



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

DESENVOLVIMENTO DE HARDWARE E SOFTWARE PARA GERAÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO CONTROLÁVEL UTILIZANDO GAIOLA DE HELMHOLTZ

Thiago Henrique Ferreira da Silva

Brasília, Setembro de 2022

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**DESENVOLVIMENTO DE HARDWARE E SOFTWARE
PARA GERAÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO CONTROLÁVEL
UTILIZANDO GAIOLA DE HELMHOLTZ**

Thiago Henrique Ferreira da Silva

*Relatório submetido ao Departamento de Engenharia
Elétrica como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Eletricista*

Banca Examinadora

Prof. Dr. Renato Alves Borges, ENE/UnB _____
Orientador

Prof. Dr. Geovany Araújo Borges, ENE/UnB _____
Co-orientador

Prof. Dr. William Reis Silva, FGA/UnB _____
Avaliador

Dedicatória

Dedico este trabalho ao maior arquiteto, que nos dá a oportunidade de compreender o funcionamento de sua extraordinária criação, o universo.

Thiago Henrique Ferreira da Silva

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à minha companheira, Ana Vitória, que torna colorido a minha vida quando os meus dias são cinza. Aos meus pais, que me incentivaram a estudar desde cedo. Às minhas irmãs, que me ensinaram que eu sou o único representante dos meus sonhos. Aos meus companheiros de faculdade, os "Eletrobiomigos", sem eles eu não iria tão longe. Aos companheiros de equipe, Danilo de Freitas e Gabriel Sertão pela contribuição no desenvolvimento do propagador que será integralizado futuramente no software. Ao João do Laboratório Aberto de Brasília, pelo desenvolvimento do gabinete do terceiro protótipo do circuito de inversão. Aos professores Renato e Geovany, que me ensinaram a ver a beleza intrínseca nos ramos de estudo de Controle e Eletrônica. Agradeço a FAPDF pelo financiamento do projeto AlfaCrux. Por fim, agradeço a todos que contribuíram e que contribuem para o desenvolvimento de uma sociedade que dê a oportunidade da formação com qualidade de ensino, uma vez que, sem o financiamento público, não seria possível a minha formação na UnB.

Thiago Henrique Ferreira da Silva

RESUMO

Este trabalho, executado no âmbito do Laboratório de Controle e Simulação de Sistemas Aeroespaciais (LODESTAR), tem por objetivo o desenvolvimento de *hardware* e *software*, com interface gráfica, para a geração de campo magnético controlável voltado para aplicações no simulador de pequenos satélites do LODESTAR. O sistema atual conta com uma gaiola de Helmholtz com dois pares de bobinas por eixo, estação de trabalho, e fontes de tensão controláveis. A proposta deste trabalho contempla atualizações e desenvolvimento de novas funcionalidades para a plataforma atual do laboratório. Dentre essas aplicações destacam-se: a reprodução do campo magnético em malha fechada utilizando o modelo *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF) em conjunto com o propagador de órbita *Simplified General Perturbations* (SGP4); e a reprodução dos vetores de campo magnético colhido pelos sensores do satélite, recém lançado, AlfaCrux. Por fim, esse trabalho contempla testes preliminares para validação do novo sistema no contexto dos projetos em curso no LODESTAR.

ABSTRACT

This work, carried out in the scope of the Laboratory of Control and Simulation of Aerospace Systems,(LODESTAR), has the objective of developing hardware and software, with a graphical user interface, for the generation of controllable magnetic field aimed at applications in the small satellite simulator at LODESTAR. The current system has a Helmholtz cage with two coil pairs per axis, workstation, and controllable voltage sources. The proposal of this work includes updates and development of new features for the platform laboratory current. Among these applications stand out: the reproduction, in a closed loop control system, of magnetic field using the International Geomagnetic Reference model Field (IGRF) in conjunction with the Simplified General Perturbations (SGP4) orbit propagator; and the reproduction of the magnetic field vectors harvested by the satellite sensors, newly launched, AlfaCrux. Finally, this work includes preliminary tests for validation of the new system in the context of ongoing projects at LODESTAR

SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	4
1.3	OBJETIVOS DO PROJETO	5
1.4	APRESENTAÇÃO DO MANUSCRITO	5
2	Métodos e Materiais	6
2.1	GERADOR DE CAMPO MAGNÉTICO	6
2.2	PROPAGAÇÃO ORBITAL	8
2.2.1	PARÂMETROS ORBITAIS E MODELO DE CAMPO GEOMAGNÉTICO.....	8
2.3	MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS.....	10
3	Contribuições ao Simulador de Campo Geomagnético LODESTAR	13
3.1	FONTES DE TENSÃO.....	14
3.2	APRIMORAMENTO DO CIRCUITO DE PONTE H	15
3.3	CALIBRAÇÃO DO MAGNETÔMETRO.....	17
3.3.1	OBTENÇÃO DE x_0 , y_0 E z_0	20
3.3.2	OBTENÇÃO DE a , b E c	22
3.4	IDENTIFICAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO DA GAIOLA DE HELMHOLTZ	24
3.4.1	CIRCUITO DA ELÉTRICO DAS BOBINAS	24
3.4.2	IDENTIFICAÇÃO DA MATRIZ DE AJUSTE DE TENSÃO	26
3.4.3	CÁLCULO DA TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO A PARTIR DO CAMPO DE REFERÊNCIA	28
3.5	SISTEMA EM MALHA FECHADA	28
3.5.1	CONTROLADOR PI	29
3.6	DESENVOLVIMENTO DE INTERFACE UTILIZANDO PYSIMPLEGUI	31
3.6.1	ESTRUTURA DE FLUXO DE EXECUÇÃO NO PYSIMPLEGUI.....	32
3.6.2	THREADING EM PYTHON.....	32
3.6.3	INTERFACE DE OPERAÇÃO DA GAIOLA DE HELMHOLTZ DO LODESTAR	33
3.6.4	VERIFICAÇÃO DAS CONEXÕES DOS SUBSISTEMAS COM O COMPUTADOR.....	33
3.6.5	CALIBRAÇÃO DO MAGNETÔMETRO.....	34
3.6.6	CALIBRAÇÃO DAS BOBINAS	35
3.6.7	CONTROLE DE TENSÃO CONSTANTE	36
3.6.8	CONTROLE DE CAMPO MAGNÉTICO CONSTANTE EM MALHA ABERTA	36

3.6.9	CONTROLE DE CAMPO MAGNÉTICO CONSTANTE EM MALHA FECHADA	38
3.6.10	IMPORTAÇÃO DE VETORES DE CAMPO MAGNÉTICO	38
4	Resultados e Validações por Testes.....	41
4.1	CALIBRAÇÃO DO MAGNETÔMETRO.....	41
4.2	CALIBRAÇÃO DA GAIOLA DE HELMHOLTZ	42
4.3	AVALIAÇÃO DOS SISTEMAS EM MALHA ABERTA E FECHADA.....	43
4.4	RESPOSTA AO DEGRAU DO SISTEMA EM MALHA FECHADA	44
4.5	CONTROLE PI EM REGIME PERMANENTE.....	46
4.6	REPRODUÇÃO DO CAMPO GEOMAGNÉTICO MEDIDO PELO ALFACRUX.....	49
4.7	RECONSTRUÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO NA ÓRBITA DO ALFACRUX.....	52
5	Conclusões.....	54
5.1	PERSPECTIVAS FUTURAS	54
5.1.1	INTEGRAÇÃO DO SOFTWARE NO AMBIENTE LINUX	54
5.1.2	INTEGRAÇÃO ENTRE O PROPAGADOR ORBITAL E A INTERFACE	55
5.1.3	APRIMORAMENTO DA INTERFACE	55
5.1.4	CALIBRAÇÃO DA GAIOLA DE HELMHOLTZ	56
5.1.5	ANÁLISE DA VARIÂNCIA DAS ESTIMATIVAS	56
5.1.6	CARACTERIZAÇÃO DO ERRO EM SIMULAÇÃO DE MALHA ABERTA E MALHA FECHADA	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		57
Anexos.....	60	
I.1	ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO DE INVERSÃO	61
I.2	LAYOUT PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO	68
I.3	FIRMWARE CIRCUITO DE INVERSÃO	75

LISTA DE FIGURAS

1.1 Sistema de comunicação de cobertura global proposto por Arthur C. Clarker. Fonte [1].	1
1.2 Réplica do primeiro satélite artificial da história, Sputnik 1. Fonte [1].	2
1.3 Nanosatélite AlfaCrux desenvolvido na Universidade de Brasília. Fonte [2].	3
1.4 Gaiola de Helmholtz do LODESTAR.	4
2.1 Gaiola de Helmholtz do LODESTAR. Fonte [3]	7
2.2 Modelo da Bobina de Helmholtz em um eixo.	8
2.3 Resumo dos parâmetros orbitais definidos pela NASA. Fonte [4].	9
2.4 Sistemas de referência ECI e ECEF. Fonte [5].	10
3.1 Subsistemas que formam o simulador de campo geomagnético do LODESTAR.	13
3.2 Fontes de alimentação do simulador de campo geomagnético.	14
3.3 Conversor GPIB/USB 2.0 utilizado na conexão entre a fonte e o computador.	14
3.4 Tabela de comandos ARSP e seu equivalente em SCPI.	15
3.5 Primeiro protótipo do circuito de inversão de corrente. Fonte [3].	16
3.6 Simulação 3D do segundo protótipo desenvolvido.	17
3.7 Segundo protótipo após a montagem dos componentes.	17
3.8 Simulação 3D do terceiro protótipo desenvolvido.	18
3.9 Terceiro protótipo após a montagem dos componentes.	18
3.10 Terceiro protótipo no gabinete desenvolvido no Laboratório Aberto de Brasília.	19
3.11 Distorções <i>soft-iron</i> e <i>hard-iron</i> . Fonte [6].	19
3.12 Topologia do controlador para geração de campo variável.	29
3.13 Janela desenvolvida com o código acima.	31
3.14 Estrutura de fluxo de execução baseada em eventos.	32
3.15 Simulação de paralelismo realizado pela biblioteca <i>threading</i> .	33
3.16 Interface da Gaiola de Helmholtz do LODESTAR.	34
3.17 Na esquerda uma verificação reprovada na direita uma verificação aprovada.	34
3.18 Verificação aprovada dos subsistemas da Gaiola de Helmholtz.	35
3.19 Interface da Gaiola de Helmholtz após a calibração do magnetômetro.	35
3.20 Interface da Gaiola de Helmholtz após a calibração das bobinas.	36
3.21 Controle de tensão constante da fontes.	37
3.22 Controle de campo magnético em malha aberta.	37
3.23 Controle de campo magnético em malha fechada.	38

3.24	Formato padrão de campo magnético.	39
3.25	Menu de navegação para a importação do arquivo de um eixo.	39
3.26	Interface após a importação dos vetores de campo magnético.	40
4.1	Em azul os dados do magnetômetro sem correção e em vermelho os dados corridos pelo magnetômetro.	42
4.2	Resposta ao degrau da gaiola em malha fechada nos eixos x, y e z.	45
4.3	Campo nos eixos x, y e z em regime permanente em malha fechada.	47
4.4	Histograma do campo nos eixos x, y e z em regime permanente.	48
4.5	Simulação em malha aberta dos dados coletados pelo AlfaCrux.	50
4.6	Simulação em malha fechada dos dados coletados pelo AlfaCrux.	51
4.7	Simulação em malha fechada dos dados pelo AlfaCrux.	53
5.1	Rastro do satélite na superfície terrestre.	55
5.2	Gráfico apresentado na plataforma em tempo real.	56

LISTA DE TABELAS

3.1	Comandos utilizados na inversão de tensão.....	16
4.1	Constantes obtidas após a calibração do magnetômetro.....	41
4.2	Campos medidos e teóricos da Gaiola de Helmholtz.....	43
4.3	Medidas realizadas no sistema em malha fechada após atingir regime estacionário. . .	46

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

H	Campo magnético	[T]
Z	Impedância elétrica	[Ω]
R	Resistência elétrica	[Ω]
V	Tensão contínua	[V]
I	Corrente contínua	[A]
K_d	Ganho proporcional	
K_i	Ganho integral	[1/s]
M	Matriz de ajuste de tensão	
M_d	Matriz de ajuste de tensão aproximada	
E_h	Erro de campo magnético	[T]
E_v	Erro de tensão	[V]
N	Quantidade total de amostras	[V]
n	Número de espiras	

Símbolos Gregos

τ	Período de Amostragem	[s]
∇	Gradiente	
Σ	Somatório	

Subscritos

x	Referente ao eixo x
y	Referente ao eixo y
z	Referente ao eixo z
n	Referente à n-ésima amostra
m	Referente ao valor medido
c	Referente ao valor corrigido
r	Referente ao valor calibrado

Sobrescritos

T	Transposta da matriz
n	Número de espiras da bobina
L	Lado da bobina
-1	Inversa da matriz

Siglas

ECEF	<i>Earth Centered, Earth Fixed</i>
ECI	<i>Earth Centered Inertial</i>
GPIB	<i>General Purpose Interface Bus</i>
IGRF	<i>International Geomagnetic Reference Field</i>
LEO	<i>Low Earth Orbit</i>
LODESTAR	Laboratório de Simulação e Controle de Sistemas Aeroespaciais
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
PCI	Placa de Circuito Impresso
SCPI	<i>Standard Commands for Programmable Instruments</i>
SCPI	<i>Standard Commands for Programmable Instruments</i>
SGP4	<i>Simplified General Perturbations 4</i>
TLE	<i>Two-Line Element</i>
TMSL	<i>Test and Measurement Systems Language</i>
UnB	Universidade de Brasília

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

Até 1945, a ideia de enviar mensagens de rádio para o espaço e ao redor do mundo era apenas ficção científica. Em outubro desse mesmo ano, Arthur C. Clarke propôs um sistema de comunicação composto por três satélites em uma órbita específica, hoje conhecida como órbita geoestacionária [1]. Nessa proposta os três satélites se mantêm defasados de 120°, conforme ilustrado na Figura 1.1, permitindo assim que qualquer sinal enviado a uma estação atingiria seu alvo, independente do horário e da posição de envio e de recepção, isto é, programas de TV não seriam interrompidos ao longo do dia, por exemplo.

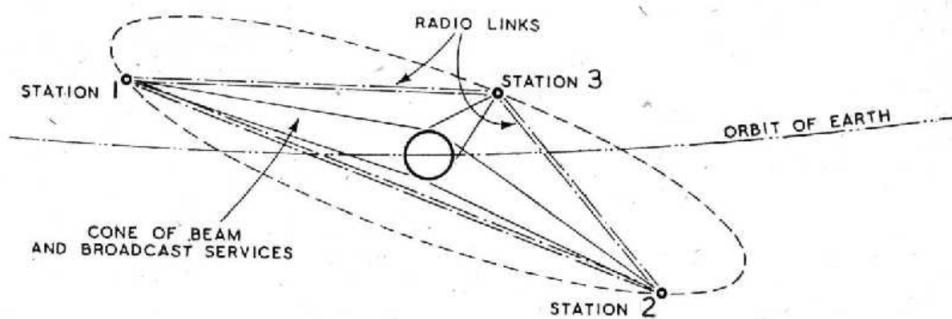


Figura 1.1: Sistema de comunicação de cobertura global proposto por Arthur C. Clarke. Fonte [1].

Já em outubro de 1957, a ficção científica começa a se tornar realidade com o lançamento do primeiro satélite artificial, Sputnik 1 [7]. Esse satélite, conforme ilustrado na Figura 1.2, apresentava uma esfera de metal polido de 58 centímetros de diâmetro, com quatro antenas para transmissão de sinais de rádio. O Sputnik se tornou símbolo do início da corrida espacial.

Atualmente, os sistemas de comunicação via satélites desempenham um papel vital no sistema global de comunicações, uma vez que são utilizados para estabelecer a comunicação entre vários pontos da Terra. Existem agora aproximadamente 5.000 satélites artificiais orbitando a Terra, [8],

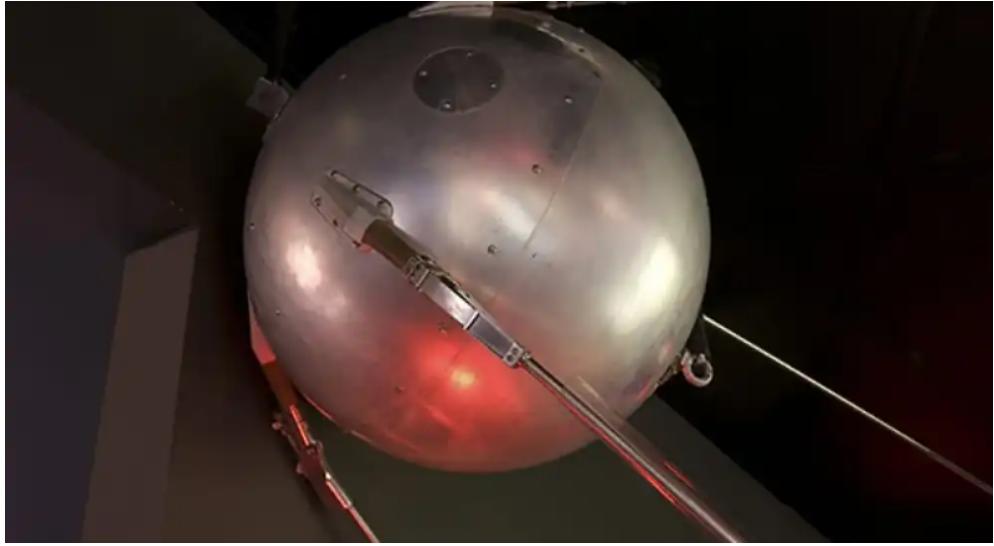


Figura 1.2: Réplica do primeiro satélite artificial da história, Sputnik 1. Fonte [1].

e retransmitindo sinais analógicos e digitais que transportam voz, vídeo e dados de um ou vários locais em todo o mundo.

De forma geral, os satélites são classificados a depender do seu tamanho e massa total. Por exemplo, nanosatélites é a classe de satélites de pequeno porte com massa entre 1 e 10 kg dentre os quais se destacam os CubeSats. Um CubeSat 1U possui o formato de um cubo de aresta de 10 centímetros e massa de inferior a 2 kg [9]. O desenvolvimento do projeto CubeSat iniciou em 1999 em uma parceria entre a Cal Poly (*California Polytechnic State university*) e Universidade de Stanford. Cabe ressaltar que os CubeSats podem ser estendidos a várias unidades e em diferentes configurações [8].

O controle de atitudes de satélites é uma das questões mais importantes em várias missões espaciais. Atualmente, visando atender os requisitos dessas missões, o projeto de controladores de atitude com alta precisão tornou-se cada vez mais importante [10]. O controle de atitude a partir da ação magnética é comum para micro e nanossatélites em órbita baixa [11], sendo utilizado para o amortecimento da velocidade angular, estabilização ao longo do vetor de indução geomagnética e estabilização por spin. A estabilização adequada requer determinação em tempo real do movimento de atitude, o que é obtido pelo processamento das medidas dos sensores de sol, magnetômetros, giroscópios, e sensores de estrelas. Porém a tendência para miniaturização e simplificação conduz os requisitos dos sistemas de controle a um conjunto mínimo de *hardware* [12].

Dentro deste contexto, no dia primeiro de abril de 2022 foi lançado o AlfaCrux, um nanossatélite de dimensão 1U, apresentado na Figura 1.3, desenvolvido na Universidade de Brasília (UnB) que tem por objetivo proporcionar experiência prática aos alunos e professores no processo de desenvolvimento e operação de uma missão espacial [13].

Com a finalidade de se estudar o ambiente espacial e aplicações satelitais, foi desenvolvida na UnB pela equipe do Laboratório de Simulação e Controle de Sistemas Aeroespaciais (LODESTAR)

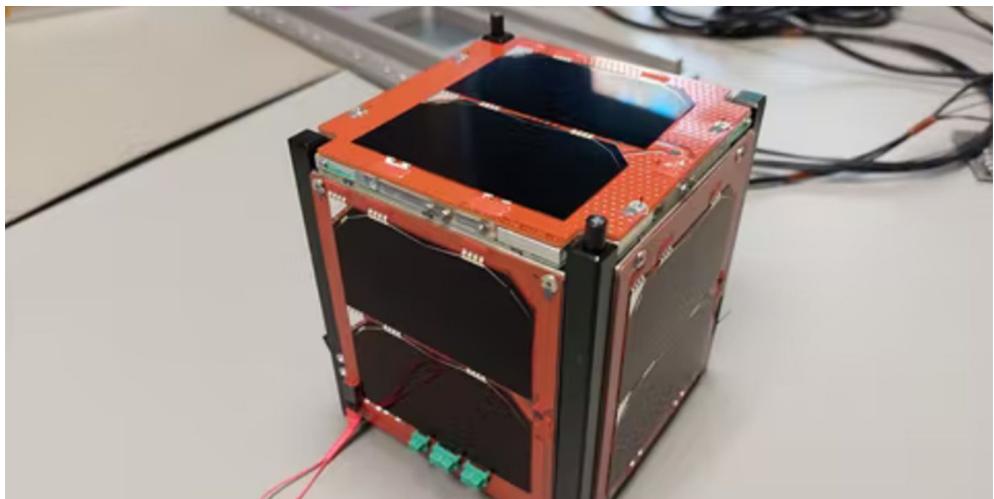


Figura 1.3: Nanosatélite AlfaCrux desenvolvido na Universidade de Brasília. Fonte [2].

uma plataforma de testes de pequenos satélites.

Essa plataforma de testes é composta por vários sistemas, sendo a Gaiola de Helmholtz, apresentada da Figura 1.4, o foco desse trabalho. Esse sistema tem por objetivo auxiliar estudos sobre o comportamento do campo geomagnético e o seu impacto nas tecnologias para aplicações espaciais, a exemplo do sistema de determinação e controle de atitude de pequenos satélites a partir da ação magnética. O sistema atual do simulador conta com dois pares de bobinas por eixo, fontes de tensão controláveis, sensor de campo magnético e estação de trabalho.



Figura 1.4: Gaiola de Helmholtz do LODESTAR.

1.2 Definição do problema

Esse trabalho apresenta novas contribuições aos resultados desenvolvidos no LODESTAR no contexto de geração de campo magnético variável e suas aplicações. Nesse contexto, destacam-se os primeiros resultados obtidos em [3] sobre o controle em malha aberta da gaiola de Helmholtz, e também [14] com resultados em malha fechada e aplicações de controle para amortecimento do momento angular. Assim, esse trabalho apresenta atualizações e desenvolvimentos de novas funcionalidades para a plataforma atual do laboratório. De forma resumida, os principais requisitos desse trabalho são:

- Simular dinamicamente o campo magnético de órbitas baixas (LEO).
- Reproduzir o ambiente magnético do satélite AlfaCrux com base nas medidas realizadas em órbita.
- Desenvolver um *software* com interface gráfica para usuário que permita a operação da Gaiola de Helmholtz.

1.3 Objetivos do projeto

O objetivo desse trabalho consiste na simulação de campo magnético em malha fechada tanto com base nas medidas realizadas pelo satélite AlfaCrux em órbita quanto com dados estimados a partir de TLEs, promovendo melhorias no *hardware* do circuito inversor de corrente e implementando uma interface gráfica que facilite a operação do sistema. Assim, esse trabalho traz contribuições ao desenvolvimento de sistemas para determinação e controle de atitude a partir da ação magnética no LODESTAR.

1.4 Apresentação do manuscrito

O restante do manuscrito está apresentado da seguinte forma. No Capítulo 2 é feita uma descrição dos métodos e materiais para contextualizar o leitor de forma rápida sobre os fundamentos teóricos envolvidos no trabalho. Em seguida, o Capítulo 3 a contribuição principal do trabalho, o desenvolvimento do *software* para geração de campo geomagnético controlável. Resultados experimentais são discutidos no capítulo 4, seguido das conclusões no capítulo 5. Os anexos contém materiais complementares para facilitar o entendimento do trabalho.

Capítulo 2

Métodos e Materiais

Esse capítulo apresenta de forma resumida os principais métodos e materiais empregados na obtenção dos resultados. Pretende-se contextualizar o leitor sobre os fundamentos teóricos com as principais referências bibliográficas empregadas no trabalho.

2.1 Gerador de campo magnético

Dentre várias configurações de simuladores de campo geomagnético, tais como, a gaiola de Helmholtz, a gaiola de Merritt e a gaiola de Ruben em que a gaiola de Helmholtz é considerada uma das mais simples [15]. Uma gaiola de Helmholtz em uma direção consiste de dois enrolamentos com eixos alinhados e se a estrutura for perfeitamente simétrica e os enrolamentos suficientemente próximos é possível obter uma região na qual o campo magnético aproximadamente constante na direção dos eixos dos enrolamentos [16].

A gaiola de Helmholtz é um dispositivo capaz de produzir um campo magnético controlado. O uso de tal sistema está relacionado com vários campos de estudos, dentre os quais se destacam as aplicações espaciais, [17], foco desse trabalho. Por questões construtivas é comum a montagem da Gaiola de Helmholtz com espiras quadradas, estrutura adotada no projeto desenvolvido no LODESTAR, conforme pode ser visto na Figura 2.1.

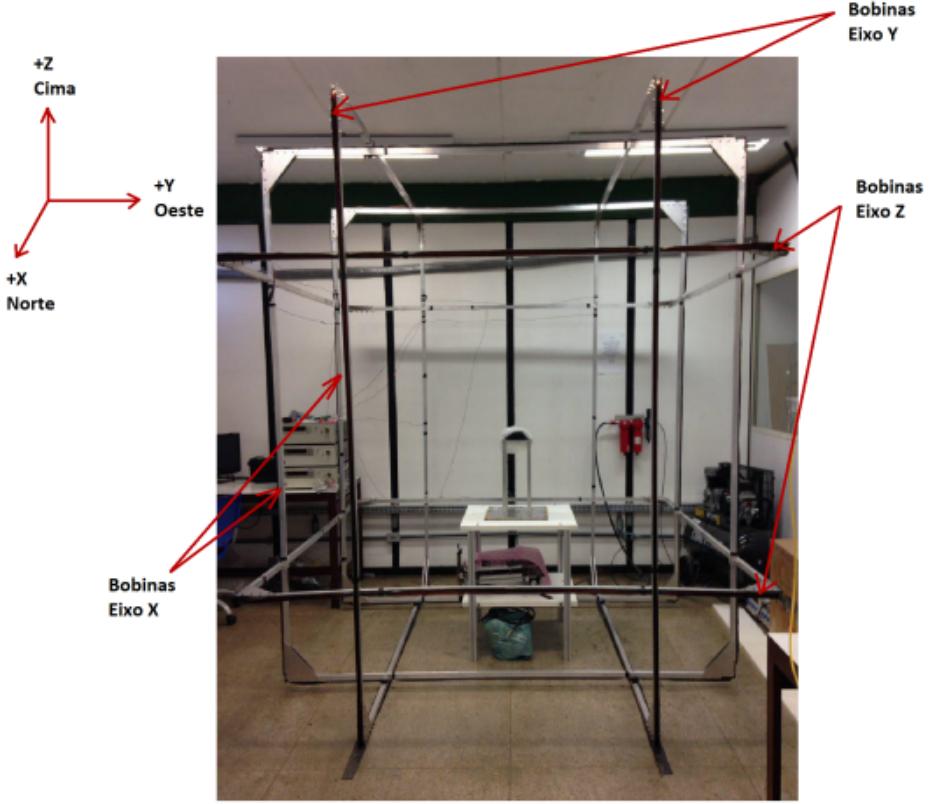


Figura 2.1: Gaiola de Helmholtz do LODESTAR. Fonte [3]

O campo magnético gerado por no centro de uma par de bobinas, de Helmholtz, com a configuração ilustrada na Figura 2.2, é dado por

$$H = \frac{8\mu n I}{\pi L} \frac{1}{\left(\left(\frac{D}{L}\right)^2 + 1\right) \sqrt{\left(\frac{D}{L}\right)^2 + 2}}, \quad (2.1)$$

em que n é o número de espiras de cada bobina, L é o comprimento da bobina, D a distância entre as espiras e I a corrente que flui pela bobina, maiores informações vide [17]. Observa-se na Equação (2.1) a linearidade entre o campo gerado pelas bobinas e a corrente que flui pelas mesmas, essa relação será utilizada como modelo base no Capítulo 3.

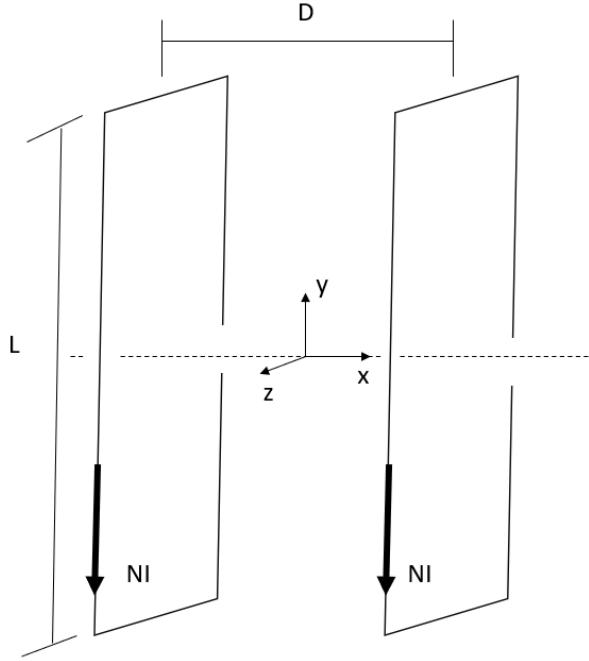


Figura 2.2: Modelo da Bobina de Helmholtz em um eixo.

2.2 Propagação orbital

2.2.1 Parâmetros orbitais e modelo de campo geomagnético

Para as aplicações de reconstrução das características magnéticas a partir de medidas em órbita, o formato de elementos de duas linhas TLE(*Two-Line Element*) é utilizado. O TLE é um formato de dados que codifica as informações de órbita em uma dada época. A Figura 2.3 mostra um resumo dos parâmetros de um TLE, para uma explicação detalhada de cada parâmetro vide [18]. Nesse trabalho, foram utilizados os TLEs fornecidos pela organização sem fins lucrativos CelesTrak. Essa organização fornece TLEs diariamente e gratuitamente em [19]. A representação de dados TLE é específica a modelos simplificados de perturbação. No sistema desenvolvido nesse trabalho, a plataforma utiliza o TLE mais atual do satélite fornecido para a propagação da órbita.

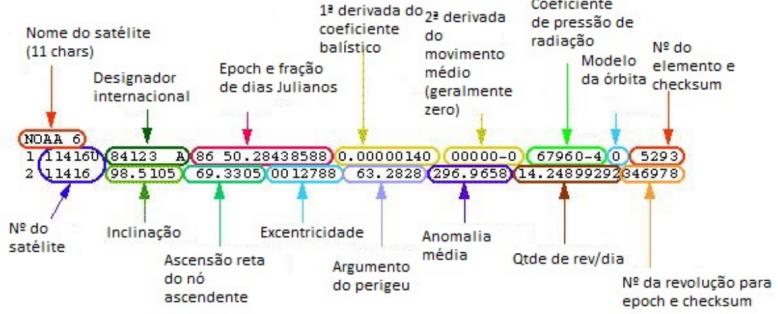


Figura 2.3: Resumo dos parâmetros orbitais definidos pela NASA. Fonte [4].

Nesse trabalho, foi considerado o propagador SGP4 (Petubações Gerais Simplificadas 4), proposto por Ken Cranford na década de 70, para modelar e propagar órbitas de satélites em órbita baixa [20]. O propagador SGP4 leva em conta na propagação os seguintes aspectos: pertubações gravitacionais, radioativas, pertubações devido a geometria terrestre e pertubações devido ao arrasto atmosférico [20]. Sua implementação neste trabalho foi realizada com a biblioteca SkyField, mais informações em [21], a qual possui nativamente o propagador SGP4. Assim, com as informações dos parâmetros orbitais clássicos, e o instante de tempo, as funções do Skyfield fornecem a posição do satélite tanto no sistema de coordenadas ECI (em inglês, *Earth-Centered Inertial*), quanto no sistema de coordenadas ECEF (em inglês, *Earth-Centered Earth-Fixed*), [18]. A Figura ?? ilustra os sistemas de coordenadas ECI e ECEF. Nos dados simulados desse trabalho, os campos analisados serão descritos no sistema de referência ECEF, já na reprodução dos dados medidos pelo satélite AlfaCrux, o sistema de referência é do próprio satélite (referencial do corpo).

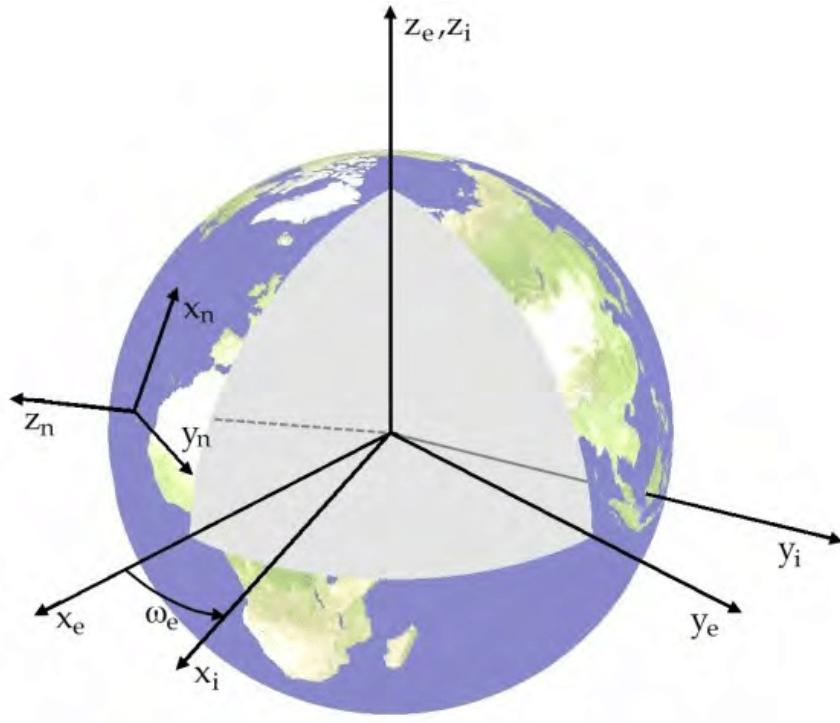


Figura 2.4: Sistemas de referência ECI e ECEF. Fonte [5].

O campo de referência geomagnético internacional (IGRF) é um modelo matemático padrão de descrição do campo magnético da Terra. Esse modelo é utilizado amplamente em estudos de campo magnético [22]. Nesse trabalho será utilizado a biblioteca Python igrf, mais informações em [23].

2.3 Método dos mínimos quadrados

Finalmente, o ajuste dos parâmetros do modelo matemático proposto para o gerador de campo magnético é feito pelo MMQ [24]. Trata-se de uma técnica muito utilizada para ajustes de parâmetros a dados experimentais [25]. O método descrito é realizado pelas seguintes etapas:

1. A realização do conjunto de medida de entradas e saídas experimentais.
2. Proposta de modelo para o conjunto de dados.
3. Definição da função erro.
4. Definição da função custo.
5. Minimização da função custo

Por questões didáticas, nessa seção será abordado um problema de ajuste de uma reta a um conjunto de dado, com a finalidade de evidenciar cada etapa.

Seja y um determinada grandeza que se relaciona com a gradeza x da seguinte forma:

$$y = ax + b \quad (2.2)$$

Coletou-se N amostras experimentais: $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), (x_4, y_4) \dots, (x_n, y_n), \dots (x_N, y_N)$.

Deseja-se encontrar os valores de a e b que melhor se ajustem aos dados. Assim, defini-se a função erro, $e(a, b)$. Esta função depende dos coeficiente a e b .

$$e(a, b) = y - ax - b \quad (2.3)$$

A função objetivo, também chamada função custo, representada por $\Psi(a, b)$ realiza a soma quadrática dos erros para o conjunto de amostras, conforme a Equação 2.4. A utilização do quadrado se dá por dois motivos: o primeiro motivo é que erros negativos não podem compensar erros positivos na função objetivo, sendo assim se faz necessário utilizar o erro quadrático; o segundo motivo é que utilizar o quadrado faz com que a função objetivo cresça não com o erro, mas sim o seu quadrado, ou seja, pontos distantes da estimativa serão mais penalizados.

$$\Psi(a, b) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N e_n(a, b)^2 \quad (2.4)$$

Assim, deseja-se minimizar a função objetivo, pois ao minimizá-la os dados experimentais estarão mais ajustados ao modelo. Como a função custo é uma função de múltiplas variáveis, seu mínimo ocorre quando o gradiente da função custo é nulo, ou seja:

$$\nabla \Psi(a, b) = 0 \quad (2.5)$$

Realizando vetorialmente tem-se as seguintes equações:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \Psi}{\partial a} \\ \frac{\partial \Psi}{\partial b} \end{bmatrix} = \sum_{n=1}^N \begin{bmatrix} ex_n \\ -e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Substituindo o erro na Equação 2.7, tem-se:

$$\sum_{n=1}^N \begin{bmatrix} y_n x_n - ax_n^2 - x_n b \\ -y + ax + b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Isolando os termos independentes:

$$\sum_{n=1}^N \begin{bmatrix} y_n x_n \\ -y \end{bmatrix} = \sum_{n=1}^N \begin{bmatrix} ax_n^2 + x_n b \\ -ax - b \end{bmatrix} = \sum_{n=1}^N \begin{bmatrix} x_n^2 & x_n \\ -x & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Observa-se que o problema passa a ser a resolução de um sistema linear:

$$\sum_{n=1}^N \begin{bmatrix} y_n x_n \\ -y \end{bmatrix} = \sum_{n=1}^N \begin{bmatrix} x_n^2 & x_n \\ -x & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Por fim, tem-se a solução:

$$\left(\sum_{n=1}^N \begin{bmatrix} x_n^2 & x_n \\ -x & -1 \end{bmatrix} \right)^{-1} \left(\sum_{n=1}^N \begin{bmatrix} y_n x_n \\ -y \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Assim, tem-se os coeficiente a e b que melhor ajustam um determinado conjunto de dados. Essa técnica é utilizada na calibração de equipamentos em geral, tais como o magnetômetro em [26].

Capítulo 3

Contribuições ao Simulador de Campo Geomagnético LODESTAR

Este capítulo apresenta as principais contribuições deste trabalho de conclusão de curso, a saber, o protótipo funcional do circuito inversor de tensão, necessário para geração de campo magnético em todas as direções e sentidos, e o software para operação e controle de campo magnético com diferentes funcionalidades compatíveis com aplicações em sistemas aeroespaciais. Nas seções seguintes, os diferentes subsistemas, e suas interfaces, são apresentados de forma a caracterizar os componentes principais do simulador de campo geomagnético, e as contribuições realizadas. A Figura 3.1 apresenta uma descrição das interfaces, protocolo de dados, e fluxo de informações que serão descritas ao longo do capítulo.

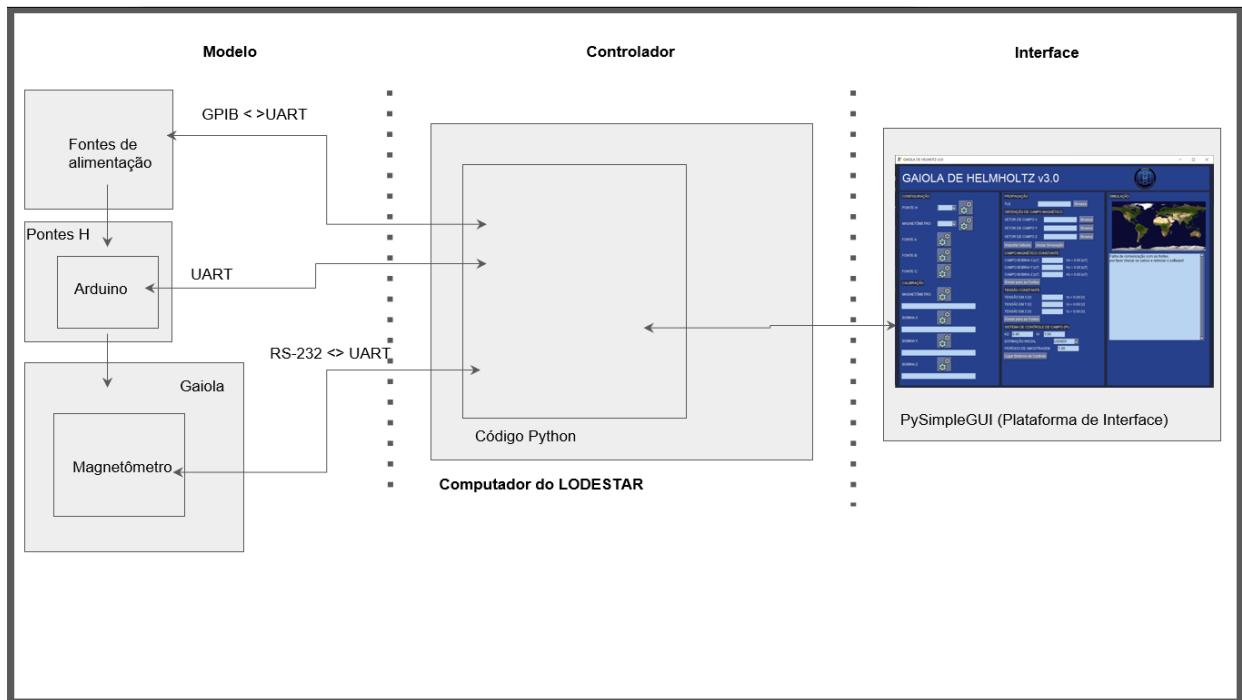


Figura 3.1: Subsistemas que formam o simulador de campo geomagnético do LODESTAR.

3.1 Fontes de tensão

As Fontes utilizadas na plataforma, vide Figura 3.2, são três fontes HP Agilent Keysight 6032A. Cada um possui tensão de saída entre 0 e 60 V, corrente de saída entre 0 e 50 A, precisão de tensão de programação de $0,035\% + 40 \text{ mV}$ de tensão e $0,2\% + 85 \text{ mA}$ de leitura, [27]. As saídas de tensão das fontes são acopladas nas entradas do circuito inversor de polaridade referentes aos eixos Y,Z e X, respectivamente.



Figura 3.2: Fontes de alimentação do simulador de campo geomagnético.

Essas fontes podem ser controladas manualmente ou por computador externo utilizando o barramento GPIB (*General Purpose Interface Bus*). Utilizando um conversor GPIB/USB (*Datasheet* em [28]) apresentado na Figura 3.3, e junto com o *driver Keysight IO Libraries Suite* (disponível em [29]) pode-se controlar a tensão das fontes utilizando o computador da estação de trabalho.



Figura 3.3: Conversor GPIB/USB 2.0 utilizado na conexão entre a fonte e o computador.

Existem duas linguagens de programação utilizadas para controle de instrumentos que são aceitas por essas fontes, sendo elas SCPI (*Standard Commands for Programmable Instruments*) e ARPS, também denominada TMSL (*Test and Measurement Systems Language*). A primeira foi desenvolvida pela Keysight e possui um padrão interno para transmissão de dados e comando entre instrumentos e computadores, definindo confirmação de envio, endereçamento e protocolo geral de comunicação, sendo assim mais utilizada. Já a segunda foi desenvolvida com a finalidade

de prover meios para que fontes de alimentação fossem controladas por computadores, ou seja, é uma linguagem mais restrita por ser utilizada apenas em fontes. Cabe ressaltar que essas fontes são configuradas por padrão de fabrica na linguagem ARPS, sendo necessário enviar o comando "SYST:LANG TMSL" para que as fontes passem a se comunicar em SCPI, [30]. A Figura 3.4 mostra os comandos ARSP e seus equivalentes em SCPI.

ARPS Command	Equivalent SCPI Command	ARPS Command	Equivalent SCPI Command	ARPS Command	Equivalent SCPI Command
ASTS?	STAT:OPER? STAT:QUES? *ESE?	ID?	*IDN?	STO	*SAV
CLR	*RST	ISET x ISET xv ISET xMV	CURR	STS?	STAT:OPER:COND? STAT:QUES:COND? *ESE?
DLY x DLY xS DLY xMS DLY?	OUTP:PROT:DEL	ISET? IOUT? IMAX x IMAX xv	CURR? MEAS:CURR? (none)	SYST:LANG	SYST:LANG SYST:LANG?
ERR?	SYST:ERR?	IMAX xMV IMAX?		T	INIT ON;TRIG
FAULT?	STAT:OPER:ENAB? STAT:QUES? *ESE?	OUT OFF OUT 0 OUT ON OUT 1 OUT?	OUTP:STAT OFF OUTP:STAT 0 OUTP:STAT ON OUTP:STAT 1 OUTP:STAT?	TRG	INIT ON,*TRG
FOLD OFF FOLD 0 FOLD CV FOLD 1 FOLD CC FOLD 2 FOLD?	(none)	OVP'	VOLT:PROT?	TEST?	*TST?
HOLD OFF HOLD 0 HOLD CV HOLD 1 HOLD CC HOLD 2 HOLD?	(none)	RST	OUTP:PROT:CLE	UNMASK	STAT:OPER:ENAB STAT:QUES:ENAB *ESE
		RCL	*RCL	UNMASK?	STAT:OPER:ENAB? STAT:QUES:ENAB? *ESE?
		SRQ OFF SRQ 0 SRQ ON SRQ 1 SRQ?	*SRE *SRE?	VSET x VSET xv VSET xMV VSET?	VOLT
				VOUT?	VOLT?
				VMAX x VMAX xv VMAX xMV VMAX?	MEAS:VOLT? (none)

Figura 3.4: Tabela de comandos ARSP e seu equivalente em SCPI.

É necessário destacar que, por motivo desconhecido, as fontes A e C não são identificadas como instrumentos no *software* Keysight IO Libraries Suite e, por isso, ambas apresentam a indicação da luz de erro no painel do instrumento. Essas mesmas fontes não permitem a mudança da linguagem de comunicação de ARPS para SCPI pelo comando "SYST:LANG TMSL".

3.2 Aprimoramento do circuito de ponte H

A primeira solução para a geração de campo magnético em todas as direções foi apresentada em [3]. A proposta foi utilizar pontes H para a inversão das correntes geradas pelas fontes. O circuito de inversão pode ser subdividido em microcontrolador, osciladores, ponte H referente ao eixo x, ponte H referente ao eixo y e ponte H referente ao eixo z, sendo os três últimos circuitos bastante semelhantes. O primeiro protótipo, resultado do trabalho em [3], pode ser visto na Figura 3.5.

Com o intuito de melhorar e amadurecer a tecnologia proposta, foi necessário refazer esquemáticos, validar os circuitos e refazer o *layout* da placa de circuito impresso (PCI). Com a finalidade de facilitar o entendimento, o esquemático original, feito no *software* Fritzing, foi subdividido

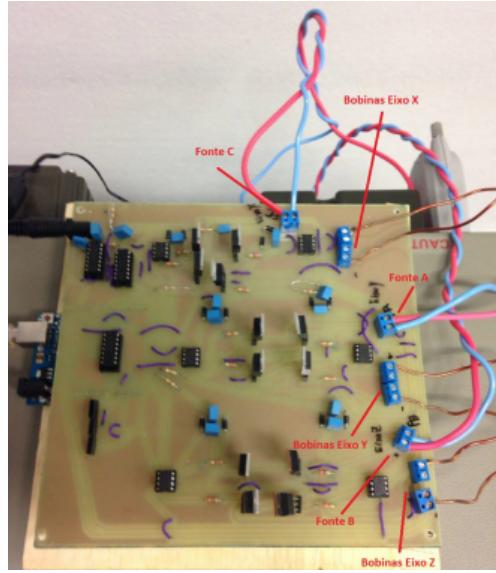


Figura 3.5: Primeiro protótipo do circuito de inversão de corrente. Fonte [3].

em seis esquemáticos utilizando o *software* KiCAD, a saber: diagrama macro, microcontrolador, osciladores, ponte H referente ao eixo x, ponte H referente ao eixo y, ponte H referente ao eixo z.

O segundo protótipo da ponte H, apresentado nas Figuras 3.6 e 3.7, foi desenvolvido de forma artesanal com a finalidade de realizar uma primeira validação dos circuitos. Durante esse processo, observou-se que a frequência dos osciladores estava inadequada com um capacitor de $1\mu F$, por isso ele foi substituído por um capacitor de $1nF$. Além disso, observou-se que os osciladores paravam de funcionar sempre que o microcontrolador reiniciava. Por isso, optou-se por realizar *pull-down* nas saídas digitais do microcontrolador, de forma que os estados das saídas estão sempre definidos.

O protótipo, que na versão anterior era controlado por uma biblioteca do Matlab, recebeu um firmware próprio, ou seja, a ponte pode ser controlada por qualquer dispositivo que tenha interface serial, bastando apenas enviar o comando "\$INV[bit Z][bit Y][bit X];". A Tabela 3.1 apresenta os possíveis comandos.

Comando	Função
\$INV?;	exibe o estado atual das bobinas
\$INV000;	não inverte nenhuma bobina
\$INV001;	inverte apenas a bobina X
\$INV010;	inverte apenas a bobina Y
\$INV100;	inverte apenas a bobina Z
\$INV011;	inverte as bobinas Y e X
\$INV101;	inverte as bobinas Z e X
\$INV110;	inverte as bobinas Z e Y
\$INV111;	inverte as bobinas X, Y e Z

Tabela 3.1: Comandos utilizados na inversão de tensão.

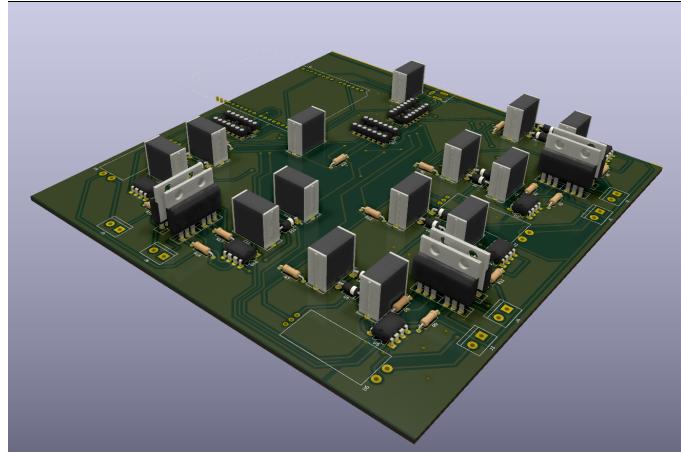


Figura 3.6: Simulação 3D do segundo protótipo desenvolvido.

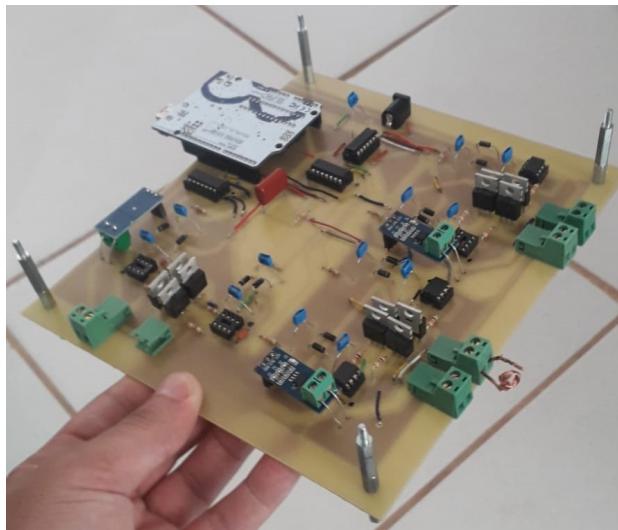


Figura 3.7: Segundo protótipo após a montagem dos componentes.

Após a validação dos esquemáticos, foi produzida uma nova versão mais próxima do produto final. As dimensões da placa de circuito impresso foram reduzidas de 182 mm de comprimento e 200 mm de largura para 93 mm de comprimento e 100 mm de largura, ou seja, uma placa com um quarto da área da placa anterior. Para isso, foi necessário trocar vários componentes PTH (*Plated Through Hole*) por componentes SMD (*Surface Mounted Device*) para que a redução de tamanho fosse significativa. As Figuras 3.8, 3.9 e 3.10 mostram, respectivamente, a simulação em 3D do terceiro protótipo, o terceiro protótipo após a montagem e o protótipo no gabinete desenvolvido no Laboratório Aberto de Brasília, um dos parceiros do LODESTAR.

3.3 Calibração do magnetômetro

Com o intuito de simplificar a notação, exclusivamente nessa seção, H_x será denotado por x , H_y será denotado por y e H_z será denotado por z .

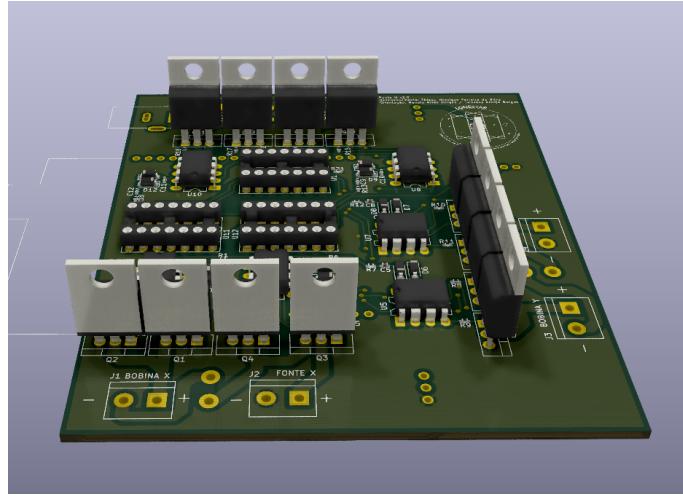


Figura 3.8: Simulação 3D do terceiro protótipo desenvolvido.

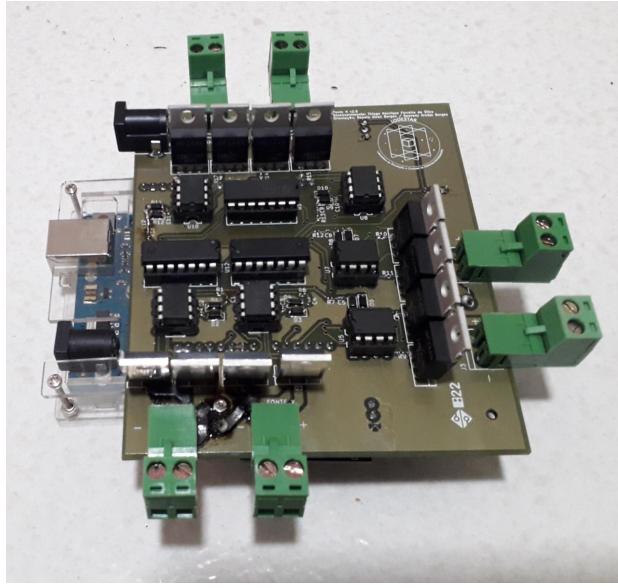


Figura 3.9: Terceiro protótipo após a montagem dos componentes.

O processo de calibração do magnetômetro é realizado com a rotação do mesmo enquanto os dados são amostrados. Caso um magnetômetro ideal, isso é, sem erros e perturbações, fosse rotacionado em diversas orientações em um ambiente de campo magnético constante, espera-se que o conjunto de dados obtidos formem uma esfera perfeita e centrada na origem,

$$x_r^2 + y_r^2 + z_r^2 = R^2 \quad (3.1)$$

em que x_r , y_r e z_r representam as componentes do campo magnético, livres de erros e perturbações, em cada um dos eixos e R , o módulo do campo na determinada região do espaço.

Porém, ao se analisar os dados de um magnetômetro comum, observa-se erros típicos desse tipo de instrumento [31], tais como, erros de *offset*, erros de sensibilidade, distorções *soft-iron*, distorções *hard-iron*. A Figura 3.11 ilustra as distorções *hard-iron* e *soft-iron*. As distorções *soft-*

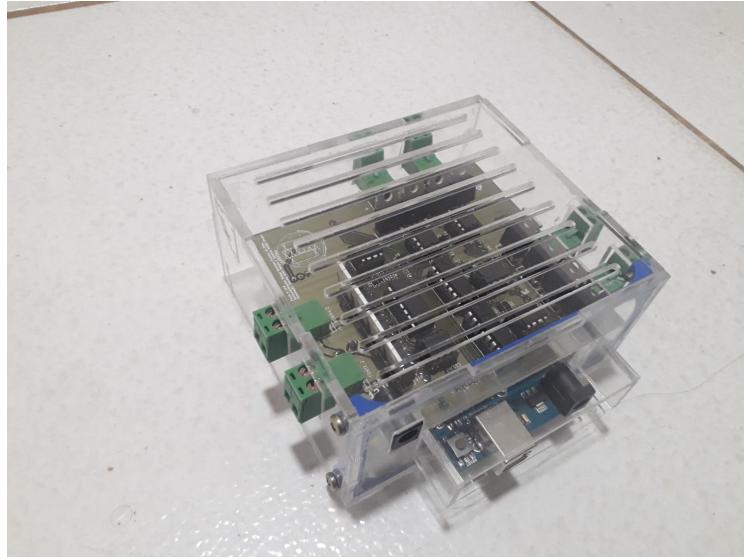


Figura 3.10: Terceiro protótipo no gabinete desenvolvido no Laboratório Aberto de Brasília.

iron causam redução ou aumento de sensibilidade de campo magnético em um determinado eixo, já nas distorções *hard-iron*, a origem da leitura do magnetômetro é deslocada.

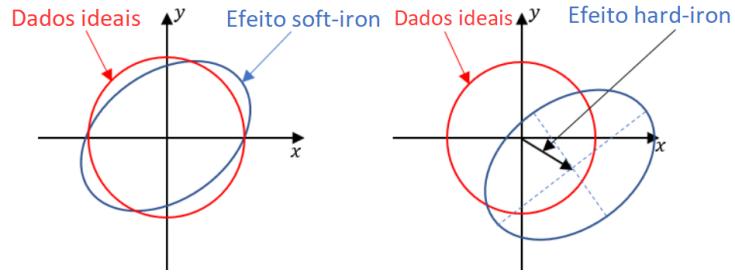


Figura 3.11: Distorções *soft-iron* e *hard-iron*. Fonte [6].

O método proposto em [26], também conhecido como método de seis parâmetros, trata de todos esses erros com exceção da não ortogonalidade entre os eixos. Ou seja, considera que o sensor não é afetado por campos em direções ortogonais ao seu eixo de medida e que os sensores permanecem ortogonais entre si.

Assim, as distorções dos dados medidos pelo magnetômetro podem ser descritas conforme a Equação (3.2)

$$H_r = K(H_m - \beta) + \epsilon, \quad (3.2)$$

em que H_r é o vetor do campo magnético real, H_m é o valor do campo magnético medido pelo sensor, β o vetor de translação do campo medido, K a matriz de escala e ϵ um vetor de ruido aleatório.

A matriz de escala K possui, no método de seis parâmetros, três coeficientes na diagonal principal, ou seja,

$$K = \begin{bmatrix} \frac{1}{a} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{b} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{c} \end{bmatrix}, \quad (3.3)$$

e o vetor b é dado por

$$\beta = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}. \quad (3.4)$$

Substituindo a Equação (3.4) e a Equação (3.3) na Equação (3.2), tem-se

$$\begin{bmatrix} x_r & y_r & z_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{a} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{b} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m - x_0 \\ y_m - y_0 \\ z_m - z_0 \end{bmatrix} + \epsilon. \quad (3.5)$$

Substituindo x_r, y_r e z_r na Equação (3.1), tem-se que x_m, y_m e z_m , as componentes de campo magnético medidas pelo sensor, obedecem a Equação (3.6)

$$\frac{(x_m - x_0)^2}{a^2} + \frac{(y_m - y_0)^2}{b^2} + \frac{(z_m - z_0)^2}{c^2} + \epsilon = R^2 \quad (3.6)$$

Logo, a calibração consiste em determinar x_0, y_0, z_0, a, b e c que melhor se ajustam a um conjunto de dados colhidos em um ambiente, no qual o módulo do campo magnético é constante. Caso o campo magnético do ambiente fosse variável, o método não se aplicaria, uma vez que a Equação (3.1) não seria satisfeita.

Por fim, a obtenção dos seis parâmetros é realizada em duas etapas. Na primeira etapa, obtém-se os valores de x_0, y_0 e z_0 a partir de um conjunto de leituras do magnetômetro. Na segunda etapa, é realizada a correção nas leituras e são obtidos os parâmetros a, b e c . Vejamos com mais detalhes as duas etapas.

3.3.1 Obtenção de x_0, y_0 e z_0

Realizando a expansão da Equação (3.6) obtém-se

$$\frac{1}{a^2}x_m^2 + \frac{1}{b^2}y_m^2 + \frac{1}{c^2}z_m^2 + \frac{-2x_0}{a^2}x_m + \frac{-2y_0}{b^2}y_m + \frac{-2z_0}{c^2}z_m + \frac{x_0^2}{a^2} + \frac{y_0^2}{b^2} + \frac{z_0^2}{c^2} - R^2 + \epsilon = 0. \quad (3.7)$$

Multiplicando (3.7) por a^2 e isolando x_m^2 , obtém-se:

$$x_m^2 = +2x_0x_m + \frac{2y_0a^2}{b^2}y_m + \frac{2z_0a^2}{c^2}z_m + \frac{a^2}{b^2}(-y_m^2) + \frac{a^2}{c^2}(-z_m^2) + a^2R^2 - x_0^2 - \frac{a^2y_0^2}{b^2} - \frac{a^2z_0^2}{c^2} + \epsilon = 0. \quad (3.8)$$

Definindo os coeficientes A, B, C, D, E e F conforme (3.9)

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \\ F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2x_0 \\ \frac{2y_0a^2}{b^2} \\ \frac{2z_0a^2}{c^2} \\ \frac{a^2}{b^2} \\ \frac{a^2}{c^2} \\ R^2a^2 - x_0^2 - \frac{a^2y_0^2}{b^2} - \frac{a^2z_0^2}{c^2} \end{bmatrix}, \quad (3.9)$$

pode-se obter os valores de x_0, y_0 e z_0 como

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{A}{2} \\ \frac{B}{2D} \\ \frac{C}{2E} \end{bmatrix}. \quad (3.10)$$

A determinação dos coeficientes a partir de um conjunto de N amostras de leituras do sensor em diferentes orientações, é realizada utilizando o método dos mínimos quadrados. Substituindo os coeficientes definidos em (3.9) na Equação (3.8), tem-se

$$x_m^2 = +Ax_m + By_m + Cz_m + D(-y_m^2) + E(-z_m^2) + F + \epsilon. \quad (3.11)$$

Definindo o resíduo $e(A, B, C, D, E, F)$ como

$$e(A, B, C, D, E, F) = x_m^2 - Ax_m - By_m - Cz_m - D(-y_m^2) - E(-z_m^2) - F, \quad (3.12)$$

e a função objetivo para um conjunto de N amostras como

$$\Psi(A, B, C, D, E, F) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N [e(A, B, C, D, E, F)]^2, \quad (3.13)$$

pode-se enunciar o problema como determinar os coeficientes A, B, C, D, E e F em (3.11), tal que a função objetivo em (3.13) seja minimizada. Por tanto tem-se

$$\nabla \Psi(A, B, C, D, E, F) = 0, \quad (3.14)$$

que na forma vetorial fica

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \Psi}{\partial A} \\ \frac{\partial \Psi}{\partial B} \\ \frac{\partial \Psi}{\partial C} \\ \frac{\partial \Psi}{\partial D} \\ \frac{\partial \Psi}{\partial E} \\ \frac{\partial \Psi}{\partial F} \end{bmatrix} = \sum_{n=1}^N \begin{bmatrix} ex_{m,n} \\ ey_{m,n} \\ ez_{m,n} \\ e(-y_{m,n}^2) \\ e(-z_{m,n}^2) \\ e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3.15)$$

Expandindo o somatório e isolando os termos independentes, tem-se

$$\sum_{n=1}^N \begin{bmatrix} x_{m,n}^3 \\ x_{m,n}^2 y_{m,n} \\ x_{m,n}^2 z_{m,n} \\ x_{m,n}^2 y_{m,n}^2 \\ x_{m,n}^2 z_{m,n}^2 \\ x_{m,n}^2 \end{bmatrix} = \sum_{n=1}^N \begin{bmatrix} x_{m,n}^2 & y_{m,n} x_{m,n} & x_{m,n} z_{m,n} & -y_{m,n}^2 x_{m,n} & -z_{m,n}^2 x_{m,n} & x_{m,n} \\ x_{m,n} y_{m,n} & y_{m,n}^2 & y_{m,n} z_{m,n} & -y_{m,n}^3 & -z_{m,n}^2 y_{m,n} & y_{m,n} \\ x_{m,n} z_{m,n} & y_{m,n} z_{m,n} & z_{m,n}^2 & -y_{m,n}^2 z_{m,n} & -z_{m,n}^3 & z_{m,n} \\ x_{m,n} y_{m,n}^2 & y_{m,n}^3 & x_{m,n} z_{m,n} & -y_{m,n}^2 x_{m,n} & -z_{m,n}^2 y_{m,n}^2 & y_{m,n}^2 \\ x_{m,n} z_{m,n}^2 & y_{m,n} z_{m,n}^3 & x_{m,n} z_{m,n} & -y_{m,n}^2 x_{m,n} & -z_{m,n}^4 & z_{m,n}^2 \\ x_{m,n} & y_{m,n} & x_{m,n} z_{m,n} & -y_{m,n}^2 x_{m,n} & -z_{m,n}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \\ F \end{bmatrix}. \quad (3.16)$$

Dessa forma ao se resolver o sistema linear obtém-se x_0 , y_0 e z_0 pela Equação (3.10)

3.3.2 Obtenção de a , b e c

Após a obtenção de x_0 , y_0 e z_0 , é realizada uma correção dos dados lidos pelo magnetômetro. Assim, definem-se x_c , y_c e z_c de forma a retirar o vetor de deslocamento β do vetor de medidas H_m ou seja

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_m - x_0 \\ y_m - y_0 \\ z_m - z_0 \end{bmatrix}, \quad (3.17)$$

Substituindo (3.17) em (3.6), tem-se

$$\frac{x_c^2}{a^2} + \frac{y_c^2}{b^2} + \frac{z_c^2}{c^2} = R^2 + \epsilon, \quad (3.18)$$

que fornece

$$x_c^2 = \frac{a^2}{b^2}(-y_c^2) + \frac{a^2}{c^2}(-z_c^2) - R^2 a^2 + \epsilon. \quad (3.19)$$

Definindo os coeficientes G , H e I como

$$\begin{bmatrix} G \\ H \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{a^2}{b^2} \\ \frac{a^2}{c^2} \\ a^2 R^2 \end{bmatrix}, \quad (3.20)$$

pode-se obter o valor de a , b e c para um R conhecido a partir de (3.21)

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{I}{R^2}} \\ \sqrt{\frac{I}{G R^2}} \\ \sqrt{\frac{I}{H R^2}} \end{bmatrix}. \quad (3.21)$$

Para garantir um sistema com maior precisão e acurácia, o módulo do campo magnético, R , deveria ser estimado com um magnetômetro calibrado e certificado pelas normas de metrologia vigente, porém, como não foi possível a obtenção de um equipamento calibrado, optou-se por estimar o módulo do campo magnético utilizando as leituras do campo magnético corrigido, x_c , y_c e z_c ,

$$R^2 = \frac{\sum_{n=1}^N (x_{c,n}^2 + y_{c,n}^2 + z_{c,n}^2)}{N}. \quad (3.22)$$

Novamente o Método dos Mínimos Quadrados foi aplicado para a determinação dos coeficientes G, H, I e J a partir de um conjunto de N amostras de x_c, y_c e z_c . Substituindo (3.20) em (3.19), tem-se

$$x_c^2 + Gy_c^2 + Hz_c^2 - I + \epsilon = 0. \quad (3.23)$$

Definindo o resíduo $e(G, H, I)$, como

$$e(G, H, I) = x_c^2 + Gy_c^2 + Hz_c^2 - I, \quad (3.24)$$

e a função objetivo para um conjunto de N amostras como

$$\Psi(G, H, I) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N [e(G, H, I)]^2, \quad (3.25)$$

O problema fica encontrar os coeficientes G, H, I e J que minimizem a função objetivo. Portanto tem-se

$$\nabla \Psi(G, H, I) = 0, \quad (3.26)$$

que vetorialmente fica

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \Psi}{\partial G} \\ \frac{\partial \Psi}{\partial H} \\ \frac{\partial \Psi}{\partial I} \end{bmatrix} = \sum_{n=1}^N \begin{bmatrix} ey_{c,n}^2 \\ ez_{c,n}^2 \\ -e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3.27)$$

Substituindo (3.24) e isolando os termos independentes, tem-se

$$\sum_{n=1}^N \begin{bmatrix} -x_{c,n}^2 y_{c,n}^2 \\ -x_{c,n}^2 z_{c,n}^2 \\ -x_{c,n}^2 \end{bmatrix} = \sum_{n=1}^N \begin{bmatrix} y_{c,n}^4 & y_{c,n}^2 z_{c,n}^2 & -y_{c,n}^2 \\ y_{c,n}^2 z_{c,n}^2 & z_{c,n}^4 & -z_{c,n}^2 \\ y_{c,n}^2 & z_{c,n}^2 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G \\ H \\ I \end{bmatrix}. \quad (3.28)$$

Dessa forma, após a resolução do sistema linear (3.28), obtém-se a, b e c pela Equação (3.21).

Finalmente, com os seis parâmetros $(x_0, y_0, z_0, a, b$ e $c)$ definidos, pode-se estimar o campo real a partir da Equação (3.29).

$$\begin{bmatrix} x_r & y_r & z_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{a} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{b} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m - x_0 \\ y_m - y_0 \\ z_m - z_0 \end{bmatrix}. \quad (3.29)$$

3.4 Identificação do modelo matemático da gaiola de Helmholtz

O campo gerado no centro da Gaiola, denominado por H , é função das correntes que circulam nas bobinas, I_x, I_y e I_z , conforme apresentado na Equação (2.1) do Capítulo 2, que por sua vez são funções da tensão aplicada nesse mesmo par de bobinas, V_x, V_y e V_z .

Algumas hipóteses foram assumidas na modelagem do sistema, a saber

1. Alinhamento dos eixos de medida do magnetômetro, que se encontra no centro da gaiola, com os respectivos eixos das bobinas.
2. O período de amostragem da calibração é maior que o tempo de acomodação do sistema.
3. O campo magnético terrestre, considerado constante, e campo gerado pelas bobinas são os únicos fatores de influência no campo da Gaiola.

A partir das hipóteses estabeleceremos o modelo utilizado na calibração. O campo magnético no centro da gaiola pode ser decomposto em dois vetores: o campo magnético terrestre, considerado constante, e o campo magnético gerado pelas bobinas, ou seja

$$H(I_x, I_y, I_z) = H_b(I_x, I_y, I_z) + H_0. \quad (3.30)$$

Os campo magnéticos gerados pelas bobinas são lineares com relação às correntes que circulam nas bobinas, dessa forma tem-se a Equação (3.31). A princípio, conforme a Equação (2.1) do Capítulo 2, espera-se que somente os coeficientes A_i, B_i e I_i sejam diferente de zero, ou seja, um sistema perfeitamente ortogonal no qual não há as correntes da bobina de um determinado eixo não influencia no campo magnético dos outros eixos.

$$H(I_x, I_y, I_z) = \begin{bmatrix} A_i & B_i & C_i \\ D_i & E_i & F_i \\ G_i & H_i & I_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x \\ I_y \\ I_z \end{bmatrix} + H_0. \quad (3.31)$$

3.4.1 Circuito da elétrico das bobinas

De acordo com o teorema de Thévenin [32], todo circuito linear contendo várias tensões e impedâncias pode ser substituído por apenas uma única tensão em série com uma única impedância conectada através da carga. Assim, pode-se descrever o circuito no domínio da frequência como

$$V(s) = (Z_{eq} + Z_c)I(s) = Z_t I(s), \quad (3.32)$$

no qual, Z_{eq} , Z_g , Z_t , $V(s)$ e $I(s)$ representam, respectivamente, a impedância equivalente externa das bobinas, a impedância da bobina, a impedância total do circuito, a tensão no domínio da frequência, a corrente no domínio da frequência.

Conforme apresentado [3], o tempo de acomodação do gaiola para uma entrada degrau é de $t = 0,015$ s. Já o magnetômetro possui capacidade de amostragem entre 10 a 154 amostras

por segundo. Nesse trabalho, utilizou-se o magnetômetro na taxa de 10 amostras por segundo, um vez que foi observado instabilidade de comunicação em taxas maiores. Dessa forma, como o tempo de acomodação é 6 vezes menor que o tempo de amostragem utilizado, no instante de amostra o circuito já se encontra em regime permanente, isto é, as correntes e tensões já se encontram constantes. Dessa forma, pode-se aproximar as capacitâncias para um circuito aberto e as indutâncias por curto circuito, obtendo

$$v(t) = (R_{eq} + R_c)i(t) = R_t i(t), \quad (3.33)$$

na qual R_{eq} , R_g , R_t , $v(t)$ e $i(t)$ representam, respectivamente, a resistência equivalente externa às bobinas, a resistência das bobinas, a resistência total do circuito, a tensão de regime permanente no domínio do tempo e a corrente de regime permanente no domínio do tempo.

Dessa forma, a corrente de regime permeante pode ser descrita pela tensão em regime permanente e a resistência total do circuito

$$i(t) = \frac{v(t)}{R_t}. \quad (3.34)$$

Nesse sentido, o vetor de correntes que circulam nas bobinas pode ser descrito da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} I_x \\ I_y \\ I_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_x/R_x \\ V_y/R_y \\ V_z/R_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/R_x & 0 & 0 \\ 0 & 1/R_y & 0 \\ 0 & 0 & 1/R_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix}, \quad (3.35)$$

que ao substituir em (3.31), fornece

$$H(V_x, V_y, V_z) = \begin{bmatrix} A_i & B_i & C_i \\ D_i & E_i & F_i \\ G_i & H_i & I_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/R_x & 0 & 0 \\ 0 & 1/R_y & 0 \\ 0 & 0 & 1/R_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} + H_0. \quad (3.36)$$

Realizando a multiplicação das matrizes tem-se:

$$H(V_x, V_y, V_z) = \begin{bmatrix} A_i/R_x & B_i/R_y & C_i/R_z \\ D_i/R_x & E_i/R_y & F_i/R_z \\ G_i/R_x & H_i/R_y & I_i/R_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} + H_0. \quad (3.37)$$

Definindo a matriz de ajuste de tensão M como

$$\begin{bmatrix} A_i/R_x & B_i/R_y & C_i/R_z \\ D_i/R_x & E_i/R_y & F_i/R_z \\ G_i/R_x & H_i/R_y & I_i/R_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B & C \\ D & E & F \\ G & H & I \end{bmatrix} = M, \quad (3.38)$$

e substituindo (3.38) em (3.37), tem-se:

$$H(V_x, V_y, V_z) = \begin{bmatrix} A & B & C \\ D & E & F \\ G & H & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_{0x} \\ H_{0y} \\ H_{0z} \end{bmatrix}. \quad (3.39)$$

Cabe ressaltar que a matriz de ajuste de tensão M é uma matriz diagonalmente dominante, isto é, o módulo dos elementos da diagonal principal é maior que a soma dos módulos dos outros elementos da mesma linha. Isso se dá porque a maior contribuição de campo magnético em um determinado eixo é dada pela fonte que atua nesse mesmo eixo. Em outras palavras, a maior contribuição em H_x é dada por V_x já que essa fonte atua no eixo x.

Anteriormente a esse trabalho, a matriz de ajuste de tensão foi considerada diagonal [3], ou seja, foi considerado que a tensão aplicada a um determinado eixo não influencia nos eixos ortogonais a esse mesmo eixo. Nesse caso, a Equação (3.39) seria aproximada por

$$H(V_x, V_y, V_z) = \begin{bmatrix} A & B & C \\ D & E & F \\ G & H & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_{0x} \\ H_{0y} \\ H_{0z} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} A & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_{0x} \\ H_{0y} \\ H_{0z} \end{bmatrix}. \quad (3.40)$$

3.4.2 Identificação da matriz de ajuste de tensão

O método de calibração visa determinar a matriz de ajuste de tensão, M , e o vetor campo magnético da terra H_0 . Serão executados quatro passos com o objetivo de identificar os coeficientes da matriz de ajuste de tensão, A, B, C, D, E, F, G, H e I , e as componentes do campo magnético terrestre H_{0x}, H_{0y} e H_{0z} .

O primeiro passo é o posicionamento do magnetômetro calibrado no centro da gaiola com os eixos de orientação iguais aos eixos da gaiola. Com as fontes em tensão desligadas, são tomadas N medidas de campo magnético. Determinando assim, o valor do campo magnético da Terra, considerado nesse modelo constante, a partir das medidas do magnetômetro calibrado,

$$\sum_{n=1}^N H_n = \sum_{n=1}^N H_0, \quad (3.41)$$

e com H_0 um vetor constante, tem-se

$$\frac{\sum_{n=1}^N H_n}{N} = H_0, \quad (3.42)$$

que pode ser reescrito como

$$\begin{bmatrix} \sum_{n=1}^N \frac{H_{x,n}}{N} \\ \sum_{n=1}^N \frac{H_{y,n}}{N} \\ \sum_{n=1}^N \frac{H_{z,n}}{N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{0x} \\ H_{0y} \\ H_{0z} \end{bmatrix}. \quad (3.43)$$

Dessa forma, tem-se H_0 a partir de um conjunto de amostras do magnetômetro calibrado e posicionado no centro da gaiola com os mesmos eixos de referência da gaiola de Helmholtz.

Para a determinação dos parâmetros A, D e G , utiliza-se a estratégia de manter as bobinas y e z com tensão nula, isto é, $V_y = V_z = 0$, variando a tensão V_x em um conjunto de N amostras, tem-se:

$$\begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} AV_x + H_{0x} \\ DV_x + H_{0y} \\ GV_x + H_{0z} \end{bmatrix}. \quad (3.44)$$

Definindo e_x, e_y e e_z como

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_x - AV_x - H_{0x} \\ H_y - DV_x - H_{0y} \\ H_z - GV_x - H_{0z} \end{bmatrix}, \quad (3.45)$$

e as funções objetivos Ψ_x, Ψ_y e Ψ_z como

$$\begin{bmatrix} \Psi_x \\ \Psi_y \\ \Psi_z \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^N e_x^2 \\ \sum_{n=1}^N e_y^2 \\ \sum_{n=1}^N e_z^2 \end{bmatrix}, \quad (3.46)$$

utiliza-se o método dos mínimos quadrados que fornece

$$\frac{\partial \Psi}{\partial A} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \frac{\partial \Psi}{\partial D} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \frac{\partial \Psi}{\partial G} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3.47)$$

Observa-se que apenas Ψ_x possui dependência de A , da mesma forma, apenas Ψ_y possui dependência de D e apenas Ψ_z possui dependência de G , ou seja, esse conjunto equações pode ser simplificado para

$$\begin{bmatrix} \sum_{n=1}^N (H_{x,n} - H_{0x})V_{x,n} - AV_{x,n}^2 \\ \sum_{n=1}^N (H_{y,n} - H_{0y})V_{x,n} - DV_{x,n}^2 \\ \sum_{n=1}^N (H_{z,n} - H_{0z})V_{x,n} - GV_{x,n}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3.48)$$

de onde se obtém A, D e G como

$$A = \frac{\sum_{n=1}^N (H_{x,n} - H_{0x})V_{x,n}}{\sum_{n=1}^N V_{x,n}^2}; D = \frac{\sum_{n=1}^N (H_{y,n} - H_{0y})V_{x,n}}{\sum_{n=1}^N V_{x,n}^2}; G = \frac{\sum_{n=1}^N (H_{z,n} - H_{0z})V_{x,n}}{\sum_{n=1}^N V_{x,n}^2}. \quad (3.49)$$

Um raciocínio análogo é utilizado na obtenção dos parâmetros B, E e H , ou seja, utiliza-se a estratégia de manter as bobinas x e z com tensão nula, isto é, $V_x = V_z = 0$ variando a tensão V_y em um conjunto de N amostras, tem-se:

$$\begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} BV_y + H_{0x} \\ EV_y + H_{0y} \\ HV_y + H_{0z} \end{bmatrix}. \quad (3.50)$$

Resolvendo pelo método dos mínimos quadrados tem-se de forma análoga ao caso anterior

$$B = \frac{\sum_{n=1}^N (H_{x,n} - H_{0x})V_{y,n}}{\sum_{n=1}^N V_{y,n}^2}; E = \frac{\sum_{n=1}^N (H_{y,n} - H_{0y})V_{y,n}}{\sum_{n=1}^N V_{y,n}^2}; H = \frac{\sum_{n=1}^N (H_{z,n} - H_{0z})V_{y,n}}{\sum_{n=1}^N V_{y,n}^2}. \quad (3.51)$$

Finalmente, os parâmetros C, F e I são determinado pelo mesmo procedimento, ou seja, as bobinas x e y com tensão nula, isto é, $V_x = V_y = 0$ variando a tensão V_z em um conjunto de N amostras, com a Equação (3.52)

$$\begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} CV_Z + H_{0x} \\ FV_z + H_{0y} \\ IV_z + H_{0z} \end{bmatrix}. \quad (3.52)$$

Resolvendo pelo método dos mínimos quadrados tem-se

$$C = \frac{\sum_{n=1}^N (H_{x,n} - H_{0x})V_{z,n}}{\sum_{n=1}^N V_{z,n}^2}; F = \frac{\sum_{n=1}^N (H_{y,n} - H_{0y})V_{z,n}}{\sum_{n=1}^N V_{z,n}^2}; I = \frac{\sum_{n=1}^N (H_{z,n} - H_{0z})V_{z,n}}{\sum_{n=1}^N V_{z,n}^2}. \quad (3.53)$$

3.4.3 Cálculo da tensão de alimentação a partir do campo de referência

Após a estimação da matriz de ajuste de tensão M , e do vetor campo magnético da terra H_0 , utilizando a Equação (3.39), é possível estimar as tensões que as fontes devem fornecer em regime estacionário para que se tenha como resposta um determinado campo magnético na gaiola. A partir da Equação (3.54)

$$H(V_x, V_y, V_z) = M \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} + H_0, \quad (3.54)$$

é possível isolar o vetor de tensões conforme em (3.55) assumindo, por hipótese, que a matriz de ajuste de tensão é invertível:

$$M^{-1}[H(V_x, V_y, V_z) - H_0] = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix}. \quad (3.55)$$

3.5 Sistema em malha fechada

Após o processo de calibração e identificação, o sistema da gaiola possui capacidade para operar em malha aberta com erro em regime estacionário de até 10% em cada eixo. Porém, optou-se por realizar o controle do campo magnético em malha fechada com a finalidade de reduzir ainda mais os erros em regime estacionário. No sistema desenvolvido, foi utilizada uma adaptação do controlador proporcional integral.

Com o objetivo estabelecer um sistema que tenha uma boa resposta dinâmica e estática, foi implementado um sistema que atua de forma diferente a depender do módulo do erro. Nesse sistema, se o módulo do erro for maior que $2\mu T$, o sistema ignora o estado atual e realiza a estimativa de tensão a partir do campo de referência, caso contrário, o sistema realiza um controle proporcional integral. A vantagem dessa estratégia se dá não só na garantia de um sistema que tenha um pequeno tempo de subida e baixo sobrepasso, mas que também tenha erro nulo em regime permanente. A topologia é apresentada na Figura 3.5.

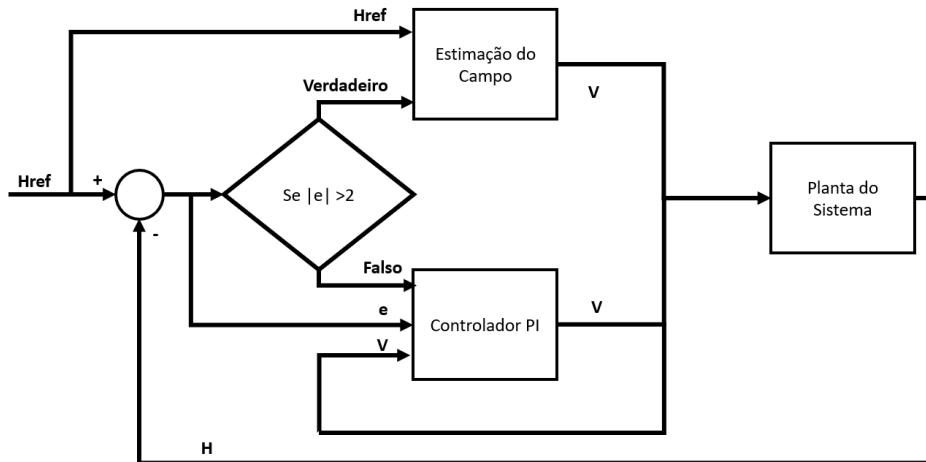


Figura 3.12: Topologia do controlador para geração de campo variável.

3.5.1 Controlador PI

O controlador proporcional integral foi implementado com a finalidade de reduzir os erros em regime permanente do sistema. Nesse sentido, foi implementado o controle com a seguinte seguinte algoritmo:

1. Obtém-se o erro de campo magnético.
2. Transforma-se o erro de campo magnético em o erro de tensão usando a matriz de ajuste de tensão.
3. Soma-se a tensão atual, o erro de tensão e sua integral ponderado pelas constante proporcionais e constante integral, respectivamente.
4. Repete-se o processo indefinidamente.

Desenvolvendo o algoritmo de forma algébrica, define-se o vetor de erro de campo magnético, E_h , de tal forma que

$$E_h = H_{ref} - H = \begin{bmatrix} H_{refx} \\ H_{refy} \\ H_{refz} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix}. \quad (3.56)$$

Seja M a matriz de ajuste de tensão definida em (3.38), a transformação do erro de campo magnético em erro de tensão é dada pela relação (3.57)

$$ME_v = \begin{bmatrix} A & B & C \\ D & E & F \\ G & H & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{vx} \\ E_{vy} \\ E_{vz} \end{bmatrix} = E_h = \begin{bmatrix} E_{hx} \\ E_{hy} \\ E_{hz} \end{bmatrix}. \quad (3.57)$$

Sabendo que a matriz de ajuste de tensão é diagonalmente dominante e visando melhor desempenho do controlador, optou-se por aproximar a matriz de ajuste de tensão por uma matriz diagonal de ajuste, M_d . Sendo o sistema em malha fechada, os erros e perturbações podem ser contornados pelo sistema de controle.

$$ME_v \approx M_d E_v = \begin{bmatrix} A & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{vx} \\ E_{vy} \\ E_{vz} \end{bmatrix} = E_h = \begin{bmatrix} E_{hx} \\ E_{hy} \\ E_{hz} \end{bmatrix}. \quad (3.58)$$

A partir dessa aproximação, tem-se

$$M_d E_v = \begin{bmatrix} A & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{vx} \\ E_{vy} \\ E_{vz} \end{bmatrix} = E_h = \begin{bmatrix} E_{hx} \\ E_{hy} \\ E_{hz} \end{bmatrix}. \quad (3.59)$$

Realizando a multiplicação de matrizes e isolando os erros de tensão, tem-se

$$\begin{bmatrix} E_{vx} \\ E_{vy} \\ E_{vz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{hx}/A \\ E_{hy}/E \\ E_{hz}/I \end{bmatrix}. \quad (3.60)$$

Dessa forma, obtém-se o erro de tensão a partir do erro de campo magnético do sistema. O novo estado de tensão, V' , é atualizado a partir do erro e sua integral, ponderados pelas constantes K_c e K_i , conforme apresentado em (3.61).

$$V' = V + K_c E_v + K_i \tau \sum_{n=1}^N E_v, \quad (3.61)$$

em que τ é o período de amostragem do sistema de controle. Nesse sistema, as constantes K_c , K_i e τ foram ajustadas manualmente visando reduzir oscilações e diminuir o tempo de convergência do sistema.

3.6 Desenvolvimento de interface utilizando PySimpleGUI

Nos trabalhos desenvolvidos anteriormente não havia interface gráfica, o controle era executado por linha de comando no terminal do Matlab, ou seja, a utilização da plataforma de testes ficava normalmente restrita ao desenvolvedor da plataforma [3].

Com a finalidade de disponibilizar uma interface amigável para o operador, o *software* de controle foi implementado na linguagem de programação Python para posterior integração gráfica.

A interface foi implementada utilizando a biblioteca PySimpleGUI não só porque não é necessário instalar outros *softwares* com a finalidade desenvolver a interface, mas também porque a biblioteca simplifica o desenvolvimento de interface gráfica.

PysimpleGUI é um biblioteca Python que permite que programadores Python na qual o formato de exibição das janelas é construído por objetos. Dessa forma, PySimpleGUI torna o código mais simples e curto, pois a maior parte das propriedades das janelas e elementos são implementados internamente na biblioteca, reduzindo de 1/2 a 1/10 a quantidade de código para criar uma janela usando outras estruturas [33]. Com um código curto de 18 linhas é possível criar uma janela conforme ilustrado na Figura 3.13.

```
1 import PySimpleGUI as sg # Importnado a Biblioteca
2 sg.theme('DarkBlue')    # Adiciona o tema da janela
3 # Todos os elementos presentes na sua janela.
4 layout = [ [sg.Text('Algum Texto na Linha 1')],
5            [sg.Text('Escreva algo na Linha 2:'), sg.InputText()],
6            [sg.Button('Ok'), sg.Button('Cancelar')] ]
7 # Criando a Janela
8 window = sg.Window('Titulo da Janela', layout)
9 # O Laco de Evento processa os eventos (events) e captura os valores (values) das
10 # entradas
11 while True:
12     event, values = window.read()
13     if event == sg.WIN_CLOSED or event == 'Cancel': # Acontece se o usuario
14         fechar a janela ou apertar em cancelar
15         break
16     print('You entered ', values[0])
17
18 window.close()
```

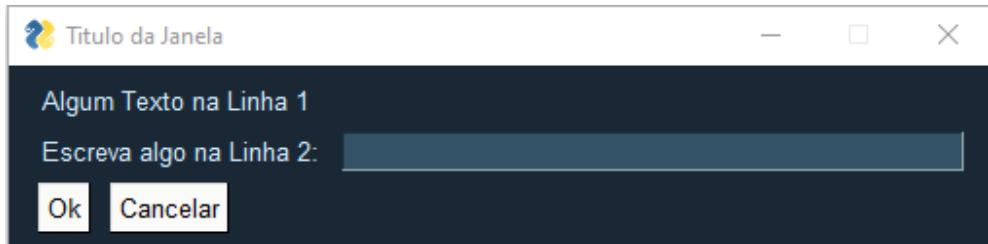


Figura 3.13: Janela desenvolvida com o código acima.

3.6.1 Estrutura de fluxo de execução no PysimpleGUI

PysimpleGUI é uma biblioteca orientada a eventos, existe uma rotina interna especializada em responder a um ou mais eventos, de modo que a interface somente inicia os processamentos necessários após a ocorrência de um evento. Essa técnica é vantajosa por evitar que o laço de processamento seja executado de forma desnecessária.

Assim, sempre que um elemento gera um evento, o laço de processamento se inicia e salva o evento na lista de eventos (*event*). A rotina de tratamento de eventos toma as decisões do que será feito com relação a cada um dos eventos. Normalmente essa rotina realiza a solicitação de mudança de layout da janela. Esse fluxo é ilustrado na Figura 3.14.

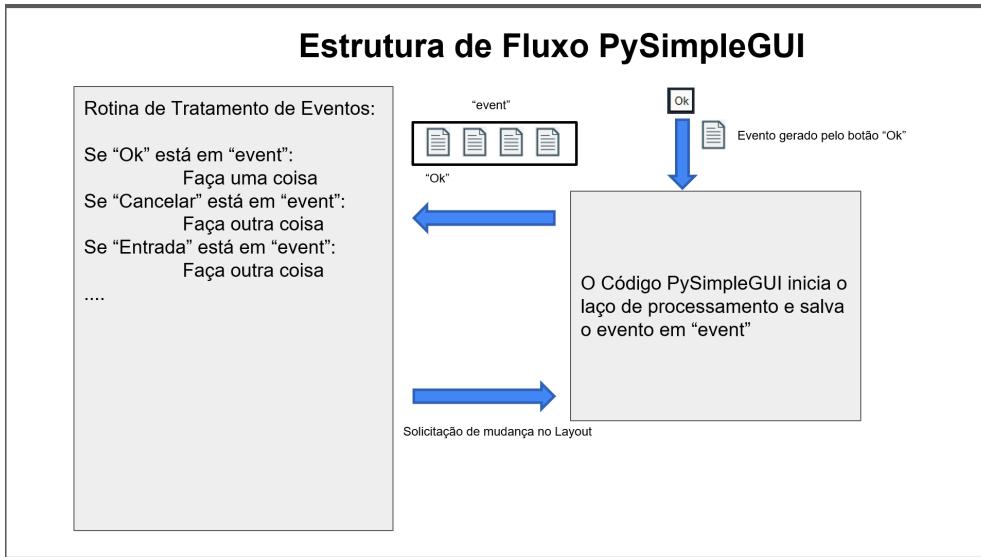


Figura 3.14: Estrutura de fluxo de execução baseada em eventos.

É importante destacar que a rotina de tratamento de eventos deve ser uma rotina curta, ou seja, não é aconselhável realizar processamentos longos de dados nessa rotina. Caso a rotina de tratamento de eventos seja longa, o *software* deixa de ser responsivo e o sistema operacional evidencia que o *software* não está funcionando corretamente e dá a opção para o usuário de fechar a interface [34].

Na interface desenvolvida para a plataforma de geração de campo magnético existem rotinas de processamento de dados longas. A calibração do magnetômetro, por exemplo, demora até 2 minutos, a calibração da gaiola demora até 4 minutos e as simulações de campo podem ser executadas por tempo indefinido. Sendo assim, foi necessário implementar estratégias para que a rotina de tratamento de eventos se mantenham curtas mesmo com a necessidade de execução de funções longas.

3.6.2 Threading em Python

Uma *thread* ou fio, em tradução livre, é um fluxo separado da execução principal. Ou seja, ao iniciar uma *thread* o programa realiza deixa de ter somente um fluxo e passa a executar dois

fluxos simultâneos. A ideia de que ao iniciar uma *thread* o sistema operacional alocará um novo processador para que ambos os programas executem em paralelismo é falha. A biblioteca *threading* apenas faz a gestão do tempo do processador entre duas ou mais tarefas, mas sempre executando uma de cada vez [35]. A Figura 3.15 representa como um processador simula a execução em paralelo de *threads*.

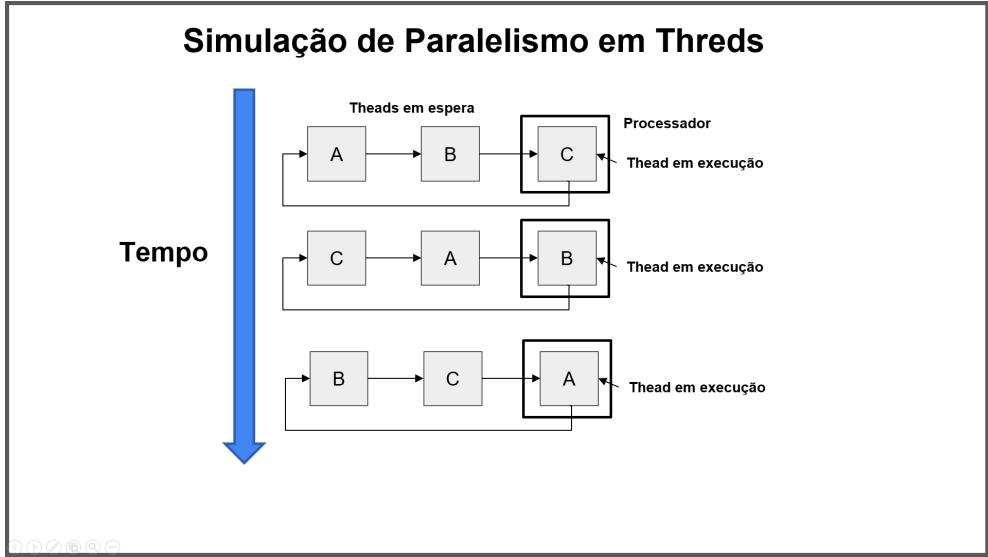


Figura 3.15: Simulação de paralelismo realizado pela biblioteca *threading*.

Assim, a utilização de *threads* são fundamentais quando é necessário executar funções longas mantendo a rotina de tratamento de evento curta. No *software* desenvolvido, sempre que um evento demandar um processamento longo, é criada uma nova *thread*, liberando sempre o fluxo da rotina principal e permitindo que a interface seja responsiva.

3.6.3 Interface de operação da gaiola de Helmholtz do LODESTAR

A interface, apresentada na Figura 3.16, tem por objetivo facilitar não só a realização de testes pelos operadores, mas também possibilitar a fácil identificação de falhas em subsistemas. Sendo assim, ao iniciar o *software*, o procedimento inicial é checar a comunicação do computador com as fontes, ponte H e magnetômetro.

3.6.4 Verificação das conexões dos subsistemas com o computador

Para verificar as conexões, basta clicar no ícone de engrenagem ao lado de cada um dos subsistemas (Ponte H, Magnetômetro, Fonte A, Fonte B e Fonte C). No caso da ponte H e do magnetômetro, também é necessário escolher a porta de comunicação. Essas portas podem variar de acordo com o *hardware* do computador e a entrada na qual o subsistema está conectado. Dessa forma, se a porta de comunicação for desconhecida, será necessário testar cada uma das portas. Se a porta de comunicação receber o valor necessário na verificação então o ícone da engrenagem se tornará um ícone de verificação aprovada. Caso contrário, o ícone de engrenagem passará a

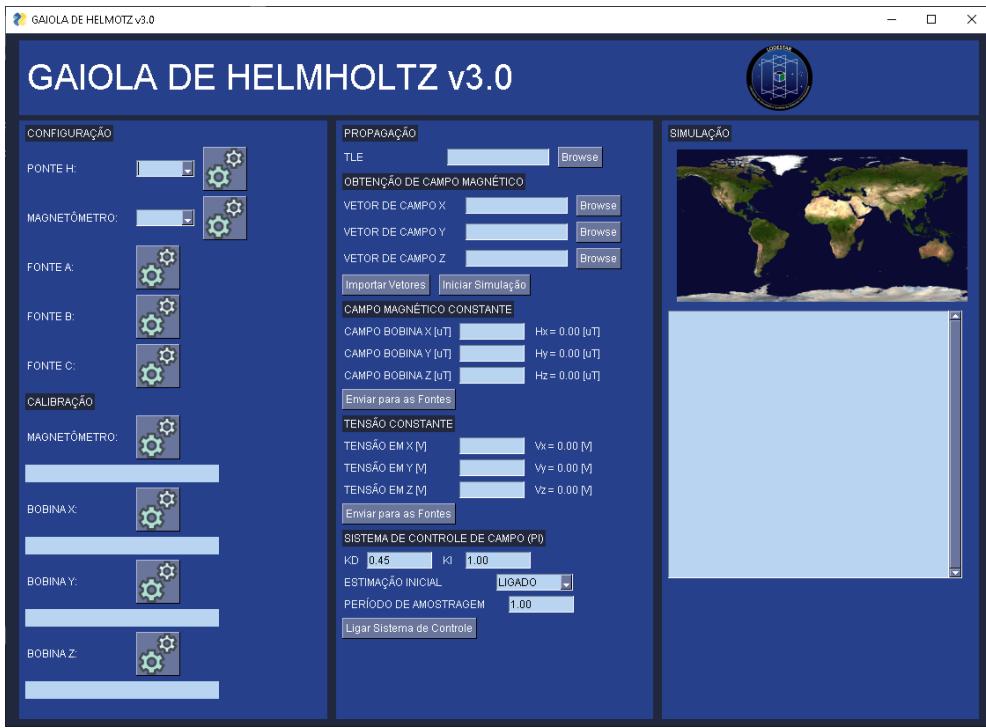


Figura 3.16: Interface da Gaiola de Helmholtz do LODESTAR.

indicar verificação reprovada, conforme apresentado na Figura 3.17.



Figura 3.17: Na esquerda uma verificação reprovada na direita uma verificação aprovada.

Após a aprovação dos subsistemas na verificação de conexões, a interface se apresentará como a Figura 3.18. Antes de realizar as simulações, é necessário realizar a calibração do magnetômetro e a calibração das bobinas.

3.6.5 Calibração do magnetômetro

Para a calibração do magnetômetro, é necessário preparar o sensor para ser manuseado e em seguida clicar no botão de calibração do magnetômetro. Ao apertar, será mostrado um aviso



Figura 3.18: Verificação aprovada dos subsistemas da Gaiola de Helmholtz.

para iniciar as movimentações no magnetômetro. Clica-se em "Ok" e movimenta-se o sensor em todas as direções possíveis. Após a calibração aparecerá no terminal lateral o valor das constantes a, b, c, x_0, y_0 e z_0 utilizadas na Equação (3.29), conforme a Figura 3.19.



Figura 3.19: Interface da Gaiola de Helmholtz após a calibração do magnetômetro.

3.6.6 Calibração das bobinas

Para a calibração do magnetômetro, é necessário posicionar o magnetômetro no centro da gaiola com os eixos de referência alinhados com os eixos de referência da gaiola e, após isso, clicar no botão de calibração das bobinas. Ao apertar, será mostrado um aviso para posicionar corretamente o magnetômetro no centro da gaiola. Clica-se em "Ok" e aguarda-se a calibração. Após a calibração aparecerá no terminal lateral o valor das constantes A, B, C, D, E, F, G, H e I

utilizadas na Equação (3.39), vide a Figura 3.20



Figura 3.20: Interface da Gaiola de Helmholtz após a calibração das bobinas.

3.6.7 Controle de tensão constante

Após a calibração do sistema, a interface permite o controle da tensão das fontes diretamente. Para isso, basta inserir os valores no campo relativo a tensão e clicar em "Enviar para as Fontes". Caso o valor inserido seja negativo, a ponte H atuará de forma a inverter o sentido das correntes nas bobinas. Essa função foi inserida com a finalidade de dar ao usuário o controle total dos subsistemas. No lado direito ao valor inserido é possível verificar o valor atual de tensão das fontes, conforme está apresentado na Figura 3.21.

3.6.8 Controle de campo magnético constante em malha aberta

Após a calibração do sistema, a interface permite o controle de campo magnético em malha aberta. Para isso, basta inserir os valores no campo de campo magnético nos campos relativos a campo magnético e clicar em "Enviar para as Fontes". Caso o valor seja negativo, o sistema realizará as compensações necessárias antes de enviar para as fontes. No lado direito do valor inserido é possível verificar o valor atual do campo na gaiola, conforme está apresentado na Figura 3.22



Figura 3.21: Controle de tensão constante da fontes.



Figura 3.22: Controle de campo magnético em malha aberta.

3.6.9 Controle de campo magnético constante em malha fechada

Para ligar o sistema de controle de campo magnético em malha fechada, basta clicar em "Ligar Sistema de Controle". A Figura 3.23 mostra o sistema com o controlador em malha fechada ligado. É possível configurar a constante proporcional, K_d ; a constante integral, K_i , e o período de amostragem. Também é possível desligar o estimador inicial e realizar o sistema como um controlador PI puro. Cabe ressaltar que é possível modificar o valor do campo de referência com o controle em malha fechada em execução. Essa técnica foi utilizada no Capítulo 4 com a finalidade de analisar a resposta degrau do sistema em malha fechada.



Figura 3.23: Controle de campo magnético em malha fechada.

3.6.10 Importação de vetores de campo magnético

A interface permite a importação de campos magnéticos em formato JSON. A Figura 3.24 ilustra o formato padrão para a simulação. Nesse formato, o campo magnético tem unidade de miligauss (mG), a pesar da interface exibir e controlar os dados em microtesla (μ T). Isso se dá porque é recorrente que os relatórios de missões espaciais, tais como os relatórios do AlfaCrux, utilizem a primeira em vez da segunda. Também é necessário que cada valor de campo magnético seja datado corretamente no formato "[ano]-[mês]-[dia] [hora]:[minuto]:[segundo].[milésimos]Z" uma vez que a não utilização do padrão causará falha de importação no *software*. Nesse formato de data, UTC se refere ao Tempo Universal Coordenado (*Coordinated Universal Time* ou UTC) e o Z no fim data mostra que não é necessário acrescentar horas na medida, pois essa medida se refere ao UTC +0.

Para realização da importação basta clicar em "Browse". Quando o botão for pressionado surgirá um menu de navegação no qual deve-se selecionar o campo magnético a ser importado e pressionar o botão "Abrir", como é possível ver na Figura 3.25.

Após a escolha dos três arquivos que contém vetores de campo magnético com a mesma taxa de

```

Telemetry_Xaxis_Mag_Epoca1 - Bloco de Notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda

[
{
    "Value (mG)": 364.6153869628906,
    "Satellite Timestamp (UTC)": "2022-07-02 01:09:24.349Z"
},
{
    "Value (mG)": 254.61538696289062,
    "Satellite Timestamp (UTC)": "2022-07-02 01:19:24.782Z"
},
{
    "Value (mG)": 443.0769348144531,
    "Satellite Timestamp (UTC)": "2022-07-02 01:24:25.061Z"
},
{
    "Value (mG)": 401.5384826660156,
    "Satellite Timestamp (UTC)": "2022-07-02 01:29:25.348Z"
}
]

```

Ln 1, Col 1 100% Windows (CRLF) UTF-8

Figura 3.24: Formato padrão de campo magnético.

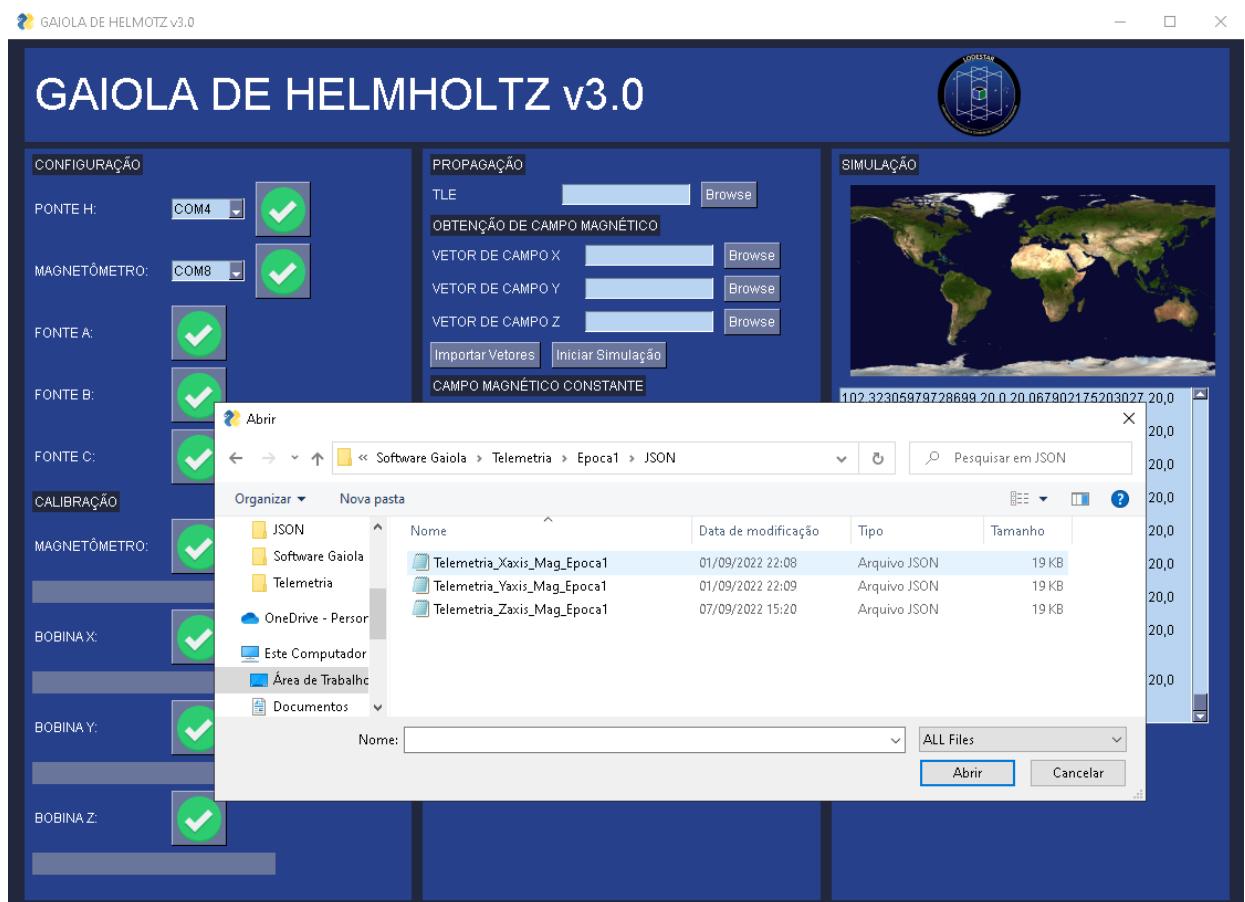


Figura 3.25: Menu de navegação para a importação do arquivo de um eixo.

amostragem, clica-se em importar os "Importar Vetores", conforme a Figura 3.26 e assim aparecerá a mensagem "Importação bem sucedida" no terminal da interface. Por fim, basta clicar em "Iniciar Simulação" que a simulação em malha fechada iniciará.



Figura 3.26: Interface após a importação dos vetores de campo magnético.

Capítulo 4

Resultados e Validações por Testes

Neste capítulo serão apresentados todos os resultados obtidos durante as simulações e suas implicações, trazendo gráficos, tabelas e descrições referentes ao modelo da gaiola de Helmholtz.

4.1 Calibração do magnetômetro

Após a calibração do magnetômetro, obtém-se valores de a, b, c, H_{x0}, H_{y0} e H_{z0} , apresentado na Tabela 4.1. As constantes são utilizadas na correção do campo lido pelo magnetômetro, conforme o modelo da equação a Equação (4.1).

$$\begin{bmatrix} H_{x,r} & H_{y,r} & H_{z,r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{a} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{b} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{x,m} - H_{x0} \\ H_{y,m} - H_{y0} \\ H_{z,m} - H_{z0} \end{bmatrix}. \quad (4.1)$$

Constante	Valor Obtido
a	1,037049
b	1,028199
c	1,063269
H_{x0}	-61,979591 μT
H_{y0}	-0,778138 μT
H_{z0}	-61,068559 μT

Tabela 4.1: Constantes obtidas após a calibração do magnetômetro.

Observa-se que o magnetômetro possui distorções *hard-iron* significativas, uma vez que as leituras são deslocadas de forma significativa da origem do sistema de coordenadas, superando, em alguns casos o valor da medida. Já as distorções *soft-iron* não são tão significativas já que os valores de a, b e c são próximos de 1. A Figura 4.1 apresenta em azul as leitura do magnetômetro sem nenhuma correção e em vermelho as leituras do magnetômetro após a correção.

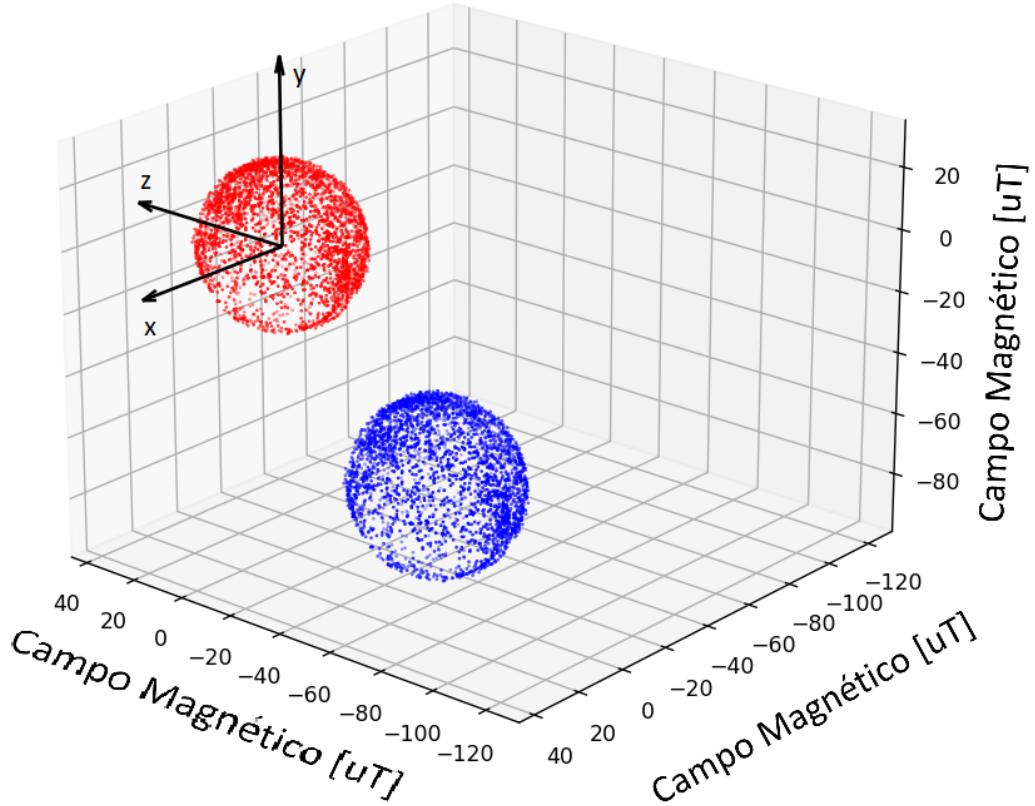


Figura 4.1: Em azul os dados do magnetômetro sem correção e em vermelho os dados corridos pelo magnetômetro.

4.2 Calibração da gaiola de Helmholtz

Após a realização da calibração da Gaiola de Helmholtz, obtém-se a matriz de ajuste de tensão, M e observa-se pela Equação (4.2) que a matriz de ajuste é diagonalmente dominante, conforme explicado no Capítulo 3.

$$M = \begin{bmatrix} -4,06 & -0,03 & -0,00 \\ 0,03 & 3,66 & 0,01 \\ -0,08 & -0,05 & 3,73 \end{bmatrix}. \quad (4.2)$$

Como a matriz de ajuste não é diagonal, então existe influência entre os eixos, ou seja, a tensão referente ao eixo x afeta a medida de campo magnético no eixo y, por exemplo. É importante observar também que a bobina x está acoplada de forma invertida na ponte H. Isso pode ser observado pelo coeficiente $A = -4,06$, que indica que à medida que a tensão no eixo x aumenta, a leitura do campo no mesmo eixo diminui. Para o sistema de controle em malha aberta não faz diferença o sentido das bobinas desde que o sistema seja calibrado antes do uso. O módulo do campo magnético em Brasília, algo em torno de $25 \mu\text{T}$, se encontra próximo do valor esperado. Além disso, a maior componente do campo é na direção x. Isso se dá por que a direção x da gaiola é aproximadamente a direção norte, sendo assim, espera-se que a componente do campo

magnético local nessa direção tenha maior intensidade que as outras, conforme o valor calculado, no referencial ECEF,

$$H_0 = \begin{bmatrix} 23,34\mu T \\ -2,25\mu T \\ 10,19\mu T \end{bmatrix}. \quad (4.3)$$

4.3 Avaliação dos sistemas em malha aberta e fechada

Com a finalidade de verificar a qualidade dos sistemas aplicou-se em cada dos eixos a referência de $20\mu T$ de forma isolada, e em conjunto. Os sistemas em avaliação são três: Campo MA_1 , Campo MA_2 e Campo PI. O campo MA_1 é o campo magnético gerado pelo sistema em malha aberta desenvolvido pela Letícia em [3]. Nesse modelo a matriz de ajuste é diagonal, ou seja, desconsidera-se a influência de campo magnético em bobinas ortogonais. O campo MA_2 , desenvolvido no Capítulo 3, é o campo magnético gerado pelo sistema em malha aberta. Nesse modelo, a matriz de ajuste possui todos os componentes, ou seja, considera-se a influência de campo magnético em bobinas ortogonais. O campo PI, também desenvolvido no Capítulo 3, é o campo magnético gerado pelo sistema em malha fechada após longo período.

Para o primeiro sistema, os erros percentuais de medida isolada em x, y e z em MA_1 são 2,8%, 1,6% e 2,8%, respectivamente. Já os erros percentuais de medida ao aplicar campo nos três eixos é de 0,55%, 0% e 7%, respectivamente aos eixos x, y e z .

Já para o segundo sistema, os erros percentuais de medida isolada em x, y e z em MA_2 são 3,05% 0,3% e 6,4%, respectivamente. Já os erros percentuais de medida ao aplicar campo nos três eixos são de 4,15%, 0,2% e 6,75%, respectivamente aos eixos x, y e z . Nesse caso, observa-se que não há um ganho significativo na redução de erros se comparado ao primeiro sistema.

No terceiro sistema, os erros percentuais de medida isolada em x, y e z em malha fechada são 0,05%, 0,15% e 0,25%, respectivamente. Já os erros percentuais de medida ao aplicar campo nos três eixos é de 0,05%, 0,1% e 0,1%. Ou seja, o erro do sistema em malha fechada é entorno de 10 vezes menor que o sistema em malha aberta, conforme pode ser visto na Tabela 4.2.

Campo Teórico (μT)			Campo MA_1 (μT)			Campo MA_2 (μT)			Campo PI (μT)		
20,00	0,00	0,00	20,56	-1,96	0,67	20,61	-0,09	1,22	19,99	0,04	-0,03
0,00	20,00	0,00	-0,192	19,68	0,14	-0,77	19,94	1,26	-0,01	19,97	0,07
0,00	0,00	20,00	0,28	-1,91	20,56	0,83	-0,07	21,28	0,03	0,02	20,05
20,00	20,00	20,00	20,11	20,00	21,40	20,83	19,96	21,35	19,99	20,02	19,99

Tabela 4.2: Campos medidos e teóricos da Gaiola de Helmholtz.

4.4 Resposta ao degrau do sistema em malha fechada

Foram executados diversos testes do tipo resposta ao degrau durante o ajuste da constante proporcional e a constante de integração. Após o ajuste do sistema, no qual para a constante proporcional o valor estabelecido foi de 0,45 e para a constante integral foi de 1, obteve-se os resultados apresentados na Figura 4.2. No sistema avaliado, o tempo de subida é aproximadamente 1 segundo, sendo o mesmo tempo de um passo do sistema. Além disso, o sistema não apresenta sobrepasso significativo na taxa de amostragem do sistema. O controle proporcional integrador auxilia na convergência com erro em regime permanente tendendo a zero.

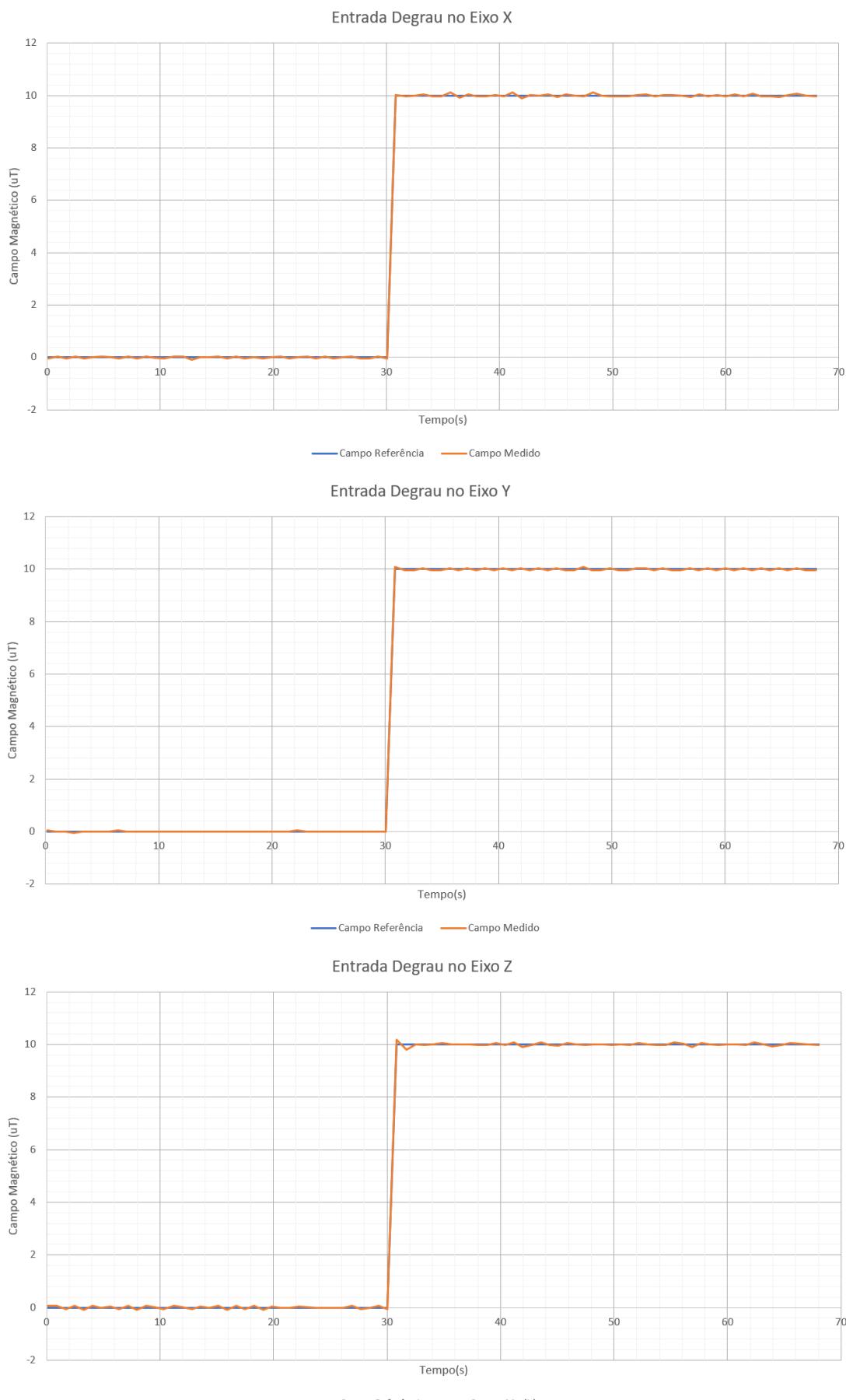


Figura 4.2: Resposta ao degrau da gaiola em malha fechada nos eixos x, y e z.

4.5 Controle PI em regime permanente

Foram executados ensaios em regime permanente. Nesses ensaios foram coletadas 622 amostras ao longo de 805,54 segundos, com a finalidade de se verificar a precisão dos controle com relação após um longo período de execução. Nesse estudo o ruído será modelado com um ruído gaussiano branco e o erro foi definido como 3 vezes o desvio padrão, representando assim 99,74% das medidas realizadas. A Tabela 4.3 resume os resultados obtidos. Na Figura 4.3 é apresentado o campo de referência e o campo medido ao longo do tempo, já na Figura 4.4 é apresentado o histograma do campo magnético.

Medidas realizadas	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
Média (μT)	20,0000322	19,99930868	19,99930868
Desvio Padrão da Média (μT)	0,052972806	0,032342838	0,047186213
Erro (μT)	0,158918417	0,097028513	0,14155864
Erro Percentual (%)	0,7945	0,4851	0,7077

Tabela 4.3: Medidas realizadas no sistema em malha fechada após atingir regime estacionário.

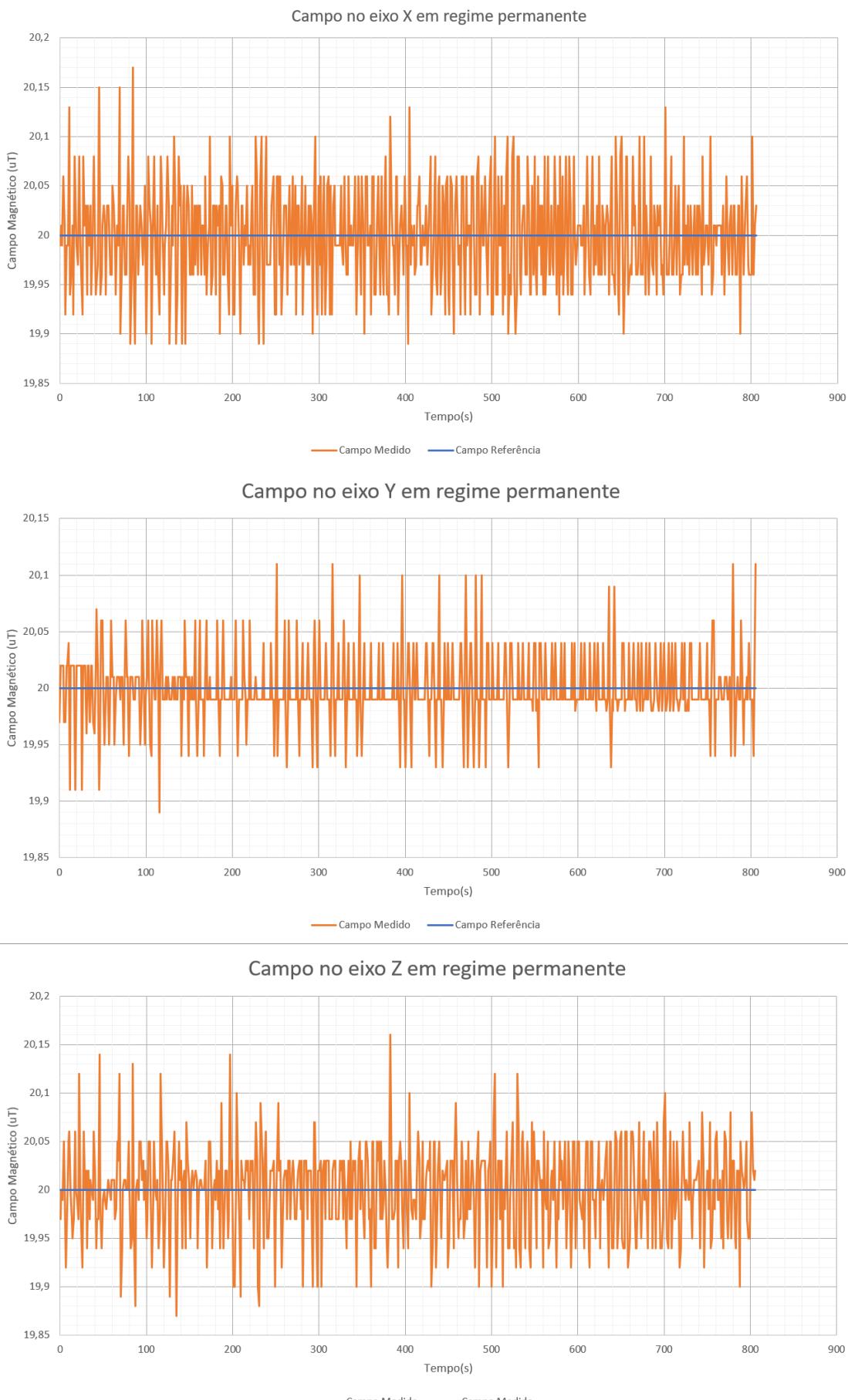
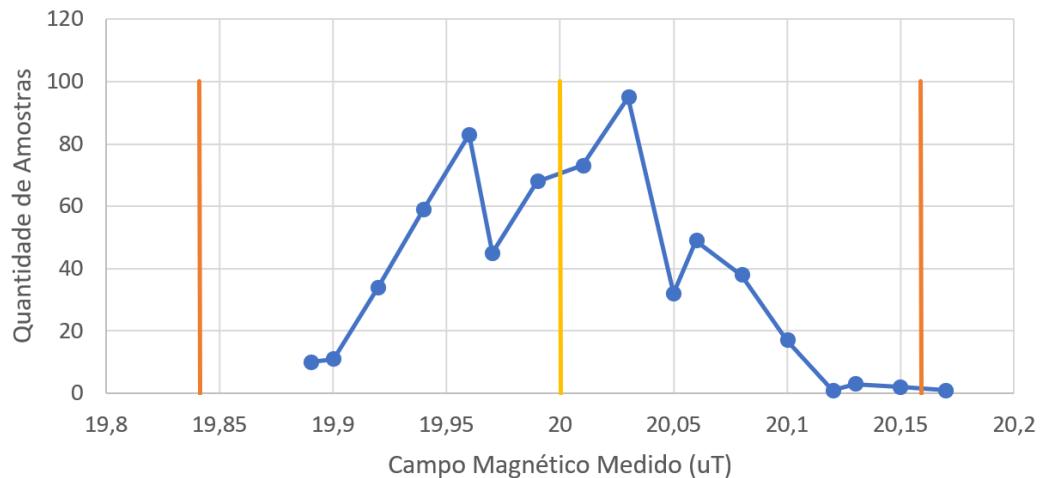
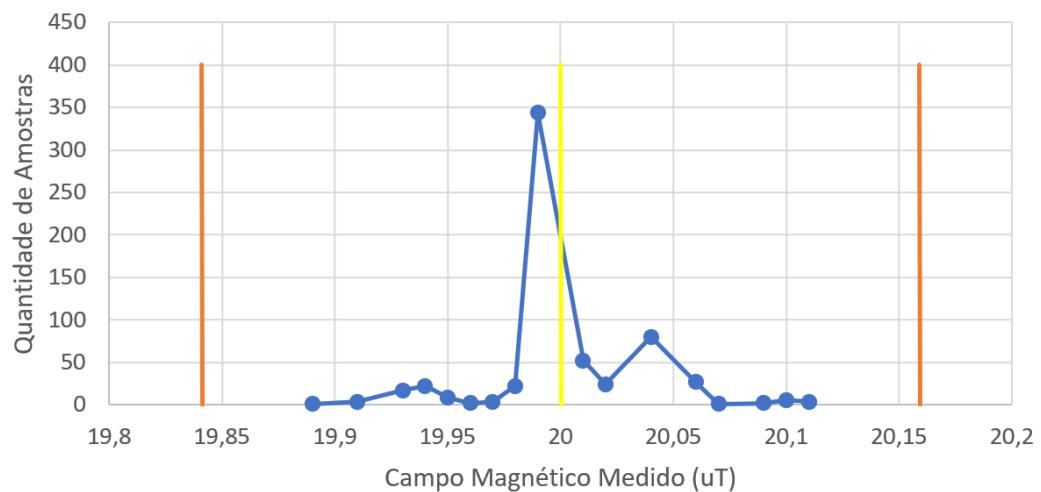


Figura 4.3: Campo nos eixos x, y e z em regime permanente em malha fechada.

Histograma Campo Magnético Eixo X



Histograma Campo Magnético Eixo Y



Histograma Campo Magnético Eixo Z

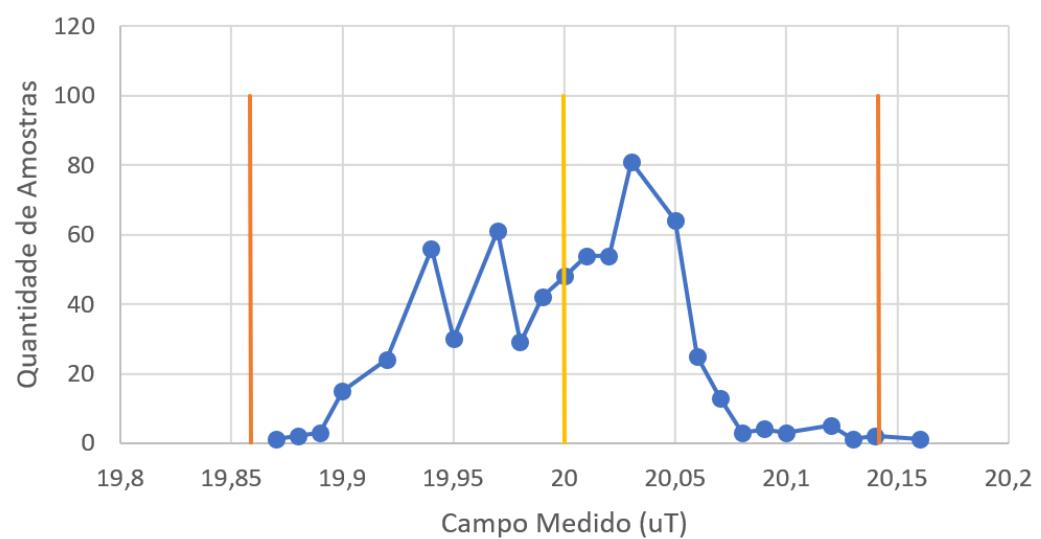
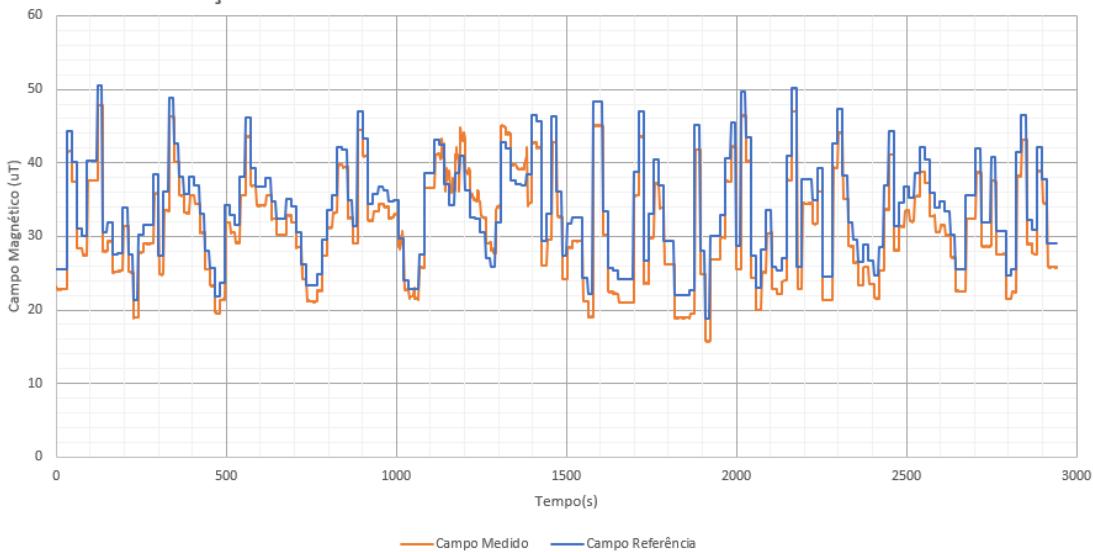


Figura 4.4: Histograma do campo nos eixos x, y e z em regime permanente.

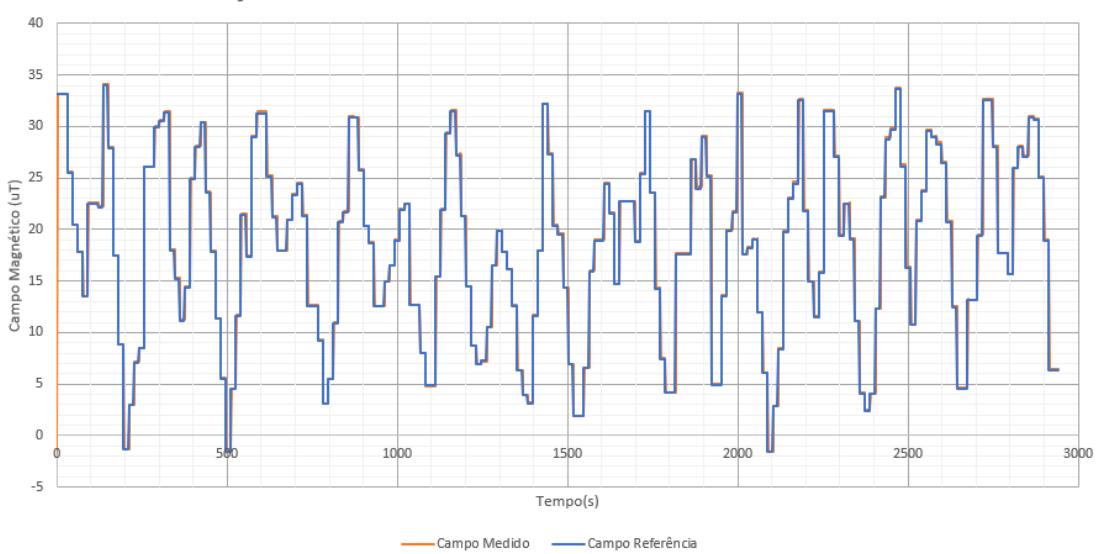
4.6 Reprodução do campo geomagnético medido pelo AlfaCrux

Foram executados ensaios em malha aberta e em fechada dos dados coletados pelo magnetômetro do AlfaCrux no dia 02/07/2022 de 01:09:24 (UTC) a 17:30:20 (UTC) do mesmo dia. Os dados coletados tem período de amostragem de 5 minutos. Por questões práticas, os dados foram simulados 20 vezes mais rápido, reduzindo o tempo de simulação de 16,34 horas para aproximadamente 50 minutos. Cabe ressaltar que as simulações foram realizadas no referencial do satélite AlfaCrux, ou seja, um referencial que gira em relação ao referencial inercial. Observa-se que a reprodução do campo em malha aberta, Figura 4.5, possui erros maiores na reprodução do campo em malha fechada, Figura 4.6.

Simulação em malha aberta dos dados coletados do AlfaCrux no eixo X



Simulação em malha aberta dos dados coletados do AlfaCrux no eixo Y



Simulação em malha aberta dos dados coletados do AlfaCrux no eixo Z

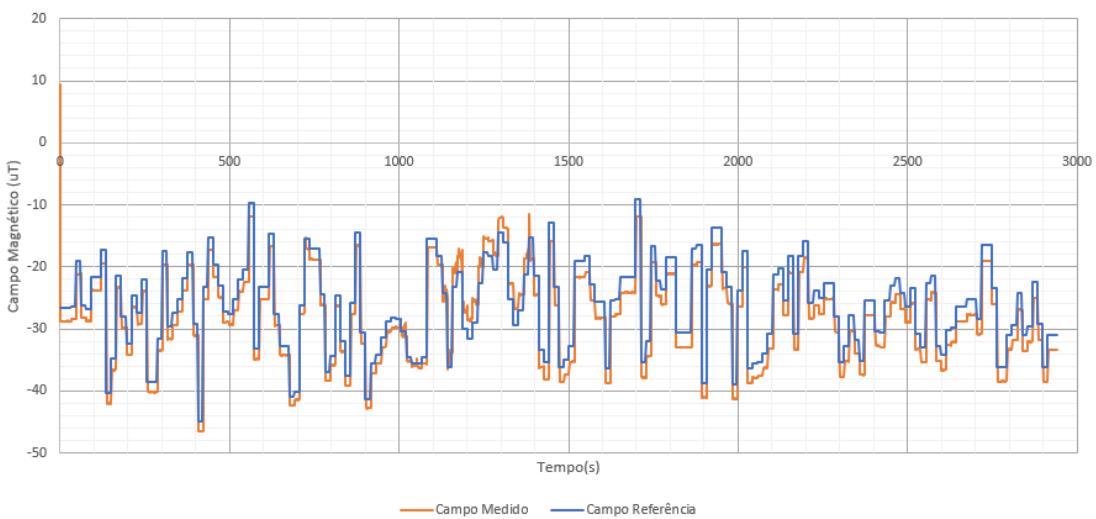
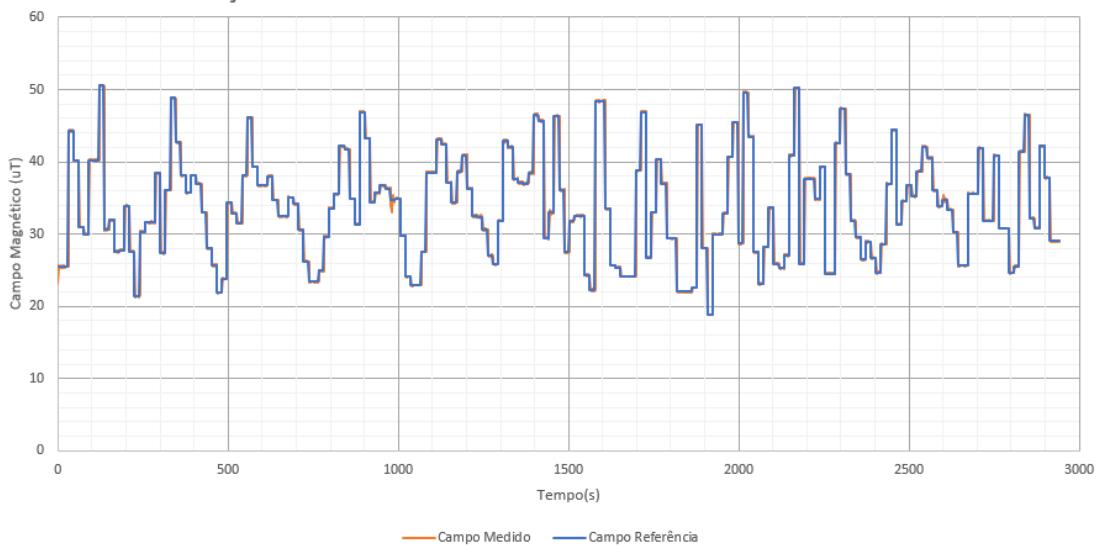
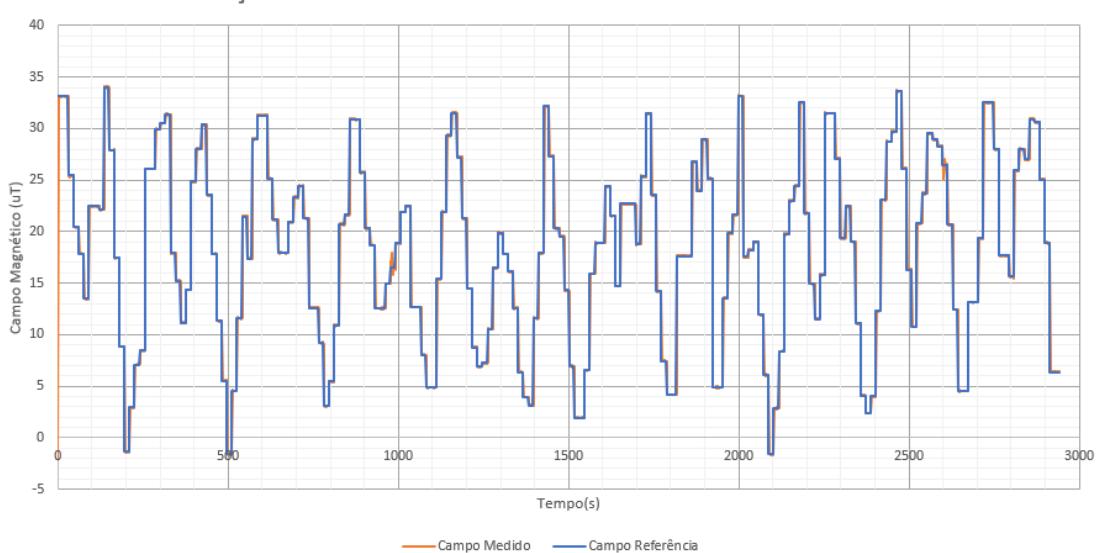


Figura 4.5: Simulação em malha aberta dos dados coletados pelo AlfaCrux.

Simulação em malha fechada dos dados coletados do Alfacrux no eixo X



Simulação em malha fechada dos dados coletados do Alfacrux no eixo Y



Simulação em malha fechada dos dados coletados do Alfacrux no eixo Z

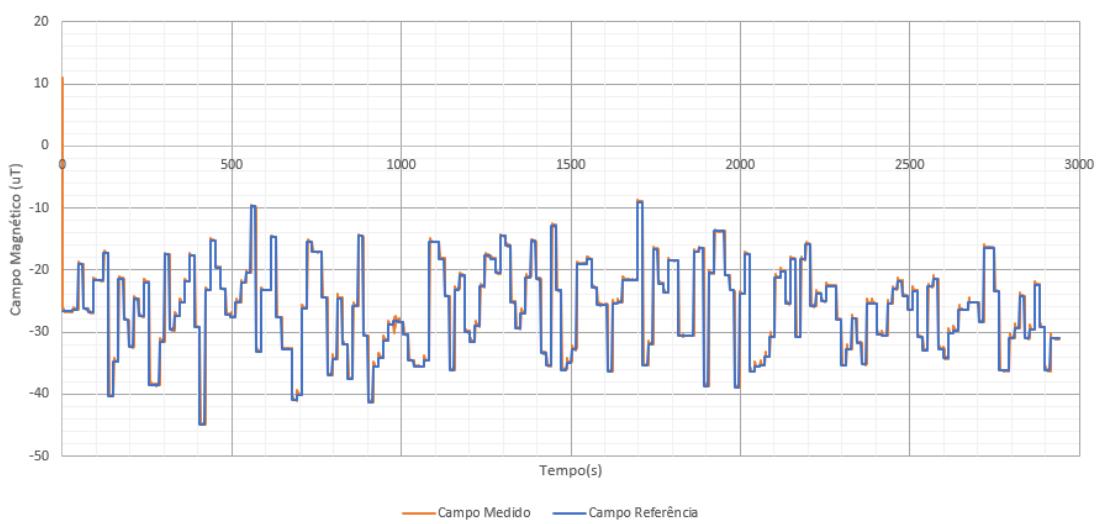
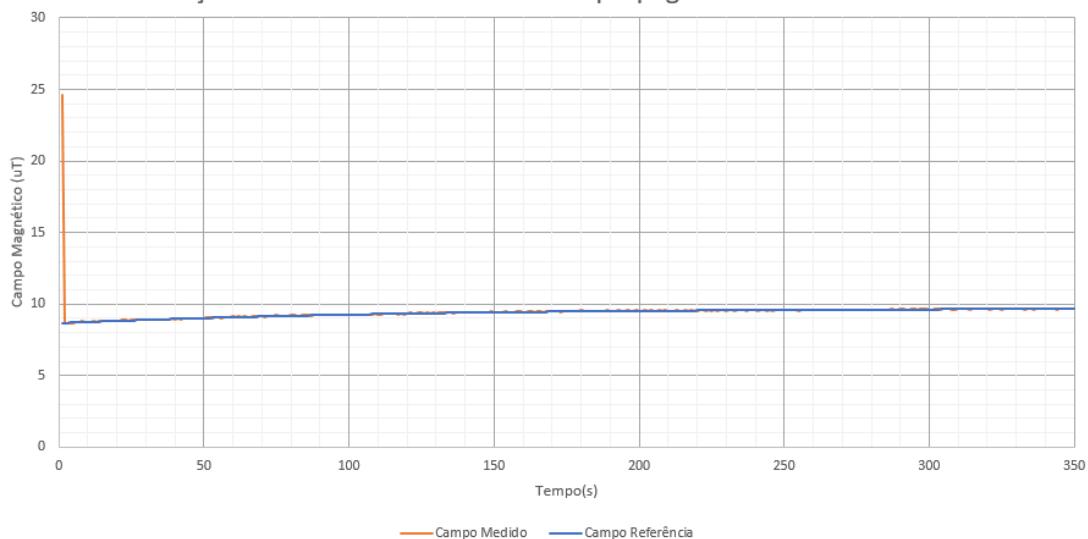


Figura 4.6: Simulação em malha fechada dos dados coletados pelo AlfaCrux.

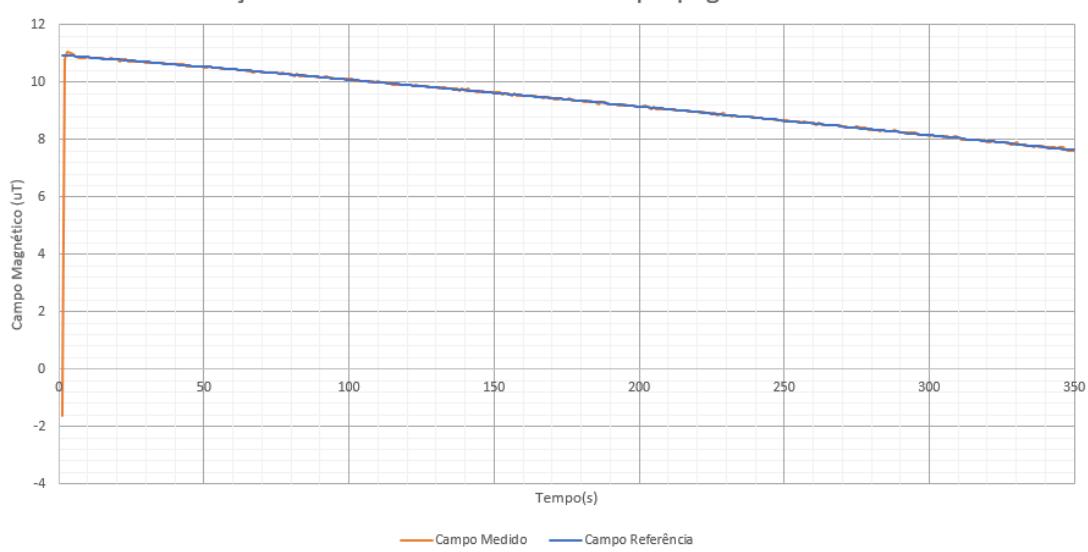
4.7 Reconstrução do campo magnético na órbita do AlfaCrux

A simulação do campo magnético na órbita AlfaCrux tem como entrada o TLE obtido na plataforma Celestrak do dia 15/09/2022. Utilizou-se o propagador SGP4 para determinar a posição do AlfaCrux de 21:00 (UTC) a 21:059 (UTC) do mesmo dia, com período de amostragem de 2 segundos. Utilizou-se o modelo IGRF para converter a posição do satélite em campo magnético no referencial ECEF, esses dados foram exportados em formato JSON conforme apresentado na Figura 3.24. Os vetores de campo magnético foram importados pelo novo software de operação e simulados em malha fechada no referencial ECEF. O resultado da simulação é apresentado na Figura 4.7.

Simulação em malha fechada dos dados propagados do Alfacrux no eixo X



Simulação em malha fechada dos dados propagados do Alfacrux no eixo Y



Simulação em malha fechada dos dados propagados do Alfacrux no eixo Z

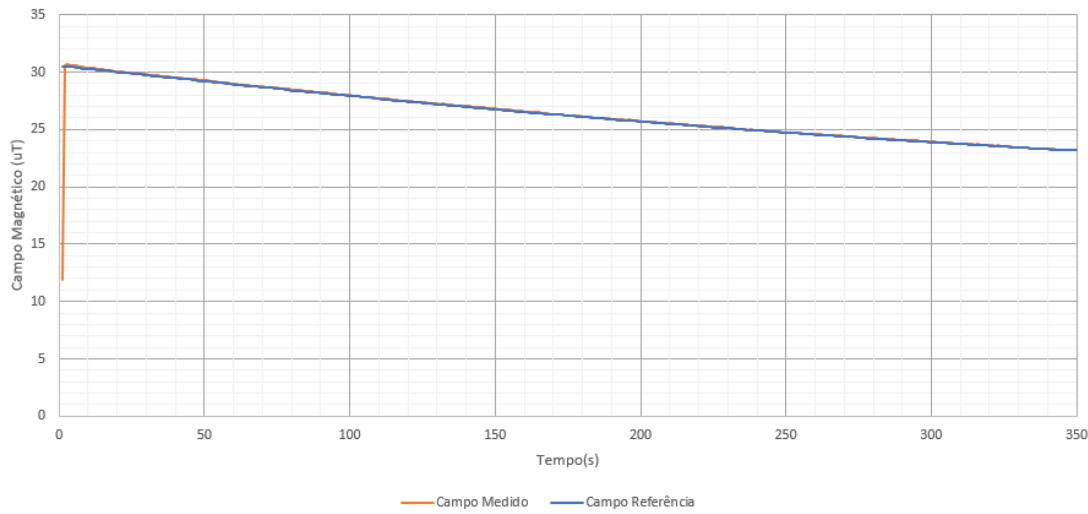


Figura 4.7: Simulação em malha fechada dos dados pelo AlfaCrux.

Capítulo 5

Conclusões

Em síntese, os objetivos estabelecidos no Capítulo 1 foram alcançados. O projeto do circuito inversor de corrente foi aprimorado tanto em sua representação esquemática quanto no seu *layout*. O Laboratório Aberto de Brasília auxiliou na evolução do projeto com o desenvolvimento de um gabinete em acrílico. O *software* de operação desenvolvido possui interface gráfica que facilita a utilização da plataforma de testes por outras equipes. Pela nova interface é possível verificar a comunicação dos subsistemas, calibrar o magnetômetro e calibrar a gaiola. Novas funcionalidades permitem a importação e execução de arquivos JSON com vetores de campo magnético. Foram verificados erros do controlador em malha aberta menores que $1,35 \mu\text{T}$, representando um erro de 6,75% da medida de referência. Já no controlador em malha fechada foram verificados erros menores que $0,05 \mu\text{T}$, representando um erro de 0,25% da medida de referência. Já no regime permanente o sistema em malha fechada apresentou erros menores que $0,15 \mu\text{T}$, representando 0,8% da medida de referência.

Assim, esse trabalho contribui no aprimoramento da infraestrutura de simulação e geração de campo magnético variável do LODESTAR.

5.1 Perspectivas futuras

5.1.1 Integração do software no ambiente linux

Atualmente existem projetos de determinação e controle de atitude que foram desenvolvidos em ambiente Linux. Assim, para maior utilização do *software* por todas as frentes de estudo, a adaptação para ambiente Linux é necessária. O ambiente Linux possui integração com a linguagem Python, porém a comunicação entre as fontes de tensão e o *software* é realizada por um *driver*, Keysight IO Libraries Suite. Sendo necessário adaptar a comunicação entre as fontes e o computador nesse ambiente.

5.1.2 Integração entre o propagador orbital e a interface

As simulações de campo magnético do AlfaCrux foram realizadas com o auxílio de um *script* em Python desenvolvido pelo Danilo Queiros de Freitas e Gabriel Lima Setão na disciplina de Tópicos em Engenharia: Operação, Comando e Controle de CubeSats. O script exporta o vetor de campo no formato JSON para que o *software* importe o vetor e simule o campo. Após a integração entre o propagador de órbita e o *software* de operações, o usuário terá a opção de importar um vetor de campo magnético no formato JSON ou importar um TLE e simular o campo utilizando o propagador orbital.

5.1.3 Aprimoramento da interface

No campo "Simulação" da interface gráfica do *software* colocou-se um mapa com a finalidade de apresentar do ponto satélite na superfície terrestre, de forma semelhante ao apresentado na Figura 5.1. Assim, durante a execução da simulação do campo magnético a animação mostraria a região geográfica correspondente ao campo executado no momento.

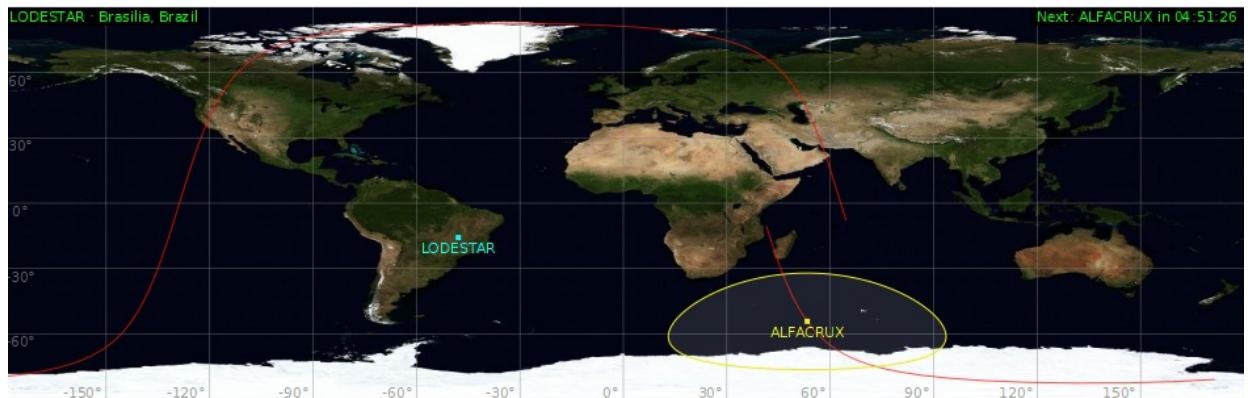


Figura 5.1: Rastro do satélite na superfície terrestre.

Também poderia ser incluído gráficos em tempo real do campo de referência e do campo medido pela plataforma, semelhante ao apresentado na Figura 5.2. Assim, durante o teste o usuário poderia verificar o comportamento do campo magnético em tempo real.

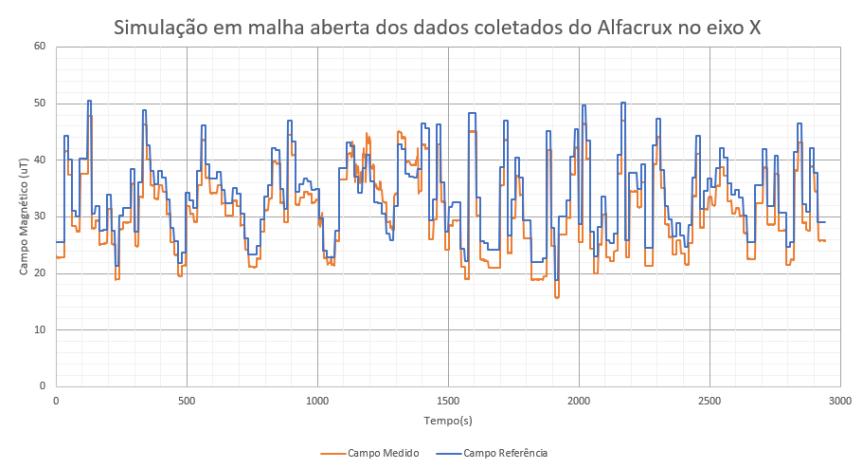


Figura 5.2: Gráfico apresentado na plataforma em tempo real.

5.1.4 Calibração da gaiola de Helmholtz

No processo de calibração desenvolvido nesse trabalho, os dados utilizados para determinar os coeficientes da matriz de ajuste de tensão M são coletados quando as fontes de tensão operam individualmente, isto é, somente uma fonte de tensão aplica tensão nas bobinas por vez. Porém ao calibrar a matriz com as fontes operando individualmente os coeficientes podem não ajustar o sistema quando as fontes operam em conjunto. Dessa forma poderia se utilizar amostras mais espaçadas no espaço de tensão, realizando a calibração matriz de ajuste e do campo magnético da Terra pelo método dos mínimos quadrados. Com a matriz de ajuste mais precisa, o campo em malha aberta teria um desempenho melhor e por consequência o sistema convergiria mais rápido, uma vez que a estimativa inicial de campo magnético seria mais precisa.

5.1.5 Análise da variância das estimativas

Em resolução de problemas que envolvem o método dos mínimos quadrados não basta calcular o valor mais provável que ajusta as curvas aos dados. É necessário verificar a precisão do modelo com relação aos dados. Ou seja, qual a variância de cada um dos parâmetros encontrados pelo método dos mínimos quadrados. Uma das formas de se fazer isso é calculando a matriz de covariância que permite inferir sobre a variância das estimativas. Embora esse trabalho não tenha contemplado essa análise, recomenda-se que o mesmo seja considerado em trabalhos futuros.

5.1.6 Caracterização do erro em simulação de malha aberta e malha fechada

Com a objetivo de caracterizar o erro tanto em malha aberta quanto em malha fechada, recomenda-se a utilização de histogramas do erro em ambos os regimes. Assim, é possível caracterizar o tipo de erro em cada um dos sistemas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

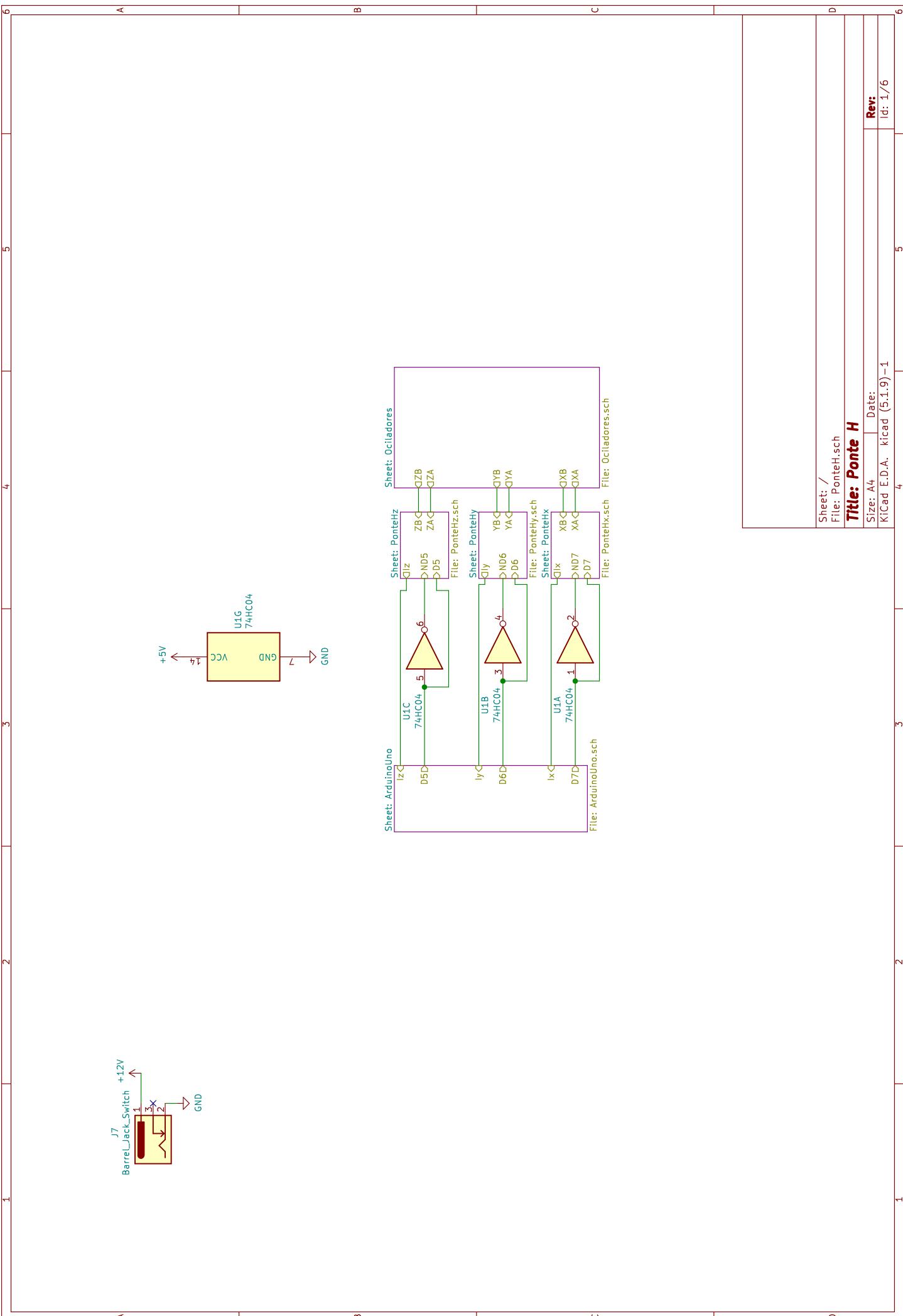
- [1] CLARKE, A. C. Extra-terrestrial relays. *Wireless World*, 1945.
- [2] LODESTAR. *THE ALFACRUX MISSION*. 2021. Acessado em 09/09/2022. Disponível em: <<https://lodestar.aerospace.unb.br/projects/alfacrux>>.
- [3] PLOEG, L. C. v. d. Desenvolvimento de sistema para simulação do campo magnético terrestre em órbitas baixas. 2017.
- [4] NASA. *Definition of Two-line Element Set Coordinate System*. Acessado em 17/09/2022. Disponível em: <https://ai-solutions.com/helpFiles/two-line_element_set_file.htm>.
- [5] LAMMAS, A.; SAMMUT, K.; HE, F. 6-dof navigation systems for autonomous underwater vehicles. *Mobile Robots Navigation*, IntechOpen, p. 457–483, 2010.
- [6] OZYAGCILAR, T. Calibrating an ecompass in the presence of hard and soft-iron interference. *Freescale Semiconductor Ltd*, p. 1–17, 2012.
- [7] CRACKNELL, A. P.; VAROTSOS, C. A. Editorial and cover: Fifty years after the first artificial satellite: from sputnik 1 to envisat. *International Journal of Remote Sensing*, v. 28, n. 10, p. 2071–2072, 2007.
- [8] UCS. *UCS Satellite Database*. 2022. Acessado em 29/09/2022. Disponível em: <<https://www.ucsusa.org/resources/satellite-database>>.
- [9] JOHNSTONE, A. Cubesat design specification (1u-12u) rev 14 cp-cds-r14. *The CubeSat Program, Cal Poly SLO, July*, 2020.
- [10] DIAS, S.; QUEIROZ, K.; ARAUJO, A. Proposta de controlador não linear para atitude de nanossatélite baseada em cinemática descrita por quatérnios. *Anais do 14o Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. Galoá. doi*, v. 10, 2019.
- [11] WISNIEWSKI, R. Linear time-varying approach to satellite attitude control using only electromagnetic actuation. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, v. 23, n. 4, p. 640–647, 2000.
- [12] IVANOV, D.; OVCHINNIKOV, M.; ROLDUGIN, D. Three-axis attitude determination using magnetorquers. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, v. 41, n. 11, p. 2455–2462, 2018.

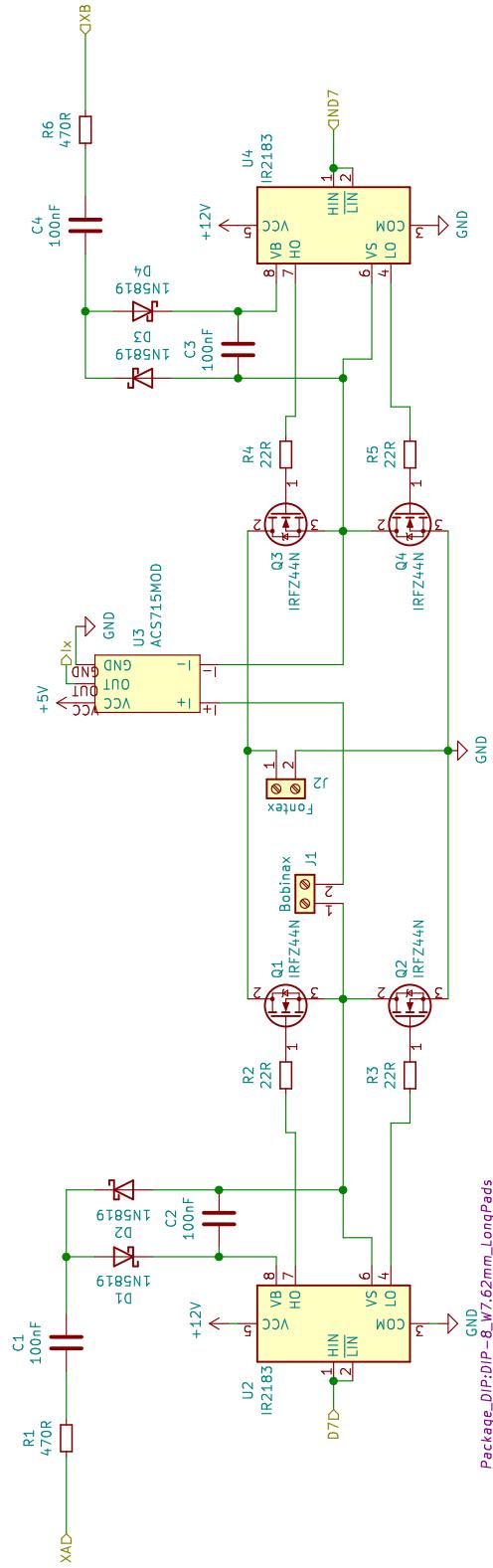
- [13] LODESTAR. *THE ALFACRUX MISSION*. Acessado em 19/09/2022. Disponível em: <<https://lodestar.aerospace.unb.br/projects/alfacrux>>.
- [14] ISHIOKA, I. S. K.; SILVA, L. M. B. da. Teste de um algoritmo para controle magnético da atitude de nanossatélites. *Trabalho de Conclusão de Curso–Universidade de Brasília–UnB, Brasília, DF*, p. 33–147, 2018.
- [15] MAGDALENO-ADAME, S. et al. Coil systems to generate uniform magnetic field volumes. In: COSMOL, INC, LINDSAY PATERSON MASSACHUSETTS, USA. *Excerpt from the proceedings of the COMSOL conference*. [S.l.], 2010. v. 13, p. 401–411.
- [16] CARRARA, V. Projeto de bobinas de helmholtz em 3 eixos para simulação de campo geomagnético. In: *VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, Campina Grande–Paraíba–Brasil*. [S.l.: s.n.], 2010.
- [17] SILVA, R. C. da et al. Helmholtz cage design and validation for nanosatellites HWIL testing. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, IEEE, v. 55, n. 6, p. 3050–3061, 2019.
- [18] MARKLEY, F. L.; CRASSIDIS, J. L. *Fundamentals of spacecraft attitude determination and control*. [S.l.]: Springer, 2014.
- [19] CELESTRAK Organization. Acessado em 17/09/2022. Disponível em: <<https://celestrak.org/>>.
- [20] HOOTS, F. R.; ROEHRICH, R. L.; KELSO, T. Spacetrack report no. 3. *Project Spacetrack Reports, Office of Astrodynamics, Aerospace Defense Center, ADC/DO6, Peterson AFB, CO*, v. 80914, p. 14, 1980.
- [21] SKYFIELD,ELEGANT Astronomy for Python. Acessado em 17/09/2022. Disponível em: <<https://rhodesmill.org/skyfield/>>.
- [22] INTERNATIONAL Geomagnetic Reference Field (IGRF). Acessado em 17/09/2022. Disponível em: <<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/igrf.html>>.
- [23] IGRF 13 in Python. Acessado em 17/09/2022. Disponível em: <<https://pypi.org/project/igrf/>>.
- [24] KIRCHNER, F. F. Análise dos mínimos quadrados. *FLORESTA*, v. 18, n. 1/2, 1988.
- [25] HELENE, O. *Metodos dos Minimos Quadrados*. [S.l.]: Editora Livraria da Física, 2006.
- [26] STMICROELECTRONICS2010. *Using LSM303DLH for a tilt compensated electronic compass*. Agosto 2010. Acessado em 01/08/2022. Disponível em: <https://www.st.com/resource/en/application_note/cd00269797-using-lsm303dlh-for-a-tilt-compensated-electronic-compass-stmicroelectronics.pdf>.
- [27] AGILENT. *Agilent Performance dc Power Supplies*. 2002. Acessado em 09/09/2022. Disponível em: <https://www.sglabs.it/public/HP_6032A.pdf>.

- [28] KEYSIGHT. *USER MANUALS 82357B User's Guide*. Acessado em 09/09/2022. Disponível em: <<https://www.keysight.com/us/en/assets/9018-06142/user-manuals/9018-06142.pdf>>.
- [29] KEYSIGHT. *IO Libraries Suite Downloads*. Acessado em 09/09/2022. Disponível em: <<https://www.keysight.com/us/en/lib/software-detail/computer-software/io-libraries-suite-downloads-2175637.html>>.
- [30] AGILENT. *SCPI Learning Page*. 2022. Acessado em 09/09/2022. Disponível em: <<https://www.keysight.com/us/en/lib/software-detail/programming-examples/scpi-learning-page-1688330.html>>.
- [31] VASCONCELOS, J. et al. A geometric approach to strapdown magnetometer calibration in sensor frame*. *IFAC Proceedings Volumes*, v. 41, n. 1, p. 172–177, 2008. ISSN 1474-6670. 2nd IFAC Workshop on Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S147466701535521X>>.
- [32] BRITTAINE, J. Thevenin's theorem. *IEEE Spectrum*, v. 27, n. 3, p. 42–, 1990.
- [33] WHAT Is PySimpleGUI. Acessado em 10/09/2022. Disponível em: <<https://pypi.org/project/PySimpleGUI/>>.
- [34] RECIPE - Long Operations - Multi-threading IMPORTANT GUI Topic! Acessado em 10/09/2022. Disponível em: <<https://www.pysimplegui.org/en/latest/cookbook/#the-long-operation/>>.
- [35] AN Intro to Threading in Python. Acessado em 10/09/2022. Disponível em: <<https://realpython.com/intro-to-python-threading/>>.

ANEXOS

I.1 ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO DE INVERSÃO





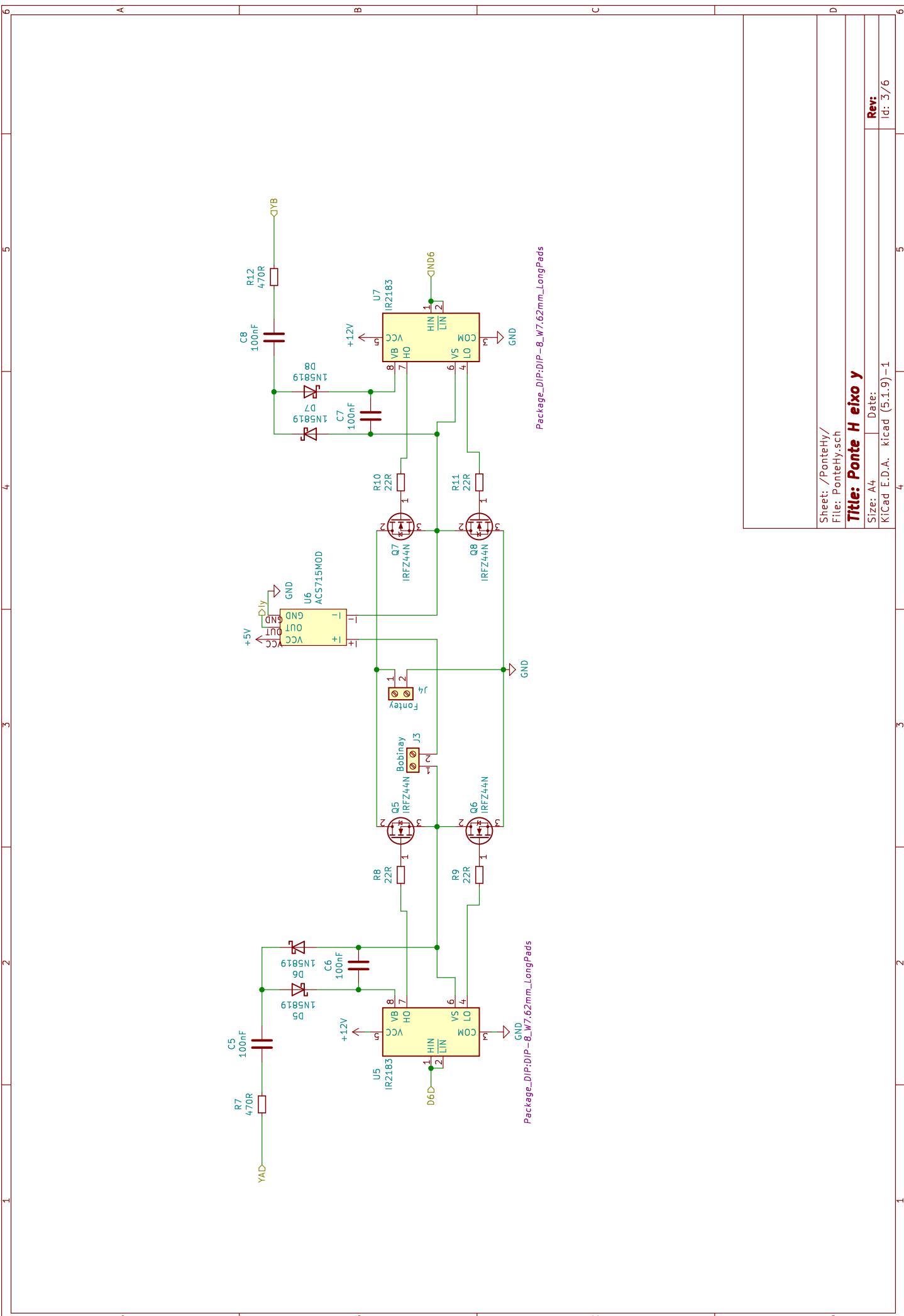
Package_DIP:DIP-8_W7.62mm_LongPads

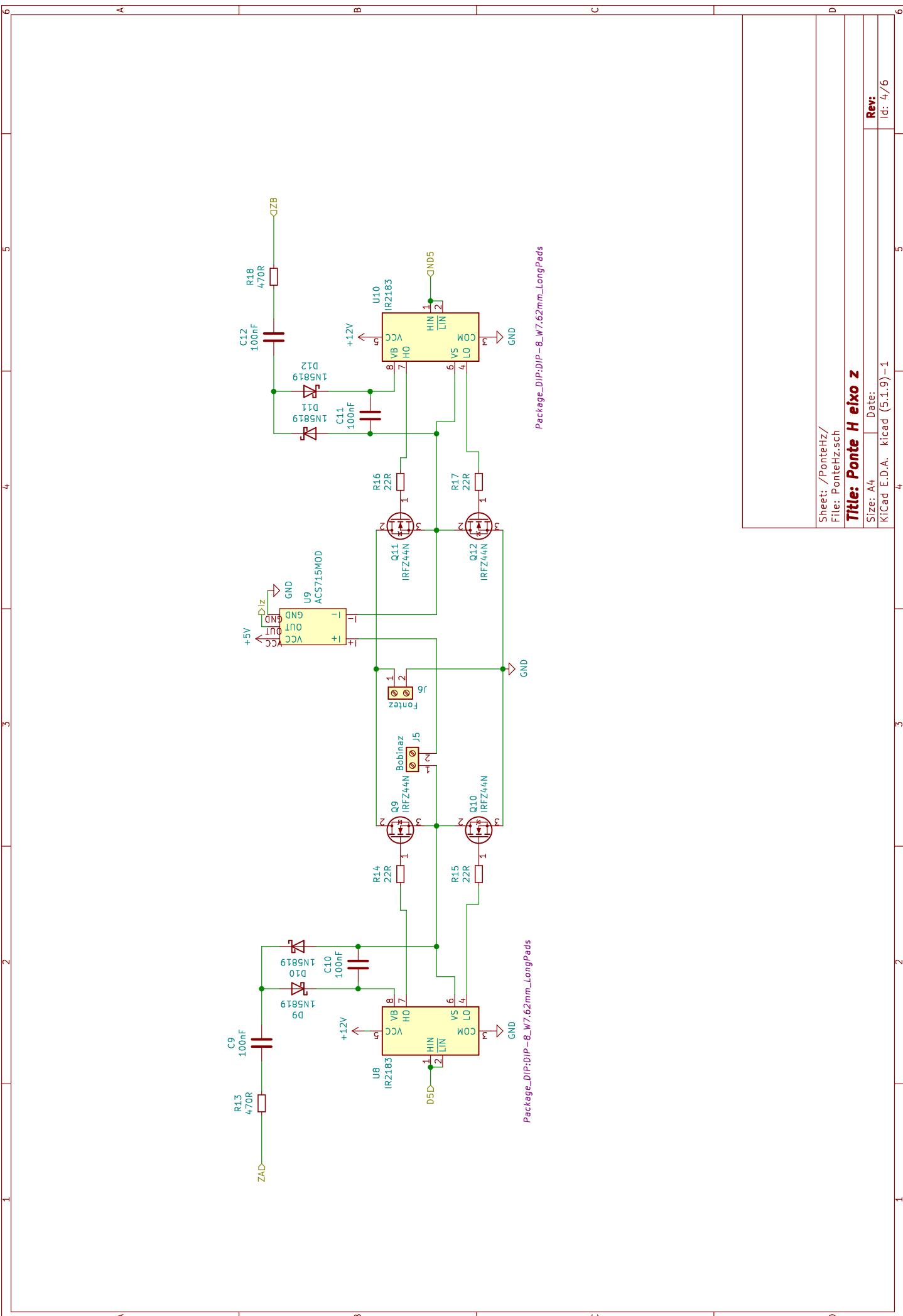
Package_DIP:DIP-8_W7.62mm_LongPads

Sheet: /PontekX/
File: PontekX.sch

Title: Ponte H eixo x

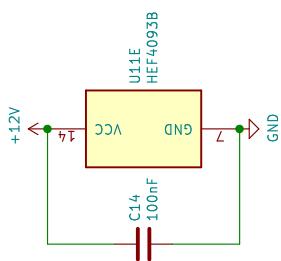
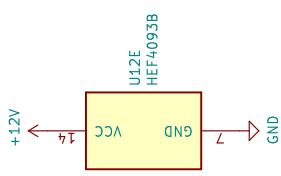
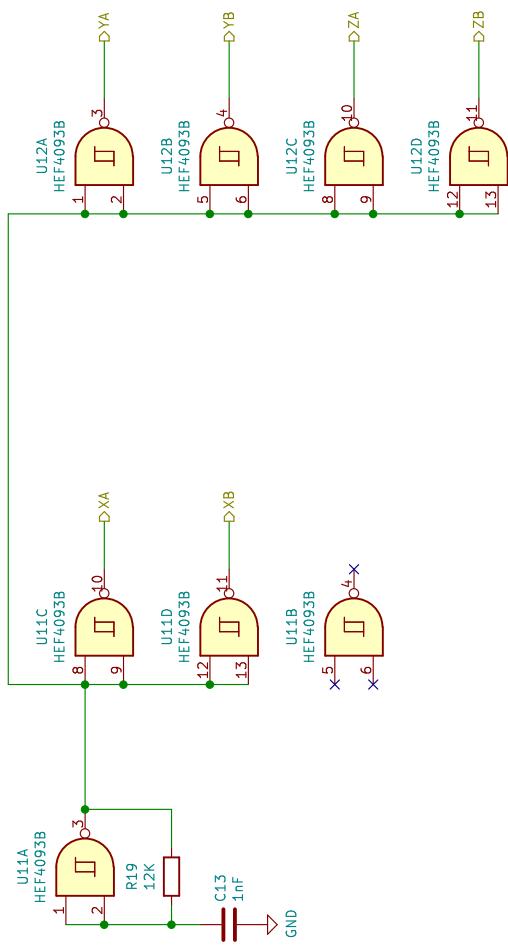
Size: A4
KiCad E.D.A. kicad (5.1.9)-1
Rev: Id: 2/6





Oscilador Principal

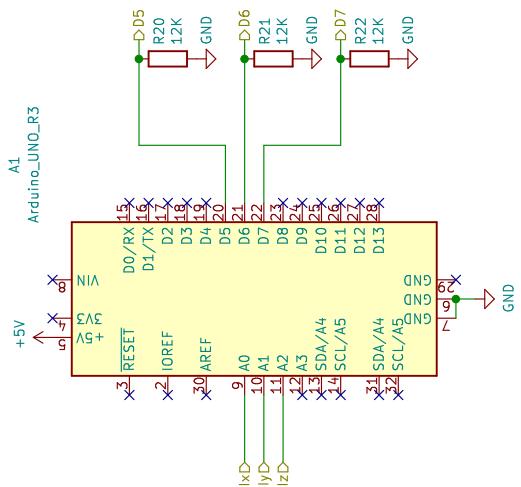
Repetidores para cada circuito.



Sheet: /Osciladores/
File: Osciladores.sch

Title: Osciladores

Size: A4
KiCad E.D.A. kicad (5.1.9)-1
Rev: 5/6
Id: 5/6



Sheet: /ArduinoUno/
File: ArduinoUno.sch

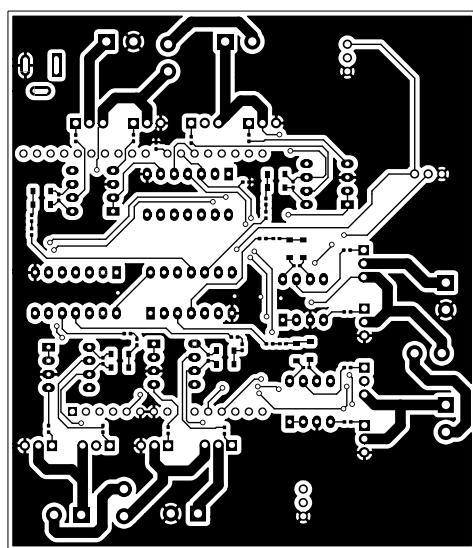
Title: Microcontrolad

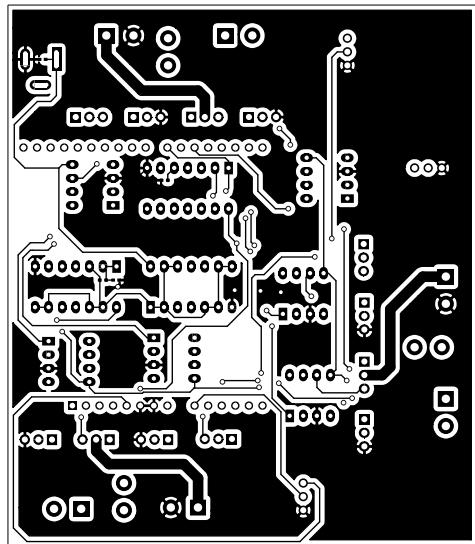
title: Microcontrolador Arduino

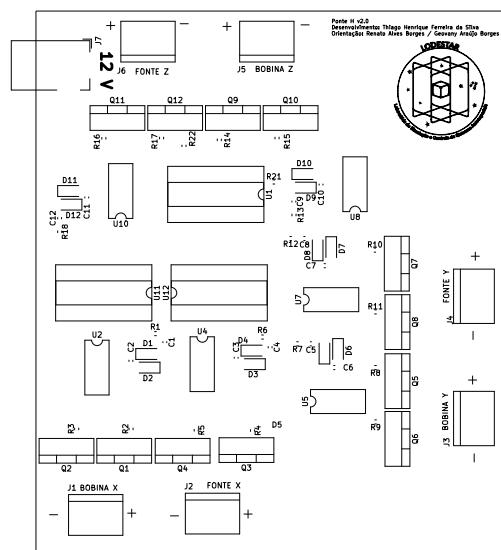
Title: Microcontrolador

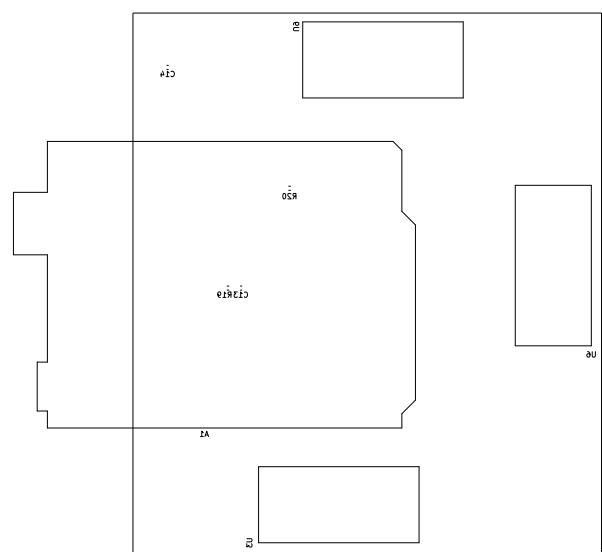
Title: Microcontrolador Arduino

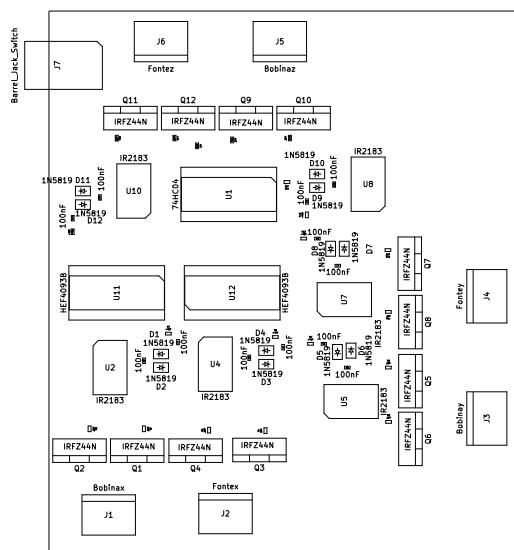
I.2 LAYOUT PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

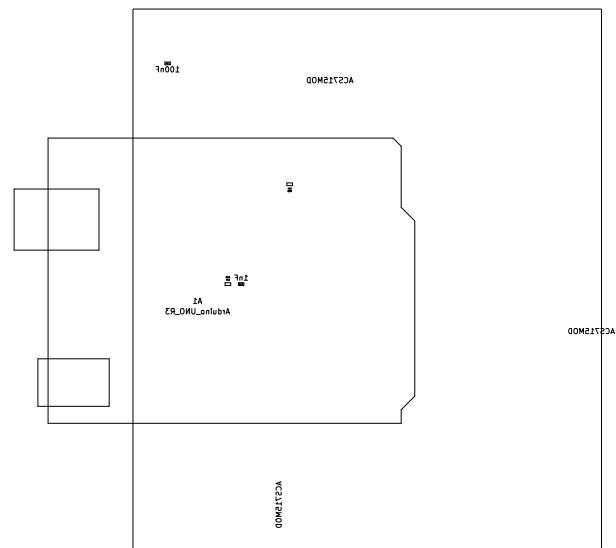












I.3 FIRMWARE CIRCUITO DE INVERSÃO

```
1 int incomingByte = 0; // for incoming serial data
2 int tempo = millis();
3 int estado[] = {0, 0, 0, 0, 0, 0}; // D7,D6,D5,A0,A1,A2
4 int n = 0;
5
6 void setup()
7 {
8     Serial.begin(9600); // opens serial port, sets data rate to 9600 bps
9     pinMode(5, OUTPUT);
10    pinMode(6, OUTPUT);
11    pinMode(7, OUTPUT);
12 }
13
14 void loop()
15 {
16
17     String msg = "";
18     while (Serial.available() > 0)
19     {
20         msg += char(Serial.read());
21         delay(10);
22     }
23
24     if (msg != "") {
25         if (msg.length() == 8)
26         {
27             if (msg[4] == '1')
28             {
29                 digitalWrite(5, HIGH);
30                 estado[0] = 1;
31             }
32             else
33             {
34                 digitalWrite(5, LOW);
35                 estado[0] = 0;
36             }
37             if (msg[5] == '1')
38             {
39                 digitalWrite(6, HIGH);
40                 estado[1] = 1;
41             }
42             else
43             {
44                 digitalWrite(6, LOW);
45                 estado[1] = 0;
46             }
47             if (msg[6] == '1')
48             {
49                 digitalWrite(7, HIGH);
50             }
51         }
52     }
53 }
```

```

50     estado[2] = 1;
51 }
52 else
53 {
54     digitalWrite(7, LOW);
55     estado[2] = 0;
56 }
57 estado[3] = analogRead(A0);
58 estado[4] = analogRead(A1);
59 estado[5] = analogRead(A2);
60 Serial.print("$INV");
61 for (int i = 0; i < 6; i++)
62 {
63     Serial.print(estado[i]);
64     if (i >= 2 and i < 5) Serial.print(" ");
65 }
66 Serial.println(";");
67 }
68 if (msg == "$INV;" or msg == "$INV?;")
69 {
70     Serial.print("$INV");
71     estado[3] = analogRead(A0);
72     estado[4] = analogRead(A1);
73     estado[5] = analogRead(A2);
74     for (int i = 0; i < 6; i++)
75     {
76         Serial.print(estado[i]);
77         if (i >= 2 and i < 5) Serial.print(" ");
78     }
79     Serial.println(";");
80 }
81 //Serial.println(msg);
82 }
83 // say what you got:
84
85
86 }

```