mateus II. **Física das radiações.** Volume 1, p.40.
- OKUNADE, Akintunde A. Parameters and computer software for the evaluation of mass attenuation and mass energy-absorption coefficients for body tissues and substitutes. **Journal of Medical Physics/Association of Medical Physicists of India**, v. 32, n. 3, p. 124, 2007.
- PAMPLONA, Gustavo SP; COSTA, Alessandro M. Determinação do espectro de raios X a partir da curva de transmissão para um equipamento de radiografia dentária. **Revista Brasileira de Física Médica**, v. 4, n. 2, p. 23-25, 2010.
- POLUDNIOWSKI, Gavin *et al.* **A validation of Spekpy: A software toolkit for modelling X-ray tube spectra.** *Physica Medica*, v. 75, p. 44-54, 2020.

POLUDNIOWSKI, Gavin *et al.* Spekpy v2. 0—a software toolkit for modeling x-ray tube spectra. *Medical Physics*, v. 48, n. 7, p. 3630-3637, 2021.

RADIOLOGY CAFÉ. **Production of X-rays.** Disponível em: <https://www.radiologycafe.com/radiology-trainees/frcr-physics-notes/production-of-x-rays>. Acesso em: 20 fev. 2021.

RUBIO, M.; MAINARDI, R. T. Determination of x-ray spectra including characteristic line intensities from attenuation data. *Physics in Medicine & Biology*, v. 29, n. 11, p. 1371, 1984.

SANTOS, Josilene C. *et al.* Direct measurement of clinical mammographic x-ray spectra using a CdTe spectrometer. ***Medical Physics***, v. 44, n. 7, p. 3504-3511, 2017.

SANTOS, Ana Carolina G. dos; COSTA, Alessandro M. Determinação do Espectro de Raios-x Terapêuticos de Quilovoltagem a Partir da Curva de Atenuação, ***Revista Brasileira de Física Médica***, v. 10, n. 3, p. 13-15, 2018.

SANTOS, Josilene Cerqueira *et al.* Determinação da camada semirredutora e da tensão aplicada a partir de espectros emitidos por um tubo de raios X. ***Revista Brasileira de Física Médica***, v. 10, n. 3, p. 28-33, 2016.

SANTOS, Ana Carolina; VISBAL, Jorge Homero Wilches; DA COSTA, Alessandro Martins. Determinación del espectro de energía de un haz de rayos X terapéutico de kilovoltaje a partir de su curva de atenuación. ***Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales***, v. 44, n. 170, p. 142-152, 2020.

SOUZA, Daiane Miron de. Reconstrução espectral de feixes de raios X diagnósticos. 2017. Dissertação (Mestrado em Física Aplicada à Medicina e Biologia) - Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2017. doi:10.11606/D.59.2018.tde-18012018-152142. Acesso em: 2023-05-08.

SECHOPOULOS, Ioannis *et al.* Monte Carlo reference data sets for imaging research: Executive summary of the report of AAPM Research Committee Task Group 195. ***Medical physics***, v. 42, n. 10, p. 5679-5691, 2015.

SILVA, Gustavo Bernardes da. **Aplicação da Transformada de Laplace para obtenção do espectro de raios X móvel.** 2020. 13 f. TCC (Graduação) - Curso de Física Médica, Ciências Exatas e Sociais Aplicadas, Universidade Federal de Ciências da Saúde de Porto Alegre, Porto Alegre, 2020.

SOUZA, K. C. Espectros e Qualidades de Raios X para Uso em Radiodiagnóstico e Calibração de Equipamentos. **Master Degree Dissertation, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro**, 1996.

SOUZA, Marcela Tavares de; SILVA, Michelly Dias da; CARVALHO, Rachel de. **Revisão integrativa: o que é e como fazer**. Einstein (São Paulo), v. 8, p. 102-106, 2010.

SILBERSTEIN, Ludwik. Determination of the spectral composition of X-ray radiation from filtration data. **JOSA**, v. 22, n. 5, p. 265-280, 1932.

TAUHATA, Luiz *et al.* **Radioproteção e dosimetria: fundamentos**. Rio de Janeiro, 2003.

TOMAL, Alessandra *et al.* Monte Carlo simulation of the response functions of CdTe detectors to be applied in x-ray spectroscopy. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 100, p. 32-37, 2015.

WILCHES, Visbal, J. H., Apaza-Veliz, D. G., & Nicolucci, P. (2022). Spectral reconstruction of kilovoltage photon beams using generalized simulated annealing. *Uniciencia*, 36(1). <https://doi.org/10.15359/ru.36-1.15>