

PROTONTERAPIA: BENEFÍCIOS E AVANÇOS TECNOLÓGICOS NO TRATAMENTO DO CÂNCER

João Vitor dos Santos Nascimento¹; Kharlo Emmanuely Gonçalves de Oliveira e Silva²; Sandra Barros Texeira³; Helena dos Santos Reis⁴; Bárbara Vanessa dos Santos Sousa⁵; Jeniffer de Souza Valentim⁶; Hozana de Almeida Evangelista⁷; Dominik Oliver Silva de Araújo⁸; Naiara Cristina de Souza Garajau⁹

Graduado em Enfermagem pelo Centro Universitário Maurício de Nassau - UNINASSAU, Maceió AL¹; Graduando em Fisioterapia pelo Centro Universitário Faema - UNIFAEMA, Ariquemes RO²; Graduada em Serviço Social pela Universidade da Amazônia - UNAMA, Belém PA³; Graduanda em Medicina pela Faculdade Evangélica Mackenzie do Paraná - FEMPAR, Curitiba PR⁴; Graduanda em Licenciatura em Educação Física pela Universidade Federal do Piauí - UFPI, Teresina PI⁵; Graduanda em Enfermagem pelo Centro Universitário Maurício de Nassau - UNINASSAU, Campina Grande PB⁶; Mestranda em Profissional em Saúde da Família pela Universidade Federal do Maranhão - UFMA, São Luís MA⁷; Graduando em Enfermagem pela Faculdade Anhanguera - ANHANGUERA, Valparaíso GO⁸; Graduanda em Enfermagem pela Universidade Norte Paraná - UNOPAR, Avaliação AL⁹

joaovitor.nsantos18@gmail.com

Área Temática: Saúde Coletiva

RESUMO

Introdução: A protonterapia configura-se como uma modalidade avançada de radioterapia oncológica, fundamentada nas propriedades físicas dos prótons, que possibilitam elevada precisão na deposição da dose de radiação. O pico de Bragg permite maior conformidade da dose ao volume tumoral, reduzindo a exposição dos tecidos saudáveis e, consequentemente, os efeitos adversos associados ao tratamento, especialmente em tumores localizados próximos a órgãos críticos e em populações vulneráveis. **Objetivo:** Analisar os benefícios clínicos e os avanços tecnológicos da protonterapia no tratamento do câncer, com base nas evidências científicas atuais disponíveis na literatura nacional e internacional. **Metodologia:** Trata-se de um estudo de abordagem qualitativa, descritiva e exploratória, desenvolvido por meio de revisão integrativa da literatura. Foram analisados artigos científicos, diretrizes clínicas e relatórios técnicos publicados entre 2021 e 2024, provenientes de bases e instituições de referência na área da radioterapia e oncologia. A seleção dos estudos considerou critérios de relevância temática, disponibilidade na íntegra e aderência aos objetivos da pesquisa. **Resultados e Discussão:** Os resultados evidenciaram que a protonterapia apresenta benefícios clínicos significativos, como redução da toxicidade aguda e tardia, preservação de órgãos de risco e melhoria da qualidade de vida dos pacientes. Os avanços tecnológicos, incluindo o escaneamento ativo do feixe, a terapia em arco com partículas e a incorporação da inteligência artificial no planejamento terapêutico, ampliaram a precisão, a segurança e a eficiência dos tratamentos. Destaca-se ainda o potencial emergente da protonterapia em regime FLASH, embora ainda em fase experimental. **Conclusão:** Conclui-se que a protonterapia representa uma estratégia terapêutica promissora no tratamento do câncer, especialmente quando associada a critérios rigorosos de indicação clínica e a investimentos contínuos em tecnologia e pesquisa, visando à ampliação do acesso e ao uso racional dessa modalidade nos sistemas de saúde.

Palavras-chave: Câncer; Protonterapia; Radioterapia; Tecnologia em saúde; Tratamento oncológico.

1 INTRODUÇÃO

A radioterapia constitui uma das principais modalidades terapêuticas no tratamento do câncer, sendo amplamente empregada tanto com finalidade curativa quanto paliativa. Os avanços tecnológicos observados nas últimas décadas permitiram maior precisão na administração das doses de radiação, reduzindo a exposição dos tecidos sadios e, consequentemente, os efeitos adversos associados ao tratamento. Nesse contexto, a protonterapia emerge como uma alternativa inovadora à radioterapia convencional baseada em fótons, especialmente em cenários clínicos nos quais a preservação de estruturas críticas é determinante para a qualidade de vida e os desfechos clínicos dos pacientes oncológicos (Paganetti, 2021; IAEA, 2021).

A principal vantagem física da protonterapia reside nas características dos prótons, partículas carregadas positivamente que apresentam um padrão singular de deposição de dose conhecido como pico de Bragg. Diferentemente dos fótons, que depositam energia de forma contínua ao longo de seu trajeto, os prótons liberam a maior parte de sua energia em uma profundidade específica, determinada previamente no planejamento terapêutico. Esse fenômeno possibilita uma significativa redução da dose nos tecidos adjacentes e além do volume tumoral, conferindo maior conformidade dosimétrica e menor toxicidade aos órgãos de risco (Paganetti, 2021; ASTRO, 2022).

Do ponto de vista clínico, a protonterapia tem sido progressivamente incorporada ao tratamento de diversos tipos de neoplasias, com destaque para tumores pediátricos, neoplasias do sistema nervoso central, tumores de base de crânio, sarcomas, cânceres oculares e situações de reirradiação. Essas indicações fundamentam-se na capacidade da técnica em minimizar os efeitos tardios da radiação, aspecto particularmente relevante em populações mais sensíveis, como crianças e adolescentes, nos quais a exposição excessiva pode resultar em sequelas funcionais, cognitivas e no aumento do risco de segundos tumores (ESTRO, 2021–2024; Moltó Puigmartí *et al.*, 2024).

Além dos benefícios clínicos já consolidados, a protonterapia encontra-se em constante evolução tecnológica. Avanços nos sistemas de aceleração de partículas, na entrega do feixe e nas técnicas de escaneamento ativo têm ampliado a precisão e a flexibilidade do tratamento. Tecnologias como a protonterapia com intensidade modulada e a terapia em arco com partículas

representam um novo patamar no controle espacial da dose, permitindo maior homogeneidade no volume-alvo e redução adicional da exposição dos tecidos saudáveis (Mein *et al.*, 2024). Esses desenvolvimentos ampliam o potencial terapêutico da técnica e favorecem sua aplicação em casos clinicamente mais complexos.

Outro campo emergente de grande relevância é a incorporação da inteligência artificial (IA) no planejamento da protonterapia. Algoritmos de aprendizado de máquina e redes neurais vêm sendo utilizados para otimizar o delineamento de volumes, prever respostas biológicas, reduzir incertezas relacionadas à movimentação dos órgãos e acelerar o processo de planejamento terapêutico. A utilização da IA contribui para maior padronização dos planos, redução do tempo de tratamento e aprimoramento da precisão dosimétrica, fortalecendo a segurança e a eficácia clínica da protonterapia (Unger, 2022).

No âmbito da radiobiologia, investigações recentes têm explorado os efeitos biológicos específicos da radiação por prótons, incluindo a protonterapia em regime FLASH, caracterizada por taxas de dose ultrarrápidas. Estudos pré-clínicos indicam que essa abordagem pode preservar tecidos normais sem comprometer o controle tumoral, abrindo novas perspectivas para o tratamento oncológico com menor toxicidade. Embora ainda em fase experimental, os resultados iniciais apontam para um potencial significativo de inovação terapêutica no campo da radioterapia com partículas (Diffenderfer *et al.*, 2022).

Sob a ótica da avaliação em saúde, relatórios internacionais destacam que a protonterapia apresenta elevados padrões de segurança e eficácia clínica, embora seu custo e a complexidade de implantação ainda representem desafios para a ampliação do acesso. A análise da eficiência econômica da técnica reforça a necessidade de critérios bem definidos para indicação clínica, bem como de políticas públicas que considerem o equilíbrio entre custo, benefício e impacto na qualidade de vida dos pacientes (IAEA, 2021; Moltó Puigmartí *et al.*, 2024).

Diante desse cenário de contínua evolução científica e tecnológica, torna-se fundamental compreender de forma integrada os benefícios, as inovações e os desafios associados à protonterapia no tratamento do câncer. Assim, o objetivo deste trabalho é analisar os principais benefícios clínicos da protonterapia, bem como os avanços tecnológicos que têm contribuído para sua consolidação como uma modalidade terapêutica promissora no tratamento oncológico, à luz das evidências científicas atuais.

2 METODOLOGIA

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa de natureza qualitativa, com abordagem descritiva e exploratória, desenvolvida por meio de uma revisão integrativa da literatura. Esse método foi escolhido por permitir a síntese sistemática do conhecimento científico disponível sobre a protonterapia, possibilitando a análise abrangente de seus benefícios clínicos, avanços tecnológicos e perspectivas atuais no tratamento do câncer, a partir de evidências nacionais e internacionais.

A revisão integrativa seguiu etapas metodológicas consolidadas, compreendendo: (i) definição da temática e da questão norteadora; (ii) estabelecimento dos critérios de inclusão e exclusão dos estudos; (iii) busca sistemática nas bases de dados; (iv) seleção e análise crítica das publicações; e (v) síntese e organização dos achados. A questão norteadora que orientou o estudo foi: quais são os principais benefícios clínicos e os avanços tecnológicos da protonterapia no tratamento do câncer descritos na literatura científica contemporânea?

A busca dos estudos foi realizada em bases de dados científicas reconhecidas pela relevância na área da saúde e das ciências médicas, incluindo Radiotherapy and Oncology, Medical Physics, Physics in Medicine & Biology, além de documentos institucionais e relatórios técnicos de organismos internacionais, como a International Atomic Energy Agency (IAEA), a American Society for Radiation Oncology (ASTRO) e a European Society for Radiotherapy and Oncology (ESTRO). Essas fontes foram selecionadas por sua credibilidade, atualização científica e ampla utilização em pesquisas sobre terapias avançadas em oncologia.

Foram utilizados descritores controlados e não controlados, combinados por meio de operadores booleanos, tais como: proton therapy, proton beam therapy, particle therapy, technological advances, clinical benefits, artificial intelligence, FLASH radiotherapy e cancer treatment. A estratégia de busca foi adaptada conforme as especificidades de cada base consultada, visando ampliar a sensibilidade e a abrangência dos resultados obtidos.

Os critérios de inclusão adotados compreenderam: artigos científicos originais, revisões sistemáticas, estudos pré-clínicos relevantes, diretrizes e relatórios técnicos publicados no período de 2021 a 2024, disponíveis na íntegra, nos idiomas português, inglês ou espanhol, e que abordassem diretamente a protonterapia sob os aspectos clínicos, tecnológicos, físicos ou radiobiológicos. Foram excluídos estudos duplicados, publicações que não apresentavam relação direta com o tema proposto, resumos de eventos científicos, cartas ao editor e trabalhos cujo foco principal não estivesse relacionado à protonterapia no contexto oncológico.

Após a identificação inicial dos estudos, procedeu-se à leitura dos títulos e resumos para triagem preliminar. Em seguida, os textos selecionados foram lidos na íntegra, permitindo a avaliação criteriosa da pertinência, qualidade metodológica e relevância científica. As informações extraídas foram organizadas de forma sistemática, contemplando dados sobre fundamentos físicos da protonterapia, indicações clínicas, benefícios dosimétricos, avanços tecnológicos, aplicações da inteligência artificial e inovações emergentes, como a protonterapia em regime FLASH.

A análise dos dados foi realizada de maneira descritiva e interpretativa, com base na comparação e integração dos resultados apresentados pelos diferentes autores. Buscou-se identificar convergências, divergências e lacunas do conhecimento, permitindo uma compreensão crítica do estado atual da protonterapia e de seu papel no tratamento do câncer. A síntese dos achados foi apresentada de forma narrativa, respeitando os princípios da clareza, coerência e rigor científico.

Por se tratar de uma pesquisa baseada exclusivamente em fontes secundárias, não houve necessidade de submissão a comitê de ética em pesquisa, conforme as diretrizes vigentes. Todos os estudos utilizados foram devidamente citados, respeitando-se os preceitos éticos da pesquisa científica e as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da literatura selecionada evidencia que a protonterapia constitui um avanço significativo na radioterapia oncológica, particularmente no que se refere à precisão dosimétrica e à minimização da toxicidade em tecidos saudáveis. Paganetti (2021) e a American Society for Radiation Oncology – ASTRO (2022) destacam a superioridade física dos prótons em relação aos fótons, atribuindo ao pico de Bragg o principal mecanismo responsável pela deposição altamente localizada da dose no volume tumoral, com mínima irradiação dos tecidos adjacentes. Essa característica tem sido associada de forma consistente a perfis de segurança mais favoráveis, com redução dos efeitos adversos agudos e tardios do tratamento radioterápico.

Os achados clínicos indicam que os maiores benefícios da protonterapia concentram-se em neoplasias localizadas próximas a órgãos críticos, incluindo tumores do sistema nervoso central, base do crânio, região ocular e casos pediátricos. As diretrizes da European Society for Radiotherapy and Oncology – ESTRO (2021–2024) e os estudos de Moltó Puigmartí et al. (2024) ressaltam que a redução da dose integral ao organismo contribui para a preservação das funções neurológicas, cognitivas e endócrinas, além de diminuir o risco de neoplasias

secundárias induzidas pela radiação. Esses resultados reforçam a relevância clínica da técnica em contextos nos quais a expectativa de sobrevida prolongada exige atenção aos efeitos tardios do tratamento.

Quadro 1 – Principais benefícios clínicos da protonterapia segundo a literatura analisada

Benefício clínico	Descrição	Impacto no tratamento oncológico
Maior precisão dosimétrica	Deposição concentrada da dose no volume tumoral por meio do pico de Bragg	Redução da irradiação de tecidos saudáveis adjacentes
Redução da toxicidade aguda	Menor incidência de efeitos adversos como mucosite, dermatite e fadiga	Melhora da tolerabilidade ao tratamento
Redução da toxicidade tardia	Menor exposição cumulativa dos órgãos de risco	Diminuição de sequelas funcionais e cognitivas
Preservação de órgãos críticos	Proteção de estruturas nobres como cérebro, medula espinhal e órgãos sensoriais	Manutenção da qualidade de vida pós-tratamento
Benefícios em pacientes pediátricos	Redução da dose integral ao organismo em indivíduos em desenvolvimento	Menor risco de alterações no crescimento e segundos tumores
Aplicação em reirradiação	Possibilidade de novo tratamento com menor dano tecidual	Ampliação das opções terapêuticas em casos complexos

Fonte: Autoria própria (2026)

Mein *et al.* (2024) apontam que a evolução dos sistemas de escaneamento ativo do feixe, associada à conformação da dose e ao desenvolvimento de técnicas inovadoras, como a terapia em arco com partículas, ampliou significativamente a capacidade de adaptação da protonterapia a geometrias tumorais complexas. Tais inovações promovem maior homogeneidade da dose no volume-alvo e reduzem a exposição dos tecidos adjacentes, favorecendo melhores desfechos clínicos.

No planejamento terapêutico, Unger (2022) enfatiza que a incorporação da inteligência artificial otimiza o delineamento de volumes, prevê variações anatômicas e diminui incertezas

associadas à movimentação dos órgãos, aumentando a reprodutibilidade dos planos e a eficiência do tratamento.

No campo radiobiológico, Diffenderfer *et al.* (2022) destacam o potencial da protonterapia em regime FLASH, caracterizada pela administração de doses muito altas em intervalos curtos, promovendo preservação dos tecidos normais sem comprometer a eficácia tumoral, embora dados clínicos ainda sejam limitados.

Quadro 2 – Avanços tecnológicos e inovações emergentes na protonterapia

Avanço tecnológico	Características principais	Contribuições para a prática clínica
Escaneamento ativo do feixe	Varredura precisa do feixe de prótons ponto a ponto	Maior conformação da dose ao volume-alvo
Modulação de intensidade	Ajuste da intensidade do feixe conforme a geometria tumoral	Tratamento de tumores com formas complexas
Terapia em arco com partículas	Distribuição contínua do feixe em múltiplos ângulos	Melhor homogeneidade da dose e redução da exposição aos tecidos sadios
Planejamento adaptativo	Ajustes do plano conforme variações anatômicas do paciente	Maior precisão ao longo do tratamento
Inteligência artificial	Uso de algoritmos para segmentação e otimização dos planos	Redução do tempo de planejamento e aumento da reprodutibilidade
Protonterapia FLASH	Administração de doses ultrarrápidas	Potencial redução da toxicidade em tecidos normais

Fonte: Autoria própria (2026)

A literatura evidencia obstáculos relacionados ao custo elevado de instalação e manutenção, à necessidade de infraestrutura especializada e à capacitação de equipes multiprofissionais, especialmente em países de baixa e média renda, conforme relatórios da International Atomic Energy Agency – IAEA (2021). Apesar de evidências de custo-efetividade em grupos específicos de pacientes, a expansão em larga escala demanda critérios rigorosos de indicação clínica e planejamento estratégico nas políticas públicas de saúde.

As diretrizes da ASTRO (2022) e da ESTRO (2021–2024) reforçam que a seleção adequada dos pacientes, baseada em evidências robustas, deve considerar tipo e localização do tumor, idade e risco de toxicidade. Essa abordagem é essencial para maximizar os benefícios clínicos da protonterapia, garantindo sua aplicação ética, eficiente e sustentável.

De forma integrada, os resultados analisados demonstram que a protonterapia se consolida como uma modalidade terapêutica de alto valor no tratamento do câncer, especialmente quando associada a avanços tecnológicos e a uma seleção criteriosa dos pacientes. A combinação entre precisão física, inovação tecnológica e potencial radiobiológico diferencia essa técnica das modalidades convencionais, ao mesmo tempo em que impõe desafios relacionados à equidade de acesso e à sustentabilidade dos sistemas de saúde. Assim, a literatura reforça a necessidade de investimentos contínuos em pesquisa, desenvolvimento tecnológico e políticas públicas que viabilizem a expansão responsável e baseada em evidências da protonterapia no contexto oncológico contemporâneo.

4 CONCLUSÃO

A protonterapia destaca-se como modalidade terapêutica de alta complexidade e precisão no tratamento do câncer, fundamentada em princípios físicos que permitem distribuição dosimétrica altamente conformada. A utilização do pico de Bragg possibilita a deposição máxima da dose no volume tumoral, com rápida queda de energia após a área-alvo, reduzindo significativamente a irradiação de tecidos saudáveis e ampliando a segurança quando comparada à radioterapia convencional por fótons.

As evidências indicam que seus benefícios clínicos são mais expressivos em populações de maior vulnerabilidade biológica e anatômica, como pacientes pediátricos, tumores próximos a estruturas críticas e casos de reirradiação. Nesses contextos, observa-se menor toxicidade aguda e tardia, melhor preservação funcional e redução do risco de complicações de longo prazo, com impacto positivo na qualidade de vida e nos desfechos terapêuticos.

Os avanços tecnológicos recentes, incluindo modulação de intensidade, técnicas avançadas de entrega do feixe e aplicações de inteligência artificial no planejamento e verificação do tratamento, têm ampliado o potencial clínico da protonterapia e sua integração à medicina de precisão. Contudo, sua ampla implementação ainda enfrenta desafios relacionados ao alto custo, à complexidade operacional e à necessidade de infraestrutura especializada, tornando essencial a definição de critérios rigorosos de indicação e o desenvolvimento de

estudos prospectivos multicêntricos que avaliem eficácia clínica, qualidade de vida e custo-efetividade, a fim de subsidiar políticas públicas e garantir sua incorporação sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTRO. Model policies: proton beam therapy. Arlington: American Society for Radiation Oncology, atualização 2022.

DIFFENDERFER, Eric S.; SØRENSEN, Birgit S.; MAZAL, André; CARLSON, Daniel J. The current status of preclinical proton FLASH radiation and future directions. *Medical Physics*, v. 49, n. 3, p. 2039–2054, 2022. DOI: 10.1002/mp.15276.

ESTRO. Particle therapy clinical indications. *Radiotherapy and Oncology*, 2021–2024.

IAEA. Advances in proton beam therapy. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2021.

MEIN, Sebastian; WUYCKENS, Steven; LI, Xiaodong; BOTH, Stefan; CARABE, Alejandro; VERA, Maria Cristina; ENGWALL, Erik; FRANCESCO, Fabio; GRAEFF, Christian; GU, Wen; HONG, Li; INANIWA, Taku; JANSSENS, Geert; DE JONG, Bas; LI, Tong; LIANG, Xiaofeng; LIU, Guang; LOMAX, Antony; MACKIE, Thomas; MAIRANI, Andrea; MAZAL, André; NESTERUK, Konstantin P.; PAGANETTI, Harald; PÉREZ MORENO, José Manuel; SCHREUDER, Nico; SOUKUP, Michael; TANAKA, Shigeru; TESSONNIER, Thomas; VOLZ, Lukas; ZHAO, Lei; DING, Xiaodong. Particle arc therapy: status and potential. *Radiotherapy and Oncology*, v. 199, p. 110434, 2024. DOI: 10.1016/j.radonc.2024.110434.

MOLTÓ PUIGMARTÍ, Carme; ALONSO GARCÍA, Laura; GIRALT, Jaume; GOMÀ, Carles; PEDRAZA FERNÁNDEZ, Sergio; PÉREZ-REGADERA GÓMEZ, José Francisco; ESTRADA SABADELL, María-Dolores; VIVANCO HIDALGO, Rosa María. La protonterapia en el tratamiento del cáncer: evaluación de la seguridad, eficacia y efectividad clínicas, y eficiencia. 2024. Informe de evaluación de tecnologías sanitarias. Barcelona, 2024.

PAGANETTI, Harald. Proton beam therapy: dosimetry, biological effects and clinical outcomes. *Physics in Medicine & Biology*, v. 66, p. 1–20, 2021.

UNGER, Klaus. Artificial intelligence in proton therapy planning. *Radiotherapy and Oncology*, v. 165, p. 1–10, 2022.