

PROTONTERAPIA NA ONCOLOGIA DE PRECISÃO: FUNDAMENTOS FÍSICOS, BENEFÍCIOS CLÍNICOS E PERSPECTIVAS PARA A IMPLEMENTAÇÃO NO BRASIL

*PROTON THERAPY IN PRECISION ONCOLOGY: PHYSICAL FOUNDATIONS, CLINICAL
BENEFITS, AND PERSPECTIVES FOR IMPLEMENTATION IN BRAZIL*

*PROTONTERAPIA EN LA ONCOLOGÍA DE PRECISIÓN: FUNDAMENTOS FÍSICOS,
BENEFICIOS CLÍNICOS Y PERSPECTIVAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN EN BRASIL*

Giovane da Silva Ferreira¹
Vanessa Cristina Costa Tursi²
Roberto Aguiar de Souza Junior³
Fernando Camilotti⁴

Resumo

A protonterapia é uma modalidade avançada de radioterapia que utiliza feixes de prótons para tratamento oncológico, distinguindo-se da radioterapia convencional por apresentar deposição de dose altamente localizada, associada aos picos de Bragg. Essa característica física permite maior conformidade ao volume tumoral e redução significativa da dose em tecidos saudáveis adjacentes. O presente estudo tem como objetivo analisar os fundamentos físicos da interação próton-matéria, os aspectos tecnológicos envolvidos na geração e modulação do feixe e as evidências clínicas relacionadas à eficácia terapêutica e à redução de toxicidades. Trata-se de uma revisão sistemática da literatura com abordagem qualitativa. A análise integra conceitos como poder de freamento, eficácia biológica relativa (RBE) e sistemas aceleradores, incluindo ciclotrons e síncrotrons, correlacionando propriedades físicas da deposição de energia com desfechos clínicos descritos na literatura. Os resultados indicam que a protonterapia apresenta vantagens dosimétricas consistentes, especialmente em tumores pediátricos e do sistema nervoso central, embora sua implementação envolva elevados custos de infraestrutura e operação. Conclui-se que a modalidade se consolida como uma das abordagens mais promissoras da oncologia de precisão, demandando expansão estratégica e investimentos estruturais para ampliação do acesso.

Palavras-chave: radioterapia; física médica; dosimetria; aceleradores de partículas; implementação no Brasil.

Abstract

Proton therapy is an advanced modality of radiotherapy that uses proton beams for oncological treatment, distinguishing itself from conventional radiotherapy by exhibiting highly localized dose deposition associated with Bragg peaks. This physical characteristic allows for greater conformity to the tumor volume and a significant reduction in dose to adjacent healthy tissues. The present study aims to analyze the physical fundamentals of proton-matter interactions, the technological aspects involved in beam generation and modulation, and the clinical evidence related to therapeutic efficacy and toxicity reduction. This is a systematic literature review with a qualitative approach. The analysis integrates concepts such as stopping power, relative biological effectiveness (RBE), and accelerator systems, including cyclotrons and synchrotrons, correlating the physical properties of energy deposition with clinical outcomes reported in the literature. The results indicate that proton therapy presents consistent dosimetric advantages, especially in pediatric tumors and tumors of the central nervous system, although its implementation involves high infrastructure and operational costs. It is concluded that this modality is consolidating itself as one of the most promising approaches in precision oncology, requiring strategic expansion and structural investments to broaden access.

Keywords: radiotherapy; medical physics; dosimetry; particle accelerators; implementation in Brazil

¹ Bacharelado em Física no Centro Universitário Internacional - UNINTER.

² Bacharelada em Física no Centro Universitário Internacional - UNINTER.

³ Professor no Centro Universitário Internacional - UNINTER.

⁴ Professor no Centro Universitário Internacional - UNINTER.

Resumen

La protonterapia es una modalidad avanzada de radioterapia que utiliza haces de protones para el tratamiento oncológico, distinguiéndose de la radioterapia convencional por presentar una deposición de dosis altamente localizada, asociada a los picos de Bragg. Esta característica física permite una mayor conformidad al volumen tumoral y una reducción significativa de la dosis en los tejidos sanos adyacentes. El presente estudio tiene como objetivo analizar los fundamentos físicos de la interacción protón-materia, los aspectos tecnológicos involucrados en la generación y modulación del haz, así como las evidencias clínicas relacionadas con la eficacia terapéutica y la reducción de toxicidades. Se trata de una revisión sistemática de la literatura con enfoque cualitativo. El análisis integra conceptos como poder de frenado, eficacia biológica relativa (RBE) y sistemas aceleradores, incluidos ciclotrones y sincrotrones, correlacionando propiedades físicas de la deposición de energía con desenlaces clínicos descritos en la literatura. Los resultados indican que la protonterapia presenta ventajas dosimétricas consistentes, especialmente en tumores pediátricos y del sistema nervioso central, aunque su implementación implica elevados costos de infraestructura y operación. Se concluye que esta modalidad se consolida como uno de los enfoques más prometedores de la oncología de precisión, requiriendo expansión estratégica e inversiones estructurales para ampliar el acceso.

Palabras clave: radioterapia; física médica; dosimetría; aceleradores de partículas; implementación en Brasil.

1 Introdução

A radioterapia é um tratamento oncológico que utiliza radiações ionizantes, como os raios-X ou feixe de partículas, para destruir células tumorais ou impedir que elas se multipliquem. Geralmente, os objetivos para esse tratamento são curativos, adjuvantes ou paliativos. Ela está evoluindo constantemente em busca de maior precisão e menor toxicidade.

Embora técnicas modernas como a Radioterapia de Intensidade Modulada (*Intensity-Modulated Radiation Therapy* - IMRT) e a Arcoterapia Volumétrica Modulada (*Volumetric Modulated Arc Therapy* - VMAT) tenham otimizado a conformidade da dose e a eficiência do tratamento, a natureza física dos fótons impõe uma limitação intrínseca: a deposição contínua de energia ao longo de todo o percurso no paciente, atingindo inevitavelmente tecidos saudáveis adjacentes ao alvo.

Nesse cenário, a protonterapia surge como uma alternativa revolucionária ao utilizar o fenômeno físico conhecido como Pico de Bragg (*Bragg Peak*). Diferentemente dos raios X, os prótons liberam o máximo de energia em uma profundidade específica, com dose de saída praticamente nula. Essa característica permite concentrar a radiação no volume tumoral e preservar órgãos críticos circundantes, unindo princípios da Física Nuclear e da Engenharia de Aceleradores à prática clínica (Paganetti, 2012; Durante; Loeffler, 2010).

Apesar dos benefícios clínicos, especialmente na oncologia pediátrica, a implementação em países emergentes enfrenta barreiras complexas. Este trabalho investiga de que forma a protonterapia pode contribuir para os tratamentos oncológicos no Brasil e quais os desafios para sua implementação. A relevância do tema fundamenta-se na superioridade dosimétrica dos prótons, fator determinante para reduzir sequelas tardias. No entanto, confrontando esse

potencial, a realidade brasileira é limitada por altos custos de capital e pela carência de quadros técnicos especializados (Sikkema *et al.*, 2017). O propósito deste estudo é analisar, por meio de uma revisão sistemática da literatura, o funcionamento físico dessa modalidade e seus respectivos benefícios clínicos.

2 Fundamentação teórica

A radiação ionizante corresponde à energia transportada por partículas subatômicas ou por ondas eletromagnéticas com capacidade de remover elétrons de átomos, promovendo a ionização. Sob o ponto de vista físico, esse processo ocorre quando a energia transferida ao sistema atômico supera a energia de ligação eletrônica, rompendo a neutralidade elétrica e resultando na formação de íons (Halliday; Resnick; Walker, 2016). A descrição dessas interações envolve os princípios da eletrodinâmica e da mecânica quântica, especialmente no tratamento das forças elétricas entre partículas carregadas e na natureza quantizada dos níveis de energia atômicos (Young; Freedman, 2016). Tipler e Llewellyn (2009) ressaltam que a transferência de energia em interações radiação-matéria depende da dinâmica entre partículas carregadas e campos elétricos, sendo esse processo governado por leis fundamentais que conectam fenômenos microscópicos a efeitos macroscópicos observáveis.

No domínio da Física Nuclear, a emissão de radiação está associada à estabilidade do núcleo atômico. Conforme discutido por Halliday, Resnick e Walker (2016), a estabilidade nuclear resulta do equilíbrio entre a interação nuclear forte, que mantém prótons e nêutrons coesos, e a repulsão eletrostática entre prótons. Quando esse equilíbrio é perturbado, o núcleo pode sofrer transformações radioativas, emitindo partículas alfa, beta ou radiação gama. Young e Freedman (2016) destacam que tais processos são descritos por leis estatísticas de decaimento exponencial, refletindo o caráter probabilístico inerente às transições nucleares. Tipler e Llewellyn (2009) complementam que o decaimento radioativo constitui uma manifestação direta das propriedades quânticas do núcleo, evidenciando que a estrutura interna da matéria condiciona sua estabilidade energética.

A partir desse fundamento físico, a interação da radiação com sistemas biológicos é compreendida como um desdobramento das mesmas leis que regem a matéria inerte. Em tecidos vivos, compostos majoritariamente por água, a ionização de moléculas de H_2O leva à formação de radicais livres altamente reativos. Esses produtos secundários desencadeiam reações químicas que podem modificar macromoléculas celulares, incluindo proteínas e, de forma particularmente crítica, o DNA (Bushong, 2010). Assim, os efeitos biológicos da radiação

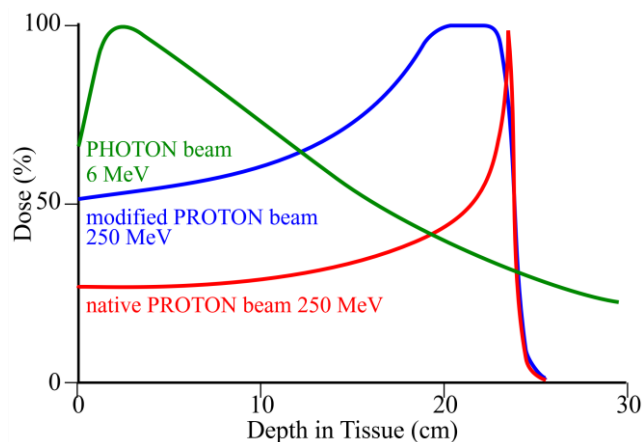
decorrem de uma cadeia causal que se inicia em escala subatômica, atravessa níveis moleculares e culmina em respostas celulares complexas.

No contexto terapêutico, a compreensão detalhada dos mecanismos de interação radiação-matéria torna-se fundamental. Na radioterapia convencional com fótons, a deposição de energia ocorre por meio de processos como efeito fotoelétrico, distribuição de espalhamento Compton e produção de pares, cuja predominância depende da energia do feixe incidente e do número atômico do meio (Halliday; Resnick; Walker, 2016; Young; Freedman, 2016). Como os fótons são eletricamente neutros, sua interação com a matéria resulta em atenuação progressiva ao longo da profundidade do tecido, implicando distribuição de dose que se estende além do volume tumoral, tanto na região de entrada quanto na de saída (Tipler; Llewellyn, 2009).

Em contraste, a protonterapia baseia-se no uso de partículas carregadas positivamente, cuja interação com a matéria é dominada por forças coulombianas. Ao penetrar no tecido, os prótons transferem energia principalmente por excitação e ionização dos elétrons do meio. A perda de energia por unidade de comprimento, denominada poder de freamento (*stopping power*), depende da velocidade da partícula, aumentando à medida que essa desacelera (Halliday; Resnick; Walker, 2016). Essa dependência dinâmica resulta em uma distribuição não uniforme da dose ao longo da profundidade, culminando em um máximo pronunciado próximo ao final da trajetória da partícula, conhecido como pico de Bragg (Wilson, 1946).

A singularidade do pico de Bragg reside no fato de que, após esse ponto, a dose depositada decresce abruptamente, uma vez que o próton perde praticamente toda sua energia cinética e interrompe seu movimento. Tal característica física permite elevada conformidade espacial da dose. Para aplicação clínica, diferentes energias de feixe são combinadas de modo a produzir o pico de Bragg alargado (Spread-Out Bragg Peak – SOBP), garantindo cobertura homogênea do volume tumoral (Paganetti, 2012). Dessa forma, um fenômeno descrito originalmente em termos de dinâmica de partículas carregadas converte-se em instrumento de precisão terapêutica.

Figura 1: Comparação entre a distribuição de dose de prótons e fótons em função da profundidade no tecido. O Pico de Bragg demonstra a superioridade dosimétrica da protonterapia ao concentrar a dose no volume tumoral e minimizar a dose de saída em tecidos saudáveis.



Fonte: Wikimedia Commons.

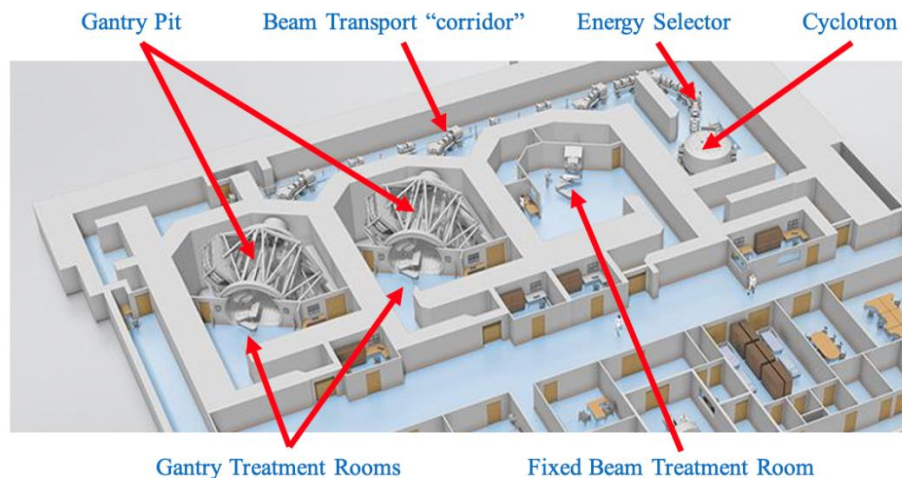
A produção dos feixes de prótons utilizados clinicamente requer aceleradores de partículas capazes de conferir energias da ordem de dezenas a centenas de megaelétron-volts (MeV). Entre os dispositivos mais empregados destacam-se os ciclotrons e os síncrotrons, ambos baseados na aceleração de partículas carregadas por campos elétricos e na sua deflexão por campos magnéticos.

No ciclotron, as partículas descrevem trajetórias aproximadamente circulares em um campo magnético constante enquanto são aceleradas por um campo elétrico alternado aplicado entre eletrodos semicirculares, fazendo com que o raio da órbita aumente gradualmente à medida que a energia cresce.

Já no síncrotron, o raio da trajetória permanece praticamente constante, sendo a aceleração obtida pela variação sincronizada da intensidade do campo magnético e da frequência do campo elétrico de radiofrequência, de modo a manter as partículas confinadas em uma órbita fixa durante todo o processo de aceleração (Podgorsak, 2005; Wilson, 1946).

Em termos operacionais, ciclotrons tendem a produzir feixes contínuos de energia fixa, exigindo sistemas adicionais de degradação energética para aplicações clínicas, enquanto síncrotrons permitem extração de feixes com energias variáveis diretamente do acelerador, característica que oferece maior flexibilidade no controle da profundidade de penetração dos prótons no tecido.

Figura 2 – Estrutura simplificada de um sistema de protonterapia clínica. O feixe de prótons é gerado em um acelerador (ciclotron ou síncrotron), transportado por linhas de feixe magnéticas e direcionado ao paciente por meio de um sistema rotacional (gantry), permitindo deposição precisa da dose no volume tumoral.



Fonte: Maughan (2022)

A implicação biológica desse padrão de deposição de energia é igualmente relevante. A elevada densidade linear de ionização na região do pico de Bragg aumenta a probabilidade de danos complexos ao DNA, incluindo quebras duplas de fita, cuja reparação é substancialmente mais desafiadora para a célula (Bushong, 2010; Paganetti, 2012).

A resposta celular à radiação envolve mecanismos coordenados de reparo do DNA, ativação de pontos de controle do ciclo celular e, diante de danos extensos ou irreparáveis, indução de apoptose ou morte mitótica (Bushong, 2010). A magnitude do efeito biológico é determinada por variáveis físicas e biológicas interdependentes, tais como dose absorvida, taxa de dose, tipo celular e estado fisiológico do tecido irradiado.

Nesse contexto, a comparação entre diferentes modalidades de radiação exige a incorporação do conceito de eficácia biológica relativa (RBE), que expressa a razão entre doses necessárias para produzir um mesmo efeito biológico. Em prática clínica, adota-se convencionalmente o valor médio de RBE igual a 1,1 para prótons terapêuticos (Podgorsak, 2005; Icru, 2007). Contudo, essa aproximação constitui simplificação operacional, visto que evidências indicam variações da RBE ao longo do percurso do feixe, especialmente na região distal ao pico de Bragg, em que ocorre aumento da densidade de ionização e modificação do espectro energético das partículas secundárias (Paganetti, 2012). Tal variabilidade reforça a necessidade de modelagem biológica refinada no planejamento terapêutico.

A aplicação clínica segura da protonterapia depende, ainda, de rigorosa padronização dosimétrica. Protocolos internacionais estabelecidos pela IAEA fundamentam-se na determinação da dose absorvida em água como padrão de referência (IAEA, 2000; Podgorsak, 2005), enquanto a ICRU define recomendações específicas para prescrição, registro e relato de

tratamentos com feixes de prótons (ICRU, 2007). Essa estrutura normativa assegura reprodutibilidade experimental, comparabilidade entre centros clínicos e confiabilidade terapêutica.

Dessa maneira, a protonterapia representa a expressão aplicada de princípios centrais da Física Nuclear e da interação radiação-matéria. Processos descritos em escala subatômica, tais como equilíbrio nuclear, decaimento radioativo, interação coulombiana e perda de energia por ionização, são operacionalizados com precisão milimétrica para produzir efeitos moleculares seletivos em tecidos tumorais. A coerência entre teoria física fundamental e aplicação clínica evidencia a continuidade conceitual entre núcleo atômico e resposta biológica, consolidando a Física Nuclear como fundamento estruturante dessa modalidade terapêutica.

3 Metodologia

A presente pesquisa adotou uma revisão sistemática da literatura com abordagem qualitativa. O levantamento de dados foi realizado entre agosto de 2025 e fevereiro de 2026 nas bases de dados PubMed, SciELO, e no repositório da International Atomic Energy Agency (IAEA).

Além dos artigos científicos, foram utilizadas obras clássicas e livros-texto de referência para fundamentação conceitual da física da radiação e da interação próton-matéria, incluindo Fundamentos de Física de Halliday, Resnick e Walker (2016), Física IV: Ótica e Física Moderna de Young e Freedman (2016), Física Moderna de Tipler e Llewellyn (2009), Ciência Radiológica para Tecnólogos de Bushong (2010), Proton Therapy Physics de Paganetti (2012) e o manual técnico Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students, referenciado por Podgorsak (2005). Essas obras foram incorporadas como base teórica para sustentar os princípios físicos, radiobiológicos e tecnológicos discutidos ao longo do estudo.

A estratégia de busca utilizou operadores booleanos para combinar os descritores em inglês e português: ‘proton therapy’, ‘Bragg peak’, ‘particle accelerators’, ‘radiation oncology’, ‘protonterapia’, ‘pico de Bragg’ e ‘aceleradores de partículas’. Foram selecionados artigos originais, manuais técnicos, relatórios de grupos de cooperação (PTCOG) e documentos de diretrizes institucionais, visando a integração de evidências físicas e clínicas desde o período de maiores avanços tecnológicos e consolidação da técnica.

Inicialmente, foram identificados aproximadamente 30 registros. Para a composição do corpus definitivo, adotaram-se critérios de inclusão baseados na: (a) relevância e autoridade dos autores no campo da física médica; (b) publicações revisadas por pares em periódicos ou

emitidas por órgãos reguladores internacionais; (c) abordagem técnico-científica dos fundamentos físicos ou desfechos clínicos; e (d) atualidade das informações. A escolha desses critérios justifica-se pela necessidade de garantir a integridade dos dados.

Após a triagem, 23 referências foram selecionadas para compor o núcleo da discussão, sendo 11 artigos científicos, 6 manuais e 6 relatórios técnicos ou diretrizes institucionais. Para estruturar a análise, os documentos foram organizados em eixos temáticos conforme apresentado na Tabela 1:

Tabela 1: Categorização temática das referências selecionadas (n=23)

Categoria Temática	n.º de artigos	Foco Principal
1. Fundamentos Físicos e o Pico de Bragg	5	Princípios físicos da interação próton-matéria, dosimetria e modulação do feixe.
2. Tecnologia de Aceleradores e Sistemas	4	Tipos de ciclotrons/síncrotrons, desenvolvimento tecnológico e inovações.
3. Aplicações Clínicas e Eficácia Terapêutica	4	Evidências clínicas em tumores específicos (pediátricos, SNC) e desfechos.
4. Estudos Comparativos e Radiobiologia	4	Análises de dosimetria comparada, toxicidade e efeitos biológicos (RBE - Eficácia Biológica Relativa).
5. Governança, Segurança e Custos	4	Garantia de qualidade (QA), análises econômicas e implementação.
6. Cenário Global e América Latina	2	Mapeamento de centros e desafios para introdução da tecnologia na região.

Fonte: Os autores, 2026.

A categorização temática supracitada foi estabelecida com o objetivo técnico de correlacionar a causa física (o comportamento da partícula) com a consequência clínica (a preservação de órgãos em risco). Essa estrutura permite que a análise dos resultados transcenda a mera descrição, fundamentando-se em uma perspectiva analítica que relaciona as propriedades de deposição de dose com os desfechos observados na literatura.

Os critérios de análise para cada categoria basearam-se na extração de variáveis específicas: para os fundamentos físicos, avaliou-se a precisão do Stopping Power e a dinâmica do pico de Bragg; para a eficácia clínica, observou-se a redução da toxicidade tardia em tecidos saudáveis; e para a implementação, analisou-se a viabilidade econômica frente à complexidade operacional de aceleradores como ciclotrons e síncrotrons. Dessa forma, a síntese dos resultados integra os argumentos centrais de cada grupo, garantindo uma visão sistêmica da transição tecnológica da radioterapia convencional para a terapia de partículas.

4 Discussões teóricas e resultados

Na radioterapia moderna ocorre a aplicação controlada de radiação ionizante com o objetivo de maximizar a probabilidade de controle tumoral enquanto se minimiza a toxicidade em tecidos normais, estabelecendo um delicado equilíbrio entre eficácia terapêutica e segurança clínica (Podgorsak, 2005). Esse equilíbrio é essencialmente determinado por princípios físicos, uma vez que a distribuição espacial da dose depende diretamente do tipo de radiação empregada e dos mecanismos de interação entre partículas energéticas e a matéria biológica. Em escala microscópica, a energia depositada nos tecidos resulta da transferência de energia cinética das partículas incidentes para elétrons atômicos, promovendo processos de excitação e ionização que desencadeiam reações físico-químicas responsáveis pelos efeitos biológicos da radiação. Assim, a capacidade de controlar espacialmente esse processo de deposição energética constitui um dos fatores centrais para a eficácia terapêutica.

Tabela 2: Resumo Comparativo entre Radioterapia (Fótons) e Protonterapia (Prótons)

Característica	Radioterapia (Fótons)	Protonterapia (Prótons)
Interação Atômica	Espalhada e Profunda	Concentrada no Alvo
Dano ao DNA	Muitas quebras simples (reparáveis)	Muitas quebras duplas (letais)
Tecidos Posteriores	Recebem radiação de saída	Dose de saída praticamente nula

Fonte: Os autores, 2026.

Apesar dos avanços tecnológicos em técnicas baseadas em fótons, como a Radioterapia de Intensidade Modulada (IMRT) e a Arcoterapia Volumétrica Modulada (VMAT), que aumentaram significativamente a conformidade da dose ao volume tumoral, a natureza física da interação dos fótons com a matéria impõe limitações estruturais. Como consequência, a deposição de energia ocorre ao longo de todo o trajeto do feixe no tecido, caracterizando-se por uma região de entrada seguida por atenuação progressiva e presença inevitável de dose de saída (Astro, 2022). Essa característica limita a proteção de órgãos em risco localizados posteriormente ao tumor, especialmente em regiões anatômicas complexas ou em pacientes pediátricos, nos quais a radiosensibilidade tecidual é mais elevada.

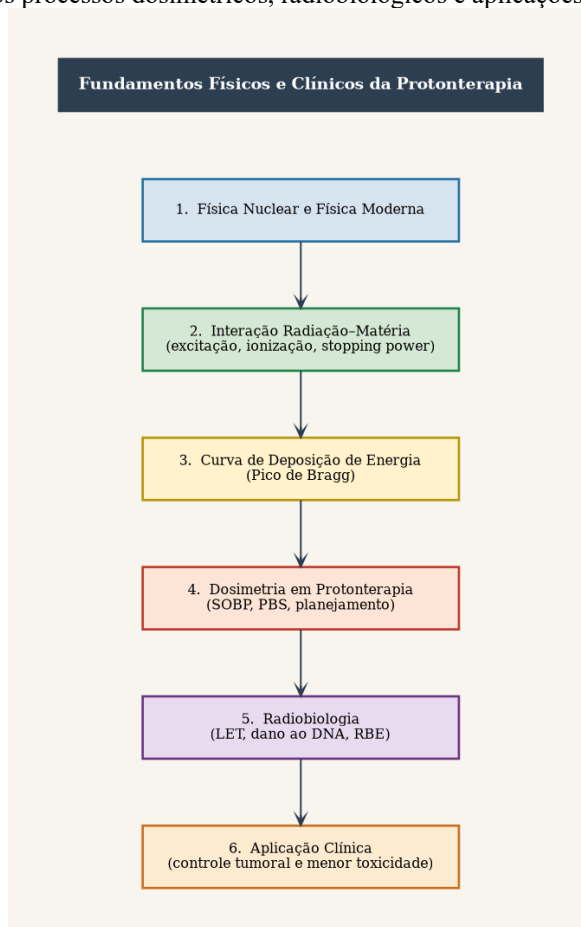
O potencial terapêutico das partículas carregadas foi inicialmente proposto por Wilson (1946), que identificou que prótons acelerados a altas energias poderiam oferecer vantagens substanciais no controle espacial da dose. Diferentemente dos fótons, prótons possuem massa e carga elétrica positiva, o que faz com que sua interação com a matéria seja dominada por forças colombianas entre a partícula incidente e os elétrons do meio.

Durante sua propagação no tecido, essas partículas transferem energia principalmente por excitação e ionização eletrônica. A taxa de perda de energia de partículas carregadas em

um meio material é descrita pelo conceito de poder de freamento, que representa a energia média transferida ao meio por unidade de comprimento percorrido pela partícula (Newhauser; Zhang, 2015; Paganetti, 2012). Essa grandeza depende principalmente da velocidade da partícula e das propriedades eletrônicas do material atravessado, resultando em aumento progressivo da deposição de energia à medida que a partícula desacelera.

Como consequência direta desse processo físico, a deposição de dose apresenta um máximo pronunciado próximo ao final da trajetória da partícula, conhecido como Pico de Bragg. Nesse ponto, a energia depositada atinge valores significativamente maiores do que nas regiões iniciais do trajeto. Após o pico, a dose decai abruptamente para valores próximos de zero, uma vez que os prótons perdem praticamente toda sua energia cinética e interrompem seu movimento (Paganetti, 2012). Na prática clínica, tumores apresentam espessura finita, o que exige a superposição de feixes com diferentes energias para produzir o chamado Spread-Out Bragg Peak (SOBP), garantindo distribuição homogênea da dose ao longo de todo o volume tumoral (Newhauser; Zhang, 2015).

Figura 3 – Estrutura conceitual da protonterapia, relacionando fundamentos da física nuclear e da interação radiação-matéria com os processos dosimétricos, radiobiológicos e aplicações clínicas.



Fonte: Os autores, 2026.

A superioridade dosimétrica da protonterapia não se limita, entretanto, à presença do pico de Bragg. Ela depende da compreensão detalhada das interações eletromagnéticas e nucleares envolvidas na propagação das partículas no tecido. Nas proximidades do pico, colisões nucleares podem gerar partículas secundárias que modificam localmente o espectro energético e a distribuição espacial da energia depositada (Matsuzaki *et al.*, 2010). Esses processos influenciam a densidade linear de energia (LET), parâmetro que descreve a quantidade de energia transferida ao meio por unidade de comprimento da trajetória da partícula.

Do ponto de vista radiobiológico, valores mais elevados de LET estão associados à produção de danos moleculares mais complexos. Durante e Loeffler (2010) demonstram que partículas carregadas apresentam maior probabilidade de induzir quebras duplas na molécula de DNA, lesões cuja reparação é significativamente mais difícil para os mecanismos celulares quando comparadas às quebras simples geralmente induzidas por fótons. Esse aumento na complexidade do dano genético contribui para a efetividade biológica relativa observada em determinadas aplicações da protonterapia.

No planejamento terapêutico, a determinação precisa do alcance do feixe constitui um fator crítico. A profundidade em que ocorre o Pico de Bragg depende diretamente da energia inicial dos prótons e do poder de freamento relativo dos tecidos atravessados. Pequenas incertezas na estimativa desse parâmetro podem deslocar o pico para além do volume tumoral ou resultar em subdosagem da região alvo (Paganetti, 2012). Tradicionalmente, essas estimativas são obtidas a partir de imagens de tomografia computadorizada de raios X, nas quais coeficientes de atenuação são convertidos em valores aproximados de poder de freamento. Estudos recentes indicam que a Tomografia Computadorizada por Prótons pode fornecer estimativas mais diretas e potencialmente mais precisas desse parâmetro (DEDES *et al.*, 2019).

A precisão espacial da protonterapia é ampliada pelo uso da técnica de Pencil Beam Scanning (PBS), na qual feixes estreitos de prótons são defletidos magneticamente e varrem o volume tumoral ponto a ponto, permitindo modulação tridimensional da dose (Newhauser; Zhang, 2015). Contudo, a heterogeneidade dos tecidos biológicos pode introduzir desafios adicionais. Baumann *et al.* (2019) demonstraram que regiões contendo tecido pulmonar, caracterizadas por baixa densidade e variações associadas ao ciclo respiratório, podem degradar a definição do Pico de Bragg, exigindo algoritmos de correção e planejamento adaptativo.

Nesse contexto, a Garantia de Qualidade (Quality Assurance, QA) torna-se essencial para assegurar a precisão dos tratamentos. Protocolos internacionais recomendam verificação sistemática da calibração dos feixes, da estabilidade energética dos aceleradores e da precisão geométrica dos sistemas de entrega de dose. O relatório do PTCOG destaca que a automação desses processos pode reduzir o tempo operacional sem comprometer a segurança clínica (PTCOG, 2016; Flanz *et al.*, 2016). Paralelamente, os protocolos de dosimetria estabelecidos pela IAEA garantem rastreabilidade metrológica internacional na determinação da dose absorvida em água (IAEA, 2000; Podgorsak, 2005).

Do ponto de vista clínico, essas propriedades físicas traduzem-se em benefícios relevantes para determinados grupos de pacientes. Em tumores pediátricos do sistema nervoso central e da base do crânio, estudos indicam que o uso de PBS permite manutenção de elevadas taxas de controle tumoral com redução significativa da dose integral depositada em tecidos saudáveis (Tran *et al.*, 2020; Lim *et al.*, 2020). Essa redução é considerada um fator importante na diminuição de toxicidades tardias e no risco de neoplasias secundárias.

Assim, a protonterapia representa uma convergência entre fundamentos da física moderna, desenvolvimento tecnológico de aceleradores de partículas e aplicação clínica em oncologia. Desde a proposição teórica de Wilson até sua implementação em centros hospitalares contemporâneos, essa modalidade terapêutica exemplifica como princípios fundamentais da interação radiação-matéria podem ser convertidos em ferramentas de alta precisão no tratamento do câncer (Mohan; Grosshans, 2017; Sikkema *et al.*, 2017)

5 Considerações finais

As evidências apresentadas nesta revisão indicam que a protonterapia representa mais do que uma evolução incremental da radioterapia convencional; trata-se de uma mudança de paradigma fundamentada em princípios físicos distintos, particularmente devido à presença do Pico de Bragg. Diferentemente da radiação baseada em fótons, cuja deposição de energia segue um padrão de atenuação exponencial ao longo do tecido, os prótons apresentam um perfil de deposição de dose altamente localizado, permitindo que a maior parte da energia seja liberada em uma profundidade específica previamente determinada. Essa característica física confere à protonterapia uma capacidade singular de conformação de dose, reduzindo significativamente a exposição de tecidos saudáveis adjacentes ao volume tumoral.

A análise integrada da literatura demonstra que essa vantagem física possui implicações clínicas diretas e mensuráveis. A redução da dose em tecidos normais está associada a menores

taxas de toxicidade aguda e, sobretudo, de efeitos tardios, aspecto particularmente relevante em pacientes pediátricos e em tumores localizados próximos a órgãos críticos, como cérebro, medula espinhal e estruturas oculares. Dessa forma, a protonterapia não apenas amplia as possibilidades terapêuticas em contextos clínicos complexos, mas também contribui para a preservação da qualidade de vida dos pacientes a longo prazo.

Entretanto, apesar das evidências crescentes que sustentam seus benefícios clínicos e radiobiológicos, a disseminação global da protonterapia ainda enfrenta desafios significativos. A implementação dessa tecnologia exige infraestrutura altamente especializada, incluindo sistemas de aceleração de partículas, linhas de feixe e complexos sistemas de planejamento e controle de dose. Esses requisitos tecnológicos implicam custos elevados de instalação, operação e manutenção, o que limita a disponibilidade da terapia a um número relativamente restrito de centros especializados no mundo. No contexto brasileiro, tais desafios são ainda mais evidentes, uma vez que fatores econômicos, estruturais e regulatórios influenciam diretamente a incorporação de tecnologias avançadas no sistema de saúde.

Nesse cenário, avanços recentes no desenvolvimento de aceleradores mais compactos, como sistemas de protonterapia do tipo single-room, surgem como uma alternativa promissora para reduzir custos e ampliar a acessibilidade da tecnologia. Paralelamente, o fortalecimento de políticas públicas voltadas à inovação em saúde e à incorporação de terapias de alta precisão poderá desempenhar um papel fundamental na expansão do acesso a essa modalidade terapêutica.

Assim, a protonterapia evidencia de forma clara como princípios fundamentais da física podem ser aplicados diretamente na prática clínica. Ao explorar de maneira precisa o comportamento da deposição de energia dos prótons, especialmente por meio do Pico de Bragg, essa modalidade terapêutica permite alcançar níveis de seletividade no tratamento radioterápico que dificilmente seriam possíveis com técnicas convencionais. À medida que avanços tecnológicos e institucionais tornarem essa abordagem mais acessível, é provável que seu papel no tratamento do câncer se torne cada vez mais relevante.

Referências

AMERICAN SOCIETY FOR RADIATION ONCOLOGY (ASTRO). **Proton Beam Therapy (PBT) Model Policy**. 2022. Disponível em: <https://www.astro.org/astro/media/astro/daily%20practice/pdfs/astropbtmodelpolicy.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2026.

BAUMANN, K. S. *et al.* Effects of the Bragg peak degradation due to lung tissue in proton

therapy of lung cancer patients. **Radiation Oncology**, v. 14, n. 183, 2019. DOI: 10.1186/s13014-019-1375-0. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31653229/>. Acesso em: 29 jun. 2026.

BUSHONG, S. C. **Ciência radiológica para tecnólogos: física, biologia e proteção**. 9. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.

DEDES, G. *et al.* Experimental comparison of proton CT and dual energy X-ray CT for relative stopping power estimation in proton therapy. **Physics in Medicine & Biology**, v. 64, n. 16, 2019. DOI: 10.1088/1361-6560/ab2b72. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31220814/>. Acesso em: 29 jun. 2026.

DURANTE, M.; LOEFFLER, J. S. Charged particles in radiation oncology. **Nature Reviews Clinical Oncology**, v. 7, p. 37–43, 2010. DOI: 10.1038/nrclinonc.2009.183. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19949433/>. Acesso em: 29 jun. 2026.

FLANZ, J. *et al.* **PTCOG Report #2: Aspects of Safety in Particle Therapy**. San Carlos: Particle Therapy Co-Operative Group, 2013. Disponível em: https://www.ptcog.site/images/Docs/Shielding_radiation_protection.pdf. Acesso em: 29 jun. 2026.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física: volume 4 – óptica e física moderna**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). **Absorbed dose determination in external beam radiotherapy: an international code of practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water**. Vienna: IAEA, 2000. (Technical Reports Series, n. 398). DOI: 10.61092/iaea.ve7q-y94k. Disponível em: <https://www.iaea.org/publications/15048/absorbed-dose-determination-in-external-beam-radiotherapy>. Acesso em: 29 jun. 2026.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). **Decommissioning of Particle Accelerators**. IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-2.9, PUB 1854. Vienna: IAEA, 2020. Disponível em: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1854_web.pdf. Acesso em: 29 jun. 2026.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS (ICRU). **Prescribing, recording, and reporting proton-beam therapy**. Journal of the ICRU, v. 7, n. 2, 2007. DOI:10.1093/jicru/ndm021. Disponível em: <https://academic.oup.com/jicru/article-abstract/7/2/NP/811649?redirectedFrom=fulltext&login=false>. Acesso em: 29 jun. 2026.

LIM, P. S. *et al.* Outcomes of adolescents and young adults treated for brain/skull base tumors with pencil beam scanning proton therapy. **Pediatric Blood & Cancer**, v. 67, n. 12, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/pbc.28664>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pbc.28664>. Acesso em: 29 jun. 2026.

MATSUZAKI, Y. *et al.* Nuclear collision processes around the Bragg peak in proton therapy. **Radiological Physics and Technology**, v. 3, p. 84–92, 2010. DOI: 10.1007/s12194-009-0081-2. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20821107/>. Acesso em: 29 jun. 2026.

MAUGHAN, R. L. Proton therapy: behind the scenes. **OncoLink**, 24 mai. 2022. Disponível

em: <https://www.oncolink.org/cancer-treatment/radiation/types-of-radiation-therapy/proton-therapy/overviews-of-proton-therapy/proton-therapy-behind-the-scenes>. Acesso em: 8 mar. 2026.

MOHAN, R.; GROSSHANS, D. Proton therapy – present and future. **Advanced Drug Delivery Reviews**, v. 109, p. 26–44, 2017. DOI: 10.1016/j.addr.2016.11.006. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27919760/>. Acesso em: 29 jun. 2026.

NARICI, L. *et al.* Multiple sensory illusions are evoked during the course of proton therapy. **Life Sciences in Space Research**, v. 26, p. 140–148, 2020. DOI: 10.1016/j.lssr.2020.04.006. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32718680/>. Acesso em: 29 jun. 2026.

NEUHAUSER, W. D.; ZHANG, R. The physics of proton therapy. **Physics in Medicine & Biology**, v. 60, n. 8, p. R155–R209, 2015. DOI: 10.1088/0031-9155/60/8/R155. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25803097/>. Acesso em: 29 jun. 2026.

PAGANETTI, H. **Proton Therapy Physics**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2012.

PARTICLE THERAPY CO-OPERATIVE GROUP (PTCOG). **Particle Therapy Efficiency: Aspects of Quality Assurance**. San Carlos: PTCOG, 2016. Disponível em: https://ptcog.online/wp-content/uploads/sites/4/2024/12/White-Paper-QA-Efficiency_Final.pdf. Acesso em: 29 jun. 2026.

PODGORSK, E. B. **Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students**. Vienna: IAEA, 2005.

SIKKEMA, M. *et al.* Advances in Radiation Oncology (ICARO-2). In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). **International Conference on Advances in Radiation Oncology**. Vienna: IAEA, 2017.

TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. **Física Moderna**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

TRAN, S. *et al.* Clinical outcomes and quality of life in children and adolescents with primary brain tumors treated with pencil beam scanning proton therapy. **Pediatric Blood & Cancer**, v. 67, n. 12, 2020. DOI: 10.1002/pbc.28465. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32902137/>. Acesso em: 29 jun. 2026.

WIKIMEDIA COMMONS. BraggPeak-en.svg. **Wikimedia Commons**, 27 fev. 2026. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:BraggPeak-en.svg>. Acesso em: 27 fev. 2026.

WILSON, R. R. Radiological use of fast protons. **Radiology**, v. 47, n. 5, p. 487–491, 1946. DOI: 10.1148/47.5.487. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20274616/>. Acesso em: 29 jun. 2026.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física IV: Sears e Zemansky: ótica e física moderna**. 14. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.,

Data de submissão: 21/03/2026

Data de aceite: 02/06/2026