DISCIPLINARUM SCIENTIA *Disciplinarum Scientia.* **Série: Naturais e Tecnológicas**
Santa Maria, v. 27, n. 3, p. 143-155, 2026
Recebido em: 28.04.2026. Aprovado em: 12.06.2026.
ISSN 2176-462X | DOI: doi.org/10.37779/nt.v27i3.5817

IMPLICAÇÕES DO ENDURECIMENTO DO FEIXE DE RAIOS X NA OTIMIZAÇÃO DE TÉCNICAS EM RADIOGRAFIA DE TÓRAX

IMPLICATIONS OF X-RAY BEAM HARDENING IN THE OPTIMIZATION OF CHEST RADIOGRAPHY TECHNIQUES

Stéfani König Alves da Silva[1], João Vítor Dacas[2], Mateus Marin[3], Marina Alves[4], Dauane Teresinha Silveira da Silva[5], Jéssica Aline Silva dos Santos[6], Maurício Pacheco Cavalheiro[7] e Thiago Victorino Claus[8]

RESUMO

Este estudo objetivou avaliar a modulação do feixe de raios X, por meio do aumento do kV e da redução do mAs (regra dos 15%), na dose de radiação e na qualidade de imagem (QI) em radiografias de tórax. A metodologia utilizou um fantoma semi-anatômico e quatro técnicas progressivas, incluindo a avaliação dos descritores de QI por meio de métricas quantitativas, como relação sinal-ruído (RSR), relação contraste-ruído (RCR) e contraste (CR), obtidas por análise de histograma e regiões de interesse (ROI). Os resultados mostraram redução expressiva na dose de entrada na pele (do inglês, *Entrance Skin Air Kerma* - ESAK), com valores de 0,284 mGy (Técnica 3) e 0,147 mGy (Técnica 4), ambos situando-se abaixo do nível de referência diagnóstico de 0,4 mGy preconizado pela IN nº 90/2021. O fator de transmissão elevou-se para 5,70% e 6,69%, respectivamente, confirmando o endurecimento do feixe com maior penetrabilidade. Na discussão, as Técnicas 3 e 4 demonstraram doses efetivas (0,076 e 0,048 mSv) inferiores à média da literatura, com a Técnica 4 sendo a mais eficiente pelo elevado valor da Figura de Mérito. Conclui-se que a modulação do feixe de raios X exerce influência mais pronunciada na redução da ESAK do que nos descritores de QI, os quais sofrem impacto menos significativo; ainda assim, o aumento da transmissão do feixe resulta em maior quantidade de informação atingindo o receptor de imagem.

Palavras-chave: Radiografia; Otimização da dose de radiação; Qualidade da imagem; Kerma; Proteção radiológica.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate X-ray beam modulation through an increase in tube voltage (kV) and a reduction in tube current-time product (mAs) according to the 15% rule, assessing its effects on radiation dose and image quality (IQ) in chest radiography. The methodology employed a semi-anthropomorphic phantom and four progressive exposure techniques, including the evaluation of IQ descriptors using quantitative metrics such as Signal-to-Noise Ratio (SNR), Contrast-to-Noise Ratio (CNR), and Contrast Ratio (CR), obtained through histogram analysis and Regions of Interest (ROIs). The results demonstrated a substantial reduction in Entrance Skin Air Kerma (ESAK), with values of 0.284 mGy (Technique 3) and 0.147 mGy (Technique 4),

1 E-mail: stefani9046@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-8780-3777
2 E-mail: joaovitordacas@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-3558-332X
3 E-mail: mateusmarin28@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-0208-1865
4 E-mail: marinaluizalves@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-8226-5490
5 E-mail: dauanetss@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-1823-6253
6 E-mail: jessicaalinedesrosiers@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-7431-0389
7 E-mail: mauriciopcoficial@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8882-5669
8 E-mail: thiago.claus@fn.edu.br . ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1446-0721

both below the diagnostic reference level of 0.4 mGy established by Brazilian Normative Instruction No. 90/2021. The transmission factor increased to 5.70% and 6.69%, respectively, confirming beam hardening and enhanced X-ray penetrability. In the discussion, Techniques 3 and 4 yielded effective doses (0.076 and 0.048 mSv, respectively) lower than the average values reported in the literature, with Technique 4 demonstrating the highest efficiency due to its superior Figure of Merit. It was concluded that X-ray beam modulation exerts a more pronounced effect on reducing ESAK than on image quality descriptors, which were less significantly affected. Nevertheless, the increased beam transmission resulted in a greater amount of diagnostic information reaching the image receptor.

Keywords: *Radiography; Radiation dose optimization; Image quality; Kerma; Radiation protection.*

INTRODUÇÃO

A implementação da radiologia digital impôs a necessidade de analisar, de forma sistemática, a influência dos parâmetros técnicos de aquisição e dos algoritmos de pós-processamento sobre os descritores de qualidade de imagem (QI) e dose de radiação (Bushberg *et al*., 2020).

Diferentemente dos sistemas analógicos, os detectores digitais apresentam uma função resposta que estabelece a relação entre a quantidade de radiação transmitida e o sinal gerador da imagem, constituindo um feedback para os profissionais da radiologia (Feitosa, Nascimento e Nersissian, 2024).

As grandezas dosimétricas são complementares e descrevem diferentes aspectos da interação da radiação ionizante durante a prática clínica. A dose absorvida (D) quantifica a energia depositada por unidade de massa (Gy), sendo a base física da dosimetria. A kerma no ar na superfície da pele (do inglês, Entrance skin air kerma - ESAK) representa essa energia na superfície do paciente, incluindo o retroespalhamento, sendo o principal indicador prático da exposição em exames radiológicos (Bushberg *et al*., 2020; Feitosa, Nascimento e Nersissian, 2024). Já a dose efetiva (DE) pondera as doses nos diferentes órgãos de acordo com sua radiossensibilidade, conforme a Comissão Internacional de Proteção Radiológica, permitindo estimar o risco biológico global associado à exposição (ICRP, 2007).

No Brasil, os níveis de referência em radiodiagnóstico para pacientes adultos típicos são definidos em termos de ESAK, conforme o Anexo II da Instrução Normativa nº 90/2021, que estabelece, por exemplo, o valor de 0,4 mGy para radiografia de tórax em projeção póstero-anterior (PA) (Brasil, 2022). A radiografia de tórax permanece como um dos exames mais realizados globalmente, em virtude de sua ampla disponibilidade e elevada eficácia como método de triagem para diversas patologias cardiorrespiratórias (Fauber, 2020).

Para realizar tais validações de forma ética e reprodutível, o uso de simuladores (fantomas) semi-anatômicos tem se mostrado uma metodologia robusta na pesquisa em Física Médica (Uffmann & Schaefer-Prokop, 2009). Esses dispositivos permitem mimetizar as propriedades de atenuação e espalhamento do corpo humano, possibilitando a coleta de dados dosimétricos precisos sem a exposição desnecessária de pacientes (Dewerd & Lawless, 2014).

A variação dos parâmetros radiográficos entre as técnicas avaliadas reflete a aplicação prática da regra dos 15%, segundo a qual o aumento de aproximadamente 15% na tensão do tubo (kV) resulta na duplicação da exposição no receptor de imagem, sendo necessária a redução de 50% no produto corrente-tempo (mAs) para manutenção da exposição constante (Fauber, 2020; Bushong, 2022). Esse ajuste promove o endurecimento do feixe, uma vez que fótons de maior energia apresentam maior poder de penetração, contribuindo para a redução da dose de radiação na entrada da pele do paciente durante o exame clínico (Bushong, 2022).

Este estudo teve como objetivo avaliar o efeito do endurecimento do feixe de raios X na otimização de técnicas radiográficas de tórax, analisando sua influência sobre a dose de radiação, a transmissão do feixe e a qualidade da imagem.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa caracteriza-se como experimental e laboratorial, com abordagem quantitativa, seguindo as orientações metodológicas propostas por Pereira *et al.* (2018). O estudo foi realizado no laboratório de radiodiagnóstico dos cursos de graduação de Radiologia e Física Médica, como parte das pesquisas desenvolvidas durante a disciplina de Radiodiagnóstico da Universidade Franciscana (UFN).

2.1 AVALIAÇÃO DOSIMÉTRICA DO FEIXE DE RAIOS X

As medições dosimétricas foram realizadas na projeção póstero-anterior (PA) de tórax, utilizando um sistema dosimétrico da marca Radical, modelo 9010. A câmara de ionização foi posicionada, de forma alternada, na entrada e na saída do feixe de raios X em relação a um fantoma semi-anatômico, conforme ilustrado na Figura 1(a). A dose de entrada na superfície do paciente (ESAK) foi determinada na face anterior do fantoma, enquanto o kerma incidente no ar transmitido (Ks) foi mensurado na face posterior, imediatamente antes do receptor de imagem. A configuração geométrica empregada no experimento encontra-se apresentada na Figura 1(a).

As exposições foram realizadas com quatro combinações de técnicas de exposição: Técnica 1 (81 kV; 20 mAs), Técnica 2 (90 kV; 10 mAs), Técnica 3 (102 kV; 5 mAs) e Técnica 4 (120 kV; 2 mAs), selecionadas diretamente no painel de controle do equipamento.

Para cada uma das quatro técnicas radiográficas avaliadas, as medições de ESAK e Ks foram realizadas em triplicata. A partir dos valores obtidos, calcularam-se a média aritmética e o desvio padrão. O percentual de Transmissão (T) foi determinado como a razão entre o Ks e o ESAK, conforme a Equação 1:

$$T(\%) = \left[\left(\frac{Ks}{ESAK}\right) \times 100\right] \quad (1)$$

A estimativa das doses absorvidas em órgãos e da DE foi realizada por simulação computacional no software PCXMC 2.0 (Stuk, 2026), baseado no Método de Monte Carlo. Os parâmetros de entrada foram definidos para reproduzir a geometria do exame e o espectro do feixe de raios X. Foram simulados 200.000 fótons por execução, com ângulo de ânodo de 12,5° e filtração total em milímetros de alumínio (mmAl), ajustada conforme a Camada Semirredutora (CSR), com valores de 3,2; 3,4; 3,6 e 4,1 mmAl para as técnicas 1, 2, 3 e 4, respectivamente. As estruturas avaliadas no fantoma adulto foram escápula, costelas, coluna torácica, coluna lombar e rins, selecionadas pela radiossensibilidade e localização no campo irradiado. O software permitiu a inserção dos parâmetros geométricos e do tamanho do campo, possibilitando a comparação entre as técnicas radiográficas.

2.2 AQUISIÇÃO DAS IMAGENS

Para a obtenção das radiografias manteve-se as mesmas condições geométricas da avaliação dosimétrica, em conformidade com procedimentos clínicos (Figura 1B). As imagens foram capturadas empregando um campo de radiação de dimensões 35 x 43 cm², utilizando receptor de imagem (RI) correspondente em tamanho. Foram obtidas quatro imagens do fantoma semi-anatômico (Vianna; Schwarz, 2020), uma para cada técnica para a vista PA do Tórax. A fim de assegurar a padronização experimental, todas as aquisições foram realizadas com o mesmo RI.

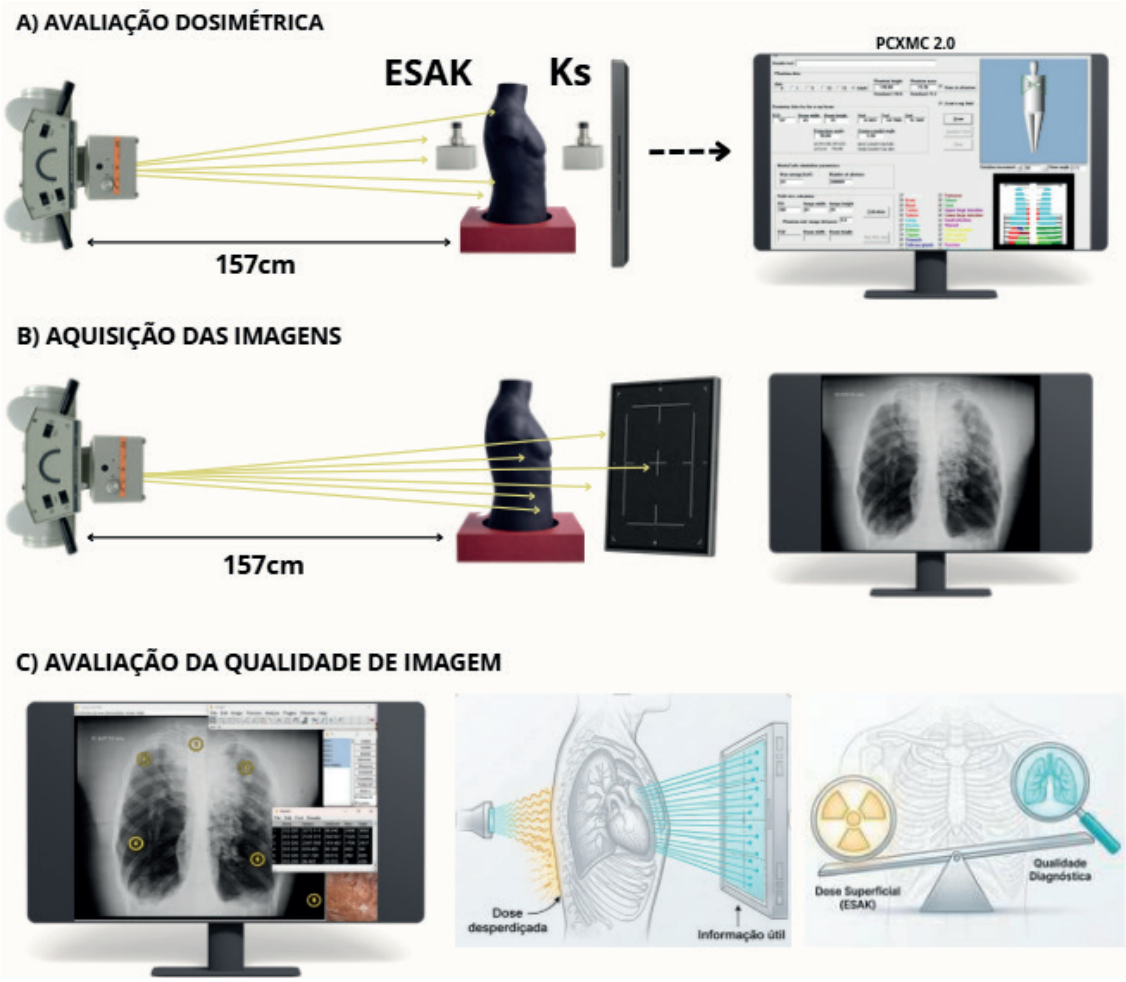
2.3 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE IMAGEM (QI)

A análise quantitativa do sinal e do ruído foi realizada utilizando o software ImageJ (Wayne, 2021). Inicialmente, procedeu-se à análise global por meio de histogramas de intensidade de pixels, nos quais foram obtidos o valor médio do sinal e o desvio padrão, considerado como estimativa do ruído da imagem.

$$RSR\ (Histograma) = \frac{Média\ sinal}{Média\ do\ Ruído} \quad (2)$$

Para uma análise regional foram separados em seis Regiões de Interesse (ROIs) circulares, cada uma com área igual de 352,020 mm². As ROIs foram posicionadas em áreas de relativa homogeneidade na imagem: esterno, lobos superiores direito e esquerdo, lobo médio e lobo inferior esquerdo. Uma sexta ROI foi posicionada na periferia da imagem, em área livre de estruturas anatômicas, para avaliação do ruído de fundo. A disposição das ROIs está apresentada na Figura 1(c).

Figura 1 - Geometria experimental para avaliação dosimétrica e aquisição das imagens: (a) mensuração do *Entrance Skin Air Kerma* (ESAK); (b) aquisição das imagens em incidência póstero-anterior (PA) de tórax; e (c) avaliação da QI.



Fonte: própria autora (2026).

Uma análise mais precisa da QI foi obtida ao se fazer a média dos valores dos *ROIs* para se obter um valor único por imagem. Para cada ROI, foram calculados o sinal e o ruído. A QI foi avaliada por meio de três descritores: (i) Relação Sinal-Ruído (RSR), calculada conforme a Equação 1 (Mraity *et al.* 2016); (ii) Relação Contraste-Ruído (RCR), determinada pela diferença média entre os valores de sinal das regiões de interesse de fundo e da imagem, adaptada da Equação 3 (Mendes, Silva e Tomal, 2019), sendo esta métrica geralmente aplicada a simuladores com sinal homogêneo; e (iii) Contraste Radiográfico (CR), que avalia a diferença de brilho entre áreas claras e escuras da imagem, conforme Equações 3, 4 e 5, respectivamente.

$$RSR = \frac{Sinal\ médio\ do\ ROI\ 1;\ 2;\ 3;\ 4\ e\ 5}{Ruído\ de\ fundo} \quad (3)$$

$$RCR = \left| \frac{\bar{x}\ valores\ de\ sinal\ (fundo) - \bar{x}\ valores\ de\ sinal\ (ROI\ 5)}{Ruído\ de\ fundo} \right| \quad (4)$$

$$CR = (ROI\ 5) - (fundo) \quad (5)$$

Tais métricas são amplamente empregadas na literatura para d escrever de forma objetiva e mensurável a performance da imagem (Tompe & Sargar, 2020). A análise desses descritores possibilita a comparação entre a imagem original e a imagem gerada com filtro negativo, oferecendo subsídios quantitativos acerca de sua eficácia e potencial aplicabilidade na prática radiológica.

A figura de mérito (FOM) quantifica a relação entre qualidade de imagem (QI) representada pela RCR e a DE, permitindo a avaliação simultânea desses parâmetros. A literatura descreve o FOM como uma ferramenta consolidada para estudos de otimização em radiologia, uma vez que integra qualidade de imagem e dose em um único indicador quantitativo, possibilitando a comparação objetiva entre diferentes protocolos radiográficos (Mendes et al 2022), valores mais elevados de FOM indicam maior eficiência do protocolo avaliado, refletindo melhor qualidade de imagem para uma determinada dose ou menor exposição para a qualidade equivalente.

$$FOM = \frac{RCR}{DE} \tag{6}$$

2.4 ANÁLISE DOS DADOS

Todos os dados foram inseridos no Excel 2007® (Microsoft Corp, Washington, EUA), a fim de facilitar a análise descritiva, os resultados foram avaliados por meio de estatística descritiva, utilizando média aritmética, desvio padrão e desvio percentual Considerando o caráter exploratório do estudo e o número limitado de repetições experimentais, não foram aplicados testes estatísticos inferenciais para avaliação de significância . Por não existirem valores de referência para definir os limites dos descritores de QI, consideraram-se os valores “de referência” aqueles medidos nas imagens adquiridas com a técnica 1 para ambas as incidências de rotina PA. Optou-se pelo desvio percentual (D%) para comparar as imagens adquiridas em relação à imagem de referência, conforme a Equação 7.

$$D(\%) = \left[\left(\frac{Valor\ técnica}{Valor\ referência} - 1\right) \times 100\right] \tag{7}$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 apresenta, de forma integrada, os parâmetros dosimétricos e os descritores de qualidade de imagem (QI) obtidos para as quatro técnicas avaliadas. Além disso, os valores percentuais de variação (D%) possibilitam comparar o desempenho relativo entre as técnicas, destacando as tendências de melhoria ou degradação dos indicadores à medida que se modificam os parâmetros operacionais.

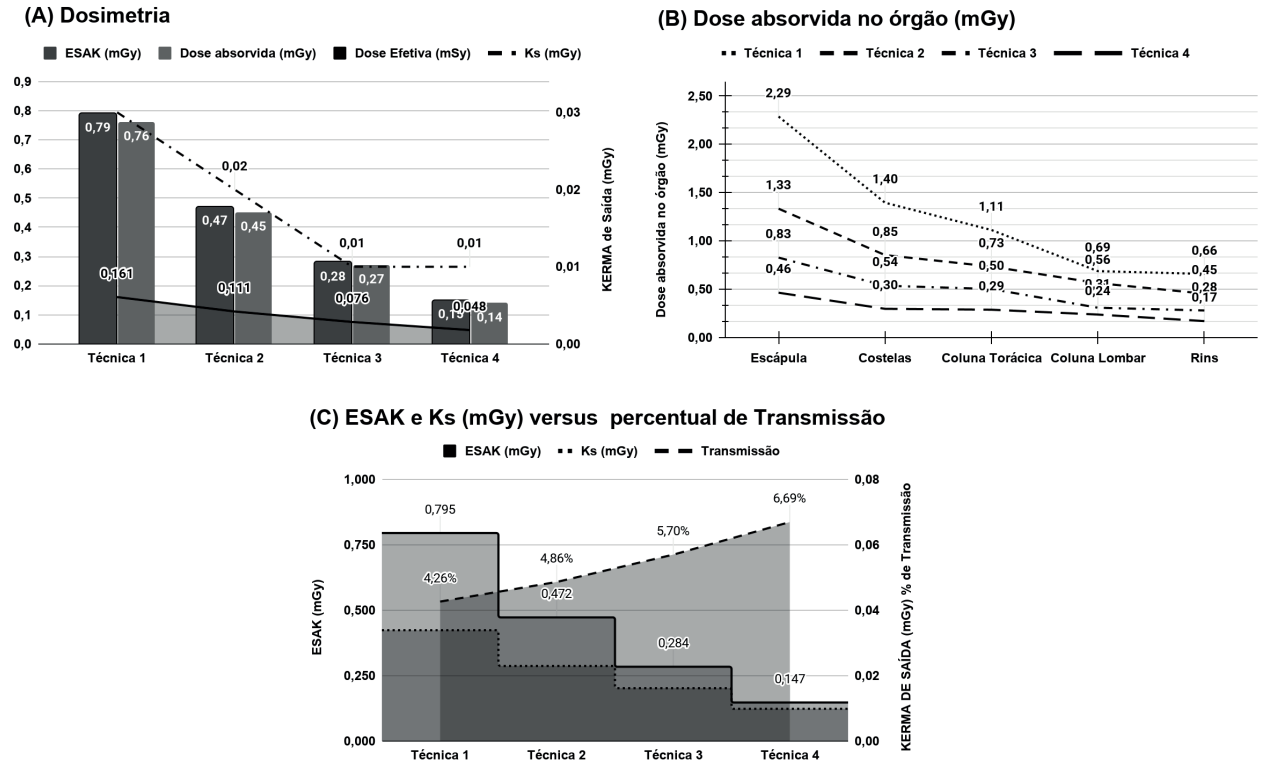
Tabela 1 - Parâmetros dosimétricos e descritores de qualidade da imagem em função das técnicas radiográficas avaliadas.

Leituras	Técnica 1	Técnica 2	Técnica 3	Técnica 4
		Kerma de entrada (ESAK) (mGy)		
L1	0,7851	0,4704	0,2928	0,1472
L2	0,7826	0,472	0,2747	0,148
L3	0,8159	0,4749	0,284	0,1472
Média	0,795	0,472	0,284	0,147
DP	0,0185	0,0023	0,0091	0,0005
Leituras		**Kerma de Saída (Ks) (mGy)**		
L1	0,0341	0,0231	0,0161	0,0099
L2	0,0341	0,0227	0,0162	0,0101
L3	0,0334	0,0231	0,0162	0,0096
Média	0,034	0,023	0,016	0,010
DP	0,0004	0,0002	0,0001	0,0003
Transmissão de raios X (T%)	4,26%	4,86%	5,70%	6,69%
Dose Absorvida (mGy)	0,761	0,449	0,268	0,138
D% dose absorvida	-	-40,91%	-64,81%	-81,91%
Dose Efetiva (mSy)	0,161	0,111	0,076	0,048
D% Dose Efetiva	-	-31,06%	-52,80%	-70,19%
Descritores		**Qualidade de Imagem (QI)**		
RSR (Histograma)	1,67	1,72	1,80	1,85
RSR (ROI)	18,26	16,02	12,56	11,64
RCR (ROI)	10,11	15,02	14,47	12,14
CR (ROI)	339,32	366,95	426,82	473,59
D% (RSR)	-	-12,25%	-31,22%	-36,24%

Fonte: própria autora (2026).

Na Figura 2, estão representados graficamente os resultados de dosimetria (A), valores estimados de dose absorvida nos órgão por meio de simulação (B) e a comparação entre a ESAK, Ks e o percentual de transmissão (C).

Figura 2 - Valores médios dosimétricos



Fonte: própria autora (2026).

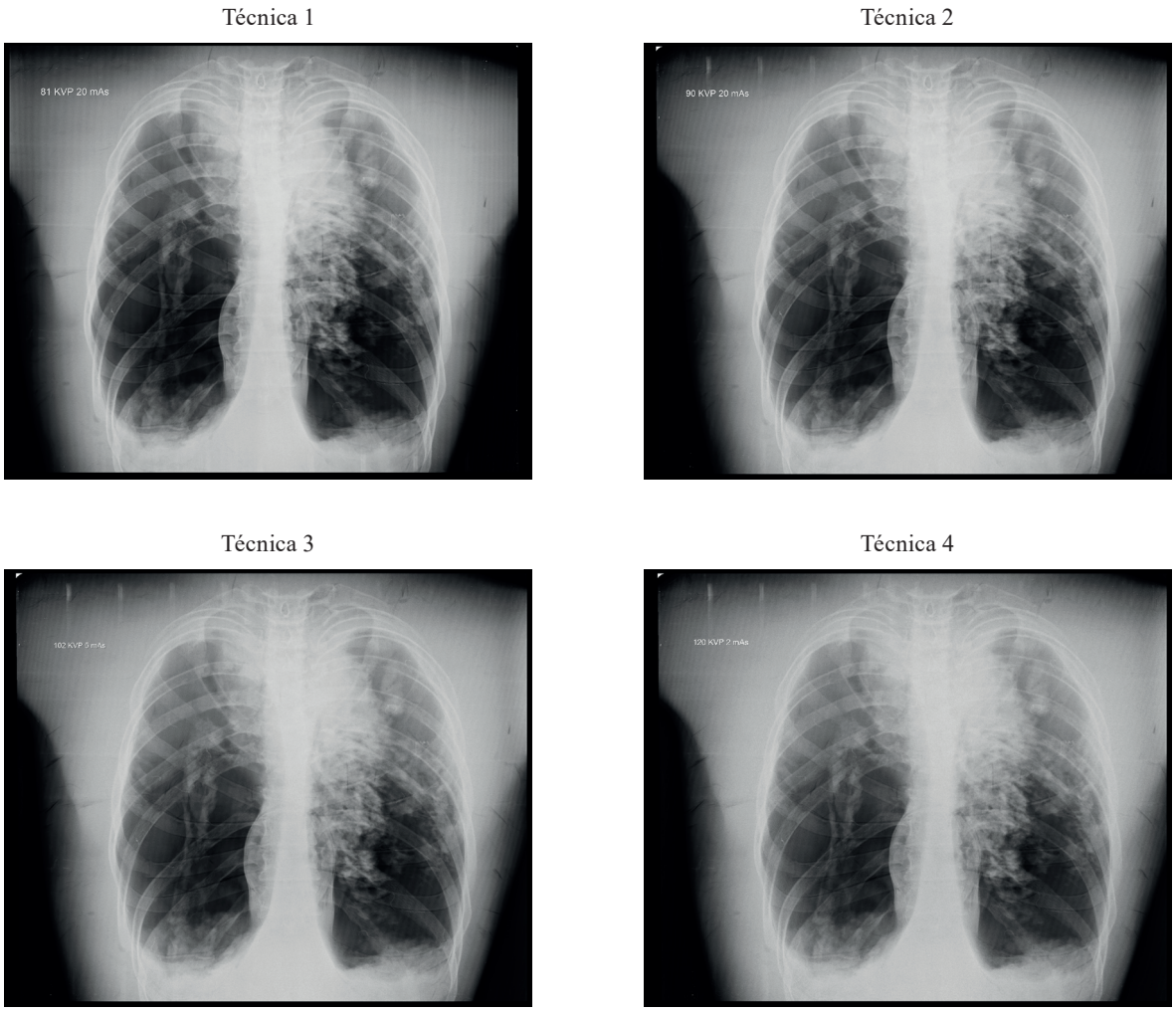
Na Figura 2(A) pode ser observada uma redução acumulada de aproximadamente 81% na dose de entrada entre a Técnica 1 e a Técnica 4. Na Figura 2(B), observa-se que estruturas diretamente expostas ao feixe primário, como as escápulas e as costelas, apresentaram os maiores valores iniciais de dose e as reduções mais expressivas ao longo do processo de otimização, passando de 2,287 para 0,464 mGy e de 1,395 para 0,297 mGy, respectivamente. Em contrapartida, estruturas anatômicas localizadas em regiões mais profundas ou parcialmente fora da incidência direta do feixe, como a coluna lombar e os rins, também apresentaram diminuição dos valores de dose, porém de forma menos acentuada. Esse comportamento pode ser explicado pela maior contribuição da radiação espalhada para a deposição de dose nesses órgãos. Na Figura 2 (C) observou-se elevação gradual do percentual de transmissão (T%) do feixe de raios X, que passou de 4,26% na Técnica 1 para 6,69% na Técnica 4. Esse comportamento indica maior penetrabilidade da radiação em decorrência do endurecimento do feixe promovido pelo aumento da tensão do tubo (kV) e redução da carga elétrica (mAs), permitindo que uma fração maior dos fótons atravessasse o fantoma, mesmo diante da significativa redução da dose incidente. Esses resultados demonstram que a otimização dos parâmetros de exposição foi capaz de reduzir substancialmente a dose de radiação sem comprometer a transmissão do feixe ao receptor de imagem.

Na prática clínica, a radiografia convencional de tórax possibilita a visualização de diversas estruturas anatômicas, incluindo os componentes da parede torácica, como ossos e tecidos moles, além das cavidades pleurais, vias aéreas, hilos pulmonares, vasculatura pulmonar, mediastino, coração,

aorta e pulmões (Wada; Rodrigues; Santos, 2019). Assim, a manutenção da adequada visualização dessas estruturas constitui um parâmetro fundamental para avaliar o impacto da otimização dos protocolos de aquisição.

Na Figura 3 estão representadas as quatro radiografias obtidas do fantoma utilizando as diferentes técnicas avaliadas. Observa-se que a influência dos parâmetros técnicos sobre a qualidade visual das imagens foi discreta, com diferenças pouco perceptíveis entre as radiografias adquiridas com dose de entrada de 0,795 mGy (Técnica 1) e aquelas obtidas com a menor dose avaliada, de 0,147 mGy (Técnica 4). Esses resultados indicam que a expressiva redução de dose alcançada não comprometeu significativamente a visualização das estruturas anatômicas analisadas, sugerindo a viabilidade da otimização proposta.

Figura 3 - Imagens obtidas para cada técnica.

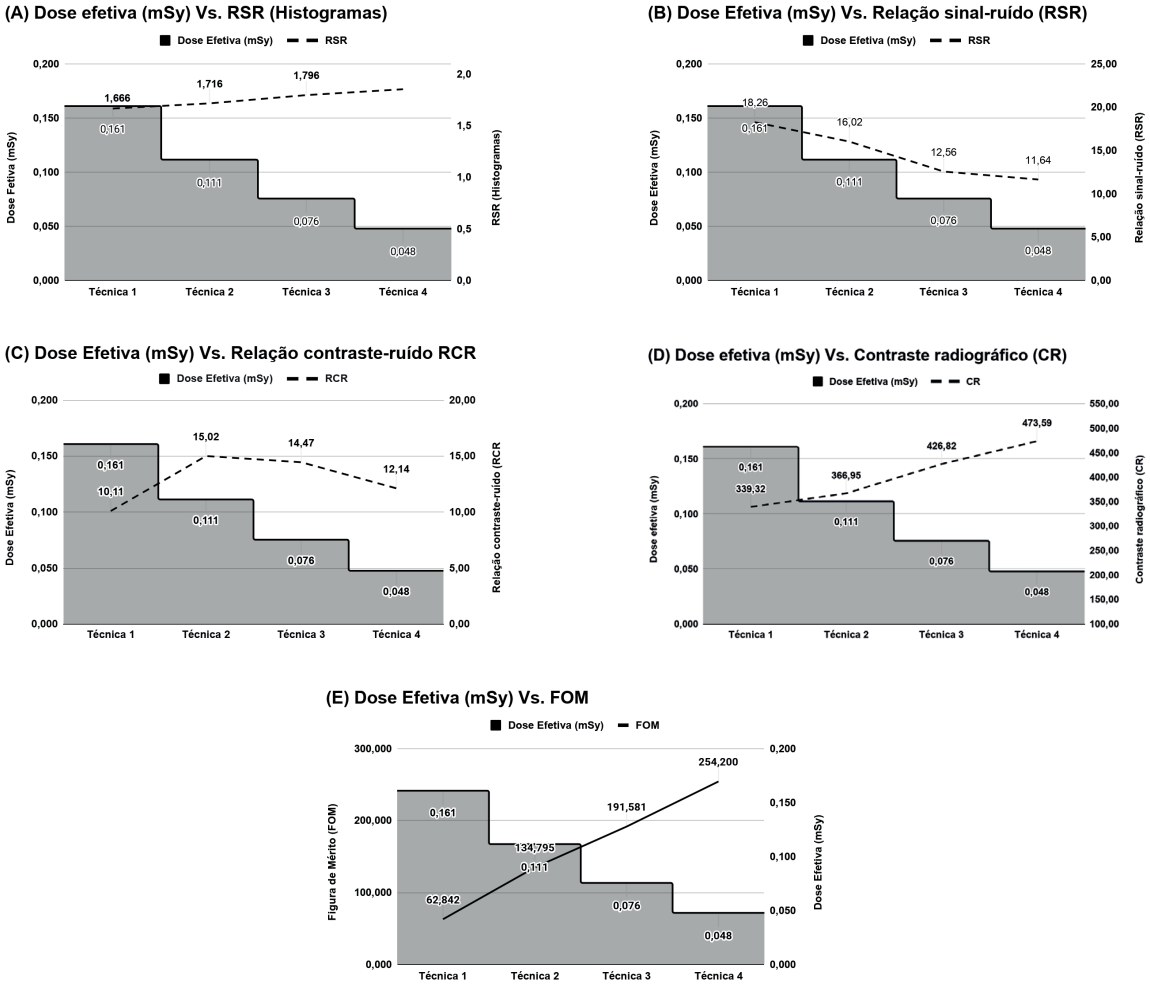


Fonte: própria autora (2026).

Observou-se que a visualização das estruturas de interesse permaneceu semelhante entre as técnicas avaliadas, indicando que o aumento da exposição não resultou em melhorias expressivas na imagem. Esses resultados demonstram que doses mais elevadas nem sempre proporcionam ganhos relevantes na visualização das estruturas da imagem.

Na Figura 4 está representada graficamente a relação entre os valores de DE (mSv) e os descritores de QI para as diferentes técnicas avaliadas, evidenciando o comportamento desses parâmetros ao longo do processo de otimização.

Figura 4 - Relação entre a DE (mSv) e os descritores de qualidade de imagem (QI).



Fonte: própria autora (2026).

Os resultados apresentados na Figura 4 demonstram que a modulação do feixe de raios X promoveu redução significativa da dose efetiva (DE), passando de 0,1609 mSv na Técnica 1 para 0,0478 mSv na Técnica 4, correspondendo a uma redução de aproximadamente 70%. Esse comportamento é explicado pelo aumento da energia média dos fótons (endurecimento do feixe), o que aumenta a penetrabilidade do feixe e reduz a absorção de energia nos tecidos (Bushong, 2022).

Em relação aos descritores de QI, observou-se comportamento distinto entre os parâmetros analisados. A relação sinal-ruído (RSR) obtida por histograma apresentou discreto aumento, indicando melhoria da uniformidade global da imagem. Em contrapartida, a RSR avaliada por regiões de interesse (ROI) apresentou redução progressiva, sugerindo aumento relativo do ruído em áreas específicas da imagem. A relação contraste-ruído (RCR) apresentou comportamento não linear,

com valores máximos nas Técnicas 2 e 3, enquanto a Técnica 4 apresentou redução desse parâmetro. Por sua vez, o contraste (CR) aumentou progressivamente ao longo das técnicas, evidenciando que a redução da dose não comprometeu o contraste absoluto das imagens.

De modo geral, os resultados confirmam o compromisso entre dose e qualidade de imagem descrito na literatura. Embora a redução da dose possa aumentar o ruído, as Técnicas 2 e 3 apresentaram o melhor equilíbrio entre exposição radiológica e desempenho dos descritores de QI, mantendo valores maiores de RCR e CR associados a reduções substanciais da dose.

A análise da Figure of Merit (FOM) indicou desempenho superior da Técnica 4, que combinou a menor dose efetiva (0,0478 mSv) com o maior valor de FOM, demonstrando maior eficiência física do sistema. Os valores de dose efetiva obtidos mostraram-se compatíveis com os reportados na literatura para radiografias de tórax. As Técnicas 2 e 3 apresentaram valores próximos ou inferiores à média descrita por Alvarez *et al.* (2022), enquanto a Técnica 4 aproximou-se do limite inferior reportado. Esses resultados corroboram estudos anteriores que demonstram a eficiência da utilização de tensões mais elevadas associadas à redução do mAs em sistemas digitais, permitindo expressiva redução da dose com impacto limitado na qualidade da imagem (Claus et al, 2024).

Como limitação do estudo, destaca-se a ausência de avaliação qualitativa da QI por radiologistas ou observadores treinados. Embora tenham sido empregadas métricas quantitativas amplamente aceitas, não foi possível determinar diretamente a aceitabilidade diagnóstica dos protocolos avaliados. Dessa forma, estudos futuros devem incluir análises visuais e investigações clínicas para validar o desempenho dos protocolos otimizados na detecção de alterações pulmonares em condições reais de exame.

CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que a modulação do feixe de raios X por meio do aumento da tensão do tubo (kVp) associada à redução da carga (mAs) foi eficaz na otimização das técnicas radiográficas de tórax, promovendo expressiva redução da dose de radiação. As Técnicas 3 e 4 apresentaram valores de ESAK entre 0,147 e 0,284 mGy, inferiores ao nível de referência diagnóstico estabelecido pela Instrução Normativa nº 90/2021. O aumento da transmissão do feixe, de 5,70% a 6,69%, evidenciou seu endurecimento e maior capacidade de penetração, favorecendo a chegada de uma maior quantidade de fótons ao receptor de imagem. Embora tenham sido observadas alterações nos descritores de qualidade de imagem, estas foram menos expressivas do que a redução dos indicadores dosimétricos. As doses efetivas permaneceram abaixo dos valores médios reportados na literatura para radiografias de tórax, e a análise da Figura de Mérito indicou melhor desempenho da Técnica 4.

AGRADECIMENTOS

Em reconhecimento, agradecemos o incentivo intelectual dos professores dos cursos de graduação em Física Médica e Radiologia da Universidade Franciscana (UFN), além da disponibilização da área e dos equipamentos do laboratório de radiodiagnóstico assim como do fantoma semi-anatômico que possibilitaram a realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

ALVAREZ, Matheus *et al*. Dose efetiva e nível de referência de dose (DRL) em radiologia em um hospital terciário. **Revista Brasileira de Física Médica**, [s. l.], v. 16, p. 678-678, 2022.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC n. 611, de 9 de março de 2022. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 107-110, 16 mar. 2022. Disponível em: https://www.in.gov.br. Acesso em: 10 abr. 2026.

BUSHBERG, Jerrold T.; SEIBERT, J. Anthony; LEIDHOLDT, Edwin M.; BOONE, John M. **The essential physics of medical imaging**. 4. ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2020.

BUSHONG, Stewart C. **Manual de radiología para técnicos**: física, biología y protección radiológica. [s. l.]: Elsevier Health Sciences, 2022.

CLAUS, Thiago Victorino *et al*. Dose efetiva em exames radiográficos de tórax: um estudo com fantoma semi-anatômico. **Revista Brasileira de Física Médica**, [s. l.], v. 18, p. 779-779, 2024.

DEWERD, L. A.; LAWLESS, M. The physics of phantoms. *In*: _____. **The phantoms of medical and health physics**. New York: Springer, 2014.

FAUBER, Terri L. **Radiographic imaging and exposure**. 6. ed. St. Louis: Elsevier Health Sciences, 2020.

FEITOSA, Breno de Oliveira; NASCIMENTO, Amanda Fernandes; NERSISSIAN, Denise Yanikian. Um estudo da função resposta e da influência de técnicas radiográficas e de processamento nas métricas de qualidade de imagem em radiologia digital. **Revista Brasileira de Física Médica**, [s. l.], v. 18, p. 781-781, 2024.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection: ICRP Publication 103. **Annals of the ICRP**, [s. l.], v. 37, n. 2-4, 2007.

MENDES, Hitalo Rodrigues; SILVA, Júlio Casagrande; TOMAL, Alessandra. Simulação Monte Carlo em radiografia de tórax: estudos de dose e qualidade da imagem. **Revista Brasileira de Física Médica**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 145-153, 2019.

MENDES, H. R.; SILVA, J. C.; MARCONDES, M.; TOMAL, A. Optimization of image quality and dose in adult and pediatric chest radiography via Monte Carlo simulation and experimental methods. **Radiation Physics and Chemistry**, [s. l.], v. 201, p. 110396, 2022. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2022.110396.

MRAITY, Hussien A. A. B. *et al*. Development and validation of a visual grading scale for assessing image quality of AP pelvis radiographic images. **The British Journal of Radiology**, [s. l.], v. 89, n. 1061, p. 20150430, 2016.

PEREIRA, A. S. *et al*. **Metodologia da pesquisa científica**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, UAB, NTE, 2018.

RASBAND, Wayne. **Software para processamento e análise de imagens (ImageJ)**. Bethesda: National Institute of Mental Health, 2021. Disponível em: http://rsbweb.nih.gov/ij/download.html. Acesso em: 10 mar. 2026.

STUK. Radiation and Nuclear Safety Authority. **PCXMC**: a PC-based Monte Carlo program for calculating patient doses in medical X-ray examinations. Helsinki: STUK, 2017. Disponível em: http://www.stuk.fi/sateilyn_kaytto/ohjelmat/PCXMC/en_GB/pcxmc/. Acesso em: 15 mar. 2026.

TOMPE, Aparna; SARGAR, Kiran. X-ray image quality assurance. **StatPearls** [Internet], Treasure Island, 2020. Disponível em: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/. Acesso em: 10 abr. 2026.

UFFMANN, M.; SCHAEFER-PROKOP, C. Digital radiography: the balance between image quality and radiation dose. **European Journal of Radiology**, [s. l.], v. 72, n. 2, p. 202-208, 2009.

VIANNA, E. R. L.; SCHWARZ, A. P. **Desenvolvimento e construção de um fantoma de tórax para uso nos estudos de imagens radiológicas**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Franciscana, Santa Maria, 2020.

WADA, Danilo Tadao; RODRIGUES, José Antonio Hiesinger; SANTOS, Marcel Koenigkam. Anatomia normal da radiografia de tórax. **Medicina (Ribeirão Preto)**, Ribeirão Preto, v. 52, p. 17-29, 2019.