
Projeto de Cavidade de Radiofrequência Normal-Condutores Excitada no Modo TM_{020} com Absorvedores de Modos de Ordem Elevada

Projeto Científico - Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC)
Pesquisador Responsável: Iago Carvalho de Almeida, Grupo de Radiofrequência - LNLS

1 Introdução

A luz síncrotron é a radiação gerada quando partículas carregadas em velocidades próximas à velocidade da luz têm sua trajetória defletida. Essa deflexão gera um feixe de fótons tangencial à trajetória, que abrange o espectro eletromagnético desde o infravermelho até os raios X. A luz síncrotron é amplamente utilizada em técnicas de imagem e espectroscopia, sendo essencial para o avanço de diversas áreas da ciência [1]. Entre suas principais características, destacam-se o alto brilho, decorrente da baixa emitância do feixe e do elevado fluxo de fótons, o que possibilita experimentos de alta resolução.

Essa radiação pode ser gerada artificialmente em aceleradores circulares conhecidos como síncrotrons. Nesses equipamentos, elétrons percorrem uma trajetória fechada em velocidades ultra-relativísticas, tendo sua energia mantida aproximadamente constante por cavidades de radiofrequência, dispositivos em que se excitam campos eletromagnéticos variantes no tempo que aceleram o feixe de elétrons. Usualmente utiliza-se o modo fundamental das cavidades, isto é, o modo de mais baixa frequência, para aceleração dos elétrons.

Em aceleradores circulares, os elétrons acumulam-se em pacotes separados pelo período de radiofrequência. Como consequência, o espectro em frequência do feixe é bastante amplo, permitindo que o próprio feixe excite modos ressonantes nas cavidades em frequências superiores à fundamental, conhecidos como modos de ordem elevada.

A excitação desses modos pode gerar campos eletromagnéticos nas cavidades de radiofrequência que interagem novamente com o feixe, produzindo mecanismos de realimentação positiva capazes de levar ao surgimento de instabilidades coletivas, eventualmente levando à perda do feixe de elétrons. Para que o feixe seja mantido estável, é de suma importância que os modos de ordem elevada excitados pelo feixe sejam mitigados. Neste contexto, este trabalho visa o estudo e projeto de uma cavidade de radiofrequência que opera em temperatura ambiente, conhecida como normal condutora, e que possibilita o amortecimento dos modos de ordem elevada.

2 Estado da Arte

Em síncrotron modernos, existem duas principais abordagens para mitigar os modos de ordem elevada em cavidades ressonantes. Uma delas é a utilização de cavidades supercondutoras construídas em nióbio, que operam em temperaturas criogênicas abaixo de 4.2K com a utilização de hélio líquido. Esse tipo de cavidade utiliza aberturas de maior diâmetro para a passagem do feixe, permitindo que os modos de ordem elevada escapem da cavidade e sejam amortecidos por absorvedores de ferrite ou carbeto de silício (SiC) no exterior do criomódulo no qual a cavidade se encontra. Essa abordagem requer uma custosa planta criogênica para liquefação de hélio [2][3].

Outra abordagem é a utilização de cavidades normal condutoras construídas em cobre, que operam em temperatura ambiente. Esse tipo de cavidade requer que as aberturas para a passagem do feixe sejam mantidas com o menor diâmetro possível para minimização da potência dissipada no corpo metálico da cavidade. Desse modo, a extração dos modos de ordem elevada ocorre com a utilização de sondas de alta complexidade que acoplam esses modos e os propagam até uma carga externa [4]. Cavidades normal condutoras são refrigeradas a água e não necessitam de uma planta criogênica, contudo dissipam grande

parte da potência em sua superfície e, portanto, são limitadas na amplitude dos campos de aceleração, necessitando de mais cavidades quando comparadas com as cavidades supercondutoras.

Recentemente, uma nova proposta de cavidades normal condutoras com amortecimento de modos de ordem elevada surgiu na comunidade científica de aceleradores de partículas [5][6]. Essas cavidades operam não no modo fundamental, mas no modo TM_{020} , que apresenta um nó do campo magnético ao longo de seu diâmetro. O perfil de campo do modo TM_{020} permite que seja feita uma abertura no corpo da cavidade que não interage com o modo que acelera o feixe, mas que propaga os modos de ordem elevada e o modo fundamental TM_{010} para fora da cavidade e possibilita o amortecimento com blocos de ferrite próximos ao corpo da cavidade. Essa abordagem torna o projeto dos absorvedores de modos de ordem elevada para cavidades normal condutoras mais simples e compactos.

3 Objetivos

Atualmente o SIRIUS opera com uma corrente armazenada de 200 mA mantida por duas cavidades supercondutoras de 500 MHz do tipo CESR-B adquiridas da empresa alemã Research Instruments GmbH [7]. Embora cavidades supercondutoras apresentem eficiente amortecimento de modos de ordem elevada e baixa dissipação de potência, necessitam de uma infraestrutura complexa para manter as cavidades no estado supercondutor. Durante o período de operação das cavidades observou-se que problemas operacionais na planta criogênica comprometem a disponibilidade do acelerador para os pesquisadores das linhas de luz por dias ou semanas. Desse modo, o objetivo deste projeto é estudar e projetar uma cavidade de radiofrequência normal condutora operando no modo TM_{020} , com amortecimento eficiente de modos de ordem elevada. O desenvolvimento dessa cavidade visa contribuir para a aquisição de conhecimento e capacitação técnica no projeto de cavidades normal condutoras com amortecimento de HOMs, tecnologia que pode ser relevante para futuras fontes de luz síncrotron e para possíveis atualizações de aceleradores existentes.

4 Metodologia

O projeto será iniciado com a modelagem 3D da geometria inicial da cavidade de radiofrequência de 500 MHz e a realização de simulações de eigenmode utilizando o *software* Ansys *High-Frequency Structure Simulator* (HFSS). Através dos resultados obtidos, será feita a caracterização dos modos de ordem elevada aprisionados na cavidade por meio da análise de parâmetros como frequência, fator de qualidade e impedância *shunt* com auxílio de pós processamento em Python. Posteriormente, serão modelados os absorvedores de modos de ordem elevada e uma nova caracterização dos modos será realizada para comparação e validação do amortecimento. O acoplador principal da cavidade para a frequência de 500 MHz será projetado através de simulações de análise modal no Ansys HFSS. Por fim, um protótipo em escala reduzida será projetado e fabricado para testes em bancada e validação das simulações.

5 Cronograma

1. Estudo da teoria de radiofrequência focada em guias de onda, cavidades ressonantes e acopladores;
2. Modelagem 3D da geometria inicial da cavidade ressonante de 500 MHz e simulações de eigenmode utilizando o Ansys HFSS;
3. Caracterização dos modos de ordem elevada aprisionados na cavidade ressonante através de pós processamento em Python;
4. Modelagem dos absorvedores dos modos de ordem elevada em ferrite e caracterização dos modos de ordem elevada amortecidos;
5. Modelagem 3D do acoplador fundamental em 500 MHz e projeto da geometria do acoplador com simulações de análise modal no Ansys HFSS;

6. Projeto de cavidade ressonante em escala reduzida para testes em bancada e validação das simulações;
7. Otimização da geometria da cavidade ressonante de 500 MHz com absorvedores de modos de ordem elevada.

Na Tabela 1, as atividades estão distribuídas entre os meses em que o projeto será realizado.

Atividades Descritas	Período (mês)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	■	■	■	■	■	■						
2	■	■										
3			■	■								
4					■	■						
5							■	■				
6								■	■	■		
7										■	■	■

Tabela 1: Cronograma de Desenvolvimento do Projeto

Referências

- [1] P. Ashe *et al.*, “Applications of Synchrotron Light in Seed Research: An Array of X-Ray and Infrared Imaging Methodologies,” *Front. Plant Sci.*, 2025.
- [2] H. Padamsse, J. Knobloch, and T. Hays, *RF Superconductivity for Accelerators*. John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- [3] J. Sears *et al.*, “Preparation and Testing of a Superconducting Cavity for CESR-B,” in *Proc. PAC’93*, 1993, pp. 763–766.
- [4] F. Perez *et al.*, “Active Harmonic EU Cavity: Commissioning and Operation with Beam,” *Science-Direct*, 2025.
- [5] T. Inagaki *et al.*, “High-power Tests of the Compactly HOM-damped TM020-cavities for a Next generation Light Source,” in *Proc. IPAC’23*, 2023, pp. 2635–2638.
- [6] C. Wang *et al.*, “Design of a 500 MHz TM020-mode cavity with elliptical choke for the high-current Super Tau-Charm Facility,” *Springer Nature*, 2026.
- [7] L. Liu *et al.*, “Status of Sirius Operation with Users,” in *Proc. IPAC’25*, 2025, pp. 228–231.