



## HADRONTERAPIA COM CARBONO E SUAS APLICAÇÕES NA SAÚDE

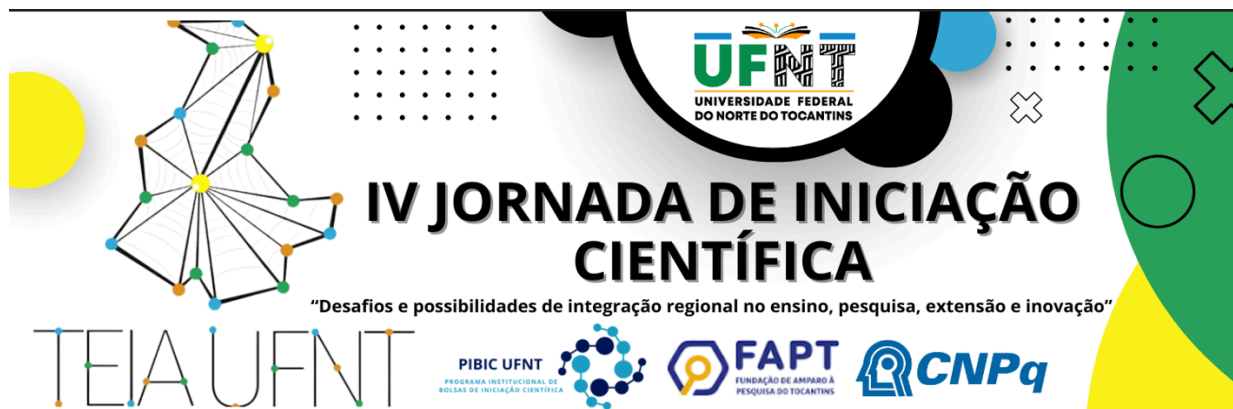
**SOUSA**, Ashley Fernanda de Sousa e<sup>1</sup>; **GOMES**, Érica Cupertino<sup>2</sup>

### RESUMO

A Hadronterapia com íons de carbono representa uma inovação na radioterapia, utilizando partículas pesadas de alta energia que oferecem maior precisão e eficácia biológica em relação às técnicas convencionais. O estudo analisou as aplicações desta tecnologia na saúde, os efeitos sobre tecidos humanos, os centros que disponibilizam o tratamento e comparou o uso de prótons e íons de carbono na oncologia. Utilizando uma abordagem qualitativa e revisão bibliográfica, foram selecionadas as informações mais relevantes sobre o tema. A carbonoterapia, subgrupo da hadronterapia, apresenta propriedades físicas singulares, como o Pico de Bragg e alta taxa Linear de Transferência Energética (LET), permitindo deposição concentrada de energia e maior eficiência biológica relativa (RBE) na destruição de células tumorais resistentes. Os íons de carbono interagem por ionização, espalhamento nuclear e fragmentação, induzindo quebras duplas no DNA e maior efeito terapêutico, sendo indicada especialmente para tumores de difícil controle, como osteossarcomas e neoplasias radiorresistentes. Apesar dos benefícios, o uso global da técnica é limitado devido ao alto custo e à complexidade tecnológica, concentrando centros em países como Japão e China. Na América Latina, apenas a Argentina possui uma instalação em construção. Portanto, a disseminação do

<sup>1</sup> Bolsista do Programa de Iniciação Científica (PIBIC - CNPQ). Universidade Federal do Norte do Tocantins (UFNT), Faculdade de Ciências da Saúde, ashley.sousa@ufnt.edu.br.

<sup>2</sup> Docente do Curso de Física. Doutora em Engenharia Nuclear. Universidade Federal do Norte do Tocantins (UFNT), Centro de Ciências Integradas, erica.gomes@ufnt.edu.br.



conhecimento sobre hadronterapia é essencial para fomentar pesquisas e ampliar opções terapêuticas em oncologia, representando uma alternativa promissora para a Medicina do futuro.

**Palavras-chave:** Radioterapia com íons pesados. Protonterapia. Oncologia. Tumores radorresistentes.

## I. INTRODUÇÃO/JUSTIFICATIVA

Este artigo aborda a hadronterapia com íons de carbono, uma técnica avançada de radioterapia com potencial terapêutico superior em tumores radorresistentes e de difícil localização. As atividades desenvolvidas consistiram em pesquisa bibliográfica seguida de análise da literatura científica disponível, com foco nas aplicações clínicas e nas características físicas dessa técnica. Este estudo situa-se na área do conhecimento das Ciências Exatas e da Terra, com ênfase em Física Médica e Radio-oncologia, sendo a Física aplicada à Saúde área temática secundária, destacando a interdisciplinaridade com a Medicina. Essa técnica é particularmente interessante quando tratamos de tumores radorresistentes - como é o caso dos osteossarcomas. As atividades de revisão e análise foram fundamentais para sistematizar não apenas os aspectos físicos e biológicos da carbonoterapia, mas também desenhar um panorama global de sua distribuição. Nesta análise, conseguimos não apenas ampliar o conhecimento acerca da Física Médica, mas também enquadrá-la como parte do cenário socioeconômico e geopolítico mundial, tendo sido de extrema relevância para a atuação profissional futura, devido à capacidade de analisar e reconhecer as desigualdades no acesso internacional à saúde, possibilitando a atuação como agente de transformação, na defesa dos investimentos tecnológicas no Sistema Único de Saúde (SUS). Considerando o



contexto de produção científica ao nível de graduação, a motivação se deu principalmente pela difusão de conhecimentos ainda pouco explorados no Brasil.

## II. BASE TEÓRICA

Os principais autores consultados para a construção deste trabalho são aqueles que investigam a física das partículas aplicadas à radioterapia e os impactos clínicos da radioterapia. Entre eles, destaca-se Burigo (2011), cuja obra aborda a contribuição de processos nucleares no tratamento de tumores, fornecendo base física para a compreensão da interação dos íons de carbono com tecidos biológicos. Outro autor fundamental foi Maccheroni et al (2023), que investigou efeitos tardios da hadronterapia em sobreviventes de câncer infantil, permitindo correlacionar as vantagens dessa modalidade na redução de toxicidade a longo prazo. Ainda, em posição de extremo destaque, temos os documentos institucionais da Particle Therapy Co-Operative Group (2024), que fornecem dados epidemiológicos e dados quantitativos de doses e unidades funcionantes.

## III. OBJETIVOS

Objetivo Geral: analisar as aplicações da hadronterapia com íons de carbono na saúde, destacando suas características físicas e biológicas.

Objetivos Específicos:

- Sistematizar os conhecimentos existentes sobre hadronterapia com carbono, enfatizando seus efeitos em tecidos humanos;
- Contribuir para a formação acadêmica em saúde, explorando uma tecnologia inovadora e pouco explorada no Brasil;
- Conhecer as instalações que oferecem esse tipo de tratamento;



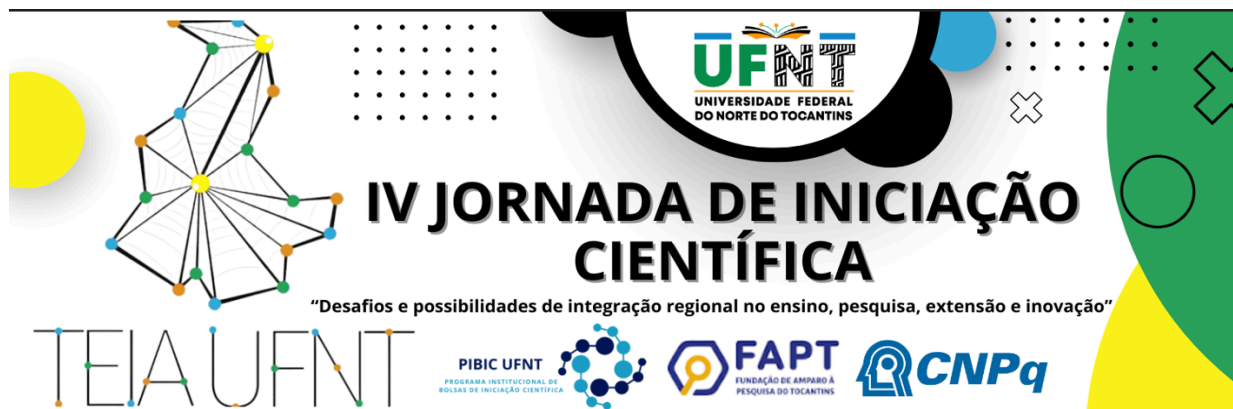
- Comparar as características e aplicações clínicas da carbonoterapia e da protonterapia, destacando indicações específicas de cada modalidade.

#### IV. METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido a partir de uma abordagem qualitativa, de caráter exploratório e descritivo. A metodologia adotada consistiu em uma busca ativa por referências bibliográficas, artigos científicos, documentos institucionais e materiais didáticos. O processo teve como objetivo reunir um acervo de conteúdos relevantes para posterior análise crítica e construção de reflexões fundamentadas. Inicialmente, foi realizada uma curadoria de fontes teóricas, priorizando materiais atualizados, pertinentes ao entendimento do funcionamento da radioterapia com íons pesados e suas aplicações na saúde. As referências foram organizadas em um portfólio pessoal, que serviu como base para o desenvolvimento das reflexões e análises subsequentes. Após a organização do material, procedeu-se à seleção das informações mais relevantes, com base em critérios de aplicabilidade prática e coerência com os objetivos do trabalho. As partes alinhadas aos objetivos propostos foram selecionadas e então integradas ao conteúdo final do trabalho.

#### V. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A hadronterapia é classificada como um tipo de radioterapia que utiliza partículas pesadas para o tratamento de tumores. Neste grupo se enquadra a carbonoterapia, que é o foco principal deste trabalho. O carbono é utilizado na sua forma de íon (geralmente  $C^{6+}$ ), que são acelerados em ciclotrons na faixa de energia de 200 a 430 MeV/u, característica que permite que essas partículas penetrem profundamente nos tecidos biológicos, alcançando até aproximadamente 30 cm. Íons de carbono possuem como característica a deposição por meio do pico de



Bragg, tornando-os extremamente precisos. Esses íons interagem com a matéria biológica por meio da perda de energia por ionização e excitação. Por se tratar de um íon pesado e altamente carregado, ele tem capacidade de arrancar elétrons dos átomos promovendo ionização, espalhamento nuclear - que ocorre quando os íons de carbono interagem com núcleos, por meio da colisão, que pode causar a fragmentação do íon de carbono em prótons, nêutrons e outros núcleos mais leves. Ou seja, além da dose do pico de Bragg, há também deposição de partículas no trajeto. Temos ainda a produção de radiação secundária, pela emissão de píons, raios gama e nêutrons que contribuem para a dose indireta. Por fim, o último processo de interação é a Transferência Linear de Energia (LET), depositando grande quantidade de energia por unidade de distância, variando entre 100-300 keV/ $\mu\text{m}$ , quantidade capaz de causar danos ao DNA, quebrando a estrutura das duplas fitas. Devido a essas características, e ao fato de que essas tecnologias são de custo bem mais elevado que a radioterapia convencional, inicialmente é interessante apontar os tipos de tumores que mais se beneficiaram do uso da hadronterapia. A indicação mais clara para hadronterapia seria nos tumores radorresistentes (como os osteossarcomas e os tumores da base de crânio) (MACCHERONI et al, 2023). Considerando que a tecnologia necessária para a utilização de hadronterapia tem custo elevado para manutenção e aplicação, sua disponibilidade no mundo ainda é extremamente limitada e quase sempre destinada a pesquisas, sem atendimento ao público em massa.

Quando consideramos os aceleradores de prótons e carbono, os EUA, Japão e Alemanha possuem a maior quantidade de unidades ativas, demonstrando o investimento contínuo neste setor. Quanto aos países emergentes, destaca-se a China, com 11 unidades de protonterapia e 5 unidades de carbonoterapia ativas, evidenciando seu investindo em autonomia tecnológica, seguida da Índia, que



avança lentamente e da Argentina, que é o único país da América Latina citado na lista e merece destaque, ainda que a unidade esteja em construção. A maioria dos países do mundo não têm capacidade de executar a carbonoterapia, que é uma realidade inclusive para os Estados Unidos, apesar de possuírem números consideráveis de unidades de manipulação de prótons. Portanto, os destaques, considerando apenas a tecnologia para uso de íons de carbono que é o foco deste trabalho, são o Japão e a China, que atualmente apresentam, respectivamente, 7 e 5 unidades.

Assim, podemos observar que o alcance aos tratamentos mais atuais em termos de tratamento de câncer se concentra no norte global e nos países orientais de maior destaque mundial. Isso se deve não apenas à tecnologia referida ser avançada, mas também ao elevado custo para a realização do tratamento. É importante destacar que mesmo em países com capacidade para hadronterapia, essa modalidade de radiação se limita ao uso nas indicações já supracitadas (tumores infantis e radiorresistentes, principalmente).

## VI. CONCLUSÃO/CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dessas análises, evidenciamos portanto que a Hadronterapia com íons de carbono constitui uma modalidade terapêutica inovadora, de elevada precisão física e superior eficácia biológica quando comparada às técnicas convencionais. As propriedades singulares do carbono conferem a ele um potencial para tratamento de tumores resistentes e de difícil localização, sendo inclusive mais vantajoso que a terapia com prótons em contextos clínicos de maior complexidade tumoral. Todavia, o acesso a essa tecnologia ainda é restrito e concentrado nos países com maior investimento em inovação. Então, além de contribuir para a compreensão dos fundamentos físicos e biológicos da carbonoterapia, este estudo



reforça a importância da divulgação desse conhecimento, apontando a carbonoterapia como caminho válido para a evolução da Medicina brasileira.

## VII. REFERÊNCIAS

BURIGO, L. N. Hadronterapia: Simulações da Contribuição de Processos Nucleares para o Tratamento de Tumores. Porto Alegre: UFRGS, 2011. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufrgs.br/da.php?nrb=000772159&loc=2011&l=0236051600863f02>. Acesso em: 17 jul. 2025.

MACCHERONI, M. et al. Liver Late Effects in Childhood Cancer Survivors Treated With Radiation Therapy: A PENTEC Comprehensive Review. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*, v. 117, n. 3, p. 584-592, 2023. Disponível em: <https://www.redjournal.org/action/showPdf?pii=S0360-3016%2823%2900584-9>. Acesso em: 1 ago. 2025.

PTC. Facilities in Operation (Public). *Particle Therapy Co-Operative Group*, 2024. Disponível em: <https://www.ptcog.site/index.php/facilities-in-operation-public>. Acesso em: 28 out. 2024.

## VIII. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – Brasil. O incentivo à produção científica e à formação acadêmica tem papel fundamental na construção de uma trajetória comprometida com o conhecimento e a transformação social.