

## 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

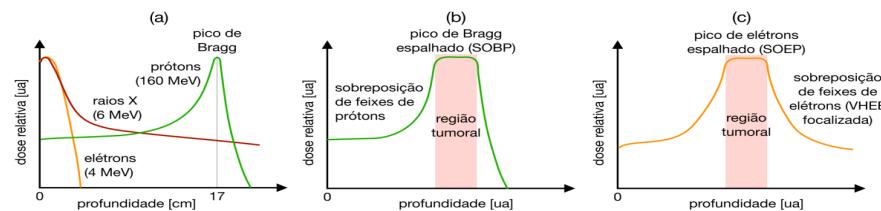
<sup>4</sup>Universidade Federal de Pelotas – jrbordin@ufpel.edu.br

### 1. INTRODUÇÃO

A radioterapia é uma modalidade crucial no tratamento do câncer, podendo ser usada isoladamente ou com cirurgia e quimioterapia. Sua expansão é essencial para o controle do câncer, garantindo tratamento adequado aos pacientes (GONZAGA, 2023). A radioterapia tradicional usa feixes de fótons e elétrons de baixa energia (4-20 MeV), sendo os fótons capazes de tratar tumores profundos, enquanto os elétrons são mais eficazes para tumores superficiais. No entanto, uma desvantagem dos fótons é que tecidos saudáveis ao longo do feixe podem receber doses significativas (CALABRESI, 2009).

A protonterapia é uma alternativa à radioterapia convencional, permitindo uma deposição de dose mais localizada e minimizando danos aos tecidos saudáveis. Nesse tratamento, prótons, partículas carregadas, perdem energia ao interagir com o corpo do paciente, principalmente em colisões inelásticas com os elétrons dos átomos (NEWHAUSER, 2015). A figura 1 apresenta o comportamento da deposição de dose relacionada ao feixe de prótons. Ao desacelerar, os prótons depositam a maior parte da dose em uma região específica, o pico de Bragg, que tem uma queda acentuada. Combinando múltiplos feixes de diferentes energias, é possível estender o pico, formando o pico de Bragg espalhado (SOBP), que cobre toda a região tumoral, minimizando danos aos tecidos saudáveis e efeitos colaterais (WHITMORE, 2021). Contudo, o alto custo e a tecnologia necessária dificultam a popularização desse tratamento.

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 elétron espalhado, obtido através da sobreposição de múltiplos feixes de elétrons (VHEE) com focalizações distintas.

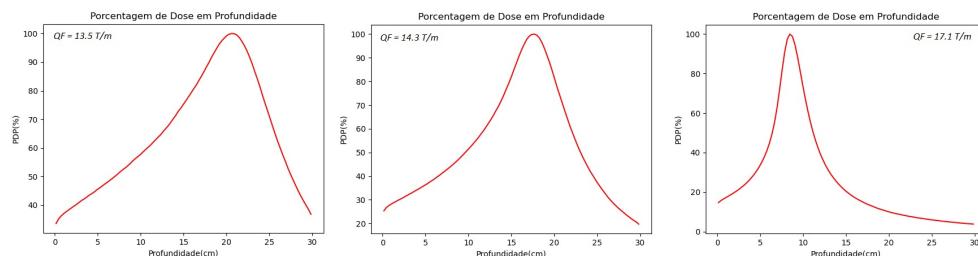


Fonte: autor

A radioterapia com elétrons na faixa de 4 a 20 MeV, além de ser uma alternativa mais econômica devido ao uso de aceleradores lineares, oferece vantagens sobre a radioterapia com fótons no tratamento de malignidades superficiais, como alta dose superficial e rápida queda de dose após a profundidade máxima (RONGA, 2021), conforme ilustrado na Figura 1 para um feixe de 4 MeV. Para o tratamento de tumores profundos, são necessários feixes de elétrons com energias entre 50 e 250 MeV (VHEE – very high energy electrons).

Feixes VHEE de 100 a 250 MeV têm sido propostos para tratar tumores profundos por suas vantagens dosimétricas (WHITMORE, 2021). Embora eficazes, esses feixes depositam dose tanto na entrada quanto na saída do paciente, resultando em dose fora da região tumoral. A focalização do feixe, entretanto, pode otimizar a dose na área tumoral, concentrando maiores volumes em pontos específicos, conforme mostrado em estudos recentes (WHITMORE, 2021) (BRUM, 2023), e ilustrado na Figura 2 para um feixe de 250 MeV.

**Figura 2: Comportamento da PDP com a variação da focalização do feixe de elétrons de 250 MeV**



Fonte: autor

A entrega de dose deve ser precisa e previsível no tratamento radioterápico. Objetos simuladores (*phantoms*) compostos por água são amplamente usados em práticas dosimétricas. No entanto, em pacientes reais, o feixe atravessa diversas camadas de diferentes densidades, como ar e osso, o que perturba a deposição de dose. Estudos recentes mostram que feixes de elétrons na terapia VHEE são menos sensíveis a inhomogeneidades do que os feixes de fótons e prótons. Deae-eddine Krim e colaboradores demonstraram que a radioterapia com feixes VHEE focalizados, acima de 100 MeV, pode tratar tumores profundos e inhomogêneos com alta precisão (KRIM, 2023).

Considerando o potencial da técnica VHEE focalizada como uma alternativa de menor custo em comparação à protonterapia (WHITMORE, 2021) (KRIM, 2023) (BRUM, 2023), ela pode ser promissora em países com economias menos robustas. No entanto, como é uma técnica em desenvolvimento, mais pesquisas são necessárias para sua aplicação clínica, incluindo o desenvolvimento de um plano de tratamento e a avaliação do impacto de inhomogeneidades na deposição de dose.

O objetivo geral deste trabalho é conduzir uma investigação sistemática sobre como inhomogeneidades no tecido-alvo afetam a deposição de dose na

radioterapia VHEE focalizada. Inomogeneidades com dimensões e geometrias clinicamente relevantes serão modeladas e investigadas por meio de simulações de Monte Carlo, utilizando o código *Tool for Particle Simulation* (TOPAS). Os objetivos específicos incluem investigar o efeito de inomogeneidades de diferentes tamanhos e geometrias na deposição de dose e comparar os resultados da radioterapia VHEE focalizada com e sem inomogeneidades, visando verificar a viabilidade de desenvolver um modelo analítico para prever esse efeito.

## **2. METODOLOGIA**

Este trabalho utiliza simulações computacionais para analisar o comportamento da radioterapia VHEE focalizada na presença de inomogeneidades, visando contribuir para sua implementação clínica. Utilizando o código TOPAS, feixes VHEE serão focalizados por um sistema de quadrupolos magnéticos, arranjados em células de focalização, alinhadas a um objeto simulador de 30 cm x 30 cm x 30 cm preenchido com água. A deposição de dose será avaliada nesse objeto, incluindo a inserção de inomogeneidades clinicamente relevantes de diferentes dimensões e geometrias. Com base nos resultados das simulações, será investigado o desenvolvimento de um modelo analítico para prever o efeito das inomogeneidades na deposição de dose. Para validar o modelo, simulações adicionais e comparações com outras técnicas, como a protonterapia, serão realizadas. Ao concluir essas etapas, esse estudo contribuirá para a compreensão dos efeitos das inomogeneidades na radioterapia VHEE, facilitando sua implementação clínica.

## **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

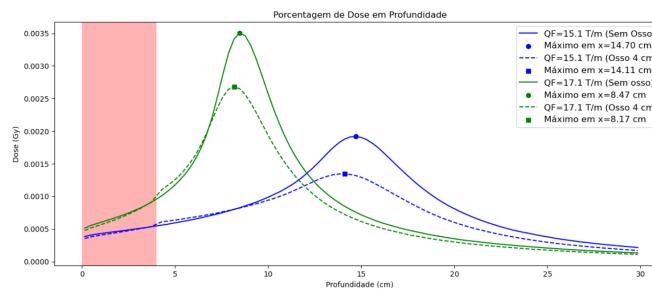
Até o momento, foram realizadas simulações utilizando feixes VHEE, variando os gradientes do campo magnético. Em cada simulação, placas ósseas de diferentes espessuras foram inseridas, com o objetivo de avaliar como essas estruturas afetam a deposição de dose no objeto simulador. A Figura 3 apresenta quatro curvas de porcentagem de dose em profundidade (PDP), sem normalização, resultantes da irradiação de feixes VHEE focalizados com 250 MeV em um objeto simulador preenchido com água. Para analisar os efeitos da presença da inomogeneidade, as curvas foram geradas com e sem a inserção de uma placa óssea de 10 cm x 10 cm x 4 cm, considerando o mesmo gradiente do campo magnético.

Observa-se, na Figura 3, que a inserção da placa óssea de 4 cm resultou em uma variação de -31% no valor da dose máxima para o gradiente de 15,1 T/m, em comparação com o caso sem inomogeneidade. Para o gradiente de 17,1 T/m, a variação foi de -23%. Esse comportamento é esperado, uma vez que o osso, por possuir maior densidade, contribui para o espalhamento do feixe, reduzindo sua focalização e, consequentemente, a quantidade de partículas que atingem a região de dose máxima.

Além disso, nota-se que a posição da dose máxima também foi alterada pela presença da placa óssea, com um deslocamento de -0,59 cm para o gradiente de 15,1 T/m em comparação ao caso sem inomogeneidade. No gradiente de 17,1 T/m, o deslocamento foi de -0,30 cm. Esse efeito também é

previsível, pois o osso, devido à sua maior densidade, atenua o feixe, resultando na absorção de parte da energia das partículas pelo material, o que leva a um pico de dose em uma profundidade menor.

Figura 3: Comparação de curvas PDP não normalizadas devido à presença de inhomogeneidade



Fonte: autor

#### 4. CONCLUSÕES

Na conclusão desse projeto de pesquisa, espera-se entender como a presença de inhomogeneidades afetam o comportamento dos feixes VHEE focalizados e portanto a deposição de dose dentro do objeto simulador.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GONZAGA, H.F. LINS, V.V.N e SANTOS, E.R.M. RADIOTERAPIA EM PACIENTES TERMINAIS. Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro. MINAS GERAIS. v5. p.1-11. 2023.

CALABRESI, M.F.F. Análise da Viabilidade de Simulações com Feixes de Prótons de 150 MeV em Alvos Heterogêneos. 2009. 44f. Monografia (Graduação em Física Médica). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

NEWHAUSER, W. D, ZHANG, R. The physics of proton therapy. Phys. Med. Biol. v60 R155. 2015.

WHITMORE, L. MACKAY, R. I. VAN HERK, M. JONES, J. K e JONES, R.M. Focused VHEE (very high energy electron) beams and dose delivery for radiotherapy applications. Scientific Report. v11. n.14013. 2021.

RONGA, M. G. CAVALZONE, 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. v13(19). n.4942. 2021.

KRIM, D. et al. Monte carlo modeling of focused very high energy electron beams as an innovative modality for radiotherapy application. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A: 167785, Elsevier, v. 1047, p. 13, 2020.

BRUM, F.L.S. Estudo da Interação de Prótons com o Meio Biológico considerando o espalhamento coulombiano e o Uso do Método Monte Carlo. 2021. 48f. Monografia (Graduação em Física Bacharelado com Ênfase em Física Médica). Universidade Federal do Rio Grande.