

BOLSA PIBIC CNPEM 2025

Modelagem e Validação Experimental da Emissão de Raios X por Prótons de Baixa Energia em Alvos Metálicos no Comissionamento do Acelerador de Prótons do CNPEM

Orientador: Dr. João Paulo de Campos da Costa
Coorientadora: Isabela Castro de Moraes

Diretoria Adjunta de Tecnologia (DAT)

Campinas, 30 DE ABRIL 2025

1. INTRODUÇÃO

Os aceleradores de partículas são ferramentas essenciais na pesquisa científica e aplicações médicas modernas, destacando-se especialmente na terapia por prótons. Esta técnica permite tratamentos altamente localizados, minimizando efeitos colaterais pela deposição precisa da dose no tumor^[1]. O CNPEM está desenvolvendo um acelerador de prótons baseado na tecnologia de quadrupolo de radiofrequência (RFQ), inicialmente projetado para energias até 1 MeV. Esse protótipo representa o primeiro estágio de um sistema modular, que pode ser acoplado a outras estruturas para alcançar energias mais elevadas. A proposta visa não apenas aplicações em terapia por prótons, mas também a produção de radioisótopos e pesquisa fundamental em física de partículas^[2].

Neste contexto, este projeto propõe estudar especificamente a produção de radiação gerada pela interação de feixes de prótons de baixa energia (~ 25 keV), durante o comissionamento faseado do sistema LEBT (*Low Energy Beam Transport*) e posteriormente do feixe de prótons de alta energia (~ 1 MeV) do sistema HEBT (*High Energy Beam Transport*) do acelerador de prótons do CNPEM. A caracterização desta radiação em alvos metálicos permitirá expandir o conhecimento sobre os processos físicos envolvidos e otimizar futuras aplicações tecnológicas e médicas.

1.1. ESTADO DA ARTE

A interação de prótons com materiais metálicos resulta na emissão de radiação X característica, fenômeno amplamente explorado em aplicações como diagnóstico por imagem e análise de materiais^[1]. Embora os mecanismos físicos envolvidos sejam bem compreendidos, sua aplicação em sistemas experimentais específicos, como o acelerador nacional em desenvolvimento — que adota uma arquitetura inédita no Brasil — exige a adaptação criteriosa de modelos físicos e operacionais às particularidades do dispositivo. Essa adaptação é fundamental não apenas para permitir uma operação segura e eficiente, mas também para fortalecer o domínio tecnológico nacional na modelagem, implementação e operação de aceleradores compactos. O domínio dessas técnicas permite internalizar conhecimento crítico, capacitando o país a projetar e validar sistemas com autonomia científica e engenharia especializada.

Neste cenário, ferramentas de simulação como o código Monte Carlo FLUKA.CERN^[3] viabilizam a modelagem detalhada das interações próton-metal, permitindo a estimativa da radiação secundária gerada e o delineamento de cenários experimentais sob diferentes geometrias e materiais^[3]. No entanto, a confiabilidade destes modelos computacionais depende de sua validação experimental em condições reais de operação. Essa etapa é determinante para fundamentar a definição de protocolos técnicos e operacionais consistentes com os requisitos específicos do sistema.

2. OBJETIVOS

Considerando os desafios associados à adaptação de modelos físicos a arquiteturas experimentais inéditas, bem como a importância da validação prática para assegurar sua confiabilidade, este projeto propõe integrar modelagem computacional e validação experimental para caracterizar a emissão de raios X induzida por prótons de baixa energia em alvos metálicos. A primeira etapa contempla a modelagem das interações próton-metal utilizando o código FLUKA.CERN, com o intuito de estimar a emissão de radiação para diferentes materiais e propor um arranjo experimental otimizado. Na sequência, serão conduzidos testes experimentais durante o comissionamento do sistema LEBT do acelerador de prótons do CNPEM, operando com energias em torno de 25 keV, visando à validação dos modelos simulados. Em etapas futuras, a metodologia poderá ser expandida para o estágio HEBT, estrutura posterior ao RFQ, onde os prótons atingem energias próximas a 1 MeV. Os objetivos específicos deste trabalho incluem:

- Revisar a literatura científica relacionada às interações próton-metal em baixas energias e à geração de radiação;
- Realizar simulações computacionais utilizando o software FLUKA.CERN para prever a produção de raios-X na saída do acelerador e em diferentes metais, visando definir uma proposta de configuração para experimentos;
- Implementar a instalação de sistemas detectores para caracterização experimental da radiação emitida;
- Realizar testes experimentais durante o comissionamento do LEBT, correlacionando os dados obtidos com as previsões de simulação;
- Analisar e comparar os resultados experimentais e teóricos, ajustando os modelos computacionais conforme necessário e ampliando análises;
- Elaborar relatórios técnicos e divulgar os resultados em eventos científicos.

3. METODOLOGIA

3.1. Modelagem Computacional das Interações Próton-Metal

Inicialmente, serão realizadas simulações utilizando o código FLUKA.CERN para prever a produção de raios-X em diferentes alvos metálicos (como cobre, alumínio e ouro) irradiados por prótons com energias dentro da faixa de operação do acelerador (entre 20 keV e 1 MeV). Serão simuladas as distribuições espectrais e espaciais da radiação gerada e sua dependência em relação ao material do alvo. Com isso, será definida a configuração necessária e um planejamento dos experimentos.

3.2. Preparação Experimental no LEBT

Com o suporte da equipe técnica do CNPEM, será realizada a preparação do sistema experimental no LEBT, incluindo a definição dos materiais metálicos a serem irradiados, preparação dos suportes dos alvos e alinhamento do feixe.

3.3. Irradiação dos Alvos e Aquisição dos Dados

Durante o processo de comissionamento do LEBT, serão realizadas sessões controladas de irradiação dos materiais metálicos com feixes de prótons de baixa energia. Os parâmetros do feixe, como suas dimensões espaciais e energia, sendo esta correlacionada com a emissão de fótons emitidos pelas chapas metálicas serão adquiridos para posterior análise.

3.4. Análise Comparativa

Os espectros experimentais serão comparados com os resultados das simulações computacionais, permitindo avaliar a acurácia dos modelos e identificar possíveis ajustes.

3.5. Redação dos Resultados e Relatório Final

Os dados obtidos serão organizados e discutidos em um relatório técnico, destacando a comparação entre os resultados simulados e experimentais, e as perspectivas para futuras fases do projeto, como a expansão dos estudos para o HEBT. Também é prevista a participação em eventos científicos, como o Congresso dos Estudantes do CNPEM (CEC). Havendo compatibilidade com o cronograma de atividades, os resultados preliminares das simulações serão submetidos para apresentação na edição de 2025, e os resultados consolidados, na edição de 2026.

4. CRONOGRAMA DE DESENVOLVIMENTO DO PROJETO:

ATIVIDADE	MESES											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Levantamento bibliográfico sobre interação próton-metal	■											
Treinamento no software FLUKA		■										
Simulações computacionais iniciais		■	■	■	■							
Planejamento experimental e montagem de setup				■	■	■						
Execução dos testes experimentais no LEBT						■	■	■				
Análise comparativa entre simulações e experimentos							■	■	■			
Ajuste dos modelos conforme resultados experimentais							■	■	■	■		
Redação do relatório técnico							■			■	■	■
Apresentação dos resultados no Congresso CNPEM				■								■

5. REFERÊNCIAS.

- [1] Mohan, R. and Grosshans, D., 2017. Proton therapy—present and future. *Advanced drug delivery reviews*, 109, pp.26-44.
- [2] CDR CNPEM. ENT034.009 - Acelerador Conceito Para Terapias, Campinas, SP, 2025.
- [3] Ahdida, C., Bozzato, D., Calzolari, D., Cerutti, F., Charitonidis, N., Cimmino, A., Coronetti, A., D'alejandro, G.L., Donadon Servede, A., Esposito, L.S. and Froeschl, R., 2022. New capabilities of the FLUKA multi-purpose code. *Frontiers in Physics*, 9, p.788253.