

# 1ª Tarefa Prática: SRIM e TRIM Simulação de Hadronterapia

Thalles Cotta Fontainha<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – CEFET/RJ  
Programa de Pós-Graduação em Instrumentação e Óptica Aplicada – PPGIO  
Disciplina: Instrumentação para Processos Físicos  
Professor: Jesse Costa

thalles.fontainha@aluno.cefet-rj.br

**Resumo.** *O objetivo desta tarefa é realizar a simulação de irradiação de íons pesados em tecidos orgânicos, simulando o tratamento de câncer por hadronterapia, como forma de familiarização do uso do software TRIM. Empregaremos como exemplos de íons para tratamento, os íons de hélio, carbono e oxigênio, escolhidos com inspiração em relatos experimentais de várias instituições que realizam este tipo de terapia, como por exemplo o HIT (Heidelberg Ion Beam Therapy Center), localizado em Heidelberg na Alemanha, considerado o maior e melhor centro de tratamento de câncer no mundo. Não temos este tipo de tratamento no Brasil e nem em toda a América Latina. Existe uma unidade na África do Sul, duas na Ásia e várias na Europa e Estados Unidos.*

## Roteiro para a 1ª Tarefa Prática: SRIM e TRIM - Simulação de Hadronterapia

### A. Reproduzir a simulação descrita a seguir

Para criar o cenário de simulação escolhemos o exemplo do câncer de mama, pela simplicidade de disposição dos tecidos orgânicos e pelas dimensões de fácil exemplificação, pois os tumores alvo estão a pouca profundidade. O tratamento real por hadronterapia inclui uma grande quantidade de tipos de câncer, não sendo o de mama, necessariamente, um caso especial, mas a disponibilidade de tecidos no dicionário do TRIM foi fator determinante. Escolhemos um tecido epitelial com espessura de 2 mm, um tecido adiposo com espessura de 10 mm (1 cm), seguido de um tecido de glândula mamária de 10 mm (1 cm), com alvo a 20 mm (2 cm) da superfície da pele. Ou seja, um tumor próximo à superfície da pele.

O alvo a 20 mm foi bombardeado com íons de hélio, carbono e oxigênio, o que significa que a energia de irradiação foi escolhida de modo que o pico de Braag ocorresse a 20 mm da superfície da pele. No caso dos íons de He, o pico ocorreu a 20 mm para uma energia de irradiação de 190 MeV. Em seguida comparamos com o efeito que feixes de carbono e oxigênio causariam se fossem irradiados com a mesma energia.

### B. Criar outro cenário exemplo de simulação de Hadronterapia

Escolha outro exemplo de aplicação de terapia empregando o método usado na simulação descrita no item anterior.

### C. Outras Aplicações

Sugerir outros exemplos de aplicações para irradiação de substâncias por íons e outras fontes de radiação.

# A. Reproduzir a simulação descrita a seguir

Roteiro de instalação do SRIM/TRIM: [Hyperlink do Notebook de instalação \(GitHub\)](#)

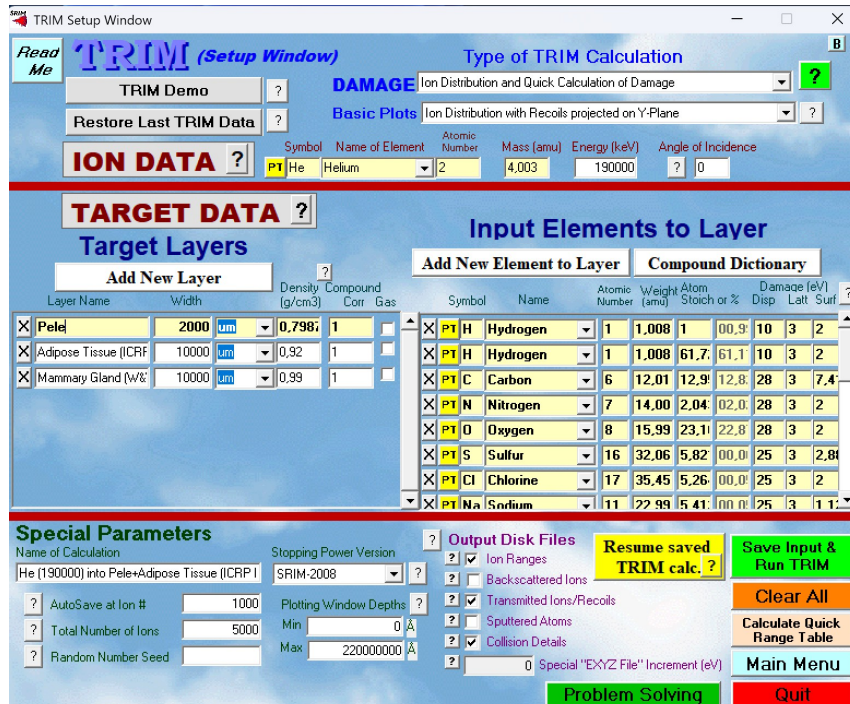


Figura 1. Setup do TRIM para o exemplo didático de *câncer de mama*: camadas pele (2 mm) → tecido adiposo (10 mm) → glândula mamária (10 mm); feixe de He = 190 MeV (0°); janela 0–2,2 × 10<sup>8</sup> Å; N = 5000 íons.

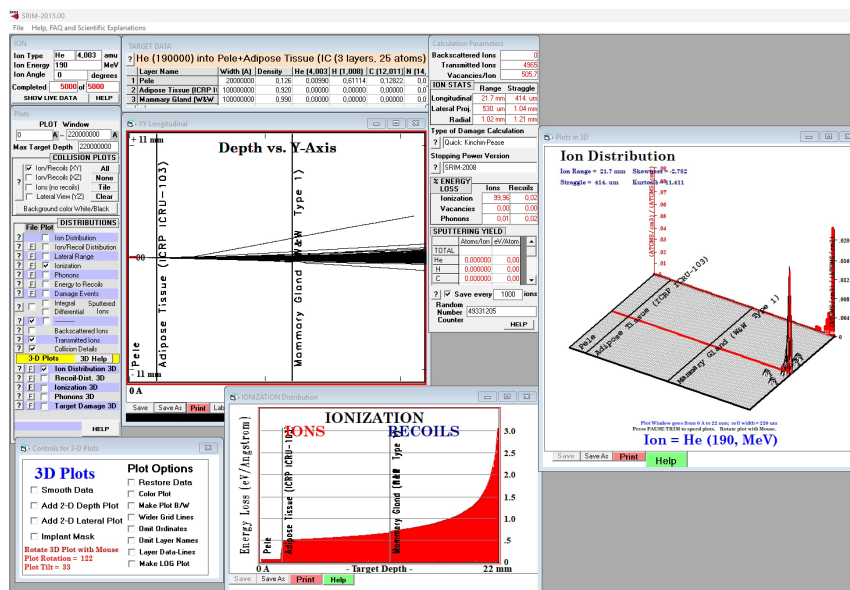
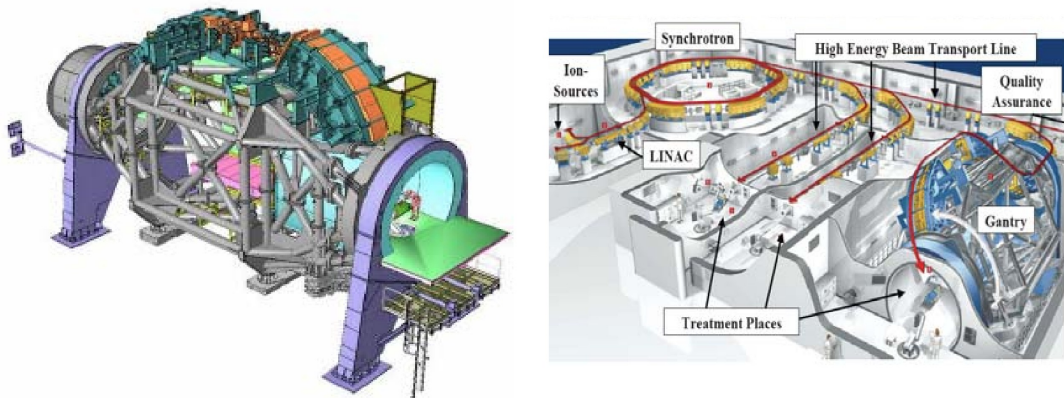


Figura 2. Resultados do exemplo de mama: distribuição de íons e curva de ionização exibindo o pico de Bragg próximo de 22 mm, compatível com He = 190 MeV e as três camadas do alvo.

## B. Criar outro cenário exemplo de simulação de Hadronterapia

### 1. Introdução

A hadronterapia é uma forma avançada de radioterapia criada por Robert Wilson nos anos 1940. Ela se destaca por permitir maior dose no tumor e menor radiação em tecidos saudáveis, superando os feixes de fótons convencionais. Atualmente, o uso de prótons é comum em vários países, enquanto o sucesso clínico dos íons de carbono no Japão estimulou sua adoção na Europa. Pesquisas também exploram íons mais pesados, como hélio, lítio, berílio e boro, que podem oferecer maior precisão de dose e controle de tumores resistentes. A escolha do íon ideal depende da profundidade do tumor, da dose necessária e da radiosensibilidade dos tecidos.



**Figura 3. Exemplo de instalação de hadronterapia em Heidelberg (direita). Gantry isocêntrico utilizado nessa instalação e projetado para íons de carbono (esquerda) Herranz et al. [2008].**

Simulações computacionais são essenciais quando não há linhas de feixe. O SRIM/TRIM Ekinici et al. [2023] permite prever a deposição de energia de íons em tecidos; no exemplo de mama, um tumor a 20 mm foi modelado ajustando-se as energias para posicionar o pico de Bragg na lesão (p.ex., He  $\approx$  190 MeV a 20 mm). Essas simulações também fornecem métricas como LET, recuos e espalhamento lateral, úteis na otimização do plano de tratamento.

A simulação proposta neste trabalho, **melanoma profundo**, com camadas de epitélio, tecido adiposo e músculo, adota a mesma metodologia de modelagem e análise proposta por Ekinici et al. [2023], mas não corresponde a um caso clínico do artigo. O novo cenário foi desenvolvido exclusivamente para o Exercício 2, conforme solicitado, empregando parâmetros próprios, como tipo de câncer, profundidade do tumor e energias dos feixes de hélio, carbono e oxigênio.

## 2. Descrição da Tarefa Realizada

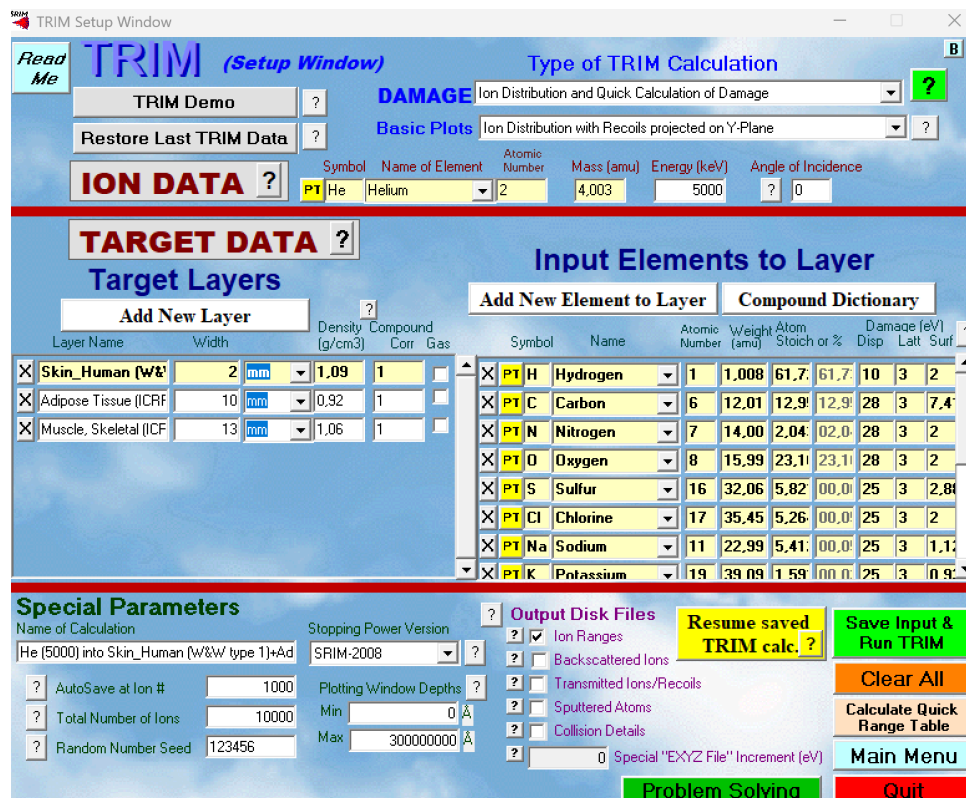
Adotou-se um alvo estratificado composto por **pele, tecido adiposo e músculo esquelético**, sem estruturas ósseas no caminho. Os materiais foram selecionados do dicionário ICRP/ICRU do TRIM e conferidos no banco **NIST/STAR – Composition of Materials**. A profundidade total do alvo foi mantida em **25 mm**.

**Tabela 1. Parâmetros do alvo (25 mm) para o cenário “pele + gordura + músculo”**

Camada	Espessura	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Material do TRIM / Observação
Layer 1 – Pele (Skin)	2 mm (2 000 µm)	1.09	<i>Skin_Human (W&amp;W) / Skin (ICRP).</i>
Layer 2 – Tecido adiposo (Fat)	10 mm (10 000 µm)	0.92	<i>Adipose Tissue (ICRP).</i>
Layer 3 – Músculo esquelético	13 mm (13 000 µm)	1.06	<i>Muscle, Skeletal (ICRP).</i>

As energias iniciais utilizadas para posicionar o *Pico de Bragg* em  $\approx 25$  mm (tecidos moles) foram:

- Hélio (He): **200 MeV** (200 000 keV)
- Carbono (C): **1,15 GeV** (1 150 000 keV)
- Oxigênio (O): **1,75 GeV** (1 750 000 keV)



**Figura 4. Setup do TRIM em 25 mm.**



### 3. Apresentação dos Resultados

Para o alvo pele (2 mm) → adiposo (10 mm) → músculo (13 mm), irradiado com **He = 200 MeV**, o TRIM previu alcance longitudinal de **21,9 mm** e pico de Bragg dentro da camada muscular (Fig. 5). Não houve íons transmitidos e a dispersão lateral ficou na faixa de **0,16–0,25 mm**, indicando boa conformidade. Para posicionar o pico em **25 mm**, recomenda-se elevar a energia para **205–210 MeV** e refinar em passos de 5 MeV.

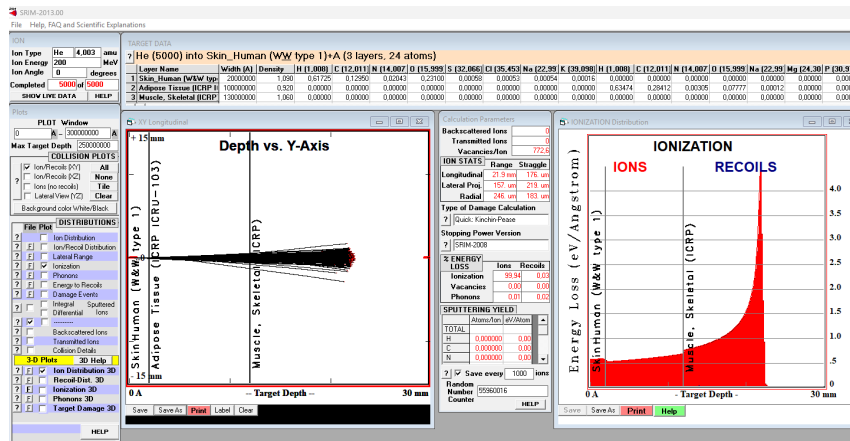
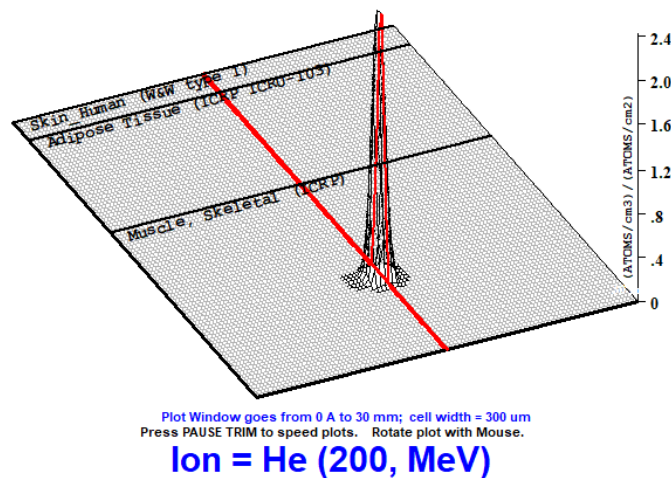


Figura 5. Perfil de ionização (He 200 MeV) no alvo pele–gordura–músculo; pico em ~22 mm (alcance longitudinal 21,9 mm).

#### Ion Distribution

Ion Range = 21.9 mm    Skewness = -0,055  
Straggle = 140. um    Kurtosis = 3,145



Plot Window goes from 0 A to 30 mm; cell width = 300 um  
Press PAUSE TRIM to speed plots. Rotate plot with Mouse.

**Ion = He (200, MeV)**

Figura 6. Distribuição 3D dos íons (He 200 MeV): parada concentrada na região do pico de Bragg; sem íons transmitidos.

#### 4. Conclusões

Nesta atividade, preparou-se e publicou-se um breve tutorial de instalação e configuração do SRIM/TRIM (A), garantindo a reprodutibilidade do ambiente. Em seguida, com o software operacional, reproduziram-se os parâmetros do exemplo didático e executou-se um segundo cenário em tecidos moles (pele–gordura–músculo, 25 mm), registrando telas, gráficos e o ajuste de energia para posicionar o pico de Bragg (B). Como desdobramento prático, indicaram-se aplicações fáceis de repetir com o mesmo passo a passo, como crânio (pele–osso cortical–cérebro, 25 mm), mama (pele–adiposo–glândula mamária, 20–25 mm) e implantação iônica em silício para perfis de dopagem (C).

### C. Outras Aplicações

**Artigo sugerido:** *Ion implantation of advanced silicon devices: Past, present and future.* (versão para visualizar online: <https://sci-hub.se/https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1369800116304905>)

A implantação iônica é importante para o futuro da eletrônica, especialmente em dispositivos de escala nanométrica que operam em um regime dominado pela mecânica quântica, enfrentando desafios como o acúmulo de danos em nanofios e os efeitos de confinamento quântico. Para mitigar problemas de carga em estruturas pequenas, o Processamento com Feixe Neutro (NBP) é uma solução promissora. As aplicações futuras se estendem à engenharia de template para o crescimento de estruturas monocamada 2D, como o grafeno, e à eletrônica atômica para computação quântica, envolvendo a implantação precisa de átomos únicos ou poucos. Assim, a implantação iônica continuará a ser essencial tanto para CIs rotineiros quanto para viabilizar a eletrônica inteligente e quântica do futuro [Current, 2017].

#### Referências

- Current, M. I. (2017). Ion implantation of advanced silicon devices: Past, present and future. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 62:13–22.
- Ekinci, F., Bostanci, E., Güzel, M., and Dagli, O. (2023). Simulation based analysis of  $^4\text{He}$ ,  $^7\text{Li}$ ,  $^8\text{Be}$  and  $^{10}\text{B}$  ions for heavy ion therapy. *International Journal of Radiation Research*, 21(1):131–137.
- Herranz, J., Herraiz, E., Vicente, S., España, J., Cal-Gonzalez, J., and Udías, J. (2008). Hadronterapia. *I Encuentro Complutense para la Divulgación en Física Nuclear y de Partículas [Internet]*. gfn.