

ESTUDO COMPUTACIONAL DO EFEITO DA FOCALIZAÇÃO NA RADIOTERAPIA VHEE

**FÁBIO LUNELLI DA SILVA BRUM¹; ALEXANDRE BONATTO²;
THATIANE ALVES PIANOSCHI²; JOSÉ RAFAEL BORDIN¹**

¹*Universidade Federal de Pelotas (UFPEL) - fabioluneli@gmail.com; jr bordin@ufpel.edu.br*

²*Universidade Federal de Ciências da Saúde de Porto Alegre (UFCSPA)-
abonatto@ufcspa.edu.br; thatiane@ufcspa.edu.br*

1. INTRODUÇÃO

O câncer representa um problema de saúde pública para o nosso país, principalmente devido ao aumento da expectativa de vida da população pelo controle de outras doenças e ao acelerado processo de urbanização e industrialização das últimas décadas, com o consequente aumento dos riscos relacionados a fatores ambientais e aos novos hábitos de vida [1].

A radioterapia é a forma de tratamento do câncer mais comumente utilizada ao longo dos anos [1, 2]. Neste tipo de tratamento são utilizados, de forma mais ampla, feixes de fótons. Contudo, uma desvantagem, em função do mecanismo da interação dos fótons com a matéria, é de que tecidos saudáveis posicionados geometricamente na linha de ação do feixe podem ser danificados [3].

Uma possível alternativa para minimizar esse efeito nos tecidos sadios é a utilização de outros tipos de radiação ionizante, tais como, por exemplo, feixes de protóns. Devido às características das interações de partículas massivas carregadas com o meio no qual elas se propagam, feixes de prótons com altas energias podem penetrar profundamente no paciente, mantendo uma deposição de dose inicialmente moderada, que aumenta suavemente à medida que os prótons perdem energia mas permanecem com altas velocidades. O máximo de deposição de dose do feixe ocorre na profundidade em que os prótons atingem baixas velocidades e são freados. Nesta região, forma-se um pico estreito de deposição de dose, denominado pico de Bragg. Após esse pico, a dose depositada cai a zero abruptamente. Combinando-se múltiplos feixes com energias distintas, é possível estender a região do pico de Bragg, transformando-a em um platô de máxima deposição de dose conhecido como pico de Bragg espalhado (*spread-out Bragg peak*, ou SOBP) [4]. Ajustando-se o platô para que o mesmo ocorra na região tumoral, é possível minimizar os danos no tecido saudável e, consequentemente, os efeitos colaterais no paciente [3]. Contudo, dada a necessidade de utilizar-se ciclotrões de médio e grande porte para acelerar prótons com as energias requeridas para tratamentos de tumores profundos (50~250 MeV), a elevada complexidade técnica e o custo da protonterapia são empecilhos para a popularização dessa modalidade de tratamento [4, 5, 6].

Assim como os prótons, os elétrons possuem massa e carga elétrica, e feixes dessas partículas também podem ser utilizados como fontes de radiação para radioterapia. Por serem muito mais leves que os prótons, os elétrons podem ser acelerados em aceleradores lineares compactos, de menor custo e complexidade se comparados aos ciclotrões utilizados para acelerar prótons. Aplicações típicas de radioterapia com elétrons requerem feixes com energias entre 5 e 20 MeV, mas limitam-se ao tratamento de tumores superficiais, pois apresentam queda rápida de dose em profundidade [7]. Para que tumores profundos possam ser tratados com

feixes de elétrons, é necessário acelerá-los a energias superiores aos 20 MeV fornecidos por equipamentos convencionais.

A radioterapia com feixes de elétrons com energias entre 50 e 250 MeV (VHEE, *Very high energy electrons*) tem sido estudada desde os anos 2000 [10]. Em contraste com os elétrons de baixa energia, feixes VHEE de 150 a 250 MeV têm sido apresentados como uma modalidade alternativa de tratamento para tumores profundos devido às suas vantagens dosimétricas [4].

Apesar de viabilizar o tratamento de tumores profundos, a radioterapia VHEE apresenta a desvantagem de uma deposição de dose em profundidade (PDP) tanto na entrada quanto na saída do paciente resultando em uma deposição de dose fora da região tumoral. Entretanto, estudos recentes mostram que, controlando-se a focalização do feixe de elétrons, é possível modular a deposição da dose na região tumoral, produzindo altos volumes de dose em pontos específicos dentro de um objeto simulador (phantom) de água [4, 8]. Além disso, combinando-se múltiplos feixes de elétrons com focalizações distintas, é possível obter-se um platô de deposição máxima de dose, denominado pico espalhado de elétrons (SOEP, *spread-out electrons peak*), com características similares às do pico de Bragg espalhado obtido na protonterapia.

A figura 1 engloba três gráficos de dose em profundidade. A Figura 1(a) representa a distribuição de dose para os seguintes feixes: feixes de fótons (raios-X) de 6 MeV; feixe de prótons de 160 MeV com a evidência do pico de Bragg e o feixe de elétrons de 4 MeV. A Figura 1(b) representa o pico de Bragg espalhado, obtido com a sobreposição de múltiplos feixes de prótons de várias energias. A Figura 1(c) representa o pico de Bragg espalhado, obtido com a sobreposição de múltiplos feixes de elétrons (VHEE) com diversas focalizações.

Dessa forma, aplicar a focalização para conseguir a diminuição da deposição de dose em tecidos sadios é de suma importância para a ampliação dessa modalidade de tratamento. Este trabalho pretende entender os processos de focalização e deposição de dose, de modo a relacionar estes para uma otimização da deposição de dose no paciente.

O objetivo geral deste trabalho é investigar, por meio de métodos analíticos e numéricos, técnicas de modulação da deposição de dose em profundidade para feixes de elétrons com energias muito altas (VHEE, *very high energy electrons*), maximizando a dose depositada na região-alvo e minimizando as doses nas regiões adjacentes, como a de entrada e saída.

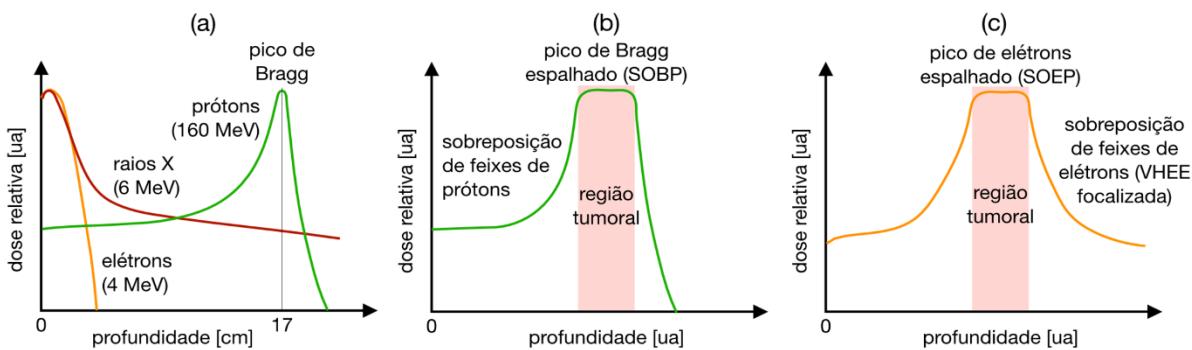
Para essa finalidade, os seguintes objetivos específicos foram definidos: estudar a focalização de feixes VHEE no vácuo utilizando o programa computacional ELEGANT (*Electron Generation And Tracking*) e códigos desenvolvidos em Python; estudar a influência da focalização dos feixes VHEE nas propriedades dosimétricas obtidas em tecido equivalente utilizando o programa computacional TOPAS e estudar a influência da focalização dos feixes VHEE na formação do pico de elétrons espalhado ("spread-out electron peak", ou SOEP).

2. METODOLOGIA

Este trabalho terá como primeira etapa, o estudo da dinâmica dos feixes VHEE no vácuo através de um sistema de focalização composto por quadrupólos magnéticos. O modelo de quadrupólos utilizado para a simulação consiste de um sistema de quadrupólos alinhados com o objeto simulador, representado (Figura 1). Para a realização deste estudo serão utilizadas células de focalizações e desfocalizações de feixes (*FODO lattices*) que estão incluídas no programa

computacional utilizado. Estes feixes VHEE serão focalizados em diferentes posições no meio, de forma a compreender as variáveis que controlam este processo de focalização. Então, para a realização deste processo será utilizado o programa computacional ELEGANT (*Electron Generation And Tracking*) [9], o qual tem a capacidade de simular feixes de elétrons no vácuo, adicionando focalizações em posições distintas do feixe.

Figura 1: (a) comparação dos perfis de deposição de dose em profundidade típicos para feixes de fótons (raios x), elétrons e prótons; (b) representação esquemática do pico de Bragg espalhado, obtido através da sobreposição de múltiplos feixes de prótons com energias distintas; (c) representação esquemática do pico de elétrons espalhado, obtido através da sobreposição de múltiplos feixes de elétrons (VHEE) com focalizações distintas.



Fonte: Autor

Depois de entendido o processo de como controlar o feixe VHEE no vácuo utilizando este conjunto de quadrupólos magnéticos e de como ajustar a posição focal, a próxima etapa será estudar a deposição de dose, devido a aplicação de diferentes focalizações em diferentes posições do meio, onde este meio agora é um objeto simulador de tecido equivalente. Para a realização desta etapa será utilizado o programa computacional TOPAS [10], o qual tem como base o código Geant4 e o método Monte Carlo para a realização das simulações envolvendo feixes de partículas. O TOPAS é capaz de simular feixes de elétrons interagindo com objetos simuladores, assim fornecendo a distribuição da dose em profundidade.

Desta forma, com a produção destes feixes VHEE com diferentes focalizações em diferentes posições e entendendo a forma de como ocorre a deposição de dose é possível fazer uma conexão de como os efeitos da focalização impactam tanto nas características dosimétricas do feixe quanto na formação do SOEP.

3.RESULTADOS E DISCUSSÃO

Até o presente momento a linguagem computacional utilizada em ambos os códigos está sendo aprendida. A simulação envolverá a implementação de um feixe composto por elétrons, os quadrupólos, o objeto simulador, a deposição de dose e a focalização. Além da parte computacional foi estudada as propriedades relacionadas a focalizações de feixes de partículas.

4. CONCLUSÕES

Assim na conclusão desse projeto de pesquisa, espera-se obter um relação-

entre o sistema de focalização e deposição de dose que maximize a dose depositada no volume alvo minimizando a dose em tecidos adjacentes.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CARUSO, F; CARVALHO, B.H.V; SANTORO,A.F.S. "A Física De Altas Energias e a Terapia De Câncer Com Prótons: Motivações e Perspectivas ." **O Mundo das Partículas de Ontem e de Hoje (2000)**. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, RJ.
- [2] TARDELLI, T.C. Análise da Viabilidade de Simulações com Feixes de Prótons de 100, 150, 200 e 250 MeV em Alvos Heterogêneos. Botucatu -SP, 2010. Monografia (Graduação em Física Médica) – Curso de Graduação em Física Médica, Universidade Estadual "Julio de Mesquita Filho" Campus de Botucatu.
- [3] CALABRESI, M.F.F. Análise da Viabilidade de Simulações com Feixes de Prótons de 150 MeV com Alvos Heterogêneos. Botucatu -SP, 2009. Monografia (Graduação em Física Médica) – Curso de Graduação em Física Médica, Universidade Estadual "Julio de Mesquita Filho" Campus de Botucatu.
- [4] WHITMORE, L.; MACKAY, R.I.; VAN HERK, M.; JONES, J.K.; JONES, R.M. Focused VHEE (very high energy electron) beams and dose delivery for radiotherapy application. **Scientific Reports** vol 11, Article number: 14013, 2021.
- [5] SMITH, W.L.; SMITH, C.D.; PATEL, S.; EISENSTAT, D.D.; QUIRK, S.; MACKENZIE, M.; OLIVOTTO, I.A. What Conditions Make Proton Beam Therapy Financially Viable in Western Canada? **Cureus**. 2018 Nov 27;10(11):e3644. Doi: 10.7759/cureus.3644. PMID: 30723643; PMCID: PMC6351082.
- [6] KONSKI, A; SPEIER,W; HANLON, A; BECK, J.R; POLLACK, A. Is Proton Beam Therapy Cost Effective in the Treatment of Adenocarcinoma of the Prostate. **JOURNAL OF CLINICAL ONCOLOGY**, Philadelphia, VOL 25, NUMBER 24 , AUGUST 2007.
- [7] RONGA, M.G.; CAVALLONE, M.; PATRIARCA, A.; LEITE, A.M.; LOAP, P.; FAVAUDON, V.; CRÉHANGE, G.; DE MARZI, L. Back to the Future: Very High-Energy Electrons (VHEEs) and Their Potential Application in Radiation Therapy. **Cancers** 2021, 13, 4942. <https://doi.org/10.3390/cancers13194942>.
- [8] KOKUREWICZ, K., BRUNETTI, E., WELSH, G.H. et al. Focused very high-energy electron beams as a novel radiotherapy modality for producing high-dose volumetric elements. **Sci Rep** 9, 10837 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46630-w>
- [9] BORLAND, M. ELEGANT: A Flexible SDDS-Compliant Code for Accelerator Simulation. Argone National Lab., IL United States (2000).
- [10] PERL, J., SHIN, J., SCHUMANN, J., FADDEGON, B. & PAGANETTI, H. TOPAS: An innovative proton Monte Carlo platform for research and clinical applications. **Med. Phys.** 39, 6818–6837 (2012).