

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

Coordenação de Física Aplicada

Dispositivos Magnéticos de um Laser de Elétrons Livres Realimentado

Rubem Raphael dos Santos Caetano

Orientador: Geraldo Roberto Carvalho Cernicchiaro

Rio de Janeiro

Agosto de 2015

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

Rubem Raphael dos Santos Caetano

Dispositivos Magnéticos de um Laser de Elétrons Livres Realimentado

Dissertação apresentada ao Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas com o objetivo de obtenção do título de Mestrado Profissional em Física, com Ênfase em Instrumentação Científica, sob a orientação do professor doutor Geraldo Roberto Carvalho Cernicchiaro, na Coordenação de Física Aplicada (APL).

Rio de Janeiro

Agosto de 2015

Resumo

Esta dissertação apresenta a caracterização experimental e modelagem numérica dos dispositivos magnéticos que são dipolos e quadrupolos e o ondulador, utilizados no controle da óptica do feixe de elétrons de um Laser de Elétrons Livres (FEL – CREOL). Laser de Elétrons Livres (do inglês *Free Electron Laser* - FEL) é uma técnica para geração de luz coerente (Laser) fundamentada na interação de um feixe de elétrons relativístico e um campo magnético estático ondulado. Existem dezenas de Lasers de Elétrons Livres no mundo trabalhando em diferentes faixas de frequência, energia e comprimentos de onda, mas não há nenhum em operação na América Latina. Este trabalho tem por objetivo contribuir para a proposta de implantação e desenvolvimento de um FEL Realimentado, para operar na faixa do TeraHertz que compreende o infravermelho longínquo entre 250 a 1000 μm . A proposta do projeto é baseada no reaproveitamento dos componentes de um FEL anteriormente implementado no *Center for Research and Education in Optics and Lasers* (CREOL), na Universidade Central da Florida. Os dispositivos magnéticos, dipolos e quadrupolos, foram caracterizados magneticamente, eletricamente e mecanicamente no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) e as medidas do Ondulador foram realizadas no Laboratório Nacional da Luz Síncrotron (LNLS). Os resultados experimentais são analisados em função dos parâmetros do projeto do CREOL, onde os resultados do dipolo e quadrupolo indicam que estes dispositivos podem ser reaproveitados para o projeto de um novo sistema FEL. No Ondulador foi constatada uma instabilidade mecânica, e conseqüentemente os parâmetros do campo magnético, que compromete a sua reutilização. Para compreender o funcionamento dos dispositivos magnéticos e obter uma ferramenta para simular um FEL foram desenvolvidos modelos numéricos construído na plataforma de simulação COMSOL *Multiphysics*, onde seus resultados podem ser aplicados para compreender os dispositivos magnéticos e simular em FEL.

Palavras-chave: Laser de Elétrons Livres, Dispositivos Magnéticos, caracterização experimental, modelagem numérica.

Abstract

This dissertation presents the experimental characterization and numerical modeling of magnetic devices that are dipoles and quadrupole and the undulator used in the optical control of the electron beam of a laser Free Electrons (FEL - CREOL). Free Electron Laser FEL is a source for generating coherent light (laser) based on the interaction of a relativistic electron beam with a undulated static magnetic field. There are dozens of Free Electron Lasers in the world working on different frequency bands, energy and wavelengths, but there is no operation in Latin America. This paper aims to contribute to the proposed implementation and development of an energy recovery FEL, to operate in the terahertz range comprising the far infrared between 250-1000 microns. The project proposal is based on the reuse of components of a FEL previously implemented at the Center for Research and Education in Optics and Lasers (CREOL) at the University of Central Florida. Magnetic, dipole and quadrupole devices were characterized magnetically, electrically and mechanically at the Brazilian Center for Physics Research (CBPF) and the Undulator measurements were performed at the National Laboratory of Synchrotron Light (LNLS). The experimental results are analyzed on the basis of CREOL design parameters, where the results of the dipole and quadrupole indicate that these devices can be reused for the design of a new FEL system. The undulator mechanical instability was detected, and therefore the parameters of the magnetic field, which compromises their reuse. To understand the operation of magnetic devices and get a tool to simulate a FEL were developed numerical models built on the COMSOL Multiphysics simulation platform where results can be applied to understand the magnetic devices and simulate in FEL.

Keywords: Free Electron Laser, magnetic devices, undulator, numerical analysis.

Agradecimentos

- Agradeço a Deus pela vida e pela oportunidade de concluir o meu curso de Mestrado em Física com ênfase em instrumentação científica.
- Aos meus pais, Rubem e Maria das Dores, e a meus irmãos, Renata, Nadia e Renato, pelo incentivo, amor e carinho recebido neste e em outros períodos da minha vida.
- A minha namorada, Agbale, pelo estímulo, força, paciência e por sempre estar ao meu lado neste momento tão importante da minha vida.
- Aos meus amigos Daniele, Juarez e João Manoel pelo incentivo durante todo o mestrado.
- Ao meu orientador Geraldo por todo o apoio, paciência, sabedoria e por acreditar no meu potencial acadêmico.
- Ao Pessoal do Laboratório de Instrumentação e Medidas, Pedro, Marcos, Virginia e Grégoire Gérin, pelo apoio técnico para a construção deste trabalho.
- Aos meus primeiros orientadores, Tatiana Gabriela Rappoport e João Ricardo Quintal, pelo incentivo a pesquisa.
- Aos professores da UFRJ - Campus Macaé, Franciole, Valeria, Bernardo, Raphael Púpio, Cleber, Marcio Magini, Claudio, Habbib e Irina pelos conselhos dados e pelo apoio nas atividades da minha função de técnico de laboratório de física.
- Ao Giovanni, técnico de física da UFRJ- Campus Macaé, por todo o apoio operacional das nossas funções como técnico de laboratório de física.
- A Marinete, dona da Pousada Rocha que me acolheu de forma carinhosa na cidade de Macaé.
- Ao James Citadini, Reinaldo Basilio, Giancarlo Tosin do grupo de Magnetos e Dispositivos de Inserção do LNLS pelo apoio técnico prestado nas medidas magnéticas do Ondulador.
- Aos membros da banca por participarem deste trabalho dando sua honrosa contribuição.
- A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Lista de Siglas e Abreviações

AFEL - *FEL Amplifier*

CAD - *Computer Aided Design*

CBPF - *Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas*

CREOL - *Center for Research and Education in Optics and Lasers*

CW - *Continuous Wave*

EA - *Electrostatic Accelerator*

EEHG - *Echo-Enabled Harmonic Generation*

EDP – *Equações Diferenciais Parciais*

ELBE – *Electron Linear accelerator with high Brilliance and low Emittance*

ERLA - *Energy Recovery Linear Accelerator*

ESR - *Electron Storage Ring*

FEL- *Free Electron Laser*

HGHG - *High-Gain Harmonic Generation*

HV- *High-Voltage Terminal*

KFEL - *FEL Klystron*

LASER - *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*

LEL- *Laser de Elétrons Livres*

LNLS - *Laboratório Nacional da Luz Síncrotron*

MA - *Microtron Accelerator*

MEF – *Método de Elementos Finitos*

OFEL - *FEL Oscillator*

PPM - *Pure Permanent Magnetic*

RFLA - *Radio Frequency Linear Accelerator*

SASE - *Self-Amplified Spontaneous Emission*

SR - *Super-radiant FEL*

TARLA - *Turkish Accelerator and Radiation Laboratory at Ankara*

Lista de Símbolos

B – Campo magnético

B_z – Campo magnético do Ondulador no Eixo Axial

B_0 – Amplitude do campo magnético do Ondulador

B_{rm} – Campo magnético remanente

c – Velocidade da Luz

e – elétron

g – *gap* (distância entre os cassetes do Ondulador)

G – Gauss

H – Campo magnético aplicado

I – Corrente elétrica

K – Parâmetro do Ondulador

M – Magnetização

m_e – Massa do elétron

m – Metro

MeV – Mega elétron Volt

N – Número de espiras

L_{gap} – Distâncias entre os ferros do dipolo

T – Tesla

THz – Radiação na faixa do TeraHertz

V_m – Potencial Escalar Magnético

λ – Comprimento de onda

λ_u – Comprimento de onda do Ondulador

γ – Fator de Lorentz

μ_{ar} – Permeabilidade magnética no ar

μ_0 – Permeabilidade magnética no vácuo

μ_{meio} – Permeabilidade magnética do meio

μ_{ferro} – Permeabilidade magnética do ferro

“Há pessoas que desejam saber só por saber, e isso é curiosidade; outras, para alcançarem fama, e isso é vaidade; outras, para enriquecerem com a sua ciência, e isso é um negócio torpe; outras, para serem edificadas, e isso é prudência; outras, para edificarem os outros, e isso é caridade”.

Santo Agostinho

Conteúdo

1 - Introdução	14
2 - Fundamentos.....	16
2.1 – Laser.....	16
2.2 – Laser de Elétrons Livres.....	18
2.3 – Lasers de Elétrons Livres em operação.....	23
2.3.1- Laser de Elétrons Livres na Faixa do THz.....	25
2.4 – COMSOL <i>Multiphysics</i>	26
3 - Laser de Elétrons Livres Realimentado	29
3.1 – CREOL – FEL	30
3.1.1- Acelerador Eletrostático	31
3.1.2- Transporte e alinhamento do feixe de elétrons	32
3.1.3- Sistema de vácuo	35
3.1.4- Sistema de controle.....	36
3.2 – Reestruturação do projeto	39
4 – Dispositivos magnéticos da óptica do feixe	42
4.1 – Dipolo.....	42
4.1.1 - Caracterização experimental.....	43
4.1.2 – Modelagem numérica.....	47
4.2 - Quadrupolo	51
4.2.1 – Caracterização experimental	53
4.2.2 – Modelagem numérica.....	55
5 – Ondulador.....	59
5.1 – Análise dos dados experimentais	63
5.2 – Modelagem numérica.....	70
5.3 – Discussão de um novo Ondulador.....	76
6 -Conclusão	79

Lista de Figuras

Figura 1: Esquema básico de um laser.....	16
Figura 2: Laser de Elétrons Livres ELBE instalado no <i>Center for High-Power Radiation Sources in Dresden-Rossendorf</i> , na Alemanha [6].....	18
Figura 3: Percurso realizado pelo feixe de elétrons para gerar radiação infravermelha no Laser de Elétrons Livres ELBE instalado no <i>Center for High-Power Radiation Sources in Dresden-Rossendorf</i> , na Alemanha (figura adaptada [6]).	19
Figura 4: Vista superior de um conjunto de imãs em um <i>wiggler</i> e no ondulador, onde é possível comparar a radiação eletromagnética produzida por um feixe de elétrons interagindo com o campo magnético desses elementos magnéticos.	21
Figura 5: Esquema do princípio do mecanismo de funcionamento de um Laser de Elétrons Livre, a partir da interação de um feixe de elétrons relativístico, conforme trajetória ilustrada pela linha tracejada em azul, o campo magnético senoidal do ondulador e a radiação eletromagnética indicada pela seta vermelha presente na cavidade ressonante formada por dois espelhos (figura adaptada [9]).	22
Figura 6: Exemplo de uma malha de elementos finitos, <i>mesh</i> , utilizada para análise do modelo de um dipolo magnético.....	26
Figura 7: Painel de interface do COMSOL para parametrização do quadrupolo. À esquerda o <i>Model Builder</i> , no centro o subpainel para a inserção dos parâmetros de programação.....	27
Figura 8: Configuração de um Laser de Elétrons Livres Realimentado.	29
Figura 9: Sistema mecânico da saída do laser e recuperação do feixe de elétrons. Neste sistema, o dipolo altera a trajetória de uma parte do feixe de elétrons para a recuperação e um espelho com refletividade menor que 100 por cento auxiliando a saída do laser.	30
Figura 10: Laser de Elétrons Livres do CREOL.....	31
Figura 11: Esquemático da estrutura interna do acelerador eletrostático, onde no detalhe temos o canhão de elétrons (figura adaptada [22]).....	32
Figura 12: Sistema de geração, transporte e injeção do feixe de elétrons empregado no Laser de Elétrons Livres Realimentado.....	33
Figura 13: a) Desenho em três dimensões do <i>aperture screen</i> que utilizando a ferramenta CAD <i>Solid Works</i> . b) Esquema detalhado do alinhamento do feixe de elétrons dentro de um <i>aperture screen</i> ...	34
Figura 14: Dispositivos magnéticos dipolo e quadrupolo e o equipamento de monitoramento do feixe de elétrons, utilizados no Laser de Elétrons Livres Realimentado.	34
Figura 15: Tipos de bombas utilizadas em sistemas de vácuo e seus intervalos de pressão. As bombas sinalizadas foram utilizadas pelo FEL CREOL. [Fonte: autor]	35
Figura 16: Esquema dos componentes monitorados pelo sistema de controle do CREOL. [Fonte: autor].....	37
Figura 17: Diagrama do sistema de controle do CREOL.	38
Figura 18: Diagrama de controle de um dispositivo magnético no CREOL.	38
Figura 19: Representação de uma proposta de instalação de um Laser de Elétrons Livres em <i>SolidWorks</i>	39
Figura 20: Linha construída para testar os componentes mecânicos do Laser de Elétrons Livres.	40
Figura 21: Sistema utilizado para verificar a variação da corrente elétrica nas placas de corrente. ...	40
Figura 22: a) Foto do Dipolo magnético. b) Linha Amperiana no modelo numérico do dipolo.	42

Figura 23: Vista lateral do Dipolo magnético, o eixo de coordenadas $Bz \times x$ representa o sentido e a direção do fluxo do campo magnético Bz e sua distribuição ao longo do eixo x e as letras A e B representam os pontos nos polos do dipolo que foram utilizados para medir o campo magnético em função da corrente elétrica.	44
Figura 24: Mesa robótica utilizada na caracterização experimental do dipolo.	44
Figura 25: Software construído em <i>LabView</i> para a caracterização magnética do dipolo.	45
Figura 26 Mapeamento magnético de um dipolo quando submetido a uma corrente de 1A.	46
Figura 27: Medida do campo magnético Bz do dipolo ao longo da posição x com uma corrente elétrica de 1A.	46
Figura 28: Gráfico que representa o campo magnético nos polos do dipolo em função da corrente elétrica de -2,5 a 2,5 A.	47
Figura 29: Vista lateral do Dipolo magnético onde a linha tracejada representa o contorno do dipolo e a região externa representa a geometria escolhida para a condição de contorno no dipolo.	48
Figura 30: Representação da intensidade do fluxo magnético obtido no dipolo, que é constante entre seus polos e na escala representada pelas cores é possível observar a variação do fluxo magnético no dipolo.	49
Figura 31: Campo magnético ao longo da posição x (Figura 23) entre os polos do dipolo com uma corrente elétrica fixa de 1A.	50
Figura 32: Campo magnético em função da corrente elétrica, no ponto B (Figura 23) no polo do dipolo.	50
Figura 33: a) Foto do quadrupolo eletromagnético. b) Linha Amperiana no modelo do quadrupolo magnético, onde r_0 é a distância entre o polo e o centro do quadrupolo.	51
Figura 34: Vista frontal do quadrupolo magnético, onde as letras A e B representam os pontos nos polos do quadrupolo que foi utilizado para medir o campo magnético em função da corrente elétrica.	54
Figura 35: Gráfico do módulo do campo magnético nos pontos A e B, dos polos do quadrupolo em função da corrente elétrica situada entre -2,5 a 2,5 A.	55
Figura 36: Desenho do Quadrupolo com a orientação magnética dos magnetos e a região circular externa representando a condição de contorno. A letra A indica um ponto na superfície do quadrupolo e a letra d representa a distância onde é calculado o fluxo magnético em relação ao longo do eixo y próximo à superfície do magneto.	56
Figura 37: Representação da intensidade do fluxo magnético no Quadrupolo. Na escala das cores representamos o fluxo magnético, onde podemos observar que o campo magnético no centro do Quadrupolo é zero.	57
Figura 38: Campo magnético Br no quadrupolo ao longo da posição no eixo y com uma corrente elétrica de 1A, representado na Figura 36.	58
Figura 39: Módulo do campo magnético Br em função da corrente elétrica, no ponto A (Figura 36) no polo do quadrupolo.	58
Figura 40: Esquema do ondulator <i>Hybrid</i> onde os ímãs estão indicados pela cor azul e seus respectivos campos magnéticos pelas setas pretas. Os entreferros, na cor cinza, orientam o fluxo resultante, indicados pelas setas em vermelho. O campo magnético estático resultante, representado pelo tracejado vermelho, é senoidal para uma faixa de parâmetros que depende da intensidade B_0 associada aos materiais dos entreferros e dos ímãs, a distância entre eles (<i>gap</i>) e de λu	59
Figura 41: a) Vista interna do ondulator mostrando o posicionamento dos cassetes. b) Vista externa onde é possível observar espaços para a colocação do equipamento de visualização do feixe de elétrons para observar o feixe dentro do ondulator.	61
Figura 42: Detalhe dos ímãs do Ondulator.	61

Figura 43: Fotos do cassete inferior do Ondulador do CREOL. a) Detalhe do parafuso de fixação e do parafuso de ajuste do entreferro b) Vista frontal com detalhe do parafuso de ajuste fino de um dos entreferros.	62
Figura 44: Bancada magnética em três dimensões utilizada para a caracterização magnética do ondulador [35].	64
Figura 45: Esquema da parte interna do Ondulador utilizado para a caracterização do campo magnético no eixo z entre os cassetes.	65
Figura 46: Medida do Campo magnético medido B_z juntamente com os valores obtidos da 1ª e 2ª integral.	66
Figura 47: Pontos de máximos do módulo campo magnético B_z medido no ponto médio no <i>gap</i> para cada período do Ondulador.	67
Figura 48: Histograma dos valores máximos do módulo do campo magnético B_z medidos no centro do <i>gap</i> do Ondulador.	68
Figura 49: Calculo da derivada para os valores do período do Ondulador, o ajuste deste gráfico possui uma média de 8,023 mm e um desvio padrão de 0,025 mm.	69
Figura 50: Desenho de um trecho do ondulador com 50 períodos, onde a geometria esférica representa a condição de contorno.	71
Figura 51: Detalhe do Potencial Escalar Magnético dos ímãs onde a característica senoidal está representada na linha tracejada.	72
Figura 52: Campo magnético B_z calculado por uma representação em duas dimensões no Eixo Axial do ondulador em função da posição ao longo do eixo x.	73
Figura 53: a) Desenho de um período do Ondulador, onde os ímãs esta representado em azul, os entreferros em cinza e o campo magnético B_z está representado pelos vetores em vermelho. b) Um ângulo de rotação no eixo do entreferro pode provocar uma componente transversal indesejável. ...	74
Figura 54: Campo magnético B_z na posição y para inclinações do entreferro a 0°(azul) e 0,5° (verde).	75
Figura 55: Projeção da variação da amplitude máxima das componentes do campo magnético B_z , em relação aos eixos x e y, de um entreferro em função de sua inclinação.	75
Figura 56: Configuração do Laser de Elétrons Livres TARLA com dois onduladores, localizado na Turquia [38].	76
Figura 57: comprimento de onda requerido λ em função da energia do feixe de elétrons para alguns comprimentos de onda do ondulador λu	78

Lista de Tabelas

Tabela 1: Tipos de Lasers.	17
Tabela 2: Laser de Elétrons Livres no mundo em 2013 [12].	24
Tabela 3: Laser de Elétrons livres na faixa do infravermelho longo em 2010 [14].	25
Tabela 4: Parâmetros do Ondulador construído pelo CREOL.	60
Tabela 5: Valores da 1ª e 2ª integrais do campo magnético B_z especificado pelo projeto.	63
Tabela 6: Valores da 1ª e 2ª integrais do campo magnético B_z para o <i>gap</i> de 6 mm sem correção. ...	65
Tabela 7: Valores da 1ª e 2ª integrais do campo magnético B_z para o <i>gap</i> de 6 mm com correção. .	66
Tabela 8: Comparação dos valores da 1ª e 2ª integrais estipulados pelo projeto CREOL e resultados obtidos em colaboração com o LNLS.	67
Tabela 9: Comparação dos dados referente à amplitude do campo magnético B_z e o comprimento de onda do ondulador estipulado pelo projeto CREOL e resultados obtidos pela análise dos dados.	69
Tabela 10: Parâmetros utilizados para calcular as curvas do comprimento de onda requerido em função da energia do feixe de elétrons.	77

1 - Introdução

Nesta dissertação abordamos os princípios e fundamentos de um Laser de Elétrons Livres (LEL), ou *Free Electron Laser* (FEL), e apresentamos subsídios para o desenvolvimento de um projeto e construção de um novo sistema para operar na faixa do infravermelho longo. Esta técnica baseia-se na interação de um feixe de elétrons relativístico com um campo magnético estático ondulatorio, o que permite sintonizar em uma ampla gama de frequência e com alta intensidade a radiação Laser resultante [1].

Surgiu no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), em 2009, a proposta de se elaborar um projeto para a construção de um Laser de Elétrons Livres, cujo objetivo é desenvolver expertise nesta área, considerada estratégica na época. O projeto foi baseado em um sistema denominado CREOL (*Center for Research and Education in Optics and Lasers*), inicialmente desenvolvido na Universidade Central da Flórida, entre 1997 e 2001 [2].

O Laser de Elétrons Livres do CREOL foi desenvolvido para operar na faixa do infravermelho longo com comprimentos de onda entre 250 a 1000 μm e seus principais elementos foram transferidos ao CBPF. Este trabalho tem como objetivo contribuir para a elaboração de um proposta de implantação e desenvolvimento de um FEL Realimentado, para operar na faixa do TeraHertz, reaproveitando os componentes do FEL- CREOL. Seu foco está na caracterização experimental e modelagem numérica do dipolo, quadrupolo e do ondulator, que consistem no cerne da óptica do feixe de elétrons e base para construção de um novo FEL. Neste trabalho foram construídas modelagens numéricas dos elementos da óptica do feixe com o objetivo de disponibilizar uma ferramenta para verificar a viabilidade de se reaproveitar os elementos do CREOL em um novo sistema.

Os elementos relativos à computação, informática, interfaces, programação, aquisição de dados e controle, tornam-se rapidamente obsoletos ou suplantados por novas tecnologias. A elaboração de um novo sistema supervisorio e de controle é base de outra dissertação associada ao projeto [3] e, de certa forma, está ligada de modo complementar a este trabalho.

O Laser de Elétrons Livres Realimentado, que descreveremos de forma mais detalhada nos próximos capítulos, pode ser entendido de modo simplificado a um pequeno Síncrotron composto por um anel de armazenamento dotado de um sistema de vácuo

utilizado para aumentar o caminho livre do feixe de elétrons; dispositivos magnéticos tais como: dipolos e quadrupolos, do tipo solenoide, que utilizam corrente elétrica para gerar um campo magnético; um ondulator que é um dispositivo magnético de inserção formado por ímãs periódicos; equipamentos para centralizar o feixe de elétrons chamado de *aperture screen*, ou dispositivo de centralização do feixe de elétrons; um sistema de potência que gerencia os elementos magnéticos e um acelerador de elétrons.

Na primeira etapa da pesquisa, foi realizada a documentação dos elementos mecânicos da óptica do feixe de elétrons e do Laser, tais como o sistema de vácuo, a sustentação, os magnetos, entre outros. Para obter tais resultados foi utilizada a plataforma DAC (Desenho Assistido por Computador) ou CAD (do inglês: *Computer Aided Design*) SolidWorks, desenvolvida pela SolidWorks Corporation.

No segundo momento, foram desenvolvidos protocolos de testes nas peças mecânicas do sistema de vácuo e nas placas de corrente utilizadas para polarizar os dipolos e quadrupolos, que estão situadas no sistema de potência. Após o término dos testes, foi efetuada a caracterização experimental e modelagem numérica do dipolo, quadrupolo e do ondulator.

Ambas as etapas concretizaram-se no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF). Cabe ressaltar que a caracterização experimental do ondulator foi realizada no Laboratório de Magnetos e Dispositivos de Inserção, do Laboratório Nacional da Luz Síncrotron (LNLS).

No capítulo 2 apresentamos os fundamentos do Laser e do Laser de Elétrons Livres e do software COMSOL *Multiphysics* que foi empregado na construção das modelagens numéricas. No capítulo 3 é abordada a descrição do Laser de Elétrons Livres Realimentado desenvolvido pelo CREOL. No capítulo 4 é exposta a caracterização experimental e modelagem numérica do dipolo e do quadrupolo que compõem a óptica do feixe. No capítulo 5 desmontamos o ondulator juntamente com sua caracterização experimental, modelagem numérica e discussão para o desenvolvimento de um novo equipamento e por fim no capítulo 6 encerramos com as considerações finais.

2 - Fundamentos

Neste capítulo apresentaremos os fundamentos de um Laser de Elétrons Livres, onde iniciaremos com o Laser, que é um princípio básico para compreender um FEL. Após será exposto uma breve explicação sobre o Laser de Elétrons Livres, com seus locais de operação e suas aplicações na faixa do THz, que é a região de trabalho do FEL CREOL. Finalizamos com o software COMSOL que foi empregado nas modelagens numéricas dos dispositivos magnéticos.

2.1 – Laser

Laser é um acrônimo de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. De modo geral, seu funcionamento é baseado na emissão estimulada que ocorre quando um fóton externo estimula o decaimento de elétron de um nível mais excitado de energia para um nível menos excitado. Este elétron ao passar para o nível mais baixo emite outro fóton que surge juntamente com o primeiro fóton, possuindo a mesma energia e propagando-se na mesma direção [4].

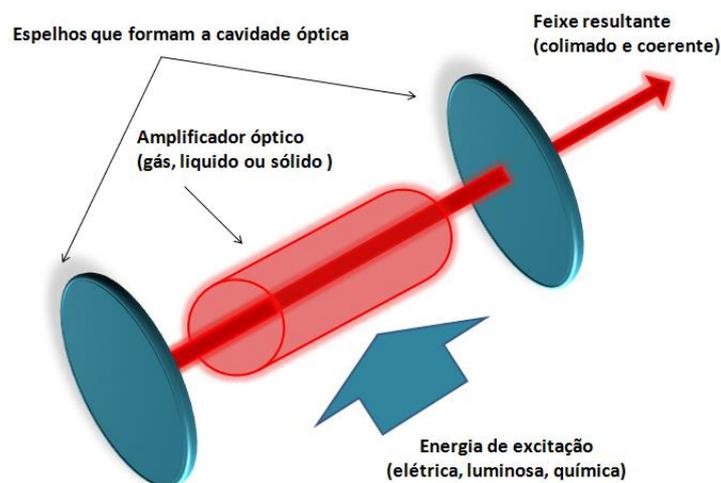


Figura 1: Esquema básico de um laser.

A estrutura básica de um laser pode ser dividida em três partes, como visto na figura 1, em fonte de energia que é utilizada para excitar os elétrons, amplificador óptico onde à

emissão estimulada ocorre podendo ser gasosa, sólida ou líquida e espelhos ressonadores, possibilitando que a emissão ocorra inúmeras vezes.

A fonte externa do laser possibilita que os átomos do meio opticamente ativo fiquem excitados. A inversão de população ocorre quando os átomos, em sua maioria, estão excitados. Desse modo, em um dos átomos excitados ocorre a emissão espontânea, emitindo fótons que se refletem nos espelhos provocando a emissão espontânea em outros átomos. Quando todos os átomos decaíram dos seus níveis energéticos, temos a emissão de luz pelo amplificador óptico.

A luz gerada no laser é caracterizada por ser [5]:

- a) Monocromática - A energia carregada dos fótons estimulados é igual a dos fótons emitidos.
- b) Colimada - O feixe resultante no laser se dá em apenas uma direção, havendo o mínimo de dispersão.
- c) Coerente - Onde os fótons estão em fase dentro da cavidade ressonante.

Existem diversos tipos de materiais utilizados no interior das cavidades ressoantes. Dessa forma, temos uma variedade de lasers, tais como: laser de estado sólido, semicondutor, gás, líquido, lasers químicos, vistos na tabela 1. Os Lasers possuem diversas aplicações científicas em física, química, biologia, medicina e em indústrias.

Tabela 1: Tipos de Lasers.

Tipo de Laser	λ (μm)
Argon fluoride (Excimer-UV)	0,193
Krypton chloride (Excimer-UV)	0,222
Helium cadmium (UV)	0,325
Helium cadmium (violet)	0,441
Krypton (yellow)	0,568
Helium neon (orange)	0,610
Krypton (red)	0,647
Rhodamine 6G dye (tunable)	0,570-0,650
Gallium arsenide (diode-NIR)	0,840
Nd:YAG (NIR)	1,064
Carbon dioxide (FIR)	10,6

2.2 – Laser de Elétrons Livres

O Laser de Elétrons Livres é um sistema que gera radiação coerente a partir de um feixe de elétrons relativístico que se propaga através de um campo magnético periódico. Este sistema é formado por um acelerador eletrostático, utilizado para produzir o feixe de elétrons, um ondulator que é um dispositivo magnético de inserção constituído de polos magnéticos alternados que produzem um campo magnético periódico e estático, um sistema de vácuo, onde o feixe de elétrons se propaga no interior de uma linha de vácuo, de forma a aumentar seu livre caminho médio e minimizar perdas devidas ao espalhamento do feixe com moléculas do gás de fundo e um sistema de controle.

Para controlar a óptica do feixe utilizamos os dispositivos magnéticos, dipolos e quadrupolos, que empregam propriedades magnéticas e elétricas para desviar e focalizar o feixe de elétrons, respectivamente. Estes componentes são responsáveis pela injeção dos elétrons no ondulator, pela focalização e monitoramento do feixe entre outras atribuições que permitem o processo de geração do feixe Laser.

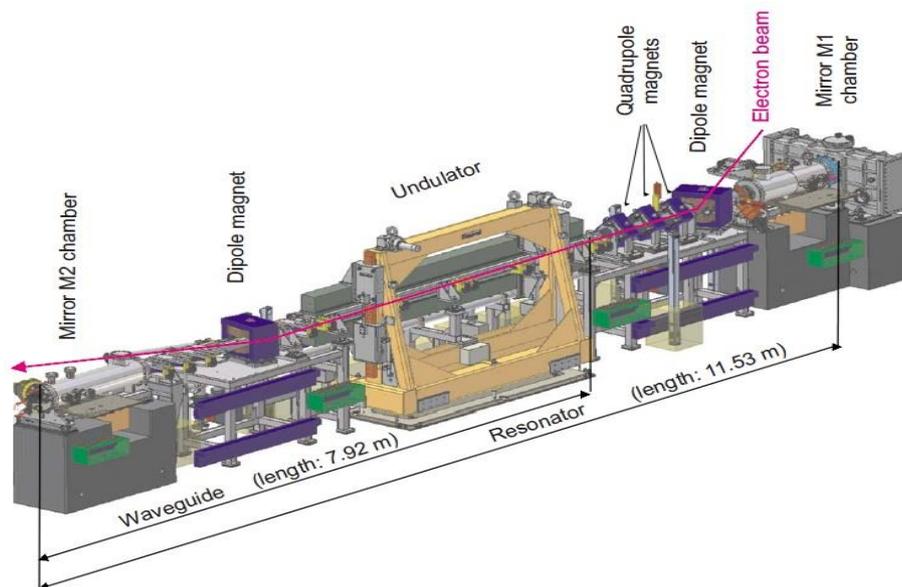


Figura 2: Laser de Elétrons Livres ELBE instalado no *Center for High-Power Radiation Sources in Dresden-Rossendorf*, na Alemanha [6].

Para ilustrar os elementos que compõem um FEL temos na figura 2 um Laser de Elétron Livres, utilizado no *Center for High-Power Radiation Sources in Dresden-Rossendorf* na Alemanha, chamado de *Free Electron Laser Electron Linear accelerator with high Brilliance and Low Emittance* (FEL-ELBE) [6].

Na figura 3, temos o percurso realizado pelo feixe de elétrons para a geração do feixe laser. O processo inicia-se na injeção de elétrons no acelerador. Quando o feixe de elétrons percorre o trajeto passando por dentro do ondulator, onde há um campo magnético periódico senoidal, ocorre à geração de radiação eletromagnética. Esta radiação é refletida nos espelhos que formam uma cavidade ressonante, tal como Lasers convencionais, e interage com o próprio feixe de elétrons gerador, modulando o feixe de elétrons de modo a gerar radiação coerente.

O feixe de elétrons é desviado por um dipolo magnético do eixo óptico para descarte ou reaproveitamento e a radiação eletromagnética, o feixe Laser, é extraída por um dos espelhos que é semitransparente.

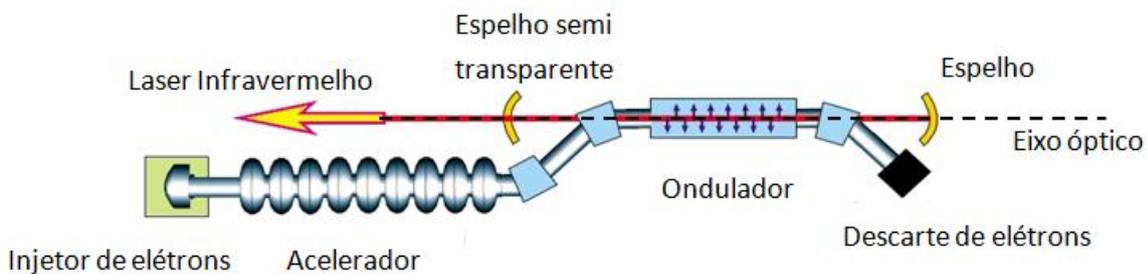


Figura 3: Percurso realizado pelo feixe de elétrons para gerar radiação infravermelha no Laser de Elétron Livres ELBE instalado no *Center for High-Power Radiation Sources in Dresden-Rossendorf*, na Alemanha (figura adaptada [6]).

Os componentes fundamentais de um Laser de Elétron Livres são:

a) Sistema de injeção

De modo geral, os elétrons são gerados em aceleradores eletrostáticos lineares que tem como função produzir um feixe de elétrons.

b) Câmara de vácuo

Para minimizar as perdas das partículas por espalhamento é necessário que se tenha uma linha com vácuo da ordem de 10^{-12} Torr. Geralmente em anel armazenador há um sistema de bombas de vácuo ligadas em série para alcançar menores valores de pressão.

c) Magnetos

São dispositivos magnéticos, formados por ímãs ou solenoides, utilizados para alterar a trajetória ou colimar o feixe de elétrons. Existem diversos tipos destes equipamentos, como dipolos, quadrupolos, sextupolos e etc. Neste trabalho abordamos os dipolos e quadrupolos.

1. Dipolos magnéticos

Possui a função de defletir o feixe de elétrons. Geralmente são utilizados em equipamentos que possuem recirculação do feixe de elétrons no anel armazenador.

2. Quadrupolos magnéticos

Permitem corrigir a divergência do feixe de elétrons. Seu funcionamento é similar às lentes em óptica e geralmente são posicionados nas seções retas do anel armazenador.

d) Dispositivos magnéticos de inserção

Quando um feixe de elétrons atravessa um elemento magnético, o feixe emite uma radiação eletromagnética. Para obter um mínimo de espalhamento da radiação foram desenvolvidos dois equipamentos: o *wiggler* e o ondulador. Estes equipamentos são estruturas mecânicas compostas por ímãs ou solenoides periódicas com polos alternados, separados por um *gap* e tem como finalidade gerar radiação eletromagnética. Possuem um campo magnético perpendicular à direção do feixe de elétrons, fazendo com que o feixe de elétrons realize uma trajetória senoidal.

A grande diferença entre *wiggler* e o ondulador é a configuração da saída da radiação, como observado na figura 4. Em um *wiggler*, temos uma grande intensidade do campo magnético e a forma da saída da radiação possui um ângulo de abertura horizontal da largura da radiação emitida. No ondulador, os campos magnéticos possuem menores intensidades, dessa forma, a abertura horizontal é menor [7].

e) Monitoramento do feixe de elétrons

Para que o feixe de elétrons efetue sua trajetória no anel é necessário que o feixe de elétrons esteja em uma posição específica, assim tornam-se necessários equipamentos para monitorar o feixe de elétrons na linha de vácuo.

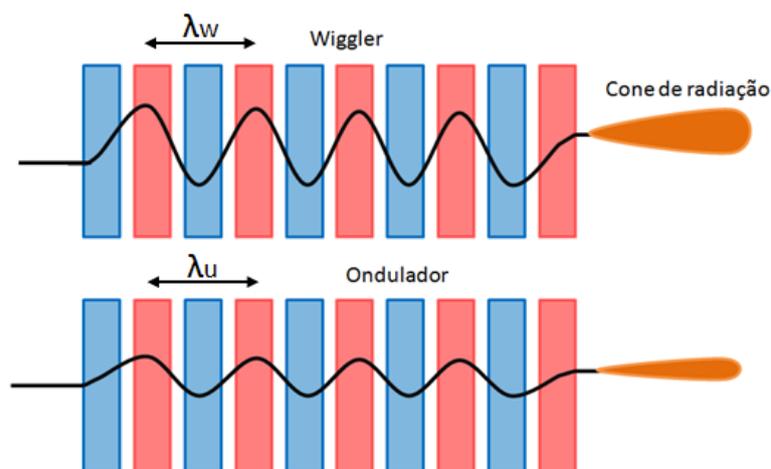


Figura 4: Vista superior de um conjunto de ímãs em um *wiggler* e no ondulator, onde é possível comparar a radiação eletromagnética produzida por um feixe de elétrons interagindo com o campo magnético desses elementos magnéticos.

f) Cavidade ressonante

É constituída por dois espelhos, cujo um dos espelhos possui refletividade inferior a 100 por cento permitindo extrair parte da radiação eletromagnética originando a radiação resultante. Os espelhos refletem os fótons, devolvendo-os para o ondulator, criando uma componente estacionária da radiação eletromagnética produzida. O ressonador é responsável pela seleção de propagação, polarização, entre outras características.

A radiação no Laser de Elétrons Livres é devida à interação de três elementos: um feixe de elétrons relativístico, o campo magnético periódico no ondulator e a onda eletromagnética que se propaga na direção dos elétrons [8]. Conforme visto na figura 5, quando o feixe de elétrons relativístico é injetado no ondulator, o campo magnético perpendicular à trajetória do feixe provoca uma deflexão nos elétrons devido à força de Lorentz. Como o campo magnético no ondulator é periódico os elétrons realizam uma trajetória senoidal no plano ao longo deste eixo.

Toda partícula carregada livre, quando acelerada emite radiação eletromagnética [4]. Devido às velocidades relativísticas envolvidas, o ângulo sólido da radiação eletromagnética emitida é estreito, o que resulta em um feixe colimado. A cavidade ressonante, formada por dois espelhos, atua de modo a criar no eixo óptico uma onda estacionária que interage com o feixe de elétrons.

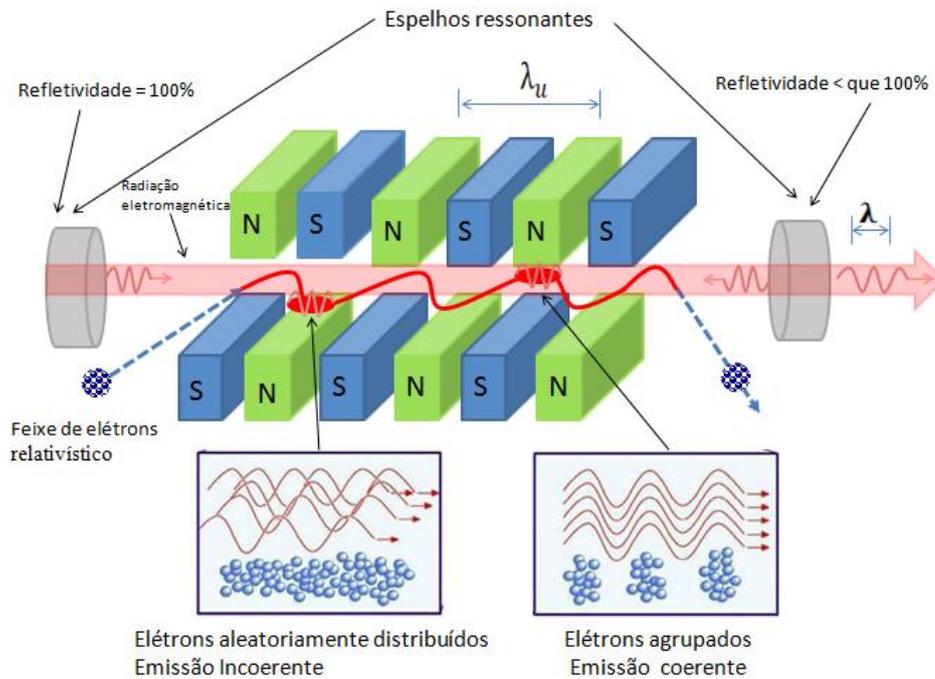


Figura 5: Esquema do princípio do mecanismo de funcionamento de um Laser de Elétron Livre, a partir da interação de um feixe de elétrons relativístico, conforme trajetória ilustrada pela linha tracejada em azul, o campo magnético senoidal do ondulador e a radiação eletromagnética indicada pela seta vermelha presente na cavidade ressonante formada por dois espelhos (figura adaptada [9]).

Nas condições de sintonia, os elétrons no feixe interagem com a radiação eletromagnética estacionária presente na cavidade ressonante. Parte dos elétrons do feixe é acelerada e outra parte é desacelerada, em função da fase do modo estacionário, resultando em um agrupamento dos elétrons no feixe ao longo de sua trajetória. O feixe de elétrons agrupados resultante passa a produzir radiação eletromagnética coerente, amplificando consequentemente o modo estacionário [10]. Como nos Lasers convencionais, um dos espelhos da cavidade ressonante apresenta refletividade menor que 100 por cento, permitindo extrair parte da radiação eletromagnética, que consiste na radiação Laser resultante.

A equação 1 é conhecida como equação fundamental de um Laser de Elétron Livre, que relaciona os comprimentos de onda λ da radiação emitida e λ_u , comprimento de onda no ondulador. Nesta equação temos γ que é o fator de Lorentz que está relacionado à energia do elétron, e o parâmetro K do ondulador, onde e é a carga do elétron, m_0 é a massa do elétron, c é a velocidade da luz no vácuo, θ é o ângulo de observação do feixe de elétrons e B_0 é a amplitude do campo magnético do ondulador [10].

$$\lambda = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} + \gamma^2 \theta^2 \right), \text{ onde } K = \frac{eB_0 \lambda_u}{2\pi m_0 c^2} \quad (1)$$

Este comprimento de onda λ pode ser sintonizado alterando mecanicamente as características magnéticas do ondulador ou atuando na energia do feixe de elétrons [10]. O Laser de Elétrons Livres tem como características um laser de alta potência, monocromaticidade (banda passante muito estreita), colimação e coerência. Porém, o que o diferencia dos lasers convencionais é sua capacidade de variar, ou sintonizar, sua frequência de operação em uma gama ampla do espectro [11].

2.3 – Lasers de Elétrons Livres em operação

A relação de Lasers de Elétrons Livres que estão operando no ano de 2013 pode ser visto na tabela 2. A tabela está dividida em local de instalação, comprimento de onda de trabalho do FEL, energia utilizada, corrente elétrica, número de períodos do ondulador, comprimento de onda do ondulador λ_u , países onde estão instalados e tipos de aceleradores que estão distribuídos em: *Radio Frequency Linear Accelerator* (RFLA), *Electrostatic Accelerator* (EA), *Energy Recovery Linear Accelerator* (ERLA), *Microtron Accelerator* (MA), *Electron Storage Ring* (ESR) e as configurações utilizadas: *FEL Oscillator* (OFEL), *FEL Amplifier* (AFEL), *FEL Klystron* (K-FEL), *High-Gain Harmonic Generation* (HGFG), *Self-Amplified Spontaneous Emission* (SASE), Super-radiant FEL (SR) e *Echo-Enabled Harmonic Generation* (EEHG) [12].

É possível observar, na tabela 2, que há um grande número de laboratórios e projetos nesta área, contudo nenhum na América Latina. Os equipamentos, em sua maioria, apresentados na tabela 2 são Lasers de Elétrons Livres osciladores, isto é, possuem cavidades ressonantes que auxiliam na geração do Laser e aceleradores lineares de rádio frequência que alcançam altas energias para gerar um feixe de elétrons.

Tabela 2: Laser de Elétrons Livres no mundo em 2013 [12].

Local	λ (μm)	E (MeV)	I (A)	N	λ_0 (cm)	Tipo Acel.	Config. FEL	
Frascati (FEL-CAT)	430-760	2.5	5	16	2.5	RFLA	O-FEL	ITA
UCSB (mm FEL)	340	6	2	42	7.1	EA	O-FEL	USA
Novosibirsk (RTM)	120-240	12	8	2x33	12	ERL	O-FEL	RUS
Dresden (TELBE)	100-3000	15-34	15	8	30	RFLA	O-FEL, SR	DEU
Nijmegen (FLARE)	100-1400	10-15	50	40	11	RFLA	O-FEL	NLD
KAERI (THz FEL)	100-1200	4.5-6.7	0.5	80	2.5	MA	O-FEL	KOR
Osaka (ISIR, SASE)	70-220	11	1000	32	6	RFLA	SASE	JPN
Himeji (LEENA)	65-75	5.4	10	50	1.6	RFLA	O-FEL	JPN
UCSB (FIR FEL)	60	6	2	150	2	EA	O-FEL	USA
Osaka (ILE/ILT)	47	8	50	50	2	EA	O-FEL	JPN
Novosibirsk (FEL2)	40-80	20	20	33	12	ERL	O-FEL	RUS
Osaka (ISIR)	32-150	13-19	50	32	6	RFLA	O-FEL	JPN
Tokai (JAEA-FEL)	22	17	200	52	3.3	RFLA	O-FEL	JPN
Bruyeres (ELSA)	20	18	100	30	3.2	RFLA	O-FEL	FRA
Dresden (ELBE U100)	18-280	15-34	15	40	10	RFLA	O-FEL, K-FEL	DEU
Osaka (iFEL4)	18-40	33	40	30	8	RFLA	O-FEL	JPN
LANL (RAFEL)	15.5	17	300	200	2	RFLA	O-FEL	USA
Kyoto (KU-FEL)	5-21.2	20-36	17-40	53	3.3	RFLA	O-FEL	JPN
Darmstadt (FEL)	6 - 8	25-50	2.7	80	3.2	RFLA	O-FEL	DEU
Osaka (iFEL1)	5.5	33.2	42	58	3.4	RFLA	O-FEL	JPN
Beijing (BFEL)	5 - 25	30	15-20	50	3	RFLA	O-FEL	CHN
Daresbury (ALICE)	5-8	27.5	80	40	2.7	ERL	O-FEL	GBR
Dresden (ELBE- U27)	4-21	15-34	15	68	2.73	RFLA	O-FEL	DEU
Berlin (FHI MIR FEL)	4-50	15-50	200	50	4	RFLA	O-FEL	DEU
Tokyo (KHI-FEL)	04-16	32-40	30	43	3.2	RFLA	O-FEL	JPN
Nieuwegein (FELIX)	3-250	50	50	38	6.5	RFLA	O-FEL	NLD
Orsay (CLIO)	3-150	12-50	100	38	5	RFLA	O-FEL	FRA
Nieuwegein (FELICE)	3 - 40	60	50	48	6.0	RFLA	O-FEL	NLD
Osaka (iFEL2)	1.88	68	42	78	3.8	RFLA	O-FEL	JPN
Nihon (LEBRA)	0.8 - 6.5	58-100	10-20	50	4.8	RFLA	O-FEL	JPN
Tsukuba (ETLOK-III)	0.8-1.45	310	1-3	2x7	20	ESR	O-FEL, K-FEL	JPN
UCLA-BNL (VISA)	0.8	64-72	250	220	1.8	RFLA	SASE	USA
JLab (IR upgrade)	0.7-10	120	300	30	5.5	ERL	O-FEL	USA
DELTA (FELICITA-I)	0.42-0.47	450-550	90	2x7	2.5	ESR	O-FEL, K-FEL	DEU
Osaka (iFEL3)	0.3-0.7	155	60	67	4	RFLA	O-FEL	JPN
JLab (UV demo)	0.25-0.7	135	200	60	3.3	ERLA	O-FEL	USA
Duke (OK-5)	0.25-0.79	270-800	10-50	2x30	12	ESR	O-FEL, K-FEL	USA
BNL (SDL FEL)	0.2-1.0	100-250	300-400	256	3.9	RFLA	SASE, HGHG, A-FEL	USA
Okazaki (UVSOR-II)	0.2-0.8	600-750	28.3	2x9	11	ESR	O-FEL, K-FEL	JPN
Tsukuba (ETLOK-II)	0.2-0.6	310	1- 3	2x42	7.2	ESR	O-FEL, K-FEL	JPN
SINAP (SDUV-FEL)	0.2-0.35	100-180	20-100	360	2.5	RFLA	A-FEL, HGHG, EEHG	CHN
DELTA (U250)	0.2	1500	40	2x7	25	ESR	K-FEL, HGHG	DEU

2.3.1- Laser de Elétrons Livres na Faixa do THz

A faixa do Terahertz é uma região que se estende de 0,1 a 10 Terahertz e consiste no comprimento de onda entre 3 mm a 30 μm , denominada como THz *gap* devido às poucas fontes disponíveis e está situada entre faixas das micro-ondas e o infravermelho [13].

As fontes de THz coerentes são desenvolvidas utilizando dispositivos de estado sólido bombeados opticamente, laser de cascata quântica e osciladores de estado sólido. Em geral, as fontes convencionais de THz atuais são baseadas em semicondutores ou interação não linear de pulsos de laser ópticos como cristais. Nestes processos temos baixos níveis de potência e falta de tunabilidade [14].

O Laser de Elétrons Livres produz radiação coerente com alta potência na faixa do THz e possui a capacidade de variar sua frequência de operação em uma gama ampla do espectro (tunabilidade). Dessa forma, este equipamento pode ser utilizado na elaboração de experimentos que demandam gerar radiação coerente na faixa do THz, tendo aplicações nas áreas de biologia, química e medicina. Na tabela 3 apresentamos os Lasers de Elétrons Livres no mundo que trabalham na faixa do infravermelho longo.

Tabela 3: Laser de Elétrons livres na faixa do infravermelho longo em 2010 [14].

Local	λ (μm)	E (MeV)	I(A)	N	λ_q (cm)	Config.FEL	
Tokyo (FIR-FEL)	300–1000	10	30	25	7	RFLA, OFEL	JPN
Nijmegen (THz-FEL)	100–1500	10–15	50	40	11	RFLA, OFEL	NLD
India (CUTE-FEL)	50–100	10–15	20	50	5	RFLA, OFEL	IND
Novosibirsk (RTM1)	5–100	50	20-100	3*33	6	RFLA, OFEL	RUS
Berlin (Fritz Haber Institute)	3–300	20–50	200	50	4	RFLA, OFEL	DEU
Turkey (TACIR II)	10–190	40	12-50	40	9	RFLA, OFEL	TUR
Tallahassee (big light)	2–1500	50	50	15/30	5,5	ERLA,OFEL	USA

2.4 – COMSOL *Multiphysics*

A modelagem computacional é o mecanismo que visa descrever componentes específicos. A modelagem ocorre, em um primeiro momento, na identificação dos princípios físicos relevantes no problema, que em geral são descritos por modelos matemáticos e formados por Equações Diferenciais Parciais (PDE). Essas equações são expressões matemáticas que descrevem a relação entre variáveis dependentes e independentes, que necessitam de definições apropriadas das condições iniciais e de contorno. Em um segundo momento, o cálculo numérico é utilizado para obter a solução do modelo matemático [15].

Em geral, para realizar o cálculo numérico utiliza-se o Método de Elementos Finitos (MEF). Este método consiste em calcular soluções das Equações Diferenciais Parciais de segunda ordem, através de subdivisões na geometria do problema. O modelo de elementos finitos é composto por elementos conectados entre si por nós, formando malhas (*mesh*) de elementos finitos [16], conforme observado na figura 6.

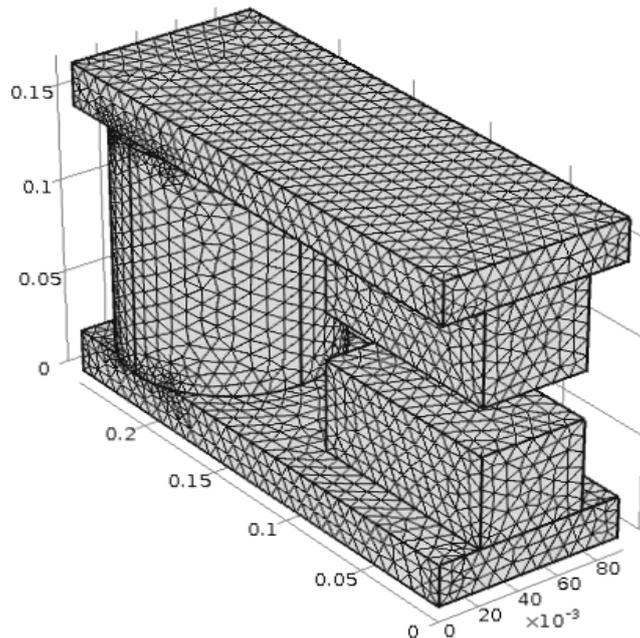


Figura 6: Exemplo de uma malha de elementos finitos, *mesh*, utilizada para análise do modelo de um dipolo magnético.

A precisão da modelagem numérica está relacionada com os elementos utilizados no problema, número de nós e do tamanho das subdivisões. A modelagem numérica pode ser vista como um método de aproximação, assim se diminuirmos o tamanho das subdivisões, a

quantidade de nós tende a infinito e a solução obtida converge para a solução do problema. Nesse contexto, quanto menor for o tamanho das subdivisões, mas preciso será a modelagem numérica [17].

Os dispositivos magnéticos foram modelados utilizando a plataforma de simulação COMSOL *Multiphysics*, que utiliza o Método de Elementos Finitos para resolver sistemas de equações dependentes do tempo, e estacionárias, em três dimensões.

O COMSOL é dividido em módulos de programação associados a diferentes modelos físicos, tais como: mecânica, óptica, eletricidade e etc. Neste trabalho foi utilizado o modelo AC/DC que calcula campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos em aplicações estáticas e de baixa frequência [18]. O computador empregado para a realização das análises foi um microcomputador, compatível PC, com CPU Intel Xeon X3430, clock de 2.40GHz, 8 GB RAM, e sistema operacional Windows 7 64 bits.

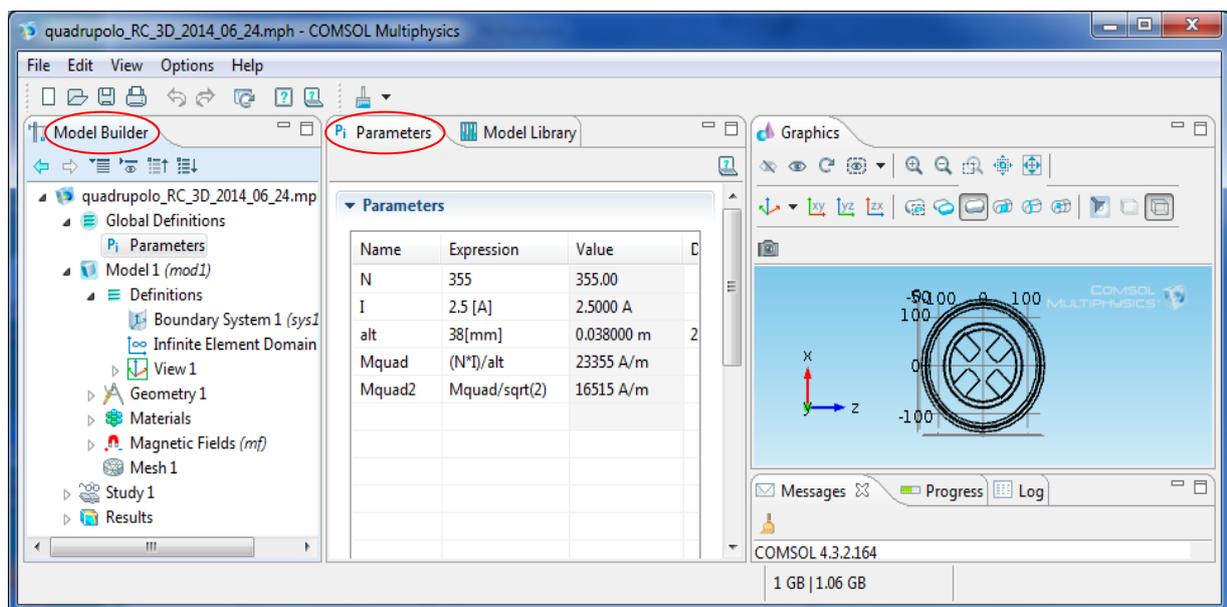


Figura 7: Painel de interface do COMSOL para parametrização do quadrupolo. À esquerda o *Model Builder*, no centro o subpainel para a inserção dos parâmetros de programação.

O COMSOL apresenta uma estrutura de interfaces para construção dos modelos, dividida em: *Global Definitions*, *Model*, *Study* e *Result*. A seguir, descrevemos como funciona cada uma dessas interfaces que estão inseridas no COMSOL, cujo painel é apresentado na Figura 7:

- Global Definitions* (Definições globais) - É o painel onde são definidas as variáveis utilizadas no problema:

1. *Definitions* (Definições): Onde são definidas as funções utilizadas na construção da análise numérica. O domínio é uma importante definição em modelagens numéricas. A escolha da geometria dos domínios é função das características de simetria do problema físico analisado para assegurar a unicidade da solução. Nesta escolha deve levar em conta o tempo de processamento, utilização da memória e de artefatos criados nos cálculos devido às definições das condições de contorno. Neste trabalho de acordo com os modelos analisados foram utilizados domínios esféricos, cilíndricos e quadrados. Uma interface utilizada para este tipo de região externa é o *Infinite Element Domain*, que emula um espaço aberto infinito [19].
 2. *Geometric* (Geometria): Tem como objetivo construir o objeto de estudo, podendo ser elaborado em duas ou três dimensões. Sendo possível construir objeto em duas dimensões e transforma-lo para um objeto tridimensional através da ferramenta *Work Plane*.
 3. *Materials* (Materiais): Painel onde são definidos os materiais do objeto de estudo.
 4. *Physics* (Física): Este parâmetro é empregado para realizar e descrever fisicamente o problema. No caso deste trabalho utilizamos o modelo físico AC/DC, com a interface *Magnetic Field* que trabalha com campos magnéticos que dependem da corrente elétrica.
 5. *Mesh* (malha): Permite determinar automaticamente os elementos do domínio do problema em regiões menores.
- b) *Study* (Estudo): É a interface empregada para realizar o cálculo numérico no objeto. O estudo pode ser estacionário (*Stationary*) ou dependente do tempo (*Temp dependent*). Em alguns casos pode ser combinada com a interface *Parametric Sweep* que realiza a análise numérica em uma faixa de valores estipuladas de um dos parâmetros físicos.
- c) *Result* (Resultados): Nessa interface são apresentadas, e manipuladas, os gráficos e planilhas com os resultados. Dentre varias alternativas para apresentar os resultados, duas interfaces se adequaram aos modelos propostos e que foram utilizadas nesse trabalho. A interface *Data Set* que utiliza uma linha para obter resultados em função da posição e a *Derived Values* que relaciona duas grandezas físicas associadas a uma linha, superfície ou volume.

3 - Laser de Elétrons Livres Realimentado

Um Laser de Elétrons Livres Realimentado é um sistema onde há recuperação do feixe de elétrons pelo acelerador, produzindo uma maior eficiência no consumo de energia elétrica por parte do sistema.

Na configuração deste tipo de equipamento, o feixe de elétrons ao sair do acelerador passa no anel de armazenamento, pelos dipolos, no interior do ondulator e, retorna para o tanque do acelerador para que o processo seja refeito [20]. Na figura 8 temos a configuração de um FEL Realimentado.

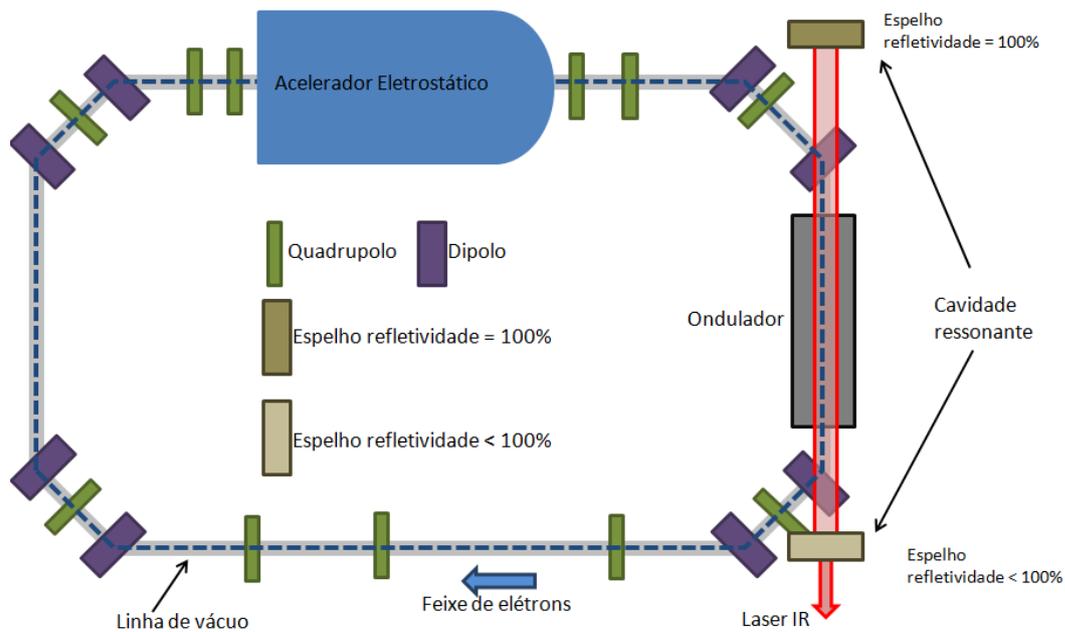


Figura 8: Configuração de um Laser de Elétrons Livres Realimentado.

Como já foi explicado anteriormente, o FEL possui dois espelhos: um com refletividade de 100 por cento e outro com refletividade menor que 100 por cento. O espelho com menor refletividade é utilizado para a saída do Laser. Na figura 9, apresentamos um esquema em três dimensões, construído em *SolidWorks*, do detalhe da saída do laser no FEL, onde é possível observar um arranjo mecânico construído para que o feixe seja reinjetado na linha de vácuo.

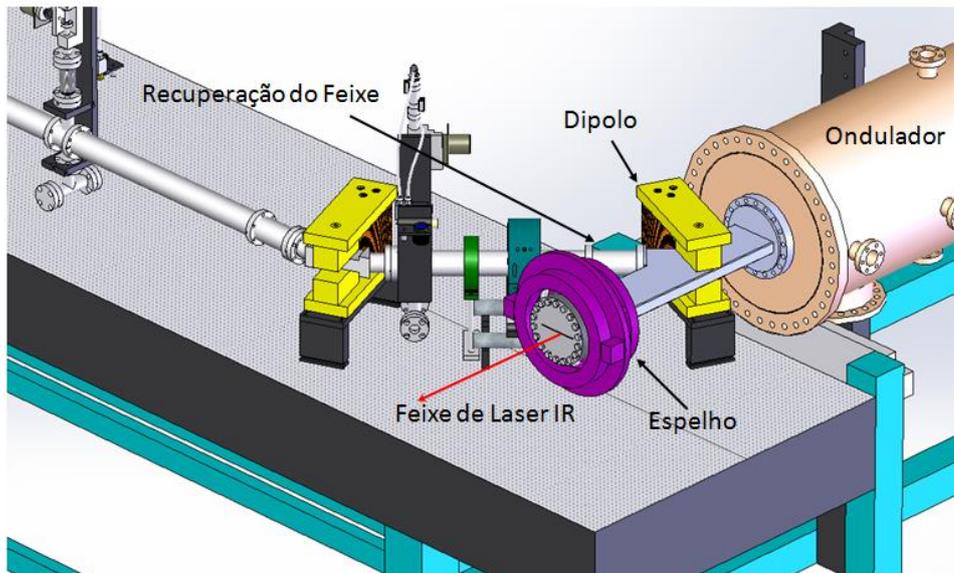


Figura 9: Sistema mecânico da saída do laser e recuperação do feixe de elétrons. Neste sistema, o dipolo altera a trajetória de uma parte do feixe de elétrons para a recuperação e um espelho com refletividade menor que 100 por cento auxiliando a saída do laser.

3.1 – CREOL – FEL

O Laser de Elétrons Livres Realimentado desenvolvido pelo CREOL tem a finalidade de gerar radiação sintonizável na faixa de frequência de 0,3 a 1,2 THz contínua e trabalha no comprimento de onda de 250 – 1000 μm , que corresponde ao infravermelho longínquo. Possui uma potência máxima de pico de 1 kW e trabalha com uma energia de 0,7 a 1,7MeV [2].

Este equipamento é formado por um acelerador eletrostático, dispositivos magnéticos, do tipo solenoide, da óptica do feixe (dipolos e quadrupolos), ondulador, componente de centralização do feixe de elétrons chamado *aperture screen*, sistemas de controle e vácuo.

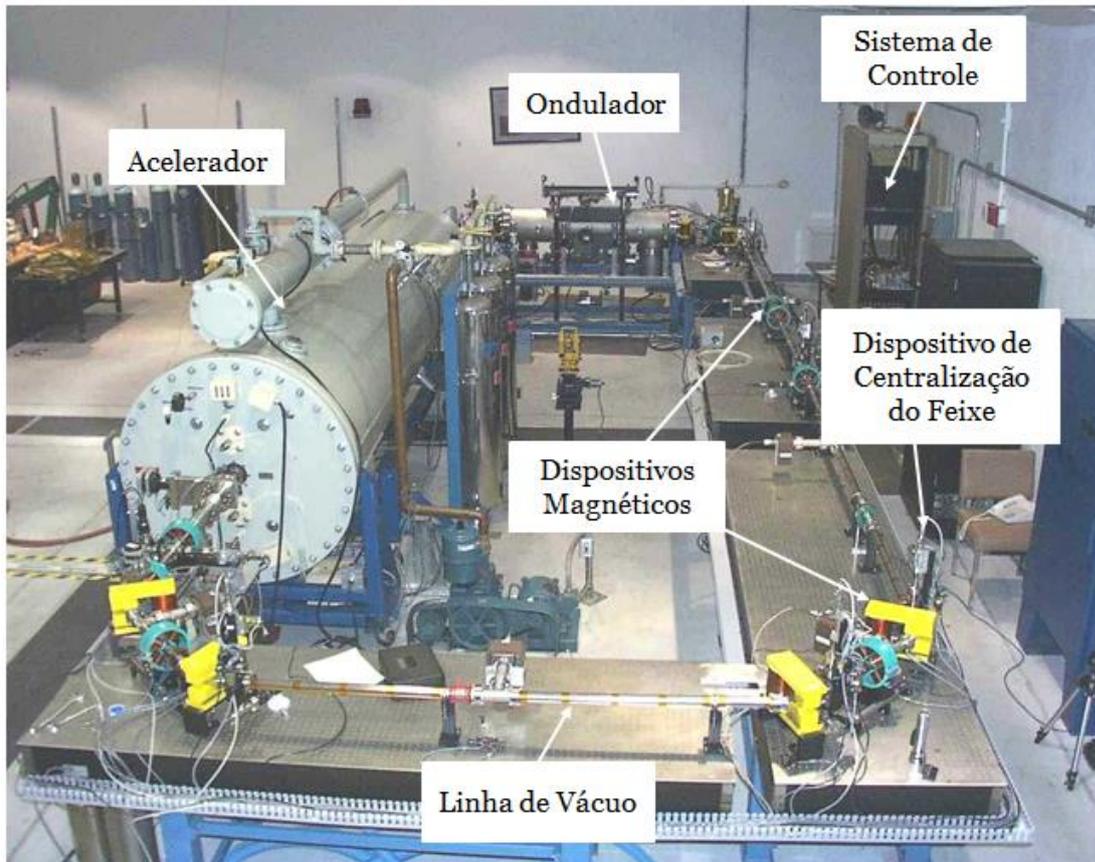


Figura 10: Laser de Elétrons Livres do CREOL.

Neste capítulo 3 e nas quatro primeiras seções apresentaremos as partes integrantes do FEL CREOL que são: acelerador de eletrostático, transporte e alinhamento do feixe de elétrons, sistemas de vácuo e controle. Os dispositivos magnéticos da óptica do feixe de elétrons que são o dipolo e quadrupolo serão apresentados no capítulo 4 e o Ondulador será visto com detalhes no capítulo 5.

3.1.1- Acelerador Eletrostático

O acelerador utilizado neste Laser de Elétrons Livres é um *Tandem*, modelo 5SDH-2 fabricado pela *National Electrostatic Corporation* (NEC). Este tipo de acelerador funciona a partir de elétrons produzidos por uma fonte que é acelerada com uma energia na faixa do MeV. Este acelerador é modificado onde se acrescentou um canhão de elétrons e um coletor de elétrons. Seu funcionamento pode ser observado no esquema da figura 11, onde os

elétrons são gerados através de um canhão de elétrons [21]. Ao passar pelo sistema de vácuo os elétrons são recuperados no tubo de desaceleração, onde passam pelo coletor de elétrons para gerar voltagem suficiente para alimentar o canhão de elétrons.

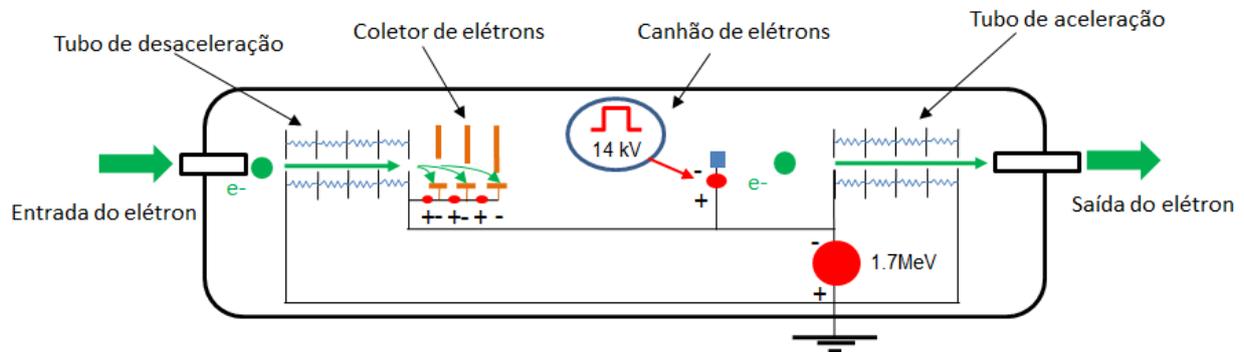


Figura 11: Esquemático da estrutura interna do acelerador eletrostático, onde no detalhe temos o canhão de elétrons (figura adaptada [22])

O canhão de elétrons possui duas restrições: o feixe tem um raio de 0,5 mm no ondulator e possui uma baixa carga para o cátodo ter um tempo de vida razoável. O feixe de elétrons sai do canhão com um raio de 1,4 mm e um tamanho da divergência do feixe de elétrons de $3,7 \pi$ mm mrad (emitância) [22].

3.1.2- Transporte e alinhamento do feixe de elétrons

O transporte do feixe de elétrons no anel inicia-se dentro do acelerador, onde o canhão de elétrons gera um feixe de elétrons pulsado contínuo com a voltagem de 20 kV, corrente elétrica de 0,3 A e uma emitância normalizada de $1,5 \pi$ mm mrad. Ao sair do canhão de elétrons, o feixe percorre 1,05 m ao longo do acelerador, com emitância de 2π mm mrad e finaliza o processo ao sair do acelerador com uma energia máxima de 1,7 MeV [2].

O feixe de elétrons ao sair do acelerador, passa por dois quadrupolos para obter o diâmetro do feixe suficiente para passar dentro do ondulator, onde as ações combinadas dos dipolos e quadrupolos resultam em um feixe elíptico na entrada do ondulator. Ao sair do ondulator, o feixe passa por dois dipolos a 90° e um quadrupolo fazendo com que o feixe

restabeleça sua forma circular, assim voltando ao acelerador para ser desacelerado, através do sistema de recuperação de feixe.

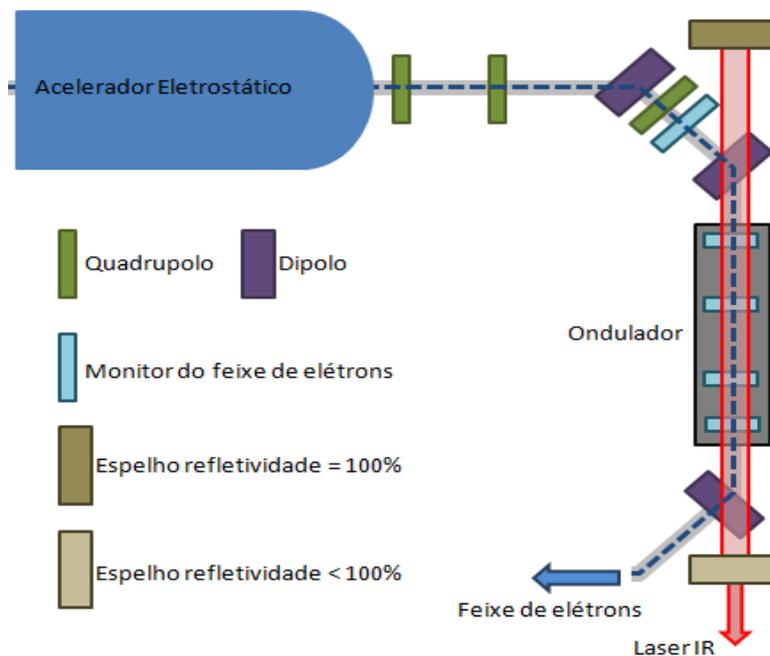


Figura 12: Sistema de geração, transporte e injeção do feixe de elétrons empregado no Laser de Elétrons Livres Realimentado.

Na trajetória do feixe de elétrons dentro do circuito de vácuo, notamos que o feixe de elétrons deve ficar centralizado para que não haja colisões com a estrutura mecânica da linha de vácuo e do ondulador.

Para estimar e analisar a posição do feixe de elétrons na linha de vácuo é utilizado um dispositivo de visualização do feixe de elétrons chamado de *aperture screen*, que utiliza um sistema mecânico para controlar a posição de uma pequena tela fluorescente dentro do circuito de vácuo.

Este equipamento, figura 13, é composto por um espelho a 45°, uma tela fluorescente, um pistão e uma câmera. A visualização é feita quando o pistão desce a tela fluorescente impedindo a passagem do feixe. O feixe provoca a luminescência na tela que pode ser observada no espelho, digitalizada pela câmera e os dados transferidos para um computador onde são processados para determinação da posição do feixe. Atuando-se nos dipolos e quadropolos a imagem é centrada e o processo se repete até se completar o circuito.

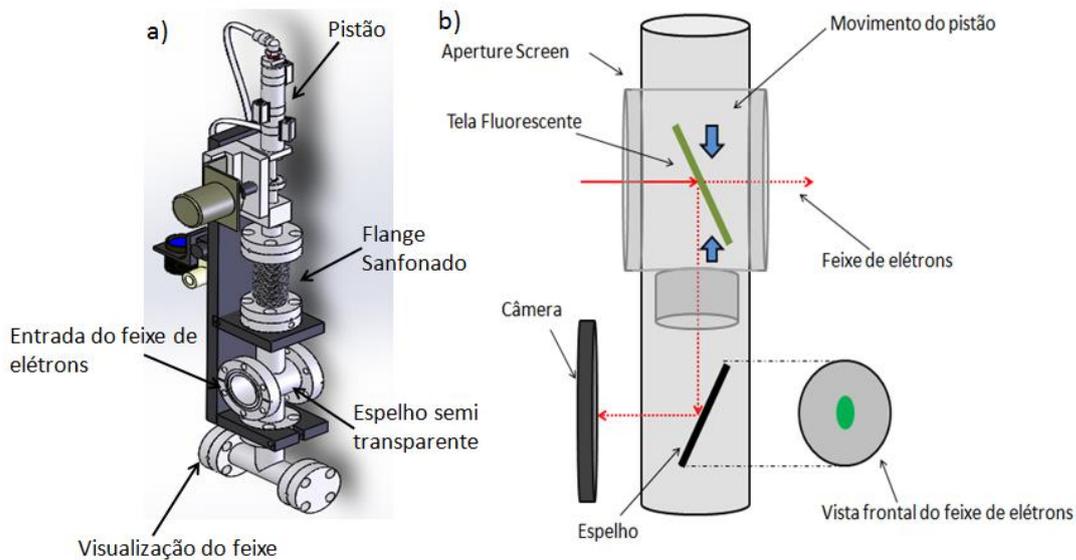


Figura 13: a) Desenho em três dimensões do *aperture screen* que utilizando a ferramenta CAD *Solid Works*. b) Esquema detalhado do alinhamento do feixe de elétrons dentro de um *aperture screen*.

Na figura 14, temos os equipamentos utilizados na recirculação e alinhamento do feixe de elétrons. Para a recirculação observamos que os dispositivos magnéticos dipolos e quadrupolos que são do tipo solenoide, utilizam a corrente elétrica para alterar o campo magnético e tem como funções defletir e colimar o feixe de elétrons respectivamente e para o alinhamento tem-se o centralizador do feixe de elétrons.

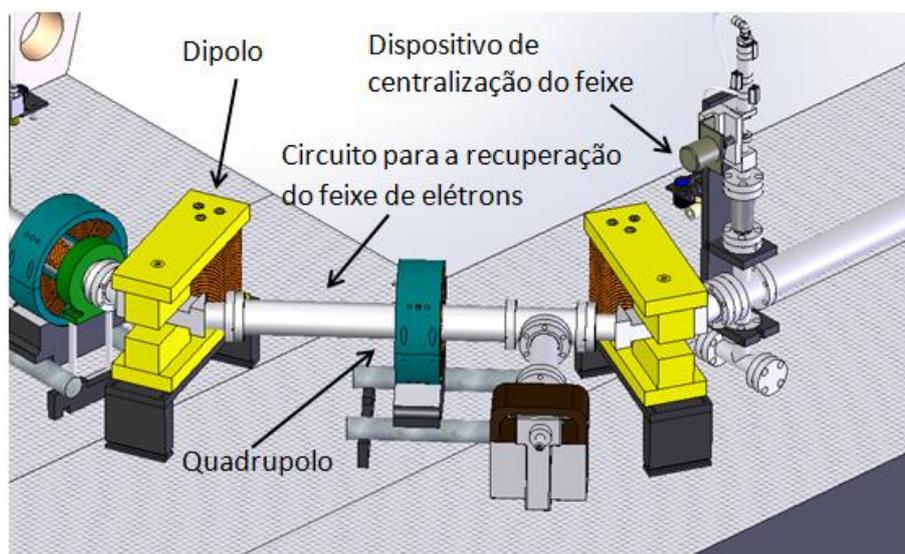


Figura 14: Dispositivos magnéticos dipolo e quadrupolo e o equipamento de monitoramento do feixe de elétrons, utilizados no Laser de Elétron Livres Realimentado.

3.1.3- Sistema de vácuo

O feixe de elétrons, em aceleradores, percorre um circuito fechado, porém os elétrons dentro desse circuito se choca com as moléculas de ar gerando perdas de energia por espalhamento. Com o objetivo de diminuir essas perdas de energia são construídos sistemas de vácuo constituídos, por bombas para produzir vácuo onde a pressão atmosférica é diminuída para valores da ordem de 10^{-12} Torr, $1,3 \cdot 10^{-15}$ atm, ou $1,3 \cdot 10^{-10}$ Pa.

As bombas de vácuo caracterizam-se pela pressão mais baixa que alcançam, intervalo de pressão em que podem ser utilizadas e velocidade de bombeamento. Existem diversos tipos de bombas de vácuo. Na figura 15 apresentamos os tipos de bombas e o intervalo de pressão [23].

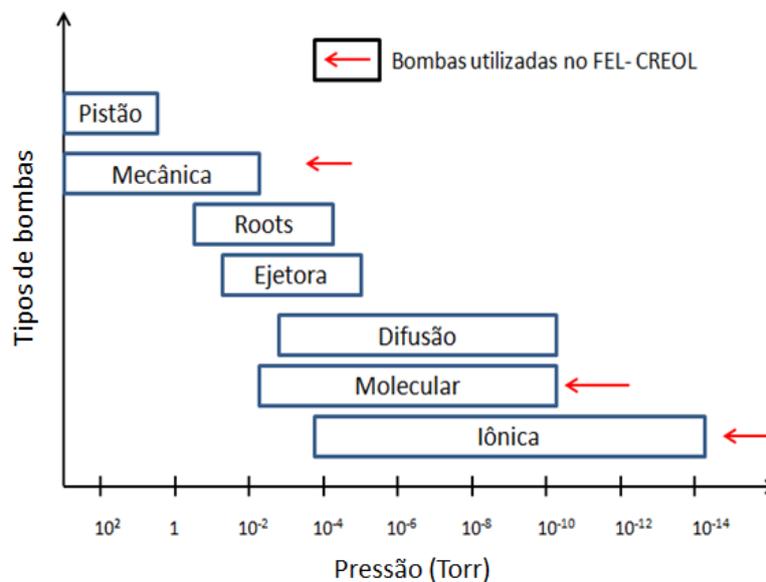


Figura 15: Tipos de bombas utilizadas em sistemas de vácuo e seus intervalos de pressão. As bombas sinalizadas foram utilizadas pelo FEL CREOL. [Fonte: autor]

O sistema de vácuo do CREOL é formado por uma bomba mecânica, uma bomba Turbomolecular e treze bombas iônicas. A seguir descrevemos o processo de funcionamento das bombas de vácuo [23].

a) Mecânica

Possui uma faixa entre 10^2 a 10^{-2} Torr e seu funcionamento é baseado em um motor cilíndrico que retira o ar da linha de vácuo e expeli o ar da bomba em forma de gás.

b) Turbomolecular

Sua operacionalização baseia-se no princípio de que as moléculas de gás podem ser impulsionadas em direções desejadas, por repetidas colisões com uma superfície sólida em movimento. Gera um vácuo entre 10^{-2} e 10^{-10} Torr e precisam de uma bomba como suporte, conectada para o lado da alta pressão.

c) Iônica

Trabalha com a ionização das moléculas de gás, em que as moléculas ficam aprisionadas entre duas placas paralelas (cátodo) onde é aplicado um potencial elétrico e um cilindro (ânodo) colocando entre as placas, que possui um campo magnético. Gera um vácuo entre 10^{-10} e 10^{-12} Torr necessitando de uma bomba turbomolecular acoplada para sua operação.

As bombas de vácuo nesse sistema funcionam em série, onde a bomba mecânica e a turbomolecular geram um vácuo de aproximadamente 10^{-10} Torr e esse sistema é conectado as bombas iônicas para que obtenham um vácuo na faixa entre 10^{-10} e 10^{-12} Torr.

No CREOL as bombas estão dispostas da seguinte forma, onde a bomba mecânica e a turbomolecular são conectadas entre si e as bombas iônicas são conectadas direto na linha de vácuo.

3.1.4- Sistema de controle

O CREOL é constituído de um sistema de controle formado por dois computadores *Thunder* e *Droplet* e um sistema de potência. O computador *Thunder* tem a função de se comunicar com um gabinete composto por placas DAC e ADC, responsáveis por controlar todos os componentes do sistema de potência do FEL. O *Droplet* é um computador de diagnóstico e supervisão sendo utilizado para interromper o equipamento se alguns dos componentes não estiverem funcionando normalmente

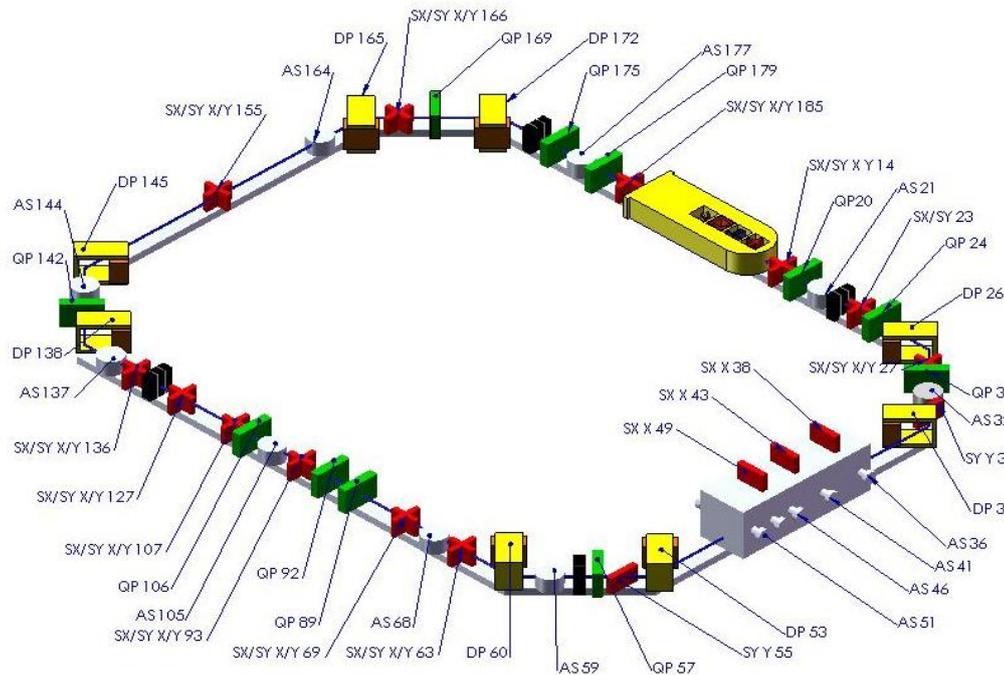


Figura 16: Esquema dos componentes monitorados pelo sistema de controle do CREOL. [Fonte: autor]

Na figura 16 são apresentados os componentes que são monitorados pelo sistema de controle, onde a simbologia utilizada pelo sistema é: AS – *Aperture Screen*, QP – quadrupolo, DP – dipolo, SX – defletor do feixe na direção x e SY – defletor do feixe na direção y.

O sistema de potência é responsável por gerenciar a corrente elétrica nos dispositivos magnéticos. Possui 20 fontes de corrente que variam de -10V a +10V, e podem fornecer de -2,5A a +2,5A de corrente elétrica. Isto requer uma tensão de -24V a +24V e um controle de +10V na referência que são controladas pelo computador *Thunder*. Na figura 17 apresentamos o diagrama do sistema de controle utilizado no CREOL.

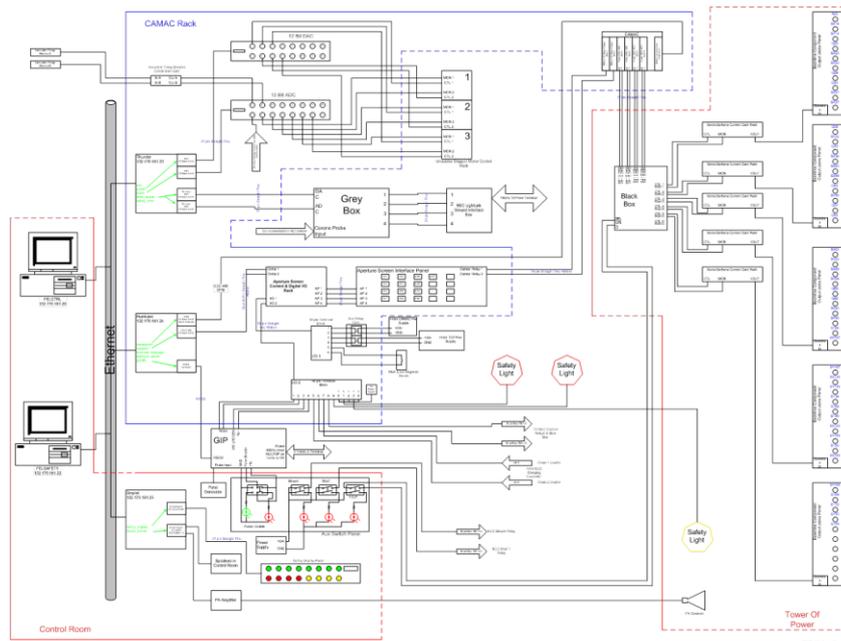


Figura 17: Diagrama do sistema de controle do CREOL.

Os sistemas de controle e de potência trabalham juntos para operar os dipolos, os quadrupolos e o equipamento de visualização do feixe. O processo é visto na figura 18, onde um comando é passado para o computador *Thunder*, que via CAMAC controla o sistema de potência que regula as correntes elétricas nos componentes magnéticos e os dispositivos de centralização do feixe.

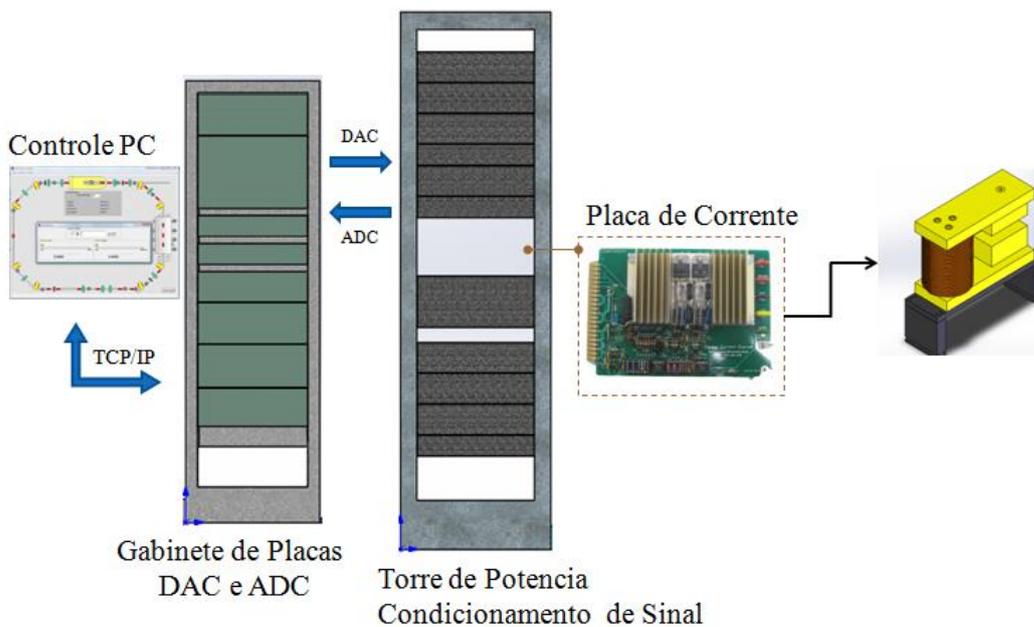


Figura 18: Diagrama de controle de um dispositivo magnético no CREOL.

3.2 – Reestruturação do projeto

Nos tópicos 3.1.1 à 3.1.4 foram vistos as partes principais do FEL CREOL que são compostos por componentes mecânicos e eletrônicos sendo construídos entre 1997 – 2001. O FEL CREOL não foi construído no CBPF, assim se fez necessário realizar uma verificação técnica da confiabilidade dos seus componentes visando uma reestruturação do projeto. O processo de reestruturação e verificação foi dividido em: construção de desenhos para documentar, dimensionar e catalogar os componentes mecânicos, elaboração de um procedimento para testes na linha de vácuo e testes das placas de corrente.

Os desenhos foram desenvolvidos em três dimensões, respeitando as medidas originais, utilizando a ferramenta CAD *SolidWorks*, onde esses desenhos podem ser utilizados neste projeto e em futuras aplicações.

O software *SolidWorks* tem a possibilidade de realizar um desenho de conjunto utilizando peças já confeccionadas. Com a proposta de se construir um laboratório multiusuário, os desenhos de montagem auxiliarão o dimensionamento do espaço físico.

Nesse desenho, figura 19, é possível se atentar a um espaço dedicado para a manutenção do acelerador, sala de controle e a disponibilidade de duas linhas de trabalho, onde na linha azul utilizaríamos o feixe de elétrons para pesquisas e a linha vermelha seria destinada para o infravermelho longínquo.

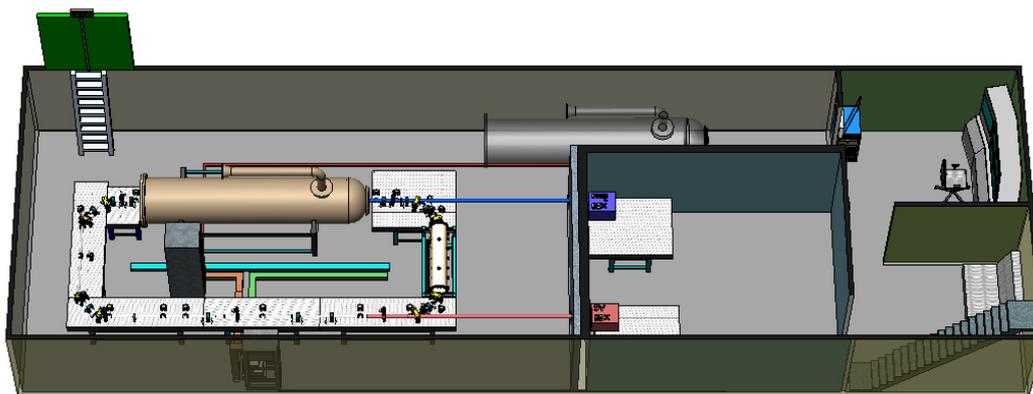


Figura 19: Representação de uma proposta de instalação de um Laser de Elétrons Livres em *SolidWorks*.

Um setor importante do projeto está relacionado ao sistema de vácuo, pois principalmente pelo fato do equipamento ter sido transportado era preciso verificar se a linha de vácuo poderia ser utilizada em um novo FEL. Nesse contexto foi realizado um protocolo de testes nas peças mecânicas de um setor da linha de vácuo utilizando o sistema de vácuo com a bomba mecânica.

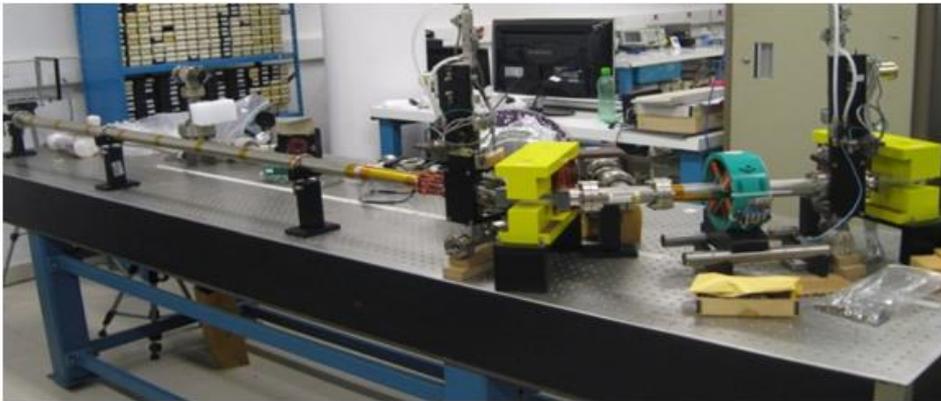


Figura 20: Linha construída para testar os componentes mecânicos do Laser de Elétrons Livres.

O teste mecânico consistia em conectar os componentes na linha óptica, ligar a bomba mecânica e produzir vácuo na linha, com o objetivo de descobrir se havia algum problema na estrutura mecânica. Os resultados mostraram que este trecho pode ser utilizado e também contribuiu para a elaboração de um protocolo de teste do sistema de vácuo.

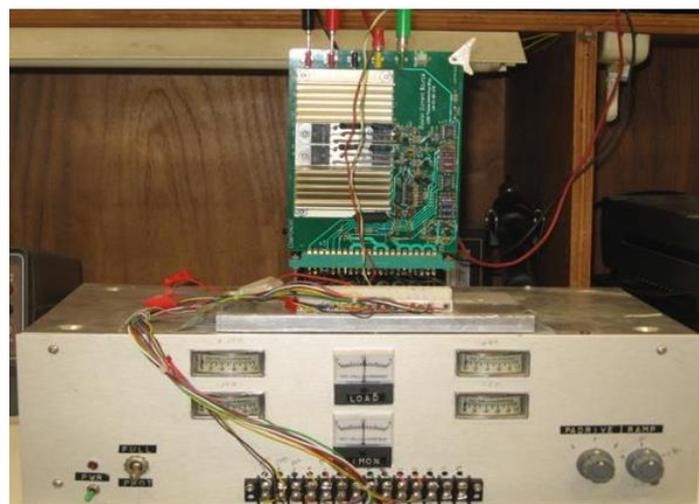


Figura 21: Sistema utilizado para verificar a variação da corrente elétrica nas placas de corrente.

O sistema de potência do CREOL possui 20 fontes de correntes que são utilizadas para polarizar os dipolos e quadrupolos como visto na figura 18. Como as placas de corrente auxiliam na geração de campo magnético nos transdutores se fez necessário testar as placas para verificar seu funcionamento. O sistema utilizado está representado na figura 21, as placas possuem uma variação estipulada pelo projeto de -2,5 A a 2,5 A e das 20 placas testadas 13 delas estão em pleno funcionamento.

Desse modo, os desenhos catalogados, os testes realizados nas peças mecânicas da linha de vácuo e das placas de corrente contribuem de forma positiva para a reestruturação do projeto. Auxiliando a compreender o FEL e proporcionam uma economia de tempo e recurso, pois os componentes que estiverem funcionando podem ser utilizados em um novo projeto. Os componentes magnéticos que são o dipolo, quadrupolo e o ondulador por serem de interesse deste trabalho têm suas caracterizações experimentais e numéricas apresentadas nos capítulos 4 e 5.

4 – Dispositivos magnéticos da óptica do feixe

Neste capítulo apresentaremos a caracterização experimental do dipolo e quadrupolo juntamente com suas modelagens numéricas. Para os cálculos apresentados definimos o campo magnético B e o campo magnético aplicado H [24]. Todos os dispositivos apresentados foram baseados em dispositivos reais do FEL CREOL, onde as simulações do dipolo e quadrupolo foram construídas com as mesmas dimensões geométricas dos originais.

4.1 – Dipolo

O Dipolo é um dispositivo tipo solenoide que tem por função criar um campo magnético que permite defletir de forma controlada o feixe de elétrons. Na figura 22 temos a ilustração do campo magnético que é gerado por uma corrente elétrica, passando por espiras condutoras enroladas em torno de um núcleo de material ferromagnético [25]. Essa corrente gera no solenoide um fluxo magnético no núcleo, criando um campo magnético unidirecional entre os polos **A** e **B** do Dipolo.

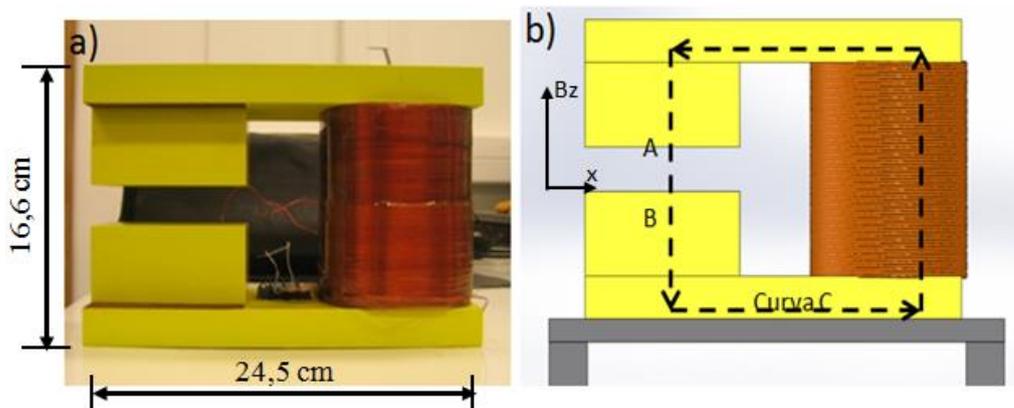


Figura 22: a) Foto do Dipolo magnético. b) Linha Amperiana no modelo numérico do dipolo.

A magnitude do campo magnético pode ser calculada pela lei de Ampère que nos dá a relação entre a intensidade do campo magnético aplicado H no solenoide e a corrente elétrica [24]. A relação entre o campo magnético B e o campo magnético aplicado H para o

solenóide é dada por $H = B/\mu_{\text{meio}}$, onde μ_{meio} é a permeabilidade magnética do meio. Logo a lei de Ampère é dada por:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_B^A \vec{H}_1 \cdot d\vec{l} + \int_A^B \vec{H}_2 \cdot d\vec{l} = NI \quad (2)$$

Onde \vec{H}_1 representa o campo magnético na linha AB entre os polos do dipolo e \vec{H}_2 representa o campo magnético na linha BA que atravessa a bobina, indicados na Figura 22. Como $\mu_{\text{ferro}} \gg \mu_{\text{ar}} \approx \mu_0$ temos que $\int_B^A \vec{H}_1 \cdot d\vec{l} \ll \int_A^B \vec{H}_2 \cdot d\vec{l}$, temos que a linha da integral de BA pode ser desprezada logo:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} \cong \int_B^A \vec{H}_1 \cdot d\vec{l} = NI \quad (3)$$

$$\frac{B}{\mu_0} L_{\text{gap}} = NI \quad (4)$$

$$B_z = \frac{NI\mu_0}{L_{\text{gap}}} \quad (5)$$

O campo magnético entre os polos **A** e **B** do dipolo é dado pela equação 5, onde N é o número de espiras, I é a corrente elétrica, L_{gap} é a distância entre os polos e μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo.

4.1.1 - Caracterização experimental

A medida experimental do dipolo tem como objetivo verificar se o equipamento pode ser reaproveitado para projetos futuros. Em um primeiro momento foi realizado a medida em um dipolo, pois, era preciso verificar a viabilidade da reprodutibilidade do processo experimental. A caracterização experimental do dipolo foi realizada medindo o

campo magnético B_z ao longo do eixo x , e em função da corrente elétrica utilizando os pontos, representados pelas letras **A** e **B**, localizados nos polos do dipolo, conforme observado na figura 23.

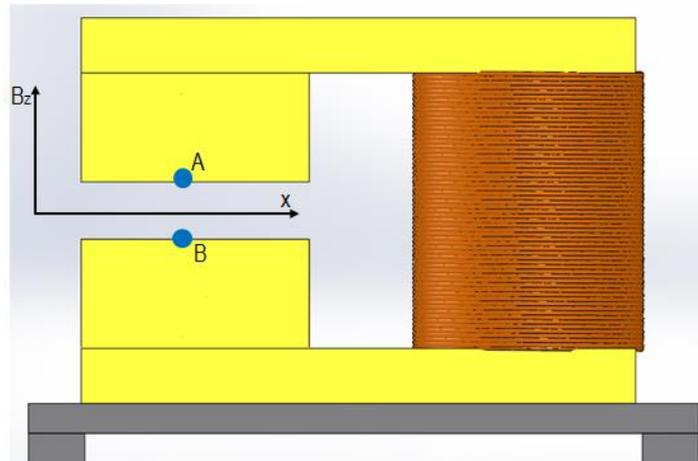


Figura 23: Vista lateral do Dipolo magnético, o eixo de coordenadas ($B_z \times x$) representa o sentido e a direção do fluxo do campo magnético B_z e sua distribuição ao longo do eixo x e as letras **A** e **B** representam os pontos nos polos do dipolo que foram utilizados para medir o campo magnético em função da corrente elétrica.

Para realizar a medida do campo magnético em função da posição foi desenvolvido um sistema de caracterização magnética. Este sistema é formado por uma mesa magnética que possui quatro graus de liberdade, nos eixos x , y , z e rotação no eixo z e seu controle é obtido por uma placa de aquisição de dados da *National Instruments* (6105E).

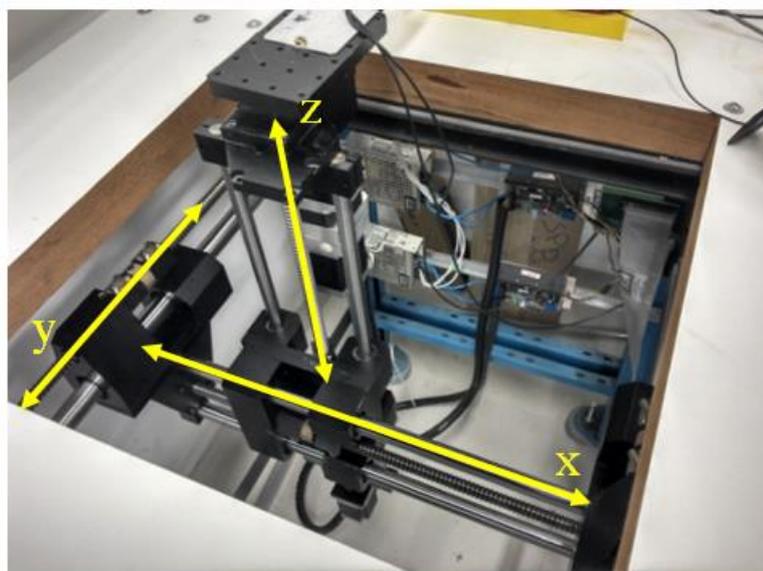


Figura 24: Mesa robótica utilizada na caracterização experimental do dipolo.

O sensor magnético utilizado para a caracterização é produzido pela *Melexis* [26]. Este sensor é programável e para este caso foi programado para 25mV/mT, sua alimentação e seu sinal são gerados na placa que controla a mesa magnética. Para a aquisição dos valores do campo magnético e da posição foi construído um programa em *LabView*, onde seu painel é visto na figura 25. Este software permite um formato simples da saída dos dados para que possam ser tratados em qualquer software gráfico.

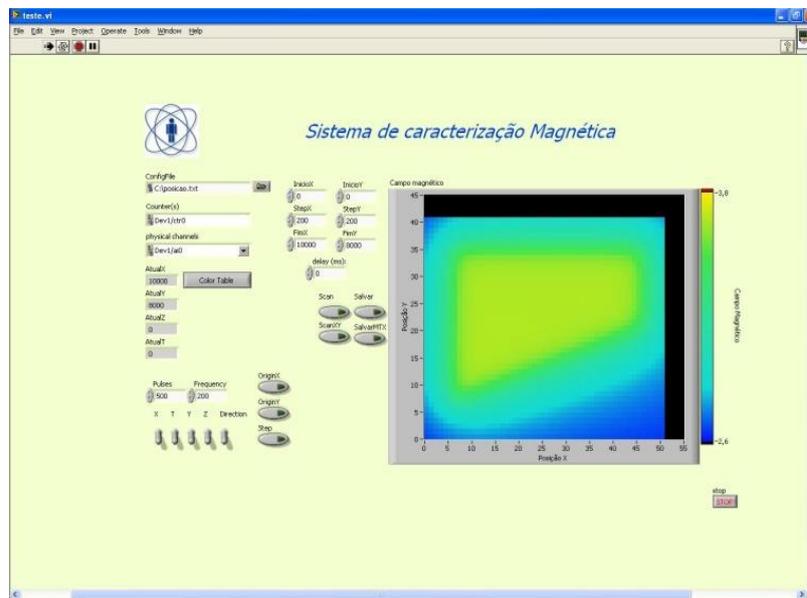


Figura 25: Software construído em *LabView* para a caracterização magnética do dipolo.

Para injetar a corrente elétrica no dipolo utilizamos o diagrama apresentado na Figura 18, onde a corrente elétrica é controlada pelo computador *Thunder* com a variação entre -2,5 A a +2,5 A [27].

O sensor magnético é posicionado no eixo x, conforme a figura 23, entre os polos do dipolo, após a mesa inicia a varredura ao longo do eixo x realizando um mapeamento magnético. Para esta medida foi utilizada a corrente elétrica de 1 A, pois é uma corrente intermediária e não prejudica o equipamento. Nas figuras 26 e 27 apresentamos o mapeamento magnético do dipolo e a medida do campo magnético ao longo do eixo x.

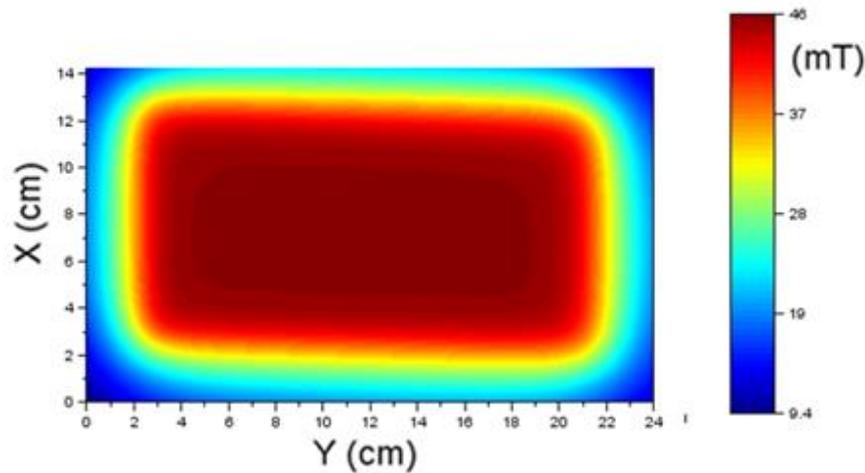


Figura 26 Mapeamento magnético de um dipolo quando submetido a uma corrente de 1A.

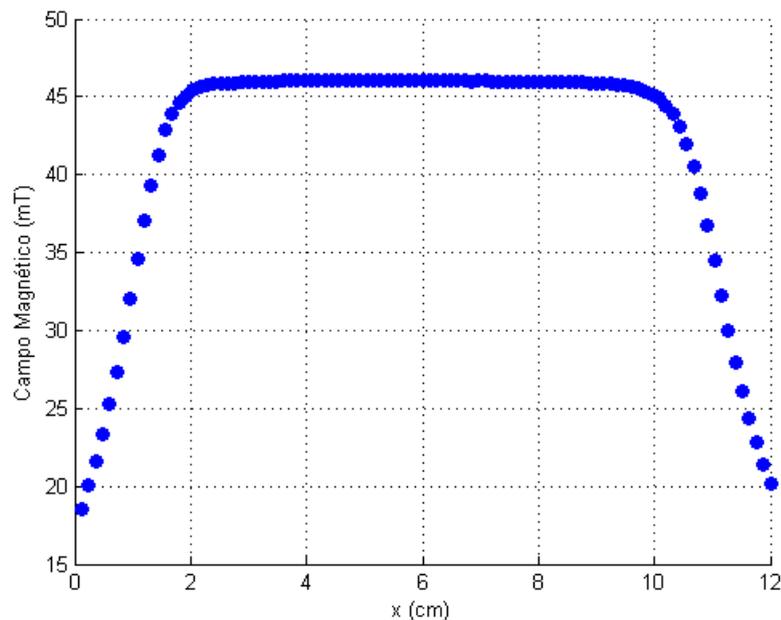


Figura 27: Medida do campo magnético B_z do dipolo ao longo da posição x com uma corrente elétrica de 1A.

Na figura 26 temos o mapeamento de um polo do dipolo na vista superior, onde podemos observar que o fluxo magnético, para uma corrente elétrica de 1A, se concentra no centro do dipolo estando sendo representado pela cor vermelha e na figura 27, temos que o campo magnético é homogêneo em função da posição ao longo do eixo x .

Para realizar a medida do campo magnético em função da corrente elétrica foi proposto um sistema composto por um osciloscópio e um gaussímetro TLMP-HAL que possui uma relação de 1 Volt – 100 mT e um erro de 2% [28]. A medida é realizada

colocando a ponta do gaussímetro nos polos do dipolo representados pela letra **A** e **B**, mostradas na figura 23, que conectando ao osciloscópio gera a visualização do valor da voltagem.

Para esta medida a corrente elétrica varia de -2,5 A a +2,5 A na torre de potência controlado pelo computador *Thunder*. Este processo permitiu que tivesse pontos para verificar a linearidade da relação do campo magnético e da corrente elétrica.

Na figura 28, apresentamos o gráfico que mostra a relação entre o campo magnético e a corrente elétrica, onde podemos observar que os valores entre os campos magnéticos nos polos do dipolo estão na faixa de erro estipulada pelo projeto.

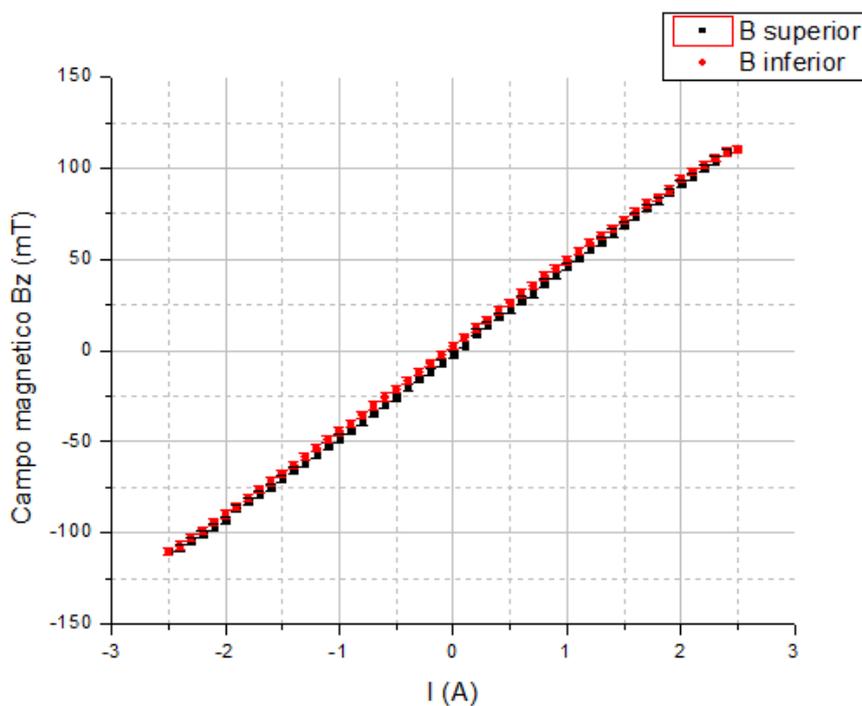


Figura 28: Gráfico que representa o campo magnético nos polos do dipolo em função da corrente elétrica de -2,5 a 2,5 A.

4.1.2 – Modelagem numérica

O campo magnético entre os polos do dipolo foi obtido utilizando o modelo físico AC/DC e a interface *Magnetic Field* [29]. O cálculo do campo magnético no solenoide é construído por meio da interface *Coil Current Calculation* que calcula o valor numérico do

campo magnético através do valor da corrente elétrica e o do número de espiras. Pela documentação do projeto temos que a corrente máxima é 2,5 A e há 877 espiras no dipolo.

Na modelagem por elementos finitos é importante definir, apropriadamente, as condições de contorno para o cálculo de acordo com a geometria do problema. Estas condições limitam a região do espaço de cálculo de modo a representar, o mais fielmente possível, o sistema investigado.

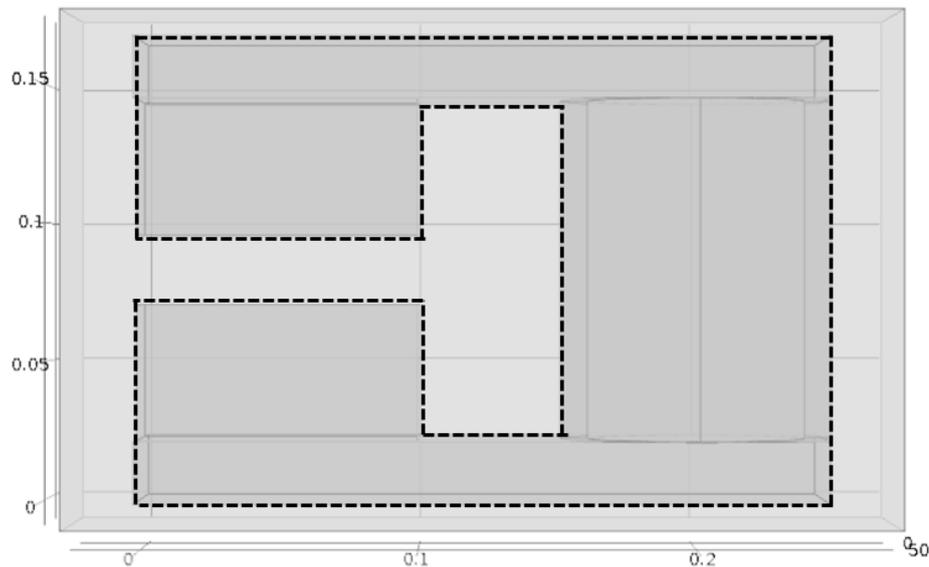


Figura 29: Vista lateral do Dipolo magnético onde a linha tracejada representa o contorno do dipolo e a região externa representa a geometria escolhida para a condição de contorno no dipolo.

A escolha de uma geometria inadequada causa um aumento de tempo de processamento ou em erros, devido a artefatos de cálculo. No cálculo do dipolo, as linhas de fluxo magnético se concentram na região entre os dois polos, isto nos permite simplificar o problema e definir o volume de um bloco retangular como região do espaço de cálculo, conforme pode ser observado na figura 29.

Para simular o dipolo utilizamos dois materiais: ferro para a estrutura e o ar na região externa. Os parâmetros destes materiais são disponíveis na biblioteca do COMSOL.

A malha utilizada no modelo foi a *Extra Fine*, que define automaticamente o tamanho para cada elemento do *mesh*, em uma faixa que varia entre no máximo 0,0104 m e no mínimo de $4,44 \cdot 10^{-4}$ m. Para a análise numérica do dipolo, foi utilizado o módulo de cálculo *Stationary* combinado com a interface *Parametric Sweep*, onde a corrente elétrica aplicada, variava na faixa de 0 a +2,5 A.

A intensidade do fluxo magnético no dipolo, para uma corrente elétrica de 1A está representada em cores na figura 30, onde há um acúmulo do campo magnético entre os polos do dipolo.

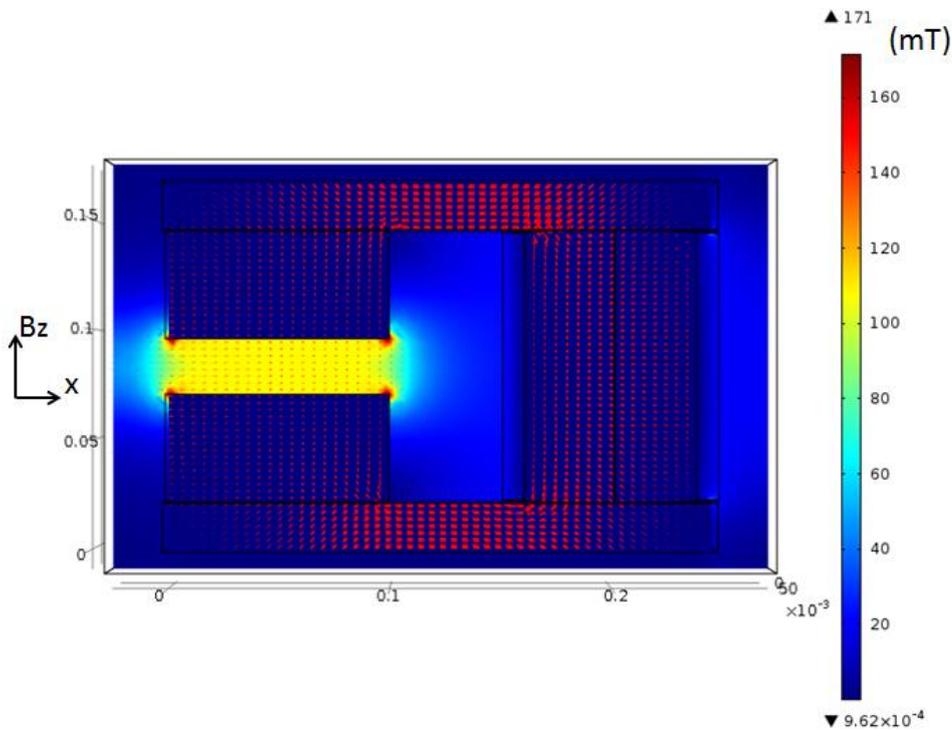


Figura 30: Representação da intensidade do fluxo magnético obtido no dipolo, que é constante entre seus polos e na escala representada pelas cores é possível observar a variação do fluxo magnético no dipolo.

Os resultados extraídos na simulação foram baseados na caracterização experimental, na figura 23, onde foi calculado o campo magnético B_z ao longo do eixo x e em função da corrente elétrica no ponto **B** localizado em um ponto do dipolo.

Utilizando a interface *Data Set*, que utiliza uma linha para obter resultados em função da posição, foi calculado o campo magnético B_z ao longo do eixo x , indicado pelos eixos de coordenadas ($B_z \times x$), visto na figura 23. Seu resultado, para a corrente elétrica de 1 A, é apresentado na figura 31, onde é possível observar uma homogeneidade do campo magnético entre os polos do dipolo.

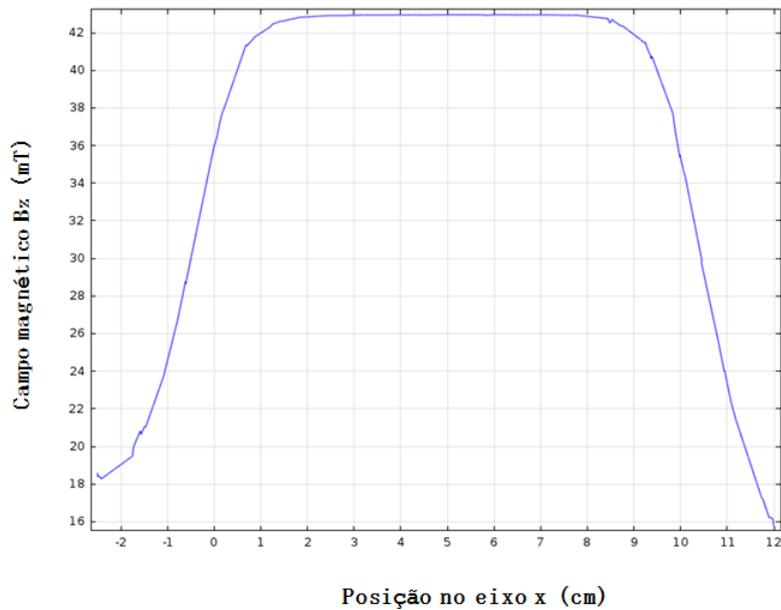


Figura 31: Campo magnético ao longo da posição x (Figura 23) entre os polos do dipolo com uma corrente elétrica fixa de 1A.

Para o cálculo do campo magnético B_z no ponto **B**, indicado na figura 23, em função da corrente elétrica foi utilizada a interface *Derived Values* relaciona duas grandezas físicas associadas a uma linha, superfície ou volume. Na figura 32 podemos observar, conforme esperado, que a relação entre o campo magnético e a corrente elétrica, entre 0 a 2,5 A, é linear de acordo com a equação 5.

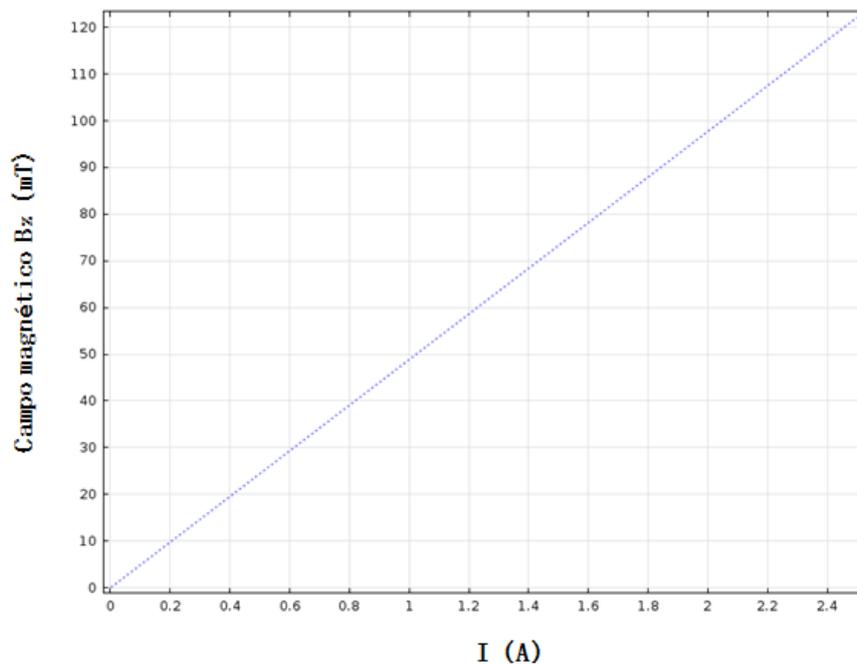


Figura 32: Campo magnético em função da corrente elétrica, no ponto B (Figura 23) no polo do dipolo.

As figuras 30, 31 e 32 apresentam resultados esperados para a simulação do dipolo. Fazendo uma análise entre a medida experimental (figura 27) e o cálculo numérico (figura 31), temos uma diferença de 3 mT, para o valor do campo magnético B_z , para uma corrente de 1A. As respostas obtidas da simulação podem explicar o funcionamento deste equipamento e em outro momento pode ser utilizada para simular um Laser de Elétrons Livres.

4.2 - Quadrupolo

O Quadrupolo é um dispositivo, visto na figura 33, é constituído de quatro polos cujos campos magnéticos são alternados. Sua função é controlar a divergência do feixe de elétrons, de forma análoga a uma lente divergente em um sistema óptico. O controle da focalização do feixe de elétrons se dá variando a corrente elétrica e, conseqüentemente, o módulo do campo magnético, que é contrario em um par de bobinas. Esta configuração apresenta campo magnético nulo no centro do Quadrupolo [25].

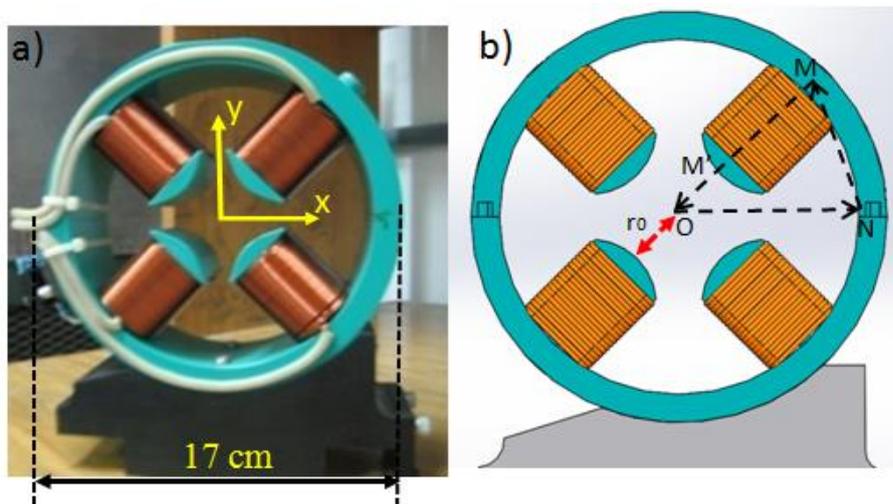


Figura 33: a) Foto do quadrupolo eletromagnético. b) Linha Amperiana no modelo do quadrupolo magnético, onde r_0 é a distância entre o polo e o centro do quadrupolo.

O módulo do campo magnético entre uma bobina do quadrupolo pode ser calculado a partir da lei de Ampère, onde temos que o eixo de coordenada está localizado no centro do

quadrupolo. Na figura 33b podemos observar que há quatro integrações para o cálculo do campo magnético:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_M^{M'} \vec{H}_1 \cdot d\vec{l} + \int_{M'}^O \vec{H}_2 \cdot d\vec{l} + \int_O^N \vec{H}_3 \cdot d\vec{l} + \int_N^M \vec{H}_4 \cdot d\vec{l} = \tilde{N}I \quad (6)$$

Onde $\vec{H}_1, \vec{H}_2, \vec{H}_3$ e \vec{H}_4 são os campos magnéticos, I é a corrente elétrica e \tilde{N} é o somatório de todas as espiras. A primeira integral é o caminho M'-M que representa o polo do quadrupolo; a segunda integral O-M' representa a região onde o campo magnético é mais intenso tendo r_0 a distância entre os pontos O-M'; a terceira integral N-O representa a distância perpendicular do centro do quadrupolo a sua extremidade e fechando o caminho temos a quarta integral, M-N onde se encontra a estrutura do ferro.

O caminho M'-M pode ser desprezado, pois essa região não interfere no campo magnético no centro do quadrupolo juntamente com o caminho M-N. Para o caminho N-O, há uma pequena contribuição das extremidades da integral de linha, que podem ser desprezadas em comparação com o caminho O-M'. Nesse contexto, o campo magnético do quadrupolo na distância r_0 é o caminho O-M' assim temos que a equação 6 pode ser expressa por:

$$\int_{M'}^O \vec{H}_2 \cdot d\vec{s} = \tilde{N}I \quad (7)$$

Calculando a integral da equação 7 com os limites de 0 a r_0 , obtemos a seguinte equação:

$$\int_0^{r_0} \frac{B}{\mu_0} \cdot d\vec{r} = \tilde{N}I \quad (8)$$

Onde B representa o campo magnético de um polo do quadrupolo, que neste caso varia com a distância r . Pois quanto mais afastado do centro o campo magnético aumenta, assim neste caso podemos dizer que $B = g.r$, onde g é o gradiente [T/m] e r é a distância do polo ao centro do quadrupolo. Calculando B na equação 9 em função do gradiente g temos:

$$\int_0^{r_0} \frac{B}{\mu_0} \cdot dr = \frac{g}{\mu_0} \int_0^{r_0} r \cdot dr = \frac{gr_0^2}{\mu_0 2} = \tilde{N}I \quad (9)$$

$$g = \frac{2\mu_0 \tilde{N}I}{r_0^2} \quad (10)$$

Adicionando o valor do gradiente g no campo magnético B temos que o campo magnético em um polo do quadrupolo é:

$$B = \frac{2\mu_0 \tilde{N}I}{r_0^2} \cdot r \quad (11)$$

Onde r_0 é a distância entre o centro e o polo do quadrupolo, r representa a distância da dependência do campo magnético, onde quanto mais próximo do centro for o r mais o campo magnético tende a zero, \tilde{N} é o número de espiras total do quadrupolo, I a corrente elétrica μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo.

Calculando o campo magnético em um par de bobinas do quadrupolo temos que $\tilde{N} = N/2$ e com a distância $r_0 = r$, podemos escrever o campo magnético como:

$$B_r = \frac{\mu_0 NI}{r_0} \quad (12)$$

Onde r_0 é a distância entre o polo e o centro do quadrupolo. Nesta equação podemos observar uma relação linear entre o campo magnético e a corrente elétrica.

4.2.1 – Caracterização experimental

No quadrupolo foi realizada a medida do módulo do campo magnético B_r em função da corrente elétrica em dois pontos **A** e **B** dos do quadrupolo, figura 34, com o objetivo de visualizar as propriedades magnéticas relacionadas com a colimação do feixe de elétrons.

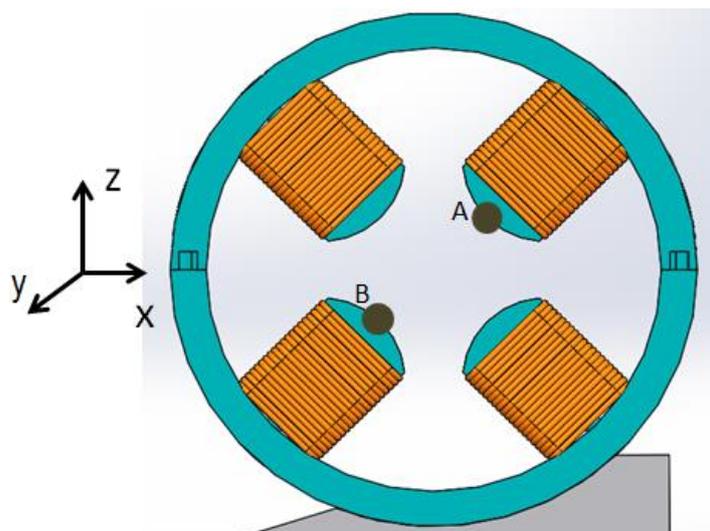


Figura 34: Vista frontal do quadrupolo magnético, onde as letras A e B representam os pontos nos polos do quadrupolo que foi utilizado para medir o campo magnético em função da corrente elétrica.

O tamanho das bobinas do quadrupolo dificultou a medida experimental do módulo do campo magnético, em função ao longo da posição y utilizando a mesa magnética. Onde a distância entre os polos é pequena, desse modo o sensor seria colocado no centro do quadrupolo que conforme esperado na teoria possui um módulo do campo magnético nulo no centro.

Nesse contexto, a medida do módulo do campo magnético em função da corrente elétrica foi obtida utilizando o gaussímetro TLMP-HAL e o osciloscópio. Na torre de potência a corrente elétrica era alterada de -2,5 a 2,5 A e adicionando o gaussímetro nos pontos A e B era possível visualizar a medida da voltagem no osciloscópio. A relação entre a voltagem e o campo magnético dada pelo fabricante é de 1 Volt – 100 mT, com um erro de 2% [28].

Na figura 35, apresentamos o gráfico da medida do módulo do campo magnético em dois polos do quadrupolo em função da corrente elétrica é linear de acordo com a equação 12. Onde podemos observar que os módulos dos campos magnéticos nos polos do quadrupolo estão na faixa estipulada pelo projeto. Desse modo, podemos inferir que também este quadrupolo está em pleno funcionamento e pode ser reaproveitado em outros projetos.

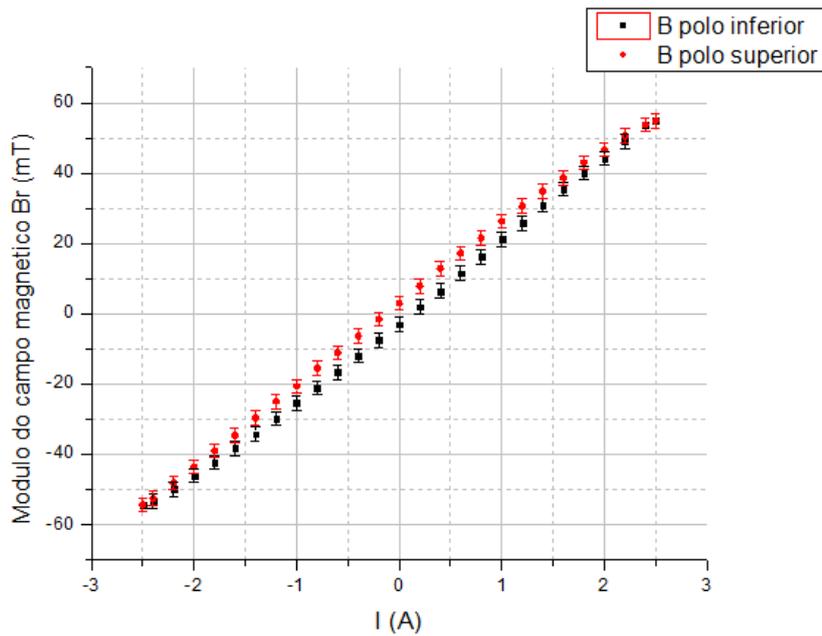


Figura 35: Gráfico do módulo do campo magnético nos pontos A e B, dos polos do quadrupolo em função da corrente elétrica situada entre -2,5 a 2,5 A.

4.2.2 – Modelagem numérica

O modelo do Quadrupolo foi desenvolvido em duas etapas, onde foi realizado um desenho em duas dimensões e após foi transformado em um desenho tridimensional. Para tal processo foi utilizado à interface *Work Plane* que realiza uma operação chamada *extrude* que, concatena as diversas representações geométricas em uma única entidade.

A distribuição dos magnetos é mostrada na figura 36. Devido à simetria do problema se utiliza um cilindro para representar a geometria das condições de contorno para o cálculo. Os materiais usados são o ferro para a estrutura do quadrupolo e o ar como envoltório.

As bobinas do Quadrupolo não possuem uma geometria circular, o que dificulta definir o sentido da corrente elétrica utilizando a interface *Coil Current Calculation*. Nesse contexto, foram utilizadas as interfaces *Magnetic Field* e *Ampere Law*, que calculam o fluxo magnético a partir da magnetização. O campo magnético é gerado no Quadrupolo por meio de bobinas, mas para a simulação, em questão, iremos emular ímãs.

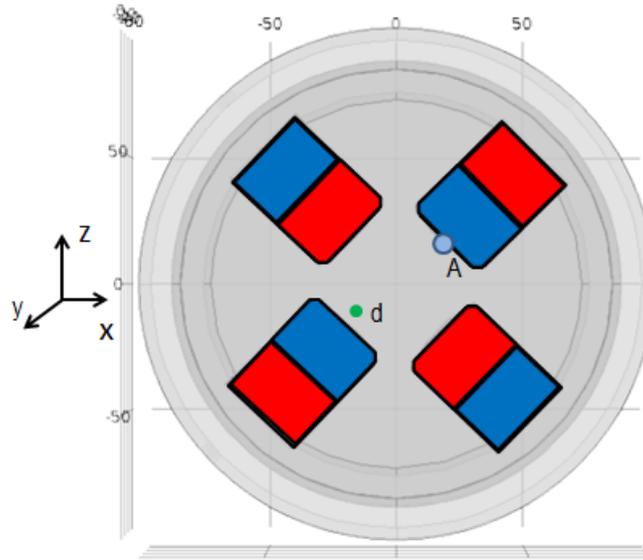


Figura 36: Desenho do Quadrupolo com a orientação magnética dos magnetos e a região circular externa representando a condição de contorno. A letra A indica um ponto na superfície do quadrupolo e a letra d representa a distância onde é calculado o fluxo magnético em relação ao longo do eixo y próximo à superfície do magneto.

A magnetização pode ser compreendida como um fenômeno que acontece em um material quando há um alinhamento dos momentos magnéticos decorrente da aplicação de um campo magnético H , que também gera um campo magnético B [30]. A equação que relaciona o campo magnético, a magnetização e o campo magnético aplicado são dados por:

$$B = \mu_0(H + M) \quad (13)$$

Onde μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo, H é o campo aplicado e M é a magnetização. A magnetização é definida como um somatório dos momentos magnéticos por unidade de volume [31]. Para um solenoide a magnetização é dada pela equação 14.

$$M = \frac{N \cdot i \cdot A}{V} = \frac{Ni \cdot A}{A \cdot 2r_0} = \frac{Ni}{2r_0} \quad (14)$$

Onde N é o número de espiras, i é a corrente, A é a área do solenoide e V é o volume. Como o objetivo é calcular a magnetização entre as bobinas, o volume é dado por $A \cdot 2r_0$, onde $2r_0$ é a distância entre os pólos do Quadrupolo, visto na figura 33.

Para o cálculo, o quadrupolo possui 355 espiras e sua corrente máxima é de 2,5 A e sua modelagem foi realizada usando a interface *Stationary* em associação com a interface *Parametric Sweep*, onde podemos variar a corrente elétrica de -2,5 a +2,5 A.

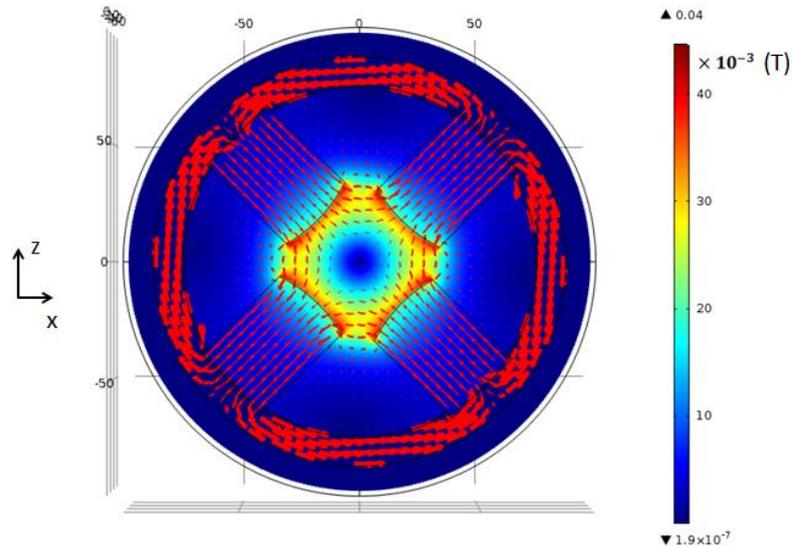


Figura 37: Representação da intensidade do fluxo magnético no Quadrupolo. Na escala das cores representamos o fluxo magnético, onde podemos observar que o campo magnético no centro do Quadrupolo é zero.

Na figura 37 destacamos a representação em cores a intensidade do intensidade do fluxo magnético no quadrupolo. Podemos observar que o módulo do campo magnético no centro das bobinas é nulo. No quadrupolo, a malha utilizada foi a *Extremely Fine*, que apresenta uma variação de dimensão para cada elemento do *mesh*, em uma faixa que varia entre no máximo 3,88 mm e no mínimo de 0,0388 mm.

Para a simulação foi calculado o módulo do campo magnético B_r em função da corrente elétrica, em função do ponto **A** do polo do quadrupolo, visto na figura 36. Esta análise é similar ao que foi desenvolvido na medida experimental do quadrupolo observado na figura 34. Ao mesmo tempo, foi realizado um cálculo do módulo do magnético em função da distância **d** próxima ao polo do quadrupolo, que está representado pela cor verde na figura 36. Na figura 38, temos que a resposta do campo magnético B_r em função da posição para a corrente de 1A gera uma curva homogênea.

O campo magnético no ponto **A**, mostrado na figura 36, em função da corrente elétrica para os valores de 0 a 2,5 A é apresentado na figura 39, onde podemos observar a linearidade do módulo do campo magnético em função da corrente elétrica.

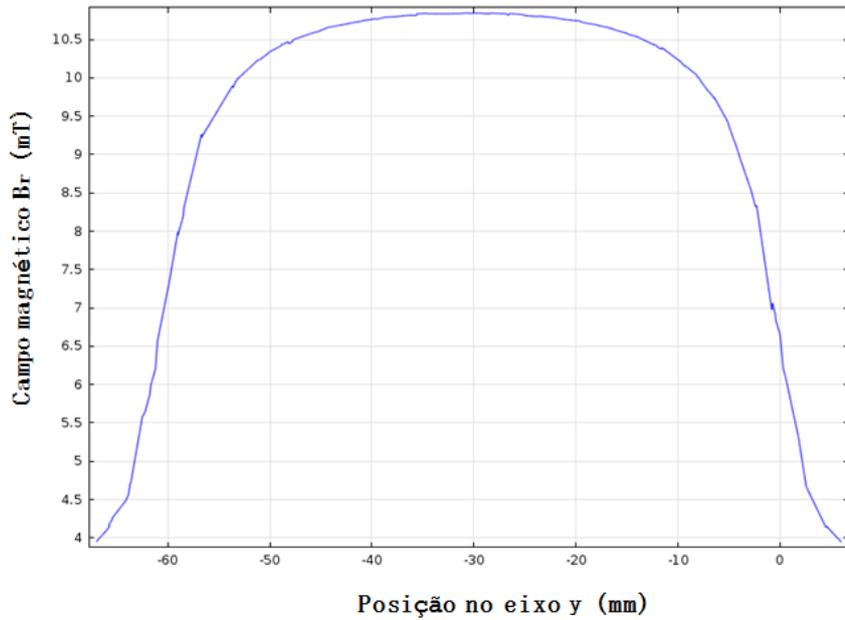


Figura 38: Campo magnético B_r no quadrupolo ao longo da posição no eixo y com uma corrente elétrica de 1A, representado na Figura 36.

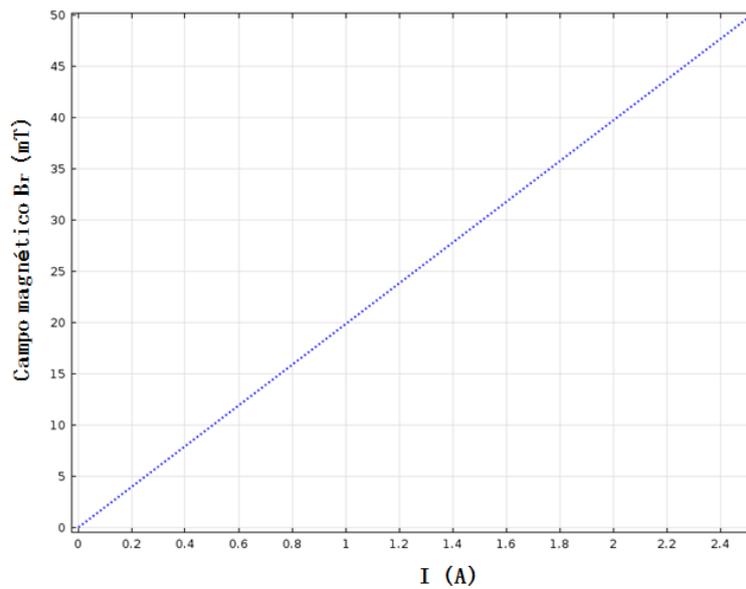


Figura 39: Módulo do campo magnético B_r em função da corrente elétrica, no ponto A (Figura 36) no polo do quadrupolo.

Para o Quadrupolo temos que as figuras 37, 38 e 39 mostram que a simulação apresenta resultados que se adaptam a teoria. Desse modo, a simulação do quadrupolo também pode ser utilizada para explicar o funcionamento deste equipamento e simular um Laser de Elétrons Livres.

5 – Ondulador

O ondulador, principal elemento de um FEL, é um dispositivo magnético de inserção construído de modo a apresentar um campo magnético senoidal estático no seu Eixo Axial, produzido por ímãs permanentes com polos alternados.

Existem dois tipos de configurações para o ondulador, a *Halbach* onde os ímãs são arranjados sem os entreferros e a configuração *Hybrid* no qual o ímã está localizado entre polos de aço. Neste estudo, optamos por uma configuração do tipo *Hybrid*, onde os ímãs são posicionados com seus polos magnéticos em oposição e separados por placas de material ferromagnético, entreferros de aço [7], conforme a figura 40.

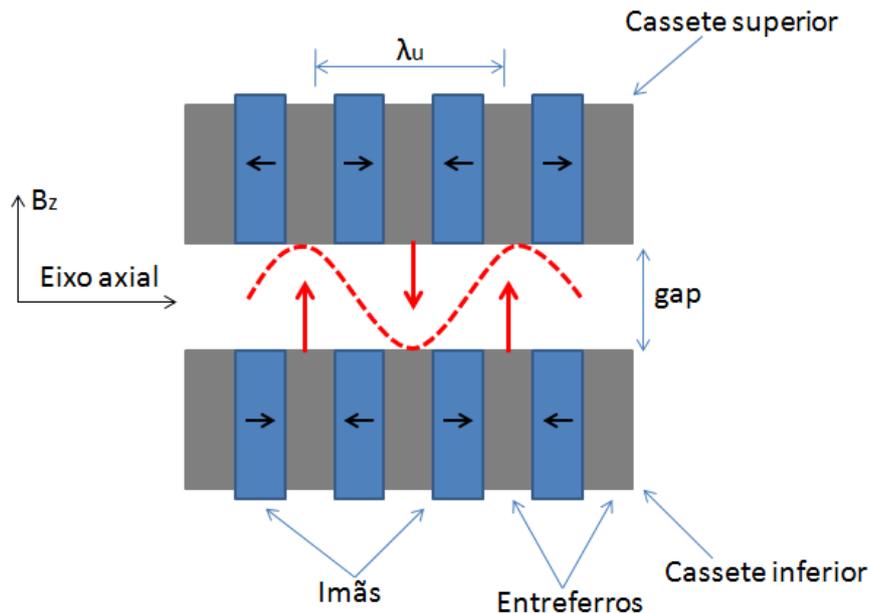


Figura 40: Esquema do ondulador *Hybrid* onde os ímãs estão indicados pela cor azul e seus respectivos campos magnéticos pelas setas pretas. Os entreferros, na cor cinza, orientam o fluxo resultante, indicados pelas setas em vermelho. O campo magnético estático resultante, representado pelo tracejado vermelho, é senoidal para uma faixa de parâmetros que depende da intensidade B_0 associada aos materiais dos entreferros e dos ímãs, a distância entre eles (*gap*) e de λ_u .

Esta configuração permite ajustar a intensidade do campo magnético B_0 variando a posição da altura relativa dos entreferros, sem afetar significativamente λ_u . Os polos magnéticos dos ímãs são alternados e o módulo do campo magnético no eixo z é expresso pela equação 15 onde B_0 é a amplitude do campo magnético [32].

$$B_z = -B_0 \text{sen} \left(\frac{2\pi}{\lambda_u} x \right) \quad (15)$$

A amplitude do campo magnético B_0 do ondulador pode ser obtida pela equação 16, onde temos a relação entre o comprimento de onda λ_u e da distância (gap) entre o vão livre dos ímãs [33]. Para a construção de um ondulador os parâmetros g e λ_u devem obedecer à relação $0,07 \leq g/\lambda_u \leq 0,7$ [10].

$$B_0[\text{T}] = 3,30 \exp \left\{ -\frac{g}{\lambda_u} \left(4,94 - 1,45 \frac{g}{\lambda_u} \right) \right\} \quad (16)$$

O Ondulador do FEL CREOL [20], apresentado neste trabalho, é formado por dois cassetes paralelos e superpostos ao longo do Eixo Axial, com 1480 ímãs separados por uma distância, denominado *gap*, de 6 mm. Possui 185 períodos, com um comprimento de onda λ_u de 8 mm, comprimento total de 1486 mm e remanência magnética B_{rm} é de 1,17 T. Suas principais características podem ser observadas na tabela 4 [34]:

Tabela 4: Parâmetros do Ondulador construído pelo CREOL.

Parâmetros Ondulador	
Comprimento de onda	8 mm
Numero de períodos	185
Comprimento	1,486 mm
Gap	6 mm
Amplitude do campo magnético	0,2 T
Erro da amplitude do campo magnético RMS	0,2 %
Permanente magnético	NdFeB NeoMax 33SH
Dimensões do permanente magnético	2,7x13 x30 mm
Sentido da magnetização	Paralelo à dimensão de 2,7 mm
Campo magnético remanescente	1,17 T
Material entreferros	Aço 1010
Dimensões entreferros	1,28x28x25 mm

Sua construção mecânica pode ser vista na figura 41, onde os cassetes que ficam enclausurados em uma estrutura com vácuo e nas suas laterais são adicionados *aperture screen* para a visualização da trajetória dos elétrons no Ondulador.

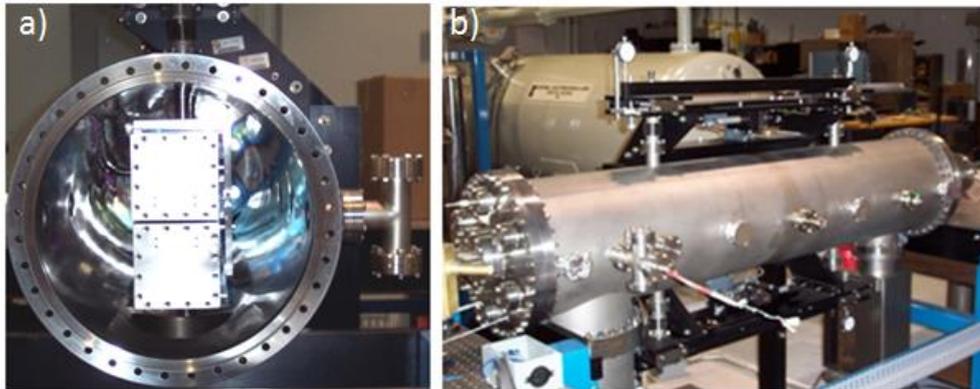


Figura 41: a) Vista interna do ondulador mostrando o posicionamento dos cassetes. b) Vista externa onde é possível observar espaços para a colocação do equipamento de visualização do feixe de elétrons para observar o feixe dentro do ondulador.

Os ímãs e os entreferros são arranjados em uma estrutura de alumínio 7075, onde o equipamento possui uma precisão da posição mecânica de 50 μm . Os ímãs são colados com cola epóxi e os entreferros são colocados na estrutura de alumínio.

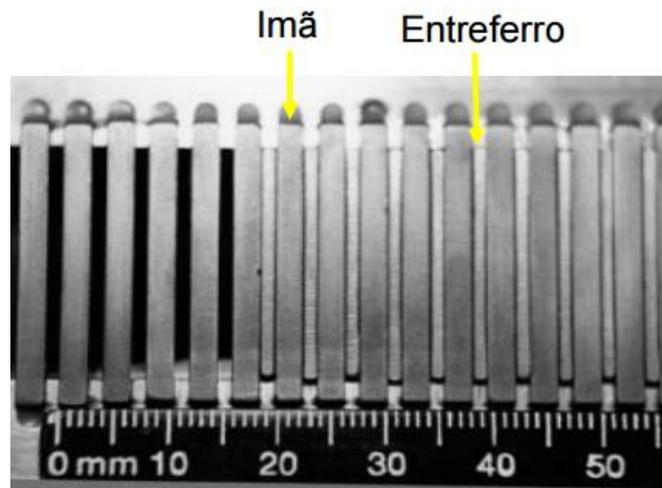


Figura 42: Detalhe dos ímãs do Ondulador.

Experimentalmente, foi observado que os ímãs possuíam variações em seus momentos magnéticos, gerando a necessidade de um mecanismo de ajuste [34]. Assim os cassetes do Ondulador possuem janelas nas suas laterais com parafusos possibilitando que as

alturas dos entreferros possam ser aumentadas mecanicamente, como pode ser observado na figura 43. Este ajuste é feito alterando mecanicamente a altura dos entreferros e apresenta a vantagem de se alterar a amplitude sem comprometer a medida.

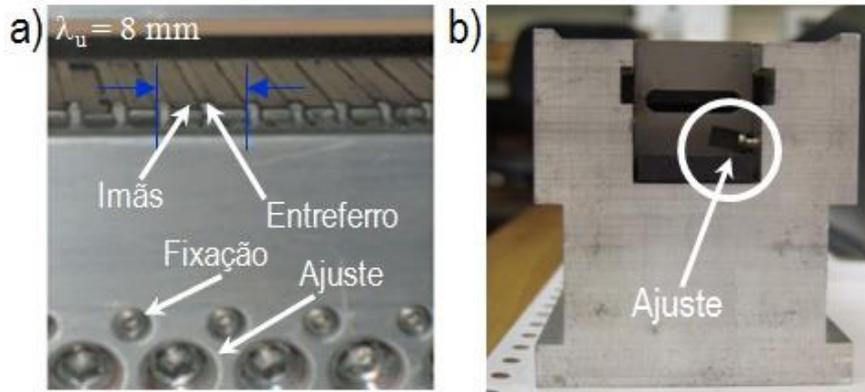


Figura 43: Fotos do cassete inferior do Ondulador do CREOL. a) Detalhe do parafuso de fixação e do parafuso de ajuste do entreferro b) Vista frontal com detalhe do parafuso de ajuste fino de um dos entreferros.

O ondulador tem como função principal alterar os parâmetros do campo magnético, de modo que haja uma mudança da trajetória controlada de um feixe de elétrons relativístico. Desse modo, temos dois parâmetros relacionados à amplitude do campo magnético B_0 do ondulador que são utilizados para verificar a qualidade do feixe de elétrons. Os parâmetros são a velocidade e o deslocamento do feixe de elétrons, que podem ser calculados a partir da equação 17.

$$\ddot{y} = -\frac{eB_0}{m_0\gamma c^2} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_u} x\right) \quad (17)$$

A equação 17 representa a aceleração do elétron no ondulador, onde B_0 é a amplitude do campo magnético do ondulador, m_0 é a massa do elétron, c^2 é a velocidade da luz no vácuo e γ é o fator de Lorentz. Integrando a equação 17 em função temos a velocidade (1ª integral) e o deslocamento (2ª integral) do feixe de elétrons no ondulador respectivamente, que correspondem aos parâmetros do ondulador [32].

$$\dot{y} = \frac{1}{\gamma c^2 m_0 2\pi} \frac{eB_0 \lambda_u}{2\pi} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_u} x\right), \text{ onde } k = \frac{eB_0 \lambda_u}{c^2 m_0 2\pi} \quad (18)$$

$$y = \frac{K\lambda_u}{\gamma 2\pi} \text{sen} \left(\frac{2\pi}{\lambda_u} x \right) \quad (19)$$

Na equação 18 temos que unidade é expressa em $[T \cdot m]$ e na equação 19 a unidade é $[T \cdot m^2]$. Essas equações servem de base para a análise experimental do Ondulado, que será vista no tópico 5.1.

5.1 – Análise dos dados experimentais

O Ondulador foi levado para caracterização magnética no Laboratório Magnetos e Dispositivos de Inserção do Laboratório Nacional da Luz Síncrotron (LNLS), com a colaboração de James Citadini, Reinaldo Basilio, Giancarlo Tosin. Os trabalhos realizados pelo LNLS foram divididos em duas partes: estrutura mecânica e magnética. Os parâmetros de qualidade utilizados são os valores da 1ª integral (equação 18), 2ª integral (equação 19) e a variação RMS nos pontos máximos do Ondulador, que é obtido a partir do desvio padrão dos pontos máximos divididos pelo campo magnético médio.

Tabela 5: Valores da 1ª e 2ª integrais do campo magnético B_z especificado pelo projeto.

Varição RMS dos picos do campo em %	0,2
1ª Integral (T.m)	$1 \cdot 10^{-5}$
2ª Integral (T.m ²)	$\sim 10 \cdot 10^{-5}$

Os primeiros testes começaram com a estrutura mecânica, passando por uma revisão geral, no qual foram trocadas as molas que já estavam gastas e os rolamentos que estavam danificados. Com essas peças instaladas foi gerado um campo magnético no Ondulador com o *gap* de 6 mm (original), com o objetivo de comparar o valor do campo magnético atual com o especificado.

Para a realização das medidas magnéticas do Ondulador foi utilizada a bancada de caracterização magnética, como visto na figura 44, para realizar o mapeamento do campo

magnético. A bancada magnética é composta por três sensores hall (sigle – axis) da *Sentron* e a tensão usada é capturada por voltímetros de 8 ½ dígitos da *Agilent* [35].

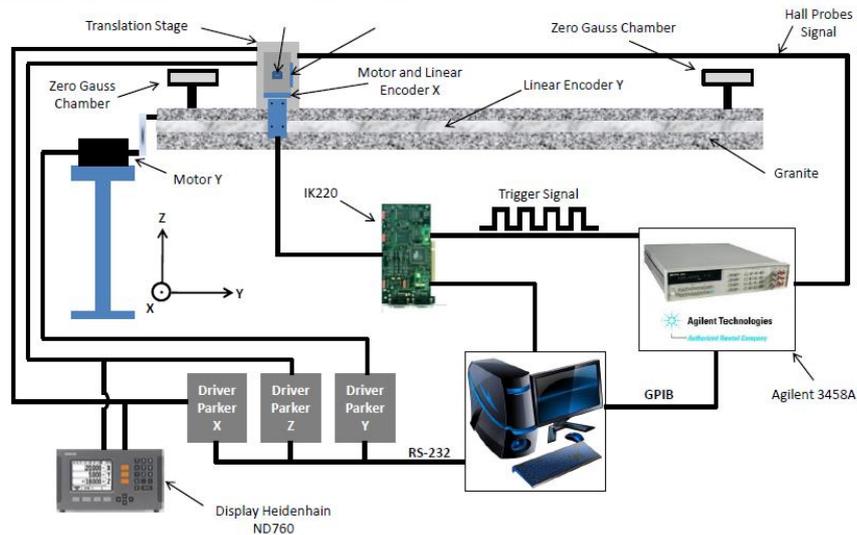


Figura 44: Bancada magnética em três dimensões utilizada para a caracterização magnética do ondulador [35].

A obtenção do campo magnético B_z no Eixo Axial do Ondulador (figura 40) foi dividida em duas etapas. Em um primeiro momento, foram feitos ajustes mecânicos nos parafusos de manuseio que estão localizados em cada lado dos cassetes do Ondulador.

Na segunda parte foi utilizado um programa escrito no software de análise gráfica chamado de Igor Pro (*Wavemetrics*) [36]. Este software visa calcular o desvio padrão entre os picos e conhecer a posição exata dos polos a serem corrigidos.

Após os ajustes mecânicos e a correção dos polos, foram realizadas duas caracterizações magnéticas no *gap* de 6 mm do Ondulador, através do sistema de eixos adotados na figura 45. A primeira medida foi obtida utilizando a configuração original sem nenhuma correção nos entreferros e a segunda foi obtida com os entreferros corrigidos.

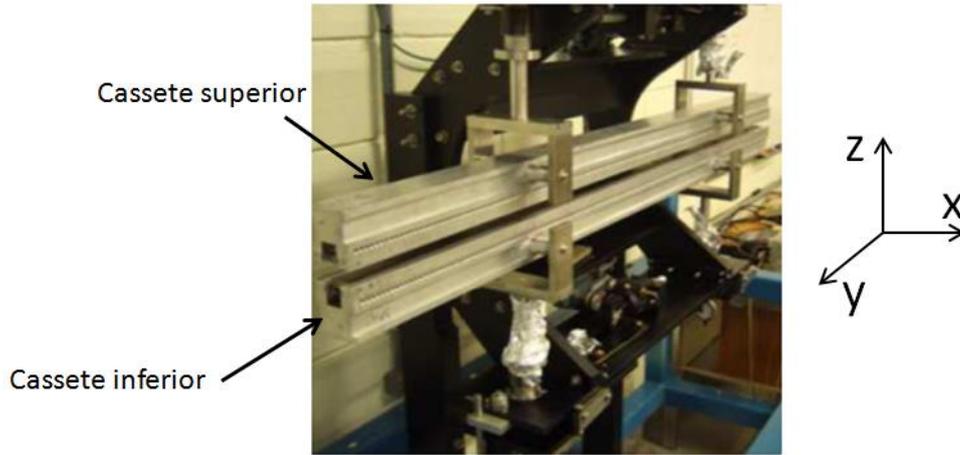


Figura 45: Esquema da parte interna do Ondulador utilizado para a caracterização do campo magnético no eixo z entre os cassetes.

- Caracterização Magnética *gap* de 6 mm – Configuração Original sem nenhuma correção.

Realizou-se a medição no centro do Ondulador para análise das condições iniciais antes das correções dos polos, que podem ser visto na tabela 6. Em comparação com a tabela 5, podemos observar que este valor está longe do especificado.

Tabela 6: Valores da 1ª e 2ª integrais do campo magnético B_z para o *gap* de 6 mm sem correção.

Varição RMS dos picos do campo magnético B_z %	0,65
1ª Integral (T.m)	$1,77 \cdot 10^{-4}$
2ª Integral (T.m ²)	$4,58 \cdot 10^{-4}$

- Caracterização Magnética *gap* de 6 mm – após correção.

Foram realizadas medidas com o campo magnético B_z , como visto na figura 46, onde foram extraídos os pontos máximos do campo magnético e o cálculo da 1ª e 2ª integrais que estão representados na tabela 7.

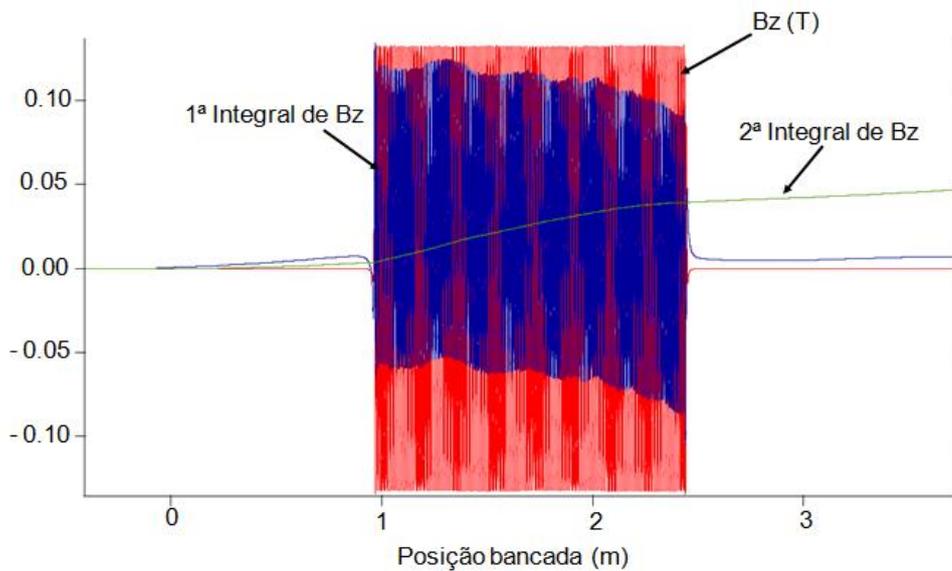


Figura 46: Medida do Campo magnético medido B_z juntamente com os valores obtidos da 1ª e 2ª integral.

Tabela 7: Valores da 1ª e 2ª integrais do campo magnético B_z para o *gap* de 6 mm com correção.

Varição RMS dos picos do campo magnético B_z %	0,22
1ª Integral (T.m)	$0,8 \cdot 10^{-5}$
2ª Integral (T.m ²)	$7,93 \cdot 10^{-5}$

Uma vez atingida à especificação de 0,2% de variação entre todos os picos (positivos e negativos), poucos ajustes eram necessários para corrigir a primeira e a segunda integral.

Desta forma, as especificações foram atingidas para o *gap* mínimo, porém ao se abrir o *gap*, deformações mecânicas aconteciam devido às variações de forças tanto magnética como das molas alterando o campo. Foram feitas diversas alterações para observar as especificações para *gaps* maiores, contudo muitos parafusos que travavam os polos estavam com problemas. Conclui-se que não é possível garantir o posicionamento de *gap* maiores que 6 mm (original).

Para que o Ondulador esteja dentro das especificações estipuladas pelo projeto é necessário que sua estabilidade mecânica seja da ordem de micrometros. Porém só é possível obter uma estabilidade de $\pm 0,01$ mm, dificultando a obtenção de resultados dentro da especificação. Para o *gap* de 6 mm, sem nenhuma correção, obtivemos uma variação de 0,65% RMS que é alta se comparada com a especificada de 0,2% RMS. Isto nos mostra que para alcançar o valor especificado é necessário realizar pequenas variações no ângulo de

fixação dos polos, conforme ocorreu na segunda medida de 6 mm, com correção, onde a variação dos picos foi de 0,22% RMS. Na tabela 8 apresentamos os valores da 1ª e 2ª integrais entre os valores estipulados pelo projeto e os resultados obtidos no LNLS.

Tabela 8: Comparação dos valores da 1ª e 2ª integrais estipulados pelo projeto CREOL e resultados obtidos em colaboração com o LNLS.

Ondulador	Projeto (gap 6 mm)	Medido (gap 6mm)
Valor 1ª integral (T.m)	1.10^{-5}	$0,8.10^{-5}$
Valor 2ª integral (T.m ²)	$\sim 10.10^{-5}$	$7,93. 10^{-5}$

Nos testes mecânicos realizados no LNLS foi percebido que o Ondulador apresenta uma instabilidade mecânica na fixação dos seus cassetes. Essa instabilidade acarreta em uma dificuldade na reprodutibilidade da caracterização experimental prejudicando a medida do campo magnético B_z .

Com os dados obtidos no LNLS, foram desenvolvidos testes no período e amplitude (valores positivos) do campo magnético do Ondulador com o objetivo de verificar se a instabilidade afetava o período e a amplitude dos valores positivos, e seus resultados foram comparados com os parâmetros do projeto CREOL [34]. A análise foi realizada em um trecho do Ondulador de 1200 mm a 2400 mm para minimizar os efeitos de borda.

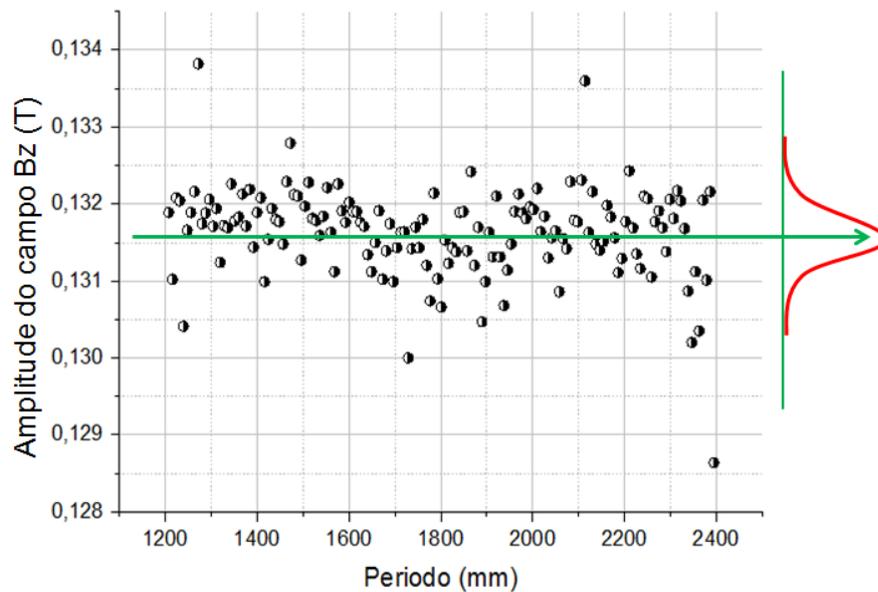


Figura 47: Pontos de máximos do módulo campo magnético B_z medido no ponto médio no *gap* para cada período do Ondulador.

No primeiro momento foram extraídos os valores de máximo do módulo do campo magnético B_z para cada período do Ondulador ao longo do ponto médio do *gap*, da componente z perpendicular ao plano entre os ímãs ao longo do eixo y, como visto na figura 47.

Realizando uma média dos valores do campo magnético no centro do Ondulador, mostrado na figura 47, foi constatado que depois do ajuste mecânico da posição individual dos entreferros o campo médio é de 0,132 T. Com os valores máximos do campo magnético é possível obter um histograma, figura 48, onde seu valor médio é 0,131 T e o seu desvio padrão é $5,80E-4$ T.

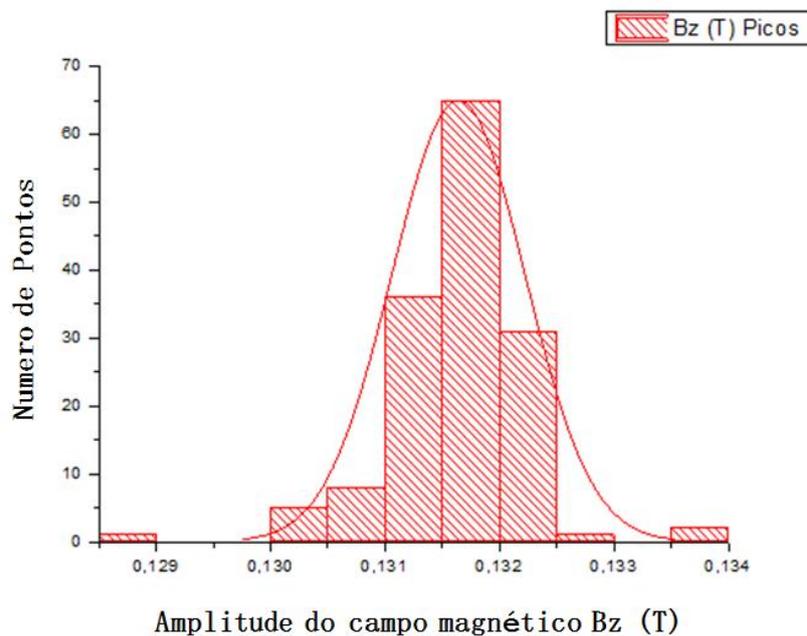


Figura 48: Histograma dos valores máximos do módulo do campo magnético B_z medidos no centro do *gap* do Ondulador.

O erro associado aos valores máximos de campo magnético é dado pelo desvio padrão em relação ao valor médio, isto é $\Delta B/B \times 100\%$. Assim para os valores máximos de campo magnético temos um erro de 0,4 % RMS.

Para o comprimento de onda foi realizado um cálculo dos períodos cujos campos magnéticos são positivos em relação ao número de pontos. Realizando este cálculo é comprovado que o período é ajustado de forma linear, com o coeficiente linear de 8,023 mm. Calculando a derivada dos valores relacionados aos períodos do comprimento de onda é possível construir o gráfico da figura 49, onde temos uma média de 8,023 mm, uma precisão do comprimento de onda do Ondulador de 50 μm e um desvio padrão de 0,025 mm.

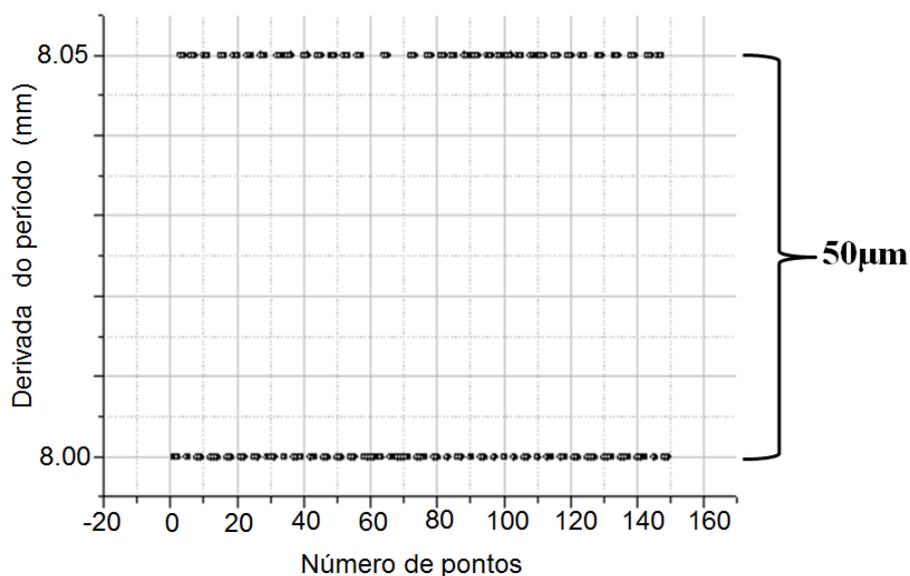


Figura 49: Cálculo da derivada para os valores do período do Ondulador, o ajuste deste gráfico possui uma média de 8,023 mm e um desvio padrão de 0,025 mm.

Nos resultados dos testes do comprimento de onda e da amplitude do Ondulador foi verificado que o comprimento de onda está de acordo com o projeto e para amplitude (valores positivos) temos que o valor encontrado corresponde ao dobro do valor estipulado pelo projeto para os picos positivos e negativos, como é mostrado na tabela 9.

Tabela 9: Comparação dos dados referente à amplitude do campo magnético B_z e o comprimento de onda do ondulator estipulado pelo projeto CREOL e resultados obtidos pela análise dos dados.

Ondulador	Projeto (gap 6 mm)	Medido (gap 6mm)
Amplitude (RMS)	0,2%	0,4 % valores positivos
Comprimento de onda (μm)	25	25

No tópico 5.2 será apresentada a simulação de um trecho do Ondulador que foi construída com o objetivo de compreender seu funcionamento e fornecer uma ferramenta que viabilize a possibilidade de cálculos numéricos utilizando o feixe de elétrons.

5.2 – Modelagem numérica

O cálculo numérico da amplitude do campo magnético B_z no Ondulador utiliza o modelo físico AC/DC e as interfaces *Magnetic Field* e *Magnetic Field No Current*. Nessas interfaces o cálculo numérico é obtido calculando o Potencial Escalar Magnético [37]. Aplicando as equações de Maxwell para o magnetismo [24] temos:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (20)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} \quad (21)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} \quad (22)$$

Como estamos trabalhando com ímãs, não há correntes elétricas no sistema, logo $\vec{\nabla} \times \vec{H} = 0$. Assim podemos definir o campo magnético H nos ímãs permanentes como:

$$\vec{H} = -\vec{\nabla} V_m \text{ [A/m]} \quad (23)$$

Onde V_m é o Potencial Escalar Magnético expresso em unidade de Ampère (A), sendo um ente matemático utilizado, em elementos finitos, para resolver problemas envolvendo permanentes magnéticos [24]. Associando a equação 23 com a equação $B = \mu_0(H + M)$ temos a relação entre a magnetização M e o Potencial Escalar Magnético, para o campo magnético B .

$$B = \mu_0 \vec{\nabla} V_m - \mu_0 M \quad (24)$$

Adicionando a equação 24 na lei de Guass do magnetismo (equação 20) temos o vetor gradiente do campo magnético B [19].

$$\vec{\nabla} \cdot (\mu_0 \vec{\nabla} V_m - \mu_0 M) = 0 \quad (25)$$

Na equação 25 temos que conhecendo a magnetização M é possível encontrar o valor do Potencial Escalar Magnético V_m e conseqüentemente o campo magnético B . Desse modo, para cada imã permanente utilizado na simulação do Ondulador foi utilizada a equação 26 aplicada na interface *Magnetic Flux Conservation* para calcular a magnetização.

$$B_{rm} = \mu_0 M \quad (26)$$

Onde B_{rm} é remanência magnética, que no caso do Ondulador, todos os imãs possuem um valor de 1,17 T e μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo. A simulação do Ondulador foi realizada com 50 períodos, para reduzir o tempo de processamento, não existe restrição conceitual para se ampliar o número de períodos, porém é necessário um ajuste fino dos campos magnéticos no início e no fim do Ondulador para compensar os efeitos de borda.

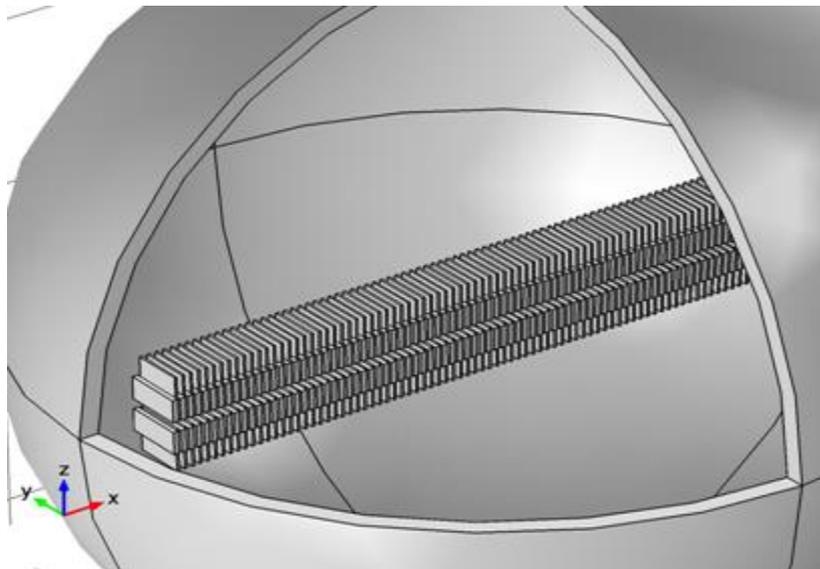


Figura 50: Desenho de um trecho do ondulador com 50 períodos, onde a geometria esférica representa a condição de contorno.

Esta simulação permite variar a intensidade do campo magnético B_0 , comprimento de onda λ_u e a distância entre os entreferos (*gap*). Para a condição de contorno foi escolhida uma geometria esférica, nessa geometria foi aplicada a interface *Infinite Element Domain* que emula o espaço sendo infinito, conforme visto na figura 50.

Os materiais utilizados são neodímio ferro boro NdFeB (33SH) para os imãs e o aço 1010 para os entreferos. As medidas dos imãs são: 10,5 x 1,3 x 25 mm e do aço 30 x 2,7 x 13 mm. A malha *Extra Fine* foi utilizada para esta simulação, onde o tamanho para cada elemento do *mesh* é estipulado em uma faixa que varia entre no máximo 10,4 mm e no mínimo 0,61 mm.

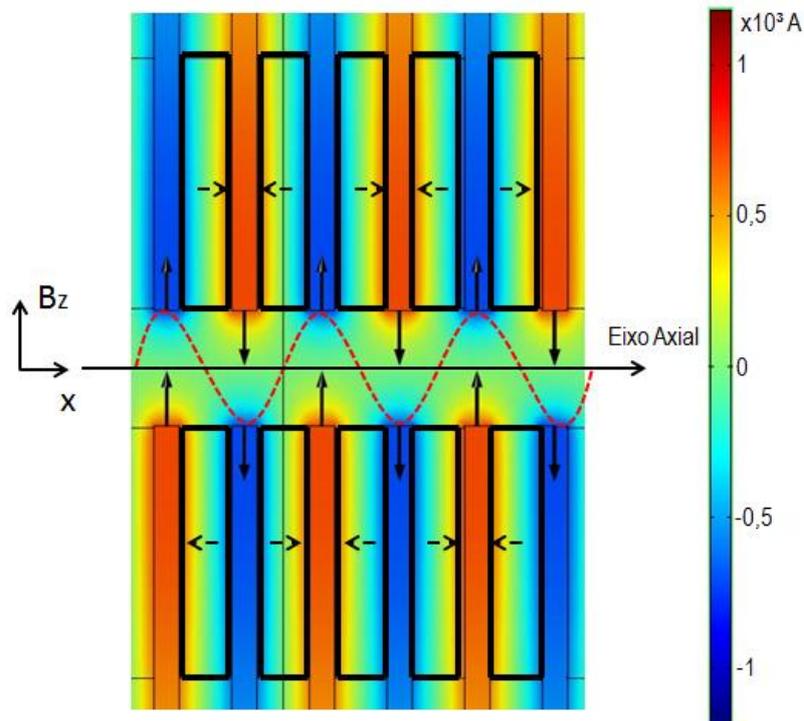


Figura 51: Detalhe do Potencial Escalar Magnético dos imãs onde a característica senoidal está representada na linha tracejada.

Na figura 51 temos a visualização de um setor do Ondulador. As linhas mais escuras representam os imãs e as cores vermelhas e azuis representam o potencial escalar magnético, onde o azul representa região negativa e a vermelha representa a região positiva.

Os momentos magnéticos dos imãs são orientados no Eixo Axial de forma alternada, gerando uma componente do campo magnético B_z entre os cassetes do Ondulador, que apresenta uma resposta senoidal para o campo magnético no eixo axial. O campo magnético B_z está representado pela linha tracejada na figura 51 [7].

O COMSOL apresenta sensibilidade em relação às medidas da posição gerando descontinuidades. Para adequar o cálculo do campo magnético B_z em relação à posição no Eixo Axial com a modelagem numérica foi utilizado um cálculo do campo magnético B_z para uma simulação em duas dimensões do mesmo Ondulador. Seu calculo é realizada utilizando a interface *Date Set* onde é colocada uma linha no Eixo Axial ao longo do eixo x.

Na figura 52 é apresentada a intensidade do campo magnético B_z entre os cassetes do Ondulador no Eixo Axial, no qual temos uma função periódica como previsto pelas configurações de projeto.

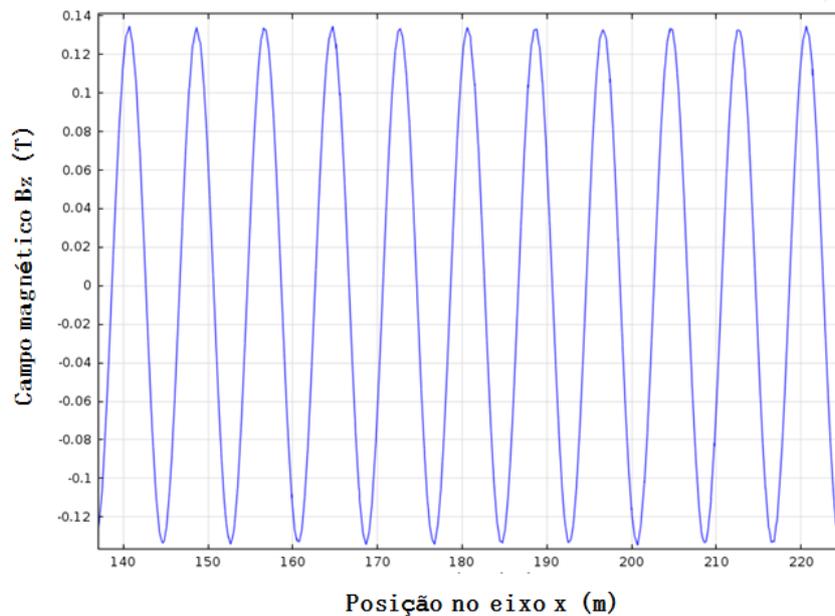


Figura 52: Campo magnético B_z calculado por uma representação em duas dimensões no Eixo Axial do ondulador em função da posição ao longo do eixo x.

Como observado neste trabalho, o Ondulador possui um ajuste mecânico na posição dos seus entreferros. Este ajuste está diretamente ligado com a amplitude do campo magnético no Ondulador. Desse modo investigamos a sensibilidade entre o campo magnético B_z no plano xy em relação à inclinação dos entreferros, o desenho da configuração dos entreferros é visto na figura 53.

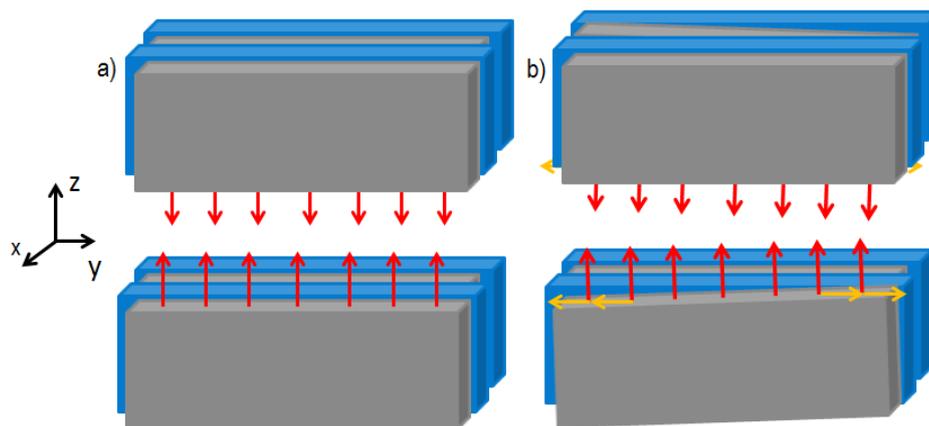


Figura 53: a) Desenho de um período do Ondulador, onde os ímãs estão representados em azul, os entreferros em cinza e o campo magnético B_z está representado pelos vetores em vermelho. b) Um ângulo de rotação no eixo do entreferro pode provocar uma componente transversal indesejável.

Para medir a relação entre o campo magnético e o ajuste dos entreferros, foi desenvolvida uma simulação de um período do Ondulador. Nesta simulação, foram calculados os valores do campo magnético B_z em um período do Ondulador em função dos eixos x e y , com os ângulos de 0° , $0,5^\circ$, 1° , $1,5^\circ$ e 2° graus.

Foram calculados os valores do cálculo do campo magnético B_z em relação ao eixo y e ao eixo x no centro do Ondulador, onde todas as respostas foram obtidas utilizando a interface *Data Set*.

Ao longo do eixo x , os campos magnéticos B_z referentes aos ângulos possuem pequenas variações em suas intensidades de campos magnéticos, porém no eixo y é possível ver que as intensidades dos campos magnéticos B_z apresentam variação em função do ângulo de inclinação dos entreferros.

Este resultado é observado na figura 54 que nos apresenta o campo magnético B_z , em função do eixo y , entre as amplitudes do campo magnético em relação aos ângulos de 0° e $0,5^\circ$, nos mostrando que a inclinação do entreferro cria uma componente transversal na intensidade do campo magnético B_z no Ondulador.

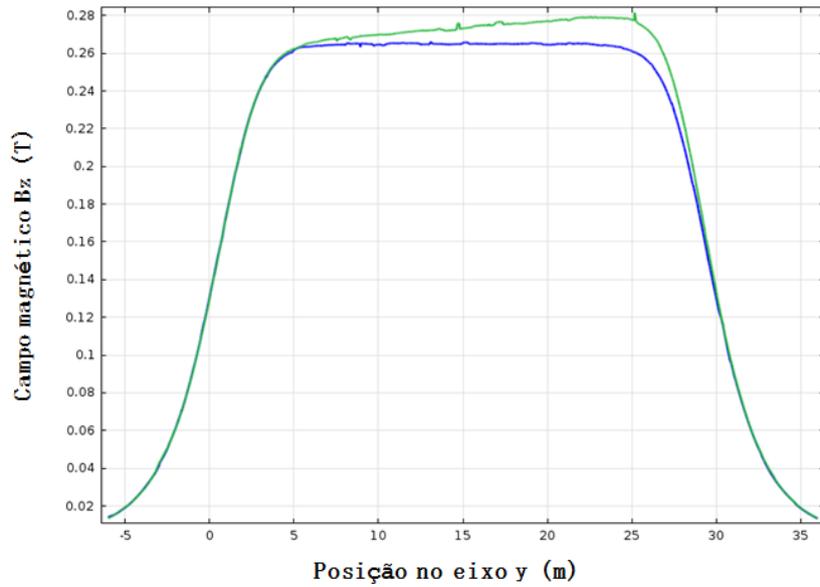


Figura 54: Campo magnético B_z na posição y e para inclinações do entreferro a 0° (azul) e $0,5^\circ$ (verde).

O gráfico construído a partir das médias dos pontos no campo magnético B_z no eixo y e utilizando os pontos de máximo do campo magnético B_z no eixo x é apresentado na figura 55. Neste gráfico é possível sugerir uma relação linear entre os campos magnéticos B_z no plano xy em função dos ângulos medidos.

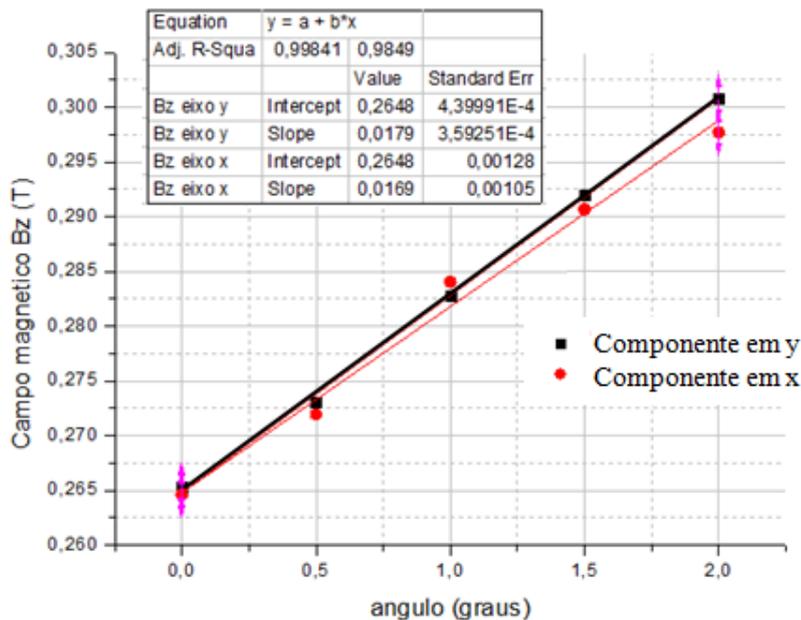


Figura 55: Projeção da variação da amplitude máxima das componentes do campo magnético B_z , em relação aos eixos x e y, de um entreferro em função de sua inclinação.

5.3 – Discussão de um novo ondulador

Na caracterização do Ondulador apresentada neste trabalho foi percebido que este equipamento possuía uma instabilidade mecânica que prejudica a reprodutibilidade da medida do campo magnético B_z .

O ondulador é a peça fundamental para um FEL e em outros laboratórios como o *Turkish Accelerator and Radiation Laboratory at Ankara (TARLA)* na Turquia [38] há mais de um ondulador, figura 56, isto possibilita que nesse laboratório haja diversas linhas de pesquisas associada diferentes comprimentos de radiações. Sabendo que o ondulador não está em seu pleno funcionamento e da utilidade que este equipamento pode fornecer, foi realizada uma discussão de um novo ondulador.

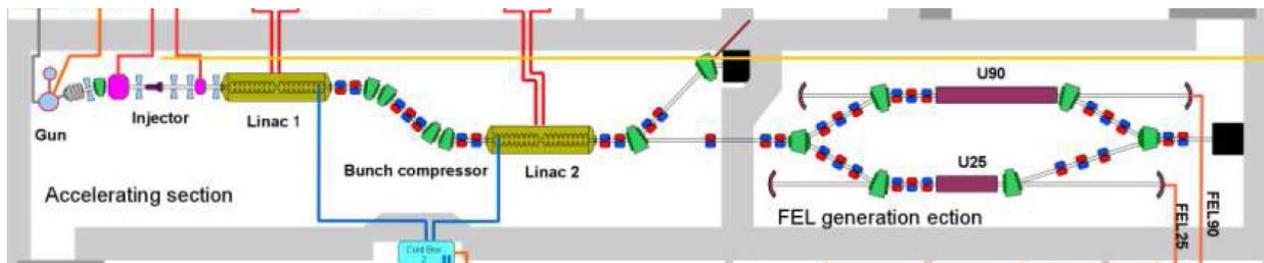


Figura 56: Configuração do Laser de Elétrons Livres TARLA com dois onduladores, localizado na Turquia [38].

O ondulador possui diversas características físicas e mecânicas, onde podemos destacar: tipo de ondulador, número de períodos, comprimento de onda λ , escolhas das estruturas e materiais de fabricação dos ímãs, estimativa da amplitude do campo magnético B_0 e as tolerâncias representadas pela 1ª e 2ª integrais.

Para a discussão de um novo ondulador para este trabalho, a configuração escolhida foi a *Hybrid* com o mesmo número de períodos e utilizando a mesmo desenho mecânico do ondulador utilizado no projeto CREOL.

Nesse contexto, aplicando a equação 1, onde podemos assumir que o ângulo θ é pequeno e a equação 16, definidas nos capítulos 1 e 5, podemos calcular as curvas da figura

57 para diferentes configurações de comprimento, para opera com a energia do acelerador disponível, que é entre 0.8 -1.8 MeV.

$$\lambda = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right), \text{ onde } K = \frac{eB_0\lambda_u}{2\pi mc} \quad (27)$$

$$B_0[\text{T}] = 3,30 \exp \left\{ -\frac{g}{\lambda_u} \left(4,94 - 1,45 \frac{g}{\lambda_u} \right) \right\} \quad (28)$$

Assim para discussão do projeto do novo ondulator foram calculados os comprimentos de onda λ_u , gaps e os campos magnéticos B_0 que podem ser observados na tabela 10.

Tabela 10: Parâmetros utilizados para calcular as curvas do comprimento de onda requerido em função da energia do feixe de elétrons.

Comprimentos de onda λ_u (mm)	Gaps (mm)	Amplitude dos Campos magnéticos B_0 (T)
4	3,0; 2,5 e 2,0	0,18
8	6,0; 5,0 e 4,0	0,26
16	12; 10 e 8,0	0,40

Os comprimentos de onda de 4 mm e 8 mm estão na faixa do infravermelho longínquo (25 a 1000 μ m). Assim, construir um ondulator com 4 mm não mudaria as aplicações do FEL, porem mecanicamente é difícil obter um comprimento de onda desta ordem. Para o ondulator de 8 mm obtemos a configuração original construído pelo CREOL, onde utilizando este novo modelo juntamente com o anterior consertado seria possível construir uma configuração com dois onduladores e tendo a possibilidade de trabalhar com valores específicos para *gaps* diferentes.

O comprimento de onda de $\lambda_u = 16$ mm estaria na faixa de frequência inicial do infravermelho longo e indo em direção à faixa das micro-ondas. Também é possível observar que para o comprimento de onda de $\lambda_u = 16$ mm, os valores dos campos magnéticos iniciais influenciam a faixa de frequência requerida pelo ondulator. Aumentando a energia do acelerador seria possível chegar a comprimentos de onda próximos do infravermelho médio.

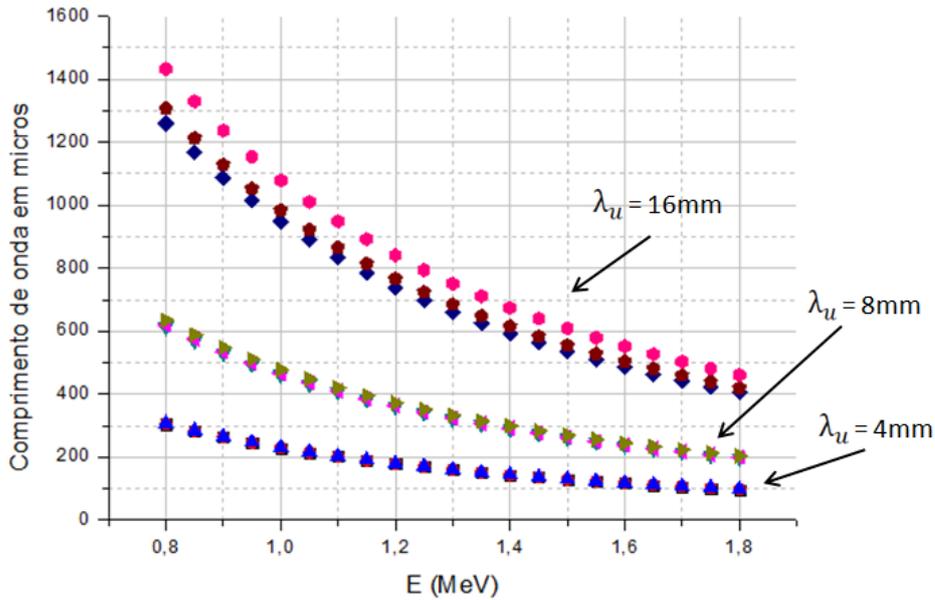


Figura 57: comprimento de onda requerido λ em função da energia do feixe de elétrons para alguns comprimentos de onda do ondulador λ_u .

O Ondulador apresentado neste trabalho possui apenas um grau de liberdade na altura dos entreferros. Foi observado que essa variação na altura auxilia no refino do valor da amplitude do campo magnético do Ondulador, que é um parâmetro fundamental para a trajetória do feixe de elétrons. Porém possuir apenas um grau de liberdade prejudica a maleabilidade do equipamento, se tornando suscetível a erros. Uma forma de amenizar essa situação é desenvolver uma nova geometria com dois graus de liberdade onde os entreferros possam inclinar nos dois sentidos horário e anti-horário e uma melhor fixação dos entreferros para que não haja folgas que prejudicam o equipamento.

6 - Conclusão

Este trabalho visa contribuir para a proposta de implantação de um laboratório multiusuário para aplicação e desenvolvimento de um FEL Realimentado, para operar na faixa do infravermelho longínquo entre 250 – 1000 μm . Foi desenvolvido o arranjo experimental para caracterização e a modelagem numérica dos dispositivos magnéticos e de inserção, dipolo, quadrupolo e o Ondulador.

A proposta do projeto é baseada no reaproveitamento dos componentes de um FEL anteriormente implementado no *College of Optics & Photonics* (CREOL), na Universidade Central da Florida entre 1997-2001. Deste modo, foi realizado o estudo de viabilidade para o reaproveitamento destes dispositivos, o que nos permitiu familiarizar com a técnica. Em uma primeira etapa, foram elaborados os instrumentos para teste e caracterização dos componentes mecânicos e eletrônicos. Os componentes mecânicos foram testados e documentados em CAD, utilizando a software *SolidWorks*. A segunda etapa foi voltada para a análise de dos dipolos, quadrupolos e do Ondulador. Para tal, foram realizadas medidas magnéticas e os resultados experimentais foram analisados a partir de modelagens numéricas.

As medidas experimentais do dipolo e quadrupolo foram realizadas no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) utilizando um novo sistema SCADA proposto para controle Laser de Elétrons Livres, em desenvolvimento como trabalho complementar a esta dissertação [3]. Um sistema de caracterização experimental utilizando uma mesa magnética foi desenvolvido para caracterização do campo magnético. Devido a sua geometria, a caracterização do quadrupolo foi realizada de modo indireto. Também foi elaborado um sistema de medição para o campo magnético em função da corrente elétrica utilizando um gaussímetro e um osciloscópio. Os resultados experimentais apresentados no dipolo e quadrupolo sugerem que estes componentes podem ser reaproveitados em um novo projeto.

A caracterização do Ondulador foi realizada em colaboração com o Laboratório Nacional da Luz Síncrotron (LNLS). Os resultados das medidas do campo magnético no Eixo Axial do Ondulador mostram uma instabilidade mecânica, que comprometem os a reprodutibilidade do método experimental do campo magnético B_z para a sua reutilização em um novo projeto.

As modelagens numéricas do dipolo, quadrupolo e Ondulador para 50 períodos foram elaboradas em três dimensões utilizando o software COMSOL *Multiphysics*. Nas simulações do dipolo e quadrupolo é possível modificar o valor da corrente elétrica, que altera o módulo do campo magnético, sendo possível mostrar a relação entre esses dois parâmetros físicos e posteriormente realizar trabalhos com a inserção de um feixe de elétrons. No Ondulador, a simulação pode ter seus valores de comprimento de onda e *gap* alterados, permitindo prospectar novas configurações para o projeto de um novo Ondulador *hybrid*.

O software COMSOL aplicado na modelagem numérica possui grande sensibilidade nas especificações da malha (*mesh*), nas escolhas dos desenhos e nas condições de contorno. Podendo provocar discontinuidades e artefatos numérico nos cálculos do campo magnético em relação à posição, e por consequência, discrepâncias significativas em relação aos resultados esperados. Uma atenção especial deve ser dedicada para verificação da consistência dos resultados.

Foi realizada a modelagem numérica de um período de campo, de Ondulador tipo *Hybrid*, com o objetivo de determinar quantitativamente, a sensibilidade das amplitudes dos campos magnéticos do Ondulador B_z nas direções x e y em função de pequenas variações dos ângulos no entreferro. Os resultados indicam uma sensibilidade entre a simetria do campo magnético e variações nos ângulos dos entreferros.

A instabilidade mecânica do Ondulador nos motivou a discussão de um novo projeto, dentro do espectro do infravermelho longínquo e utilizando um acelerador de elétrons com 1,7 MeV de energia. Foram testados diferentes comprimentos de onda λ_u e diferentes intensidades de campo magnético B_0 .

Como proposta para continuidade do trabalho, se apresentam dois grandes desafios. O primeiro é incluir a análise dinâmica do feixe de elétrons, a partir dos elementos constituintes aqui apresentados (Ondulador, Dipolo e Quadrupolos). A plataforma de simulação COMSOL inclui uma biblioteca para simulação do feixe de elétrons. O segundo é o projeto de um novo ondulador mais robusto mecanicamente e com ajuste de campo individual que compense não apenas as variações de amplitude do campo, devido à confecção dos ímãs e entreferro, mas também sua orientação.

7 - Bibliografia

- [1] C. A. Brau, *Free Electron Laser*, Academic Press, 1990.
- [2] M. Tecimer, *Time – Domanin analysis and technology of THz Free Electron Lasers*, Tel – Aviv University. : Faculty of Engineering. Departamento f Electical Engineering – Physical Electronics. , 2005.
- [3] J. M. B. Pereira, "Sistema de controle da óptica de um Laser de Elétrons Livres," Dissertação (Mestrado Profissional em Instrumentação Científica) Coordenação de Formação Científica, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas CBPF. , Rio de Janeiro, 2015. Dissertação a ser submetida.
- [4] Paul A. Tipler & Ralph A. Llewellyn , *Física Moderna*, LTC, 2010.
- [5] V. S. A Bagnato., *Os Fundamentos da Luz Laser*, Instituto de Fisica São Carlos. Universidade de São Paulo.
- [6] S. A. Zvyagin, M. Ozerov, E. Čížmár, D. Kamenskyi, S. Zherlitsyn, T. Herrmannsdörfer, J. Wosnitza, R. Wünsch and W. Seidel, "Terahertz-range free-electron laser electron spin resonance spectroscopy: Techniques and applications in high magnetic fields," *Review of scientific instruments*, vol. 80, 2009.
- [7] J. Clarke, *Insertion Devices - Introduction to Synchrotron Radiation*, ASTeC - Daresbury Laboratory.
- [8] L. F. Monteiro., *Modelo Hidrodinâmico para Quantum Free electron Laser*, Tese Doutorado. Instituto de Física. Universidade Federal Fluminense 2010.
- [9] Accelerator Science and Technology Center (ASTeC), "ALICE free electron laser," 2015. [Online]. Available: <http://www.stfc.ac.uk/astec/17452.aspx>. [Accessed 12 04 2015].
- [10] G. Dattoli, A. Renieri, A. Torre, "Lectures on the Free Electron Laser Theory and Related Topics," Roma, 1993, pp. 117-124.
- [11] R. Bonifacio. B. Mc Neil. A. C. J. Paes. L. de Salvo. R. M. O. Galvão, "A Far Infrared Super Radiant FEL," *Int J Infrared Milli Waves*, vol. 28, p. 699–704, 2007.
- [12] J. Blau, K. Cohn, W. B. Colson, R. Vigil, "FREE ELECTRON LASERS IN 2013," *Proceedings of FEL2013*, pp. 486-490, 2013.
- [13] Ryan M. Smith, Mark A. Arnold, "Terahertz Time-Domain Spectroscopy of Solid Samples:

- Principles, Applications and Challenges," Iowa , 2011, pp. 637-639.
- [14] Tan Ping, Huang Jiang, Liu KaiFeng, Xiong YongQian, Fan MingWu, "Terahertz radiation sources based on free electron," *SCIENCE CHINA*, vol. 55, pp. 1-15, 2012.
- [15] F. L. B. Ribeiro, "Introdução ao método dos elementos finitos," COPPE/UFRJ - Programa de Engenharia Civil , Rio de Janeiro, 2005.
- [16] G. Singh, *Short Introduction to Finite Element*, 2009.
- [17] B. L. Giacchini, "Uma breve introdução ao método dos elementos finitos," Departamento de Matemática. Instituto de Ciências Exatas. Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais. Belo Horizonte, 2012.
- [18] R. W. Pryor, *Multiphysics Modeling Using COMSOL? A First Principles Approach*, 2011.
- [19] COMSOL, "Introduction to the AC/DC module," 2013.
- [20] M. Tecimer, *Time – Domain analysis and technology of THz Free Electron Lasers*, Tel – Aviv University.: Faculty of Engineering. Department Electrical Engineering – Physical Electronics., 2005.
- [21] R. Hellborg, "Electrostatic-Accelerator Free-Electron Lasers," in *Electrostatic Accelerators Fundamentals and Applications*, 2005, pp. 378-390.
- [22] Luis R. Elias, I. Kimel, D. Larson, D. Anderson, M. Tecimer and Z. Zhefu, "A compact cw free electron laser," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A304*, pp. 219-223, 1991.
- [23] Augusto M. C. Moutinho, Maria Eugénia S. Fronteira e Silva, Mária Áurea C. M. Isidoro da Cunha, *Tecnologia de Vácuo*, Lisboa: Universidade Nova de Lisboa, 1980.
- [24] D. J. Griffiths, *Introduction to Electrodynamics*, New Jersey: Prentice- Hall, 1989.
- [25] J. Tanabe, *Iron Dominated Electromagnets Design, Fabrication, Assembly and Measurements*, 2006.
- [26] M. I. S. (Melexis), *Position Programmable Linear Hall Effect Sensor MLX90215*, 2012.
- [27] G. GÉRIN, "Control system of a Free Electron Laser," CBPF – INSA de Lyon, Rio de Janeiro, 2013.
- [28] G. Mag, *Manual Transdutor de campo magnetico*, Cotia .
- [29] *COMSOL Multiphysics User's Guide*, 2012.

- [30] R. N. Faria, L.F.C.P. Lima, *Introdução ao magnetismo dos materiais*, São Paulo: Livraria da Física, 2005.
- [31] K. D. Machado, *Teoria do Eletromagnetismo*, Ponta Grossa: UEPG, 2002.
- [32] M. D. J. R. Peter Schmüser, *Ultraviolet and Soft X-Ray Free-Electron Lasers - Introduction to Physical Principles, Experimental Results, Technological Challenges*, Springer, 2009.
- [33] Jia Qi-ka, Zhang Shancai, Lu Shengkuan, He Duohu. Cao Yun, Dai Zhimin, Zhao Zhentang., "Desing od undulator for the Shanghai DUV-FEL," *Proceedings of the FEL Conference*, pp. 494-497, 2004.
- [34] J. G. L. R. E. Paul P. Tesch, "Final construction of the CREOL 8 mm period hybrid undulator," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A375*, pp. 504-507, 1996.
- [35] G. Tosin, J.F. Citadini, R. Basílio and M. Potye, "Development of insertion device magnetic," *Proceedings of EPAC 2006*, pp. 3113-3115, 2006.
- [36] WaveMetrics, *IGOR Pro Versão 6.36*, Oregon, 2014.
- [37] Ana Mladenovic Vuckovic and Slavoljub Aleksic, "Magnetic Field Determination for Different Block," *FACTA UNIVERSITATIS*, vol. 23, no. 3, pp. 259-272, 2010.
- [38] A. Aksoyy, Ö. Karsh, Ç. Kaya, Ö. Yavas, S. Ozkorucuklu, P. Arıkan, "The turkish accelerator and radiation laboratory in ankara (TARLA) project," in *FEL2014 - Proceedings*, Basel, Switzerland, 2014.