

## ESTUDO COMPUTACIONAL DO EFEITO DE INOMOGENEIDADES NA DOSIMETRIA DA RADIOTERAPIA VHEE FOCALIZADA

**FÁBIO LUNELLI DA SILVA BRUM<sup>1</sup>; ALEXANDRE BONATTO<sup>2</sup>; THATIANE ALVES PIANOSCHI<sup>3</sup>; JOSÉ RAFAEL BORDIN<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>*Universidade Federal de Pelotas – fabio.lunelli@ufpel.edu.br*

<sup>2</sup>*Universidade Federal de Ciências da Saúde de Porto Alegre – abonatto@ufcspa.edu.br*

<sup>3</sup>*Universidade Federal de Ciências da Saúde de Porto Alegre - thatiane@ufcspa.edu.br*

<sup>4</sup>*Universidade Federal de Pelotas – jrbordin@ufpel.edu.br*

### 1. INTRODUÇÃO

A radioterapia é crucial no tratamento do câncer, usada sozinha ou com cirurgia e quimioterapia. A técnica convencional utiliza feixes de fótons para tumores profundos (com a desvantagem de irradiar tecidos saudáveis no caminho) e feixes de elétrons de baixa energia para tumores superficiais, já que sua penetração é limitada. A terapia de prótons é uma alternativa mais precisa, pois o pico de Bragg minimiza danos a tecidos saudáveis (WHITMORE, 2021), mas seu alto custo restringe o uso.

A radioterapia por elétrons, na faixa de 4 a 20 MeV, é vantajosa para tumores superficiais por ter alta dose na superfície e queda rápida da dose em profundidade (WHITMORE, 2021).

No entanto, sua baixa penetração impede o tratamento de tumores profundos. Para resolver essa limitação, o uso de feixes de elétrons de energia muito alta (VHEE), de 50 a 250 MeV, tem se destacado. Embora a radioterapia com VHEE seja estudada desde os anos 2000, o interesse foi limitado pela falta de equipamentos. Recentemente, o desenvolvimento de aceleradores lineares mais avançados e de aceleradores a laser compactos (LWFA) reacendeu o interesse na técnica (ESAREY, 2009) (GUO, 2025).

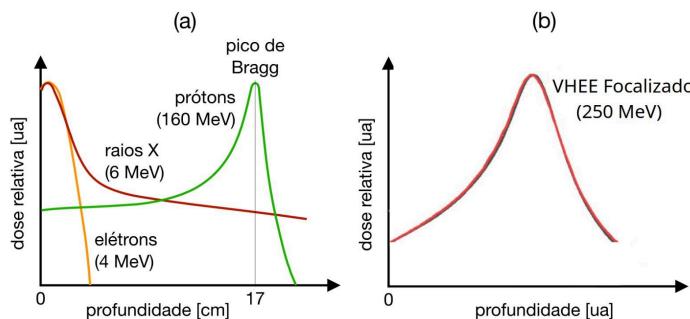
Um desafio, porém, é a dose na entrada do feixe, que pode prejudicar tecidos saudáveis. Para mitigar isso, sistemas de focalização com quadrupolos magnéticos podem ser usados. Através de uma focalização assimétrica dos feixes VHEE é possível direcionar a dose com mais precisão, de forma similar à terapia de prótons (WHITMORE, 2021).

A Figura 1 mostra, de forma ilustrativa, a distribuição de dose em profundidade para diferentes feixes: fótons de 6 MeV (raios X), prótons de 160 MeV, evidenciando o pico de Bragg, e elétrons de 4 MeV. O esquema inclui ainda o perfil de deposição de dose em profundidade para o VHEE focalizado.

Em comparação à terapia com prótons, a radioterapia VHEE se destaca por ser mais robusta a mudanças anatômicas. Segundo Lagzda et al. (2020), seus feixes apresentam menor sensibilidade a variações de densidade dos tecidos, o que a torna mais adequada para tratar tumores em regiões com alta heterogeneidade e movimento, garantindo maior estabilidade e eficácia do tratamento. Embora a robustez dos VHEE frente às heterogeneidades dos tecidos já tenha sido abordada na literatura, é crucial entender com mais precisão a interação com estruturas de alta densidade, como ossos, para otimizar o uso clínico, especialmente com a focalização de feixes VHEE. Para alcançar alta precisão e preservar tecidos saudáveis, é essencial caracterizar como os sistemas de focalização interagem com essas complexidades anatômicas. Este

trabalho tem como objetivo investigar a interação dos feixes VHEE focalizados com inhomogeneidades, de forma a se entender como essas inhomogeneidades afetam a distribuição de dose.

Figura 1: Representação Ilustrativa da (a) Comparação dos Perfis Típicos de Deposição de Dose em Profundidade para Feixes de Fótons (raios X), Elétrons e Prótons; (b) Perfil de Dose em Profundidade para o VHEE Focalizado.



Fonte: autor

## 2. METODOLOGIA

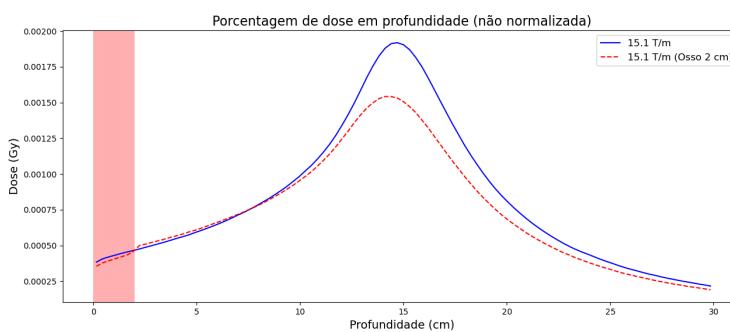
Este trabalho utiliza simulações computacionais para analisar o comportamento da radioterapia VHEE focalizada na presença de inhomogeneidades. As simulações foram conduzidas com o código *Tool for Particle Simulation* (TOPAS), considerando feixes de elétrons de 250 MeV com distribuição espacial gaussiana centrada em  $x = 0$  e  $y = 0$ , e desvios padrão de 4 mm em ambas as direções. A distribuição de energia também foi modelada de forma gaussiana, com energia média de 250 MeV e desvio padrão correspondente a 0,75% desse valor, enquanto a divergência angular inicial foi de 3,2 mrad. Cada feixe foi simulado utilizando  $10^7$  histórias de partículas. Os feixes foram focalizados, por meio de um sistema de quadrupolos magnéticos, em um objeto simulador composto por água, com dimensões de  $30 \times 30 \times 30$  cm $^3$ .

Os feixes VHEE foram focalizados de forma assimétrica por meio de um conjunto de quatro quadrupolos. Os gradientes de campo magnético dos três primeiros quadrupolos foram mantidos constantes, com valores de 10,5 T/m, 10,6 T/m e 8,0 T/m, respectivamente. O gradiente do quarto quadrupolo foi ajustado de modo a posicionar os picos de deposição de dose no início (8,47 cm), no meio (14,70 cm) e no final (20,64 cm) do objeto simulador, utilizando os valores de 17,1 T/m, 15,1 T/m e 13,5 T/m, respectivamente. Esse ajuste evidencia que o aumento do gradiente do quadrupolo provoca uma diminuição da profundidade do ponto focal, que coincide aproximadamente com a localização do pico de dose. Assim, observa-se que o gradiente do quarto quadrupolo é o principal parâmetro de controle da profundidade de deposição de dose.

Para fins comparativos, feixes de prótons foram igualmente utilizados na irradiação do mesmo objeto simulador, adotando-se parâmetros semelhantes aos empregados nos feixes VHEE (WHITMORE, 2021). Além disso, as energias dos feixes de prótons foram escolhidas de modo que os picos de deposição de dose em profundidade, coincidissem com os picos dos feixes VHEE focalizados. Para tanto, as seguintes energias do feixe de prótons foram utilizadas 110 MeV, 150 MeV e 180 MeV.

Para avaliação do impacto das inomogeneidades, simulações foram realizadas sem nenhuma inomogeneidade (caso homogêneo), e com placas ósseas planas, com tamanho transversal de 10 cm x 10 cm e espessuras de 1 cm a 6 cm, com incrementos de 1 cm. A Figura 2 apresenta as distribuições de dose em profundidade para feixes VHEE focalizados com gradiente de 15,1 T/m, comparando o caso homogêneo com a presença de uma placa óssea de 2 cm de espessura.

Figura 2 – Comparação da Distribuição de Dose em Profundidade para Feixes VHEE Focalizados com Gradiente de 15,1 T/m, entre o Caso Homogêneo e, o caso com Osso.



Fonte: Autor

Os feixes VHEE focalizados e os feixes de prótons foram utilizados para irradiar o objeto simulador, com e sem a presença de inomogeneidades. Para permitir as comparações, foram analisadas as seguintes quantidades: a porcentagem de dose em profundidade (PDP), sem normalização, e os perfis de dose na região de dose máxima. A partir dessas distribuições, foram avaliadas a posição e o valor da dose máxima, bem como a largura a meia altura (FWHM) dos perfis de dose máxima nas direções x e y.

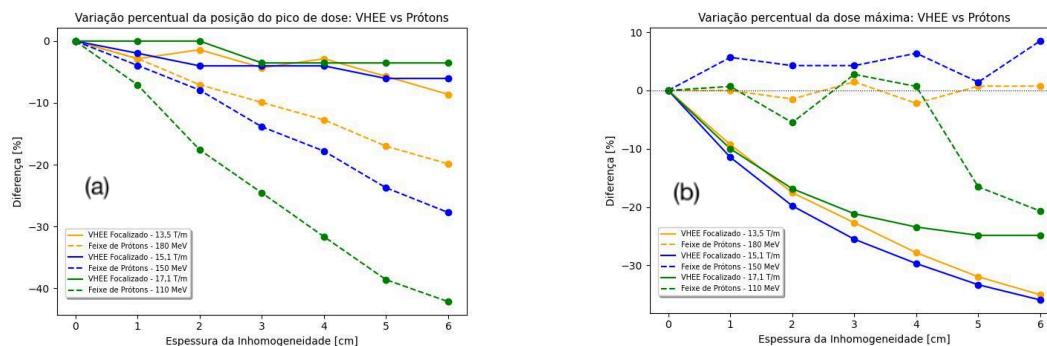
### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Curvas de porcentagem de dose em profundidade foram obtidas para cada configuração de inomogeneidade, considerando tanto o feixe de VHEE focalizado quanto o de prótons. A Figura 3(a) apresenta a diferença percentual na profundidade da dose máxima em relação ao caso homogêneo, para ambos os feixes. A Figura 3(b) apresenta, também para ambos os feixes, a diferença percentual no valor da dose máxima, em comparação com o caso homogêneo.

A Figura 3(a) mostra que a posição de dose máxima do feixe VHEE focalizado é menos sensível à presença da inomogeneidade do que a do feixe de prótons. Além disso, observa-se que, à medida que a posição focal do feixe ocorre em maiores profundidades, o efeito da presença das inomogeneidades é maior. Isso sugere que, quanto maior o valor do gradiente, que define a posição do pico de dose do feixe VHEE, menor é o impacto causado pela inomogeneidade na posição de dose máxima.

A Figura 3(b) mostra que apesar da posição dos picos de deposição de dos feixes VHEE focalizados serem menos afetadas pela presença das placas ósseas de diferentes espessuras, o valor dos picos de dose depositados nessas posições são menos alterados no caso dos prótons.

Figura 3: (a) Comparação da Posição de Dose Máxima para os Feixes VHEE Focalizados e de Prótons; (b) Comparação da Valor de Dose Máxima para os Feixes VHEE Focalizados e de Prótons.



Fonte: Autor

Por fim, o perfil de dose máxima está sendo analisado individualmente para cada caso, com o objetivo de complementar a compreensão sobre as diferenças entre os feixes e explorar suas possíveis aplicações terapêuticas.

#### 4. CONCLUSÕES

Este trabalho comparou o comportamento de feixes VHEE focalizados e feixes de prótons na presença de inomogeneidades. Os resultados indicam que os feixes VHEE são menos sensíveis ao deslocamento da posição de dose máxima, enquanto os feixes de prótons apresentam maior estabilidade no valor da dose. Além disso, verificou-se que a profundidade do pico de dose dos VHEEs influencia diretamente essa sensibilidade. A análise dos perfis de dose máxima continua em desenvolvimento, visando aprofundar a compreensão e orientar aplicações clínicas mais precisas.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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 applications.** *Scientific Reports*, v. 11, p. 14013, 2021. DOI: 10.1038/s41598-021-93276-8.

ESAREY, E.; SCHROEDER, C. B.; LEEMANS, W. P. **Physics of laser-driven plasma-based electron accelerators.** *Rev. Mod. Phys.*, v. 81, n. 3, p. 1229–1285, ago. 2009. DOI: 10.1103/RevModPhys.81.1229.

GUO, Z.; LIU, S.; ZHOU, B.; et al. **Preclinical tumor control with a laser-accelerated high-energy electron radiotherapy prototype.** *Nature Communications*, v. 16, p. 1895, 2025. DOI: 10.1038/s41467-025-57122-z.

LAGZDA, A. et al. **Influence of heterogeneous media on Very High Energy Electron (VHEE) dose penetration: a Monte Carlo comparison with existing radiotherapy modalities.** *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, 482, 70–81, 2020. DOI: 10.1016/j.nimb.2020.09.008.