



**DESENVOLVIMENTO DE HARDWARE PARA  
CONTROLE DE ATITUDE MAGNÉTICO EM  
CUBESATS**

**LI WING KEE RAMOS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

Universidade de Brasília  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Elétrica

Desenvolvimento de Hardware para Controle de Atitude Magnético  
em CubeSats

Li Wing Kee Ramos

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Daniel Chaves Café, Ph.D, FT/UnB  
(Orientador)

---

Prof. Eduardo Peixoto Fernandes da Silva, Ph.D, FT/UnB  
(Examinador Interno)

---

Prof. Ricardo Zelenovsky, Ph.D, FT/UnB  
(Examinador Interno)

Brasília/DF, Julho de 2023.

## FICHA CATALOGRÁFICA

RAMOS, LI WING KEE

Desenvolvimento de Hardware para Controle de Atitude Magnético em CubeSats. [Brasília/DF] 2023.

xxx, nnnp., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Engenheiro Eletricista, Trabalho de Conclusão de Curso, 2023).

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica.

Departamento de Engenharia Elétrica

- |                  |                               |
|------------------|-------------------------------|
| 1. Magnetorquer  | 2. Hardware                   |
| 3. Nanossatélite | 4. Placa de Circuito Impresso |
| I. ENE/FT/UnB    | II. Título (série)            |

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RAMOS, LI WING KEE (2023). Desenvolvimento de Hardware para Controle de Atitude Magnético em CubeSats. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, xxxxp.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Li Wing Kee Ramos

TÍTULO: Desenvolvimento de Hardware para Controle de Atitude Magnético em CubeSats.

GRAU: Engenheiro Eletricista ANO: 2023

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta Trabalho de Conclusão de Curso e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho de conclusão de curso o pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Li Wing Kee Ramos

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

Faculdade de Tecnologia - FT

Departamento de Engenharia Elétrica(ENE)

Brasília - DF CEP 70919-970

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a minha família, em especial aos meus pais, Valéria Ramos e Li Chi Hang, por terem me proporcionado a melhor educação possível, além de todo o carinho e suporte ao longo dos anos. À minha irmã, Giovanna Ramos, por ter me acompanhado durante vários momentos difíceis. Aos meus primos, Kenneth, Brian, Chun e Tin, por toda a parceria que construímos desde a infância.

Além disso, gostaria de agradecer aos amigos que fiz durante a graduação, Vini, Dani, Anne, Breno, Gustavo, Júlia, Luquinhas, Railson, Thiago, Thiaguinho e Rebeca, pela companhia diária e incentivo que me deram para seguir o curso até o fim.

Também agradeço aos funcionários da Universidade de Brasília, pelo serviço essencial que prestam à sociedade. Em especial, gostaria de expressar minha gratidão aos professores Adolfo Bauchspiess, Flávia Maria Guerra, Marcelo Menezes de Carvalho e Daniel Chaves Café, por serem mentores e inspirações profissionais para mim.

Aos meus amigos, Daniel, Félix e Gabriel, agradeço por terem me acompanhado desde os primeiros anos de escola até o fim da graduação. Por fim, agradeço a minha namorada, Maitê, por todo o companheirismo e amor compartilhado. Dividir a vida ao seu lado é o meu maior privilégio.

## ABSTRACT

Magnetorquers are devices used in nanosatellites to perform attitude control through magnetic actuators. This solution has gained increasing popularity in relation to other alternatives because it has no moving parts and does not depend on fossil fuels. This study presents the hardware development project that implements a magnetic actuation system through coils wound on rods perpendicular to each axis.

The work was motivated by the need to improve the previous version of the magnetorquer, solving problems of PCB connectivity and low field strength of the coils. The use of a ferromagnetic core increased the generated field, and the PC104 connector facilitated integration into different missions. New sensors were implemented, such as an IMU and magnetometers, which provide more data on satellite pointing.

Control and sensing algorithms can now be implemented on the microcontroller of the magnetorquer, allowing a reduction in the processing load of the other modules. The Helmholtz cage was produced in a simplified way to allow initial performance tests. The work brought relevant improvements to the magnetorquer hardware, solving problems and making the system more flexible.

## RESUMO

Magnetorquers são dispositivos utilizados em nanossatélites para realizar o controle de atitude através de atuadores magnéticos. Essa solução tem ganhado cada vez mais popularidade em relação às outras alternativas por não possuir partes móveis e nem depender de combustíveis fósseis. Este estudo apresenta o projeto de desenvolvimento do hardware que implementa um sistema de atuação magnética através de bobinas enroladas em hastes perpendiculares a cada eixo.

O trabalho teve como motivação a necessidade aprimorar a versão anterior do magnetorquer, solucionando problemas de conectividade da PCI e de baixa intensidade do campo das bobinas. O uso de um núcleo ferromagnético aumentou o campo gerado, e o conector PC104 facilitou a integração em diferentes missões. Foram implementados novos sensores, como uma IMU e magnetômetros, que fornecem mais dados sobre o apontamento do satélite.

Algoritmos de controle e sensoriamento agora podem ser implementados no microcontrolador do magnetorquer, permitindo a redução na carga de processamento dos outros módulos. A gaiola Helmholtz foi produzida de forma simplificada para permitir testes iniciais de desempenho. O trabalho trouxe melhorias relevantes no hardware do magnetorquer, resolvendo problemas e tornando o sistema mais flexível.

# SUMÁRIO

<b>Sumário</b>	i
<b>Lista de figuras</b>	iv
<b>Lista de tabelas</b>	vi
<b>Lista de símbolos</b>	vii
<b>Glossário</b>	viii
<b>Capítulo 1 – Introdução</b>	1
1.1 Controle de Atitude . . . . .	2
1.2 Atuadores . . . . .	3
1.3 Magnetorquer . . . . .	4
1.4 Ambiente de Testes . . . . .	5
1.5 Objetivos . . . . .	6
<b>Capítulo 2 – Fundamentação Teórica</b>	8
2.1 Padrão Cubesat . . . . .	8
2.2 Comunicação Serial <i>SPI</i> . . . . .	10
2.3 Atuação Magnética . . . . .	12
2.3.1 Núcleo Ferromagnético . . . . .	13
2.4 Tipos de Bobinas de Magnetorquer . . . . .	15
2.4.1 Embarcadas . . . . .	15
2.4.2 Compactas . . . . .	16
2.4.3 Hastes . . . . .	17
2.5 Gaiola de Helmholtz . . . . .	18
2.6 Sensores . . . . .	20
2.6.1 Magnetômetro . . . . .	20
2.6.2 Unidade de Medição Inercial . . . . .	23

---

<b>Capítulo 3 – Projeto</b>	<b>26</b>
3.1 Levantamento de Requisitos . . . . .	26
3.1.1 Aspectos Mecânicos . . . . .	26
3.1.2 Processamento . . . . .	27
3.1.3 Acionamento das Bobinas . . . . .	28
3.1.4 Sensoriamento . . . . .	28
3.2 Escolha dos Componentes . . . . .	30
3.2.1 Magnetômetros . . . . .	30
3.2.2 Sensor Inercial . . . . .	31
3.2.3 Driver de Corrente . . . . .	31
3.2.4 Microcontrolador . . . . .	32
3.3 Design da PCI . . . . .	32
3.4 Produção . . . . .	35
3.4.1 Placa de Circuito Impresso . . . . .	35
3.4.2 Atuadores Magnéticos . . . . .	36
3.5 Protocolo de Comunicação . . . . .	38
3.5.1 Convenções Adotadas . . . . .	38
3.5.2 Comandos . . . . .	38
3.6 Ambiente de Testes . . . . .	40
3.6.1 Produção do Ambiente de Testes . . . . .	41
<b>Capítulo 4 – Metodologia</b>	<b>44</b>
4.1 Teste dos Componentes Eletrônicos . . . . .	44
4.1.1 Microcontrolador . . . . .	44
4.1.2 Sensores . . . . .	45
4.1.3 Consumo Energético . . . . .	45
4.2 Caracterização dos Atuadores . . . . .	46
4.2.1 Obtenção da Curva de Magnetização . . . . .	47
4.2.2 Dimensionamento do Par de Bobinas . . . . .	48
<b>Capítulo 5 – Resultados</b>	<b>50</b>
5.1 Microcontrolador . . . . .	50
5.2 Driver de Corrente . . . . .	52
5.3 Magnetômetros . . . . .	53
5.4 Sensor Inercial . . . . .	55
5.5 Caracterização da Bobina . . . . .	56

---

<b>Capítulo 6 – Conclusão</b>	58
6.1 Sugestões Para Trabalhos Futuros . . . . .	59
<b>Referências</b>	60

## LISTA DE FIGURAS

1.1	Representação CAD do CubeSat Alphacrux na mesa de testes (BORGES <i>et al.</i> , 2022). . . . .	2
1.2	Gaiola de Helmholtz e a direção do campo magnético gerado (SILVA <i>et al.</i> , 2019). . . . .	5
1.3	Primeira versão do magnetorquer. . . . .	7
2.1	Tamanhos padrão de CubeSats (VINAY; SAINI, 2022). . . . .	8
2.2	Exemplo de implementação de interface PC/104 (GEIB, 2021). . . . .	10
2.3	Diagrama de transmissão de 1 byte através do protocolo SPI (LEENS, 2009). . . . .	11
2.4	Valores de permeabilidade magnética para diversos materiais (JILES, 2015). . . . .	13
2.5	Curva de histerese generalizada. (LAURENTIU, 2021). . . . .	14
2.6	Representação de bobina embarcada em CubeSat (KHAN <i>et al.</i> , 2021). . . . .	15
2.7	Magnetorquer compacto MT01 (ERTÜRK, 2022) . . . . .	16
2.8	Atuador magnético em haste utilizado pela missão NeAtO (GALLIATH <i>et al.</i> , 2020) . . . . .	17
2.9	Combinação de magnetorquer compacto e em hastes (NANOAVIONICS, 2021). . . . .	18
2.10	Representação gaiola de Helmholtz (TATUM, 2023). . . . .	19
2.11	Intensidade do campo magnético dentro da gaiola ao longo do eixo $x$ para diferentes valores de $c$ (TATUM, 2023). . . . .	19
2.12	Efeito Hall em um material semiconductor (RAMSDEN, 2011). . . . .	21
2.13	Efeito da distorção <i>soft iron</i> e <i>hard iron</i> (OZYAGCILAR, 2012). . . . .	22
2.14	Representação dos ângulos de Euler (HASHIM, 2019). . . . .	23

3.1	Desenho técnico de exemplo de implementação de interface PC/104 (GEIB, 2021).	27
3.2	Sensor de efeito HALL modelo OH49e (NANJING OUZHUO TECH, 2018).	30
3.3	Sensor LSM6DS3 (STMICROELECTRONICS, 2017)	31
3.4	Chip DRV8837 (TEXAS INSTRUMENTS, 2021a).	32
3.5	Diagrama de Pinagem do MSP430FR6972 (TEXAS INSTRUMENTS, 2021b).	34
3.6	<i>Layout</i> da Placa de Circuito Impresso desenvolvida.	35
3.7	Placa do magnetorquer montada.	36
3.8	Suporte mecânico das bobinas.	37
3.9	Etapas de montagem das bobinas.	37
3.10	Diagrama de comunicação SPI configurado como 8bit-MSB, Fase = 0 e Polaridade = 1 (TEXAS INSTRUMENTS, 2021b).	38
3.11	Representação CAD gaiola de Helmholtz 1D.	42
3.12	Circuito de alimentação magnetorquer.	42
4.1	Diagrama de estados de acionamento das bobinas para obtenção da curva de magnetização.	47
5.1	Potência ao longo de 10 segundos no perfil de consumo mínimo.	50
5.2	Potência ao longo de 10 segundos no perfil de consumo médio.	51
5.3	Potência ao longo de 10 segundos no perfil de consumo máximo.	52
5.4	Corrente consumida pelas bobinas.	53
5.5	Resposta do magnetômetro para diferentes frequências.	54
5.6	Amostras do sinal magnetômetro.	54
5.7	Posição estimada.	55
5.8	Campo gerado pelas bobinas.	57
5.9	Projeto montado com todos os componentes.	57

## LISTA DE TABELAS

3.1	Requisitos de Hardware do novo magnetorquer. . . . .	29
3.2	Atribuição de pinos para o projeto. . . . .	33
3.3	Status das bobinas. . . . .	39
3.4	Modos de atuação das bobinas. . . . .	39
3.5	Escalas de tempo. . . . .	40
3.6	Lista de comandos de controle do magnetorquer. . . . .	41
5.1	Parâmetros do perfil de consumo mínimo. . . . .	51
5.2	Parâmetros do perfil de consumo médio. . . . .	51
5.3	Parâmetros do perfil de consumo máximo. . . . .	52
5.4	Parâmetros de Calibração Magnetômetros . . . . .	55

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Símbolos Latinos

$m$	Momento dipolo magnético	[Am <sup>2</sup> ]
$N$	Número de espiras	
$I$	Corrente elétrica	[A]
$A$	Área de seção transversal	[m <sup>2</sup> ]
$B$	Campo magnético	[T]
$V$	Tensão	[V]
$r$	Raio	[m]
$l$	Comprimento	[m]

## Símbolos Gregos

$\tau$	Torque	[N m]
$\mu$	Permeabilidade magnética	
$\chi_m$	Susceptibilidade magnética	
$\rho$	Resistividade	$\Omega$ m
$\alpha$	Aceleração angular	rad/s <sup>2</sup>
$\theta$	Ângulo	rad

## GLOSSÁRIO

LODESTAR	Laboratório de Simulação e Controle de Sistemas Aeroespaciais
ADCS	<i>Attitude and Determination Control System</i>
LEO	<i>Low Earth Orbit</i>
EPS	<i>Electrical Power System</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
PCI	Placa de Circuito Impresso
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
PTH	<i>Pin Through Hole</i>
SMD	<i>Surface Mounted Device</i>
ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>
MSB	<i>Most Significant Byte</i>
LSB	<i>Least Significant Byte</i>
GPIO	<i>Generic Purpose Input Output</i>

# INTRODUÇÃO

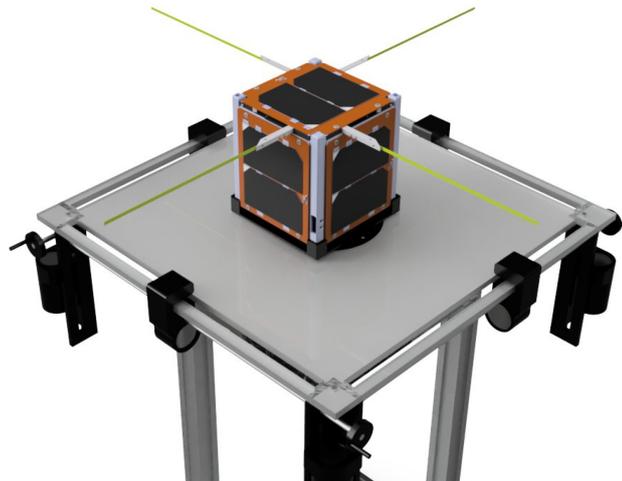
Satélites cúbicos (CubeSat), são uma classe de nanossatélites de tamanho padronizado que revolucionaram o setor de exploração espacial na última década. Esses satélites em miniatura permitiram o surgimento de diversas novas oportunidades em pesquisas científicas, telecomunicações e monitoramento da Terra (ISHIOKA *et al.*, 2017).

Graças ao tamanho reduzido destes dispositivos, a exploração espacial se tornou mais inclusiva. A adoção do padrão CubeSat impulsionou sua rápida popularização entre as universidades. Além disso, sua consolidação no mercado privado fez com que diversas *start-ups* desenvolvessem e lançassem suas próprias soluções. O crescimento do padrão CubeSat é notável: em 2012 foram lançados 25 *CubeSats*, já em 2022 o número subiu para 334. Destes, 53.8% foram desenvolvidos por empresas e 30.1% por universidades (CHO *et al.*, 2019).

Nesse contexto, em 2019 o laboratório LODESTAR iniciou o projeto AlfaCrux (GUERRA, 2022) com o objetivo de aprofundar o conhecimento sobre nanossatélites. Um dos principais propósitos da missão é realizar demonstrações técnicas em comunicação de banda estreita, o que beneficiaria a conectividade com regiões mais remotas do Brasil, visto que apresenta diversas vantagens, como: maior penetração na vegetação densa; menor interferência eletromagnética; maior alcance e consumo energético reduzido.

Assim, através do financiamento do Governo do Distrito Federal e da colaboração entre alunos e professores da Universidade de Brasília, foi produzido o CubeSat AlfaCrux I, apenas com componentes disponíveis abertamente no mercado (GUERRA, 2022). Uma representação do projeto pode ser observado na Figura 1.1. No dia 1<sup>o</sup> de Abril de 2022, o satélite foi lançado pela missão *Falcon 9 Transporter 4* da empresa *Space X*.

O sucesso do projeto AlfaCrux aumenta a viabilidade de futuros lançamentos, incentivando a demanda por novas plataformas de desenvolvimento e validação de CubeSats. Essa necessidade surge como uma oportunidade para aprimorar os processos já existentes, contribuindo para a



**Figura 1.1.** Representação CAD do CubeSat Alphacrux na mesa de testes (BORGES *et al.*, 2022).

ampliação da capacidade técnica de alunos e professores.

## 1.1 CONTROLE DE ATITUDE

O controle do apontamento do CubeSat, também chamada de controle de atitude, é essencial para que ele alcance e mantenha a orientação desejada no espaço. É a precisão no controle do apontamento do satélite que permite que sejam realizadas diversas missões como direcionar instrumentos de medição em locais específicos, obter imagens de alta resolução e estabilizar antenas de comunicação. Entretanto, garantir a precisão e estabilidade da plataforma continua sendo um desafio, visto que seu tamanho e massa reduzidos limitam o uso de métodos convencionais.

O subsistema responsável por realizar o controle de atitude do dispositivo é denominado ADCS (*Attitude Determination Control System*). A maior dificuldade no desenvolvimento destes subsistemas vem da limitação do tamanho e demanda de integração de uma grande quantidade de componentes, incluindo sensores, atuadores e circuitos eletrônicos. Além disso, por operarem em baixas órbitas terrestres (LEO), os CubeSat estão sujeitos a uma grande quantidade de perturbações como pressão de radiação solar, gradiente gravitacional e variações do campo magnético. Superar essas adversidades é uma tarefa crucial para garantir o sucesso da missão, que exige planejamento minucioso durante a integração de todos os sistemas envolvidos.

As tecnologias de controle de atitude são diversas e adequadas em diferentes cenários e

missões. Com o objetivo de determinar a melhor tecnologia para este projeto, uma breve revisão das tecnologias disponíveis será feita na próxima seção.

## 1.2 ATUADORES

O propulsor a frio é o atuador mais convencional utilizado no controle de satélites. Esse tipo de propulsor ejeta gás pressurizado para gerar torque. Devido à sua simplicidade e robustez, ele é amplamente empregado em missões de CubeSats. No entanto, devido à limitação na quantidade de combustível e à baixa capacidade de gerar torque, seu uso é ideal apenas para ajustes finos na trajetória ou apontamento. Como alternativa, existem os propulsores elétricos, que não possuem restrições no uso de combustível. No entanto, eles requerem uma grande quantidade de potência elétrica e são consideravelmente mais caros e complexos.

Outra abordagem amplamente adotada para o controle de atitude de satélites é o uso de rodas inerciais, dispositivos que giram em alta velocidade para gerar reação no satélite. Essas rodas são empregadas no processo de estabilização devido à sua capacidade de gerar torque mais elevado. Todavia, é importante considerar suas principais desvantagens. Primeiramente, as rodas inerciais consomem uma quantidade significativa de energia elétrica, o que pode representar um desafio em missões com recursos energéticos limitados.

Ademais, essas rodas ocupam um espaço considerável, o que pode ser problemático em espaçonaves com restrições de tamanho e peso, como os CubeSats. Por fim, ao longo do tempo, as rodas inerciais tendem a sofrer degradação, resultando em perda de precisão devido a atritos internos e desalinhamentos dos eixos. É crucial levar em conta essas desvantagens ao selecionar e projetar os sistemas de controle de atitude para garantir o desempenho adequado e a longevidade dos nanossatélites.

Os atuadores magnéticos são uma alternativa aos propulsores e rodas inerciais. Conforme mencionado anteriormente, o campo magnético da Terra pode interferir negativamente na estabilidade de um satélite, mas também pode ser utilizado como um recurso de controle para o dispositivo. Os ímãs tendem a alinhar seus campos magnéticos. Logo, eletroímãs ou ímãs permanentes podem ser empregados para o controle de atitude. Os ímãs permanentes têm a vantagem de não consumir energia. Porém, têm precisão de apontamento limitada e não podem

ser modificados durante a missão.

### 1.3 MAGNETORQUER

Eletroímãs utilizados como atuadores ativos no controle de satélites são denominados magnetorquers. Seu princípio de funcionamento se baseia na força magnética que surge pela interação de dois campos. Assim, permitindo a geração de torque sem dependência de combustíveis limitados ou de partes mecânicas complexas. Além disso, o uso de magnetorquer oferece uma metodologia leve, simples e eficiente para a realização do controle de atitude.

A geração de torque é realizada por meio do uso de bobinas. O torque resultante é diretamente proporcional ao momento dipolo magnético da bobina que, por sua vez, está relacionado à corrente elétrica aplicada. Assim, um torque maior é obtido ao injetar correntes mais elevadas. Com o objetivo de maximizar o campo magnético gerado pelos eletroímãs, eles são frequentemente construídos na forma de solenoides, utilizando fios de cobre e podendo incluir um núcleo ferromagnético. Essa configuração contribui para aumentar a intensidade e a eficiência do campo magnético produzido.

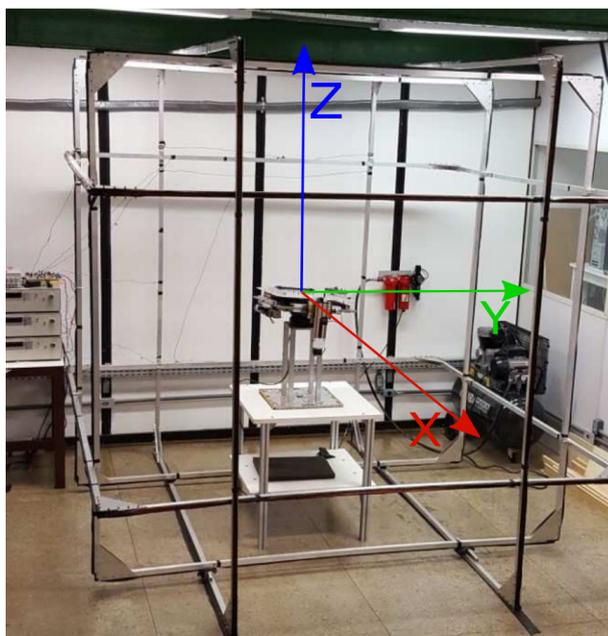
Apesar das vantagens significativas oferecidas pelos magnetorquers em comparação com os demais métodos de controle de atitude, existem também grandes desvantagens associadas a esses dispositivos sendo a principal delas a necessidade de uma grande quantidade de corrente ou longos períodos de tempo para realizar manobras, resultando em um alto consumo de energia. Isso pode limitar sua aplicabilidade em missões com recursos energéticos limitados.

Além disso, dependem da medição do campo magnético da Terra para determinar sua orientação, mas o campo magnético gerado pelas próprias bobinas pode interferir nessa medição. Essa interferência introduz erros e imprecisões no apontamento do satélite, comprometendo a precisão do sistema de controle de atitude. Portanto, deve-se levar em conta as desvantagens a fim de que elas sejam mitigadas durante o projeto.

## 1.4 AMBIENTE DE TESTES

O controle de atitude é de extrema importância para o sucesso de missões espaciais, e a validação dos magnetorquers desempenha um papel fundamental nesse contexto. Para garantir a eficácia e a confiabilidade desses dispositivos, é essencial contar com uma plataforma de testes adequada. Nesse sentido, as gaiolas de Helmholtz surgem como uma solução viável, capazes de simular o campo magnético gerado pela Terra em todos os eixos. Assim, é possível gerar um ambiente controlado para avaliar o desempenho dos magnetorquers, permitindo a realização de testes de funcionamento, calibração e otimização.

Para gerar um campo magnético uniforme no interior da gaiola, um par de bobinas é disposto em cada eixo, com espaço em seu interior para o posicionamento da carga de prova. Em sua fabricação, as bobinas são geralmente enroladas em forma de espiral em torno de um núcleo não magnético, como ferrite. Além disso, materiais condutores, como alumínio ou cobre, são frequentemente utilizados para construir a estrutura da gaiola, proporcionando uma blindagem eletromagnética. A Figura 1.2 demonstra a gaiola produzida pela equipe do laboratório LODESTAR.



**Figura 1.2.** Gaiola de Helmholtz e a direção do campo magnético gerado (SILVA *et al.*, 2019).

Todavia, essas estruturas podem ser complexas e dispendiosas de serem construídas, requerendo uma configuração precisa e o uso de materiais especializados. Além disso, as gaiolas

de Helmholtz podem ocupar um espaço significativo, o que pode ser limitante em ambientes de laboratório ou em instalações com recursos restritos. Outra desvantagem é a possibilidade de interferências eletromagnéticas devido à presença de bobinas e fios condutores de alta corrente. Essas interferências podem afetar outros equipamentos e exigir precauções adicionais para minimizar seus efeitos.

## 1.5 OBJETIVOS

Uma versão inicial de magnetorquer foi produzida para a missão *Wormsail*, em parceria entre a Universidade de Brasília e a Universidade de Nottingham, representado pela Figura 1.3. No entanto, durante a integração dos sistemas, foram identificados problemas que dificultaram a integração do magnetorquer. A placa não possuía conectores mecânicos e elétricos padrão para esse tipo de missão e as bobinas não tinham capacidade de gerar torque suficiente para rotacionar o satélite no ambiente de testes.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é desenvolver um novo magnetorquer que resolva as falhas apontadas. Adicionalmente, ele deve operar autonomamente ou sob comandos de uma unidade externa de processamento. Também será construído um ambiente de testes simplificado baseado na gaiola de Helmholtz, que possibilitará uma avaliação controlada do desempenho do magnetorquer em diferentes cenários. Essa abordagem resultará em uma plataforma de desenvolvimento e validação de magnetorquers, o que permitirá melhorar e verificar a eficiência desses dispositivos em missões espaciais.



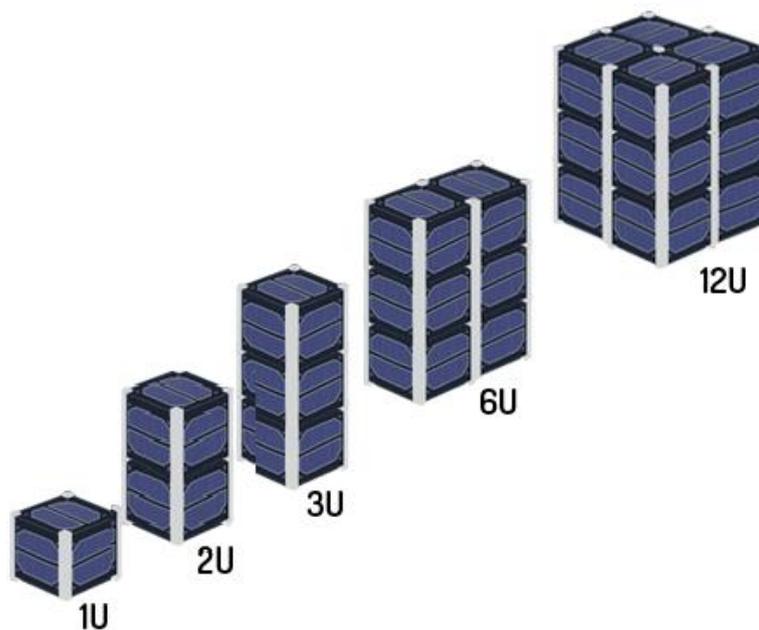
**Figura 1.3.** Primeira versão do magnetorquer.

# FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

## 2.1 PADRÃO CUBESAT

A padronização tem um papel fundamental no desenvolvimento e lançamento de CubeSats. O estabelecimento de uma diretriz comum possibilita a compatibilidade de componentes entre diferentes missões. Conseqüentemente, as mais diversas entidades responsáveis por desenvolver CubeSats podem colaborar entre si, o que resulta em redução de custos e tempo de desenvolvimento, aumentando a inclusão no setor de exploração espacial.

A Universidade Estadual Politécnica da Califórnia é a entidade responsável por definir as especificações externas dos CubeSats, garantindo a compatibilidade para os lançamentos. Foi definido o tamanho padrão de  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$  como sendo "1U". Assim, existem diferentes formatos que variam de 1U até 12U como demonstra a Figura 2.1.

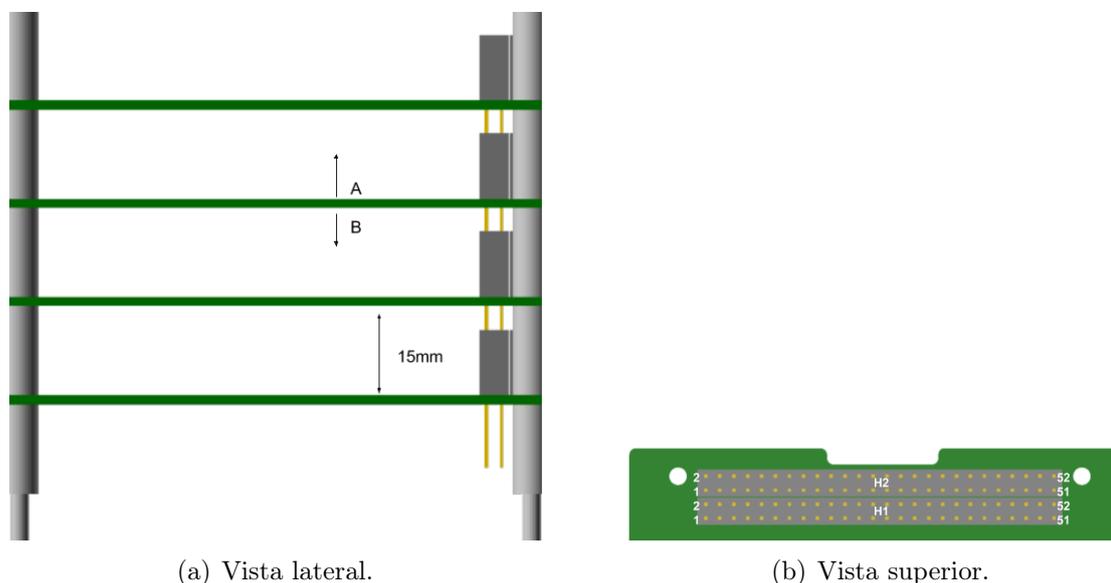


**Figura 2.1.** Tamanhos padrão de CubeSats (VINAY; SAINI, 2022).

Além da padronização dos aspectos construtivos externos, existe também uma diretriz que dita as especificações das conexões internas dos CubeSats. Apesar de não ser um padrão formalmente reconhecido, a interface PC/104 vem sendo amplamente utilizada no contexto de missões espaciais de nanossatélites (BOUWMEESTER *et al.*, 2017). Ela fornece barramentos de comunicação serial e alimentação, além de delimitar conexões mecânicas e tamanho das placas de circuito impresso. Desse modo, é possível integrar os sistemas embarcados que compõem os submódulos do satélite através de um conector de 104 pinos, como demonstra a Figura 2.2. Usualmente, os subsistemas desse tipo de missão são classificados da seguinte forma (LÄTT *et al.*, 2014):

1. **Sistema de Comunicação (Communications System):** Responsável pela transmissão e recepção de dados por meio de rádio transceptores, sistemas de comunicação por satélite ou outros meios de comunicação necessários para a missão.
2. **Sistema de Energia Elétrica (Electrical Power System):** É o submódulo que atua no gerenciamento do fornecimento de energia para os demais componentes do sistema. Engloba a geração de energia através de painéis solares e a regulação dos sinais para os níveis adequados.
3. **Sistema de Determinação e Controle de Atitude (Attitude Determination and Control System):** Esse sistema é responsável por determinar e controlar a atitude (orientação) do CubeSat no espaço. Isso envolve o uso de sensores, como acelerômetro, giroscópios, magnetômetros e sensores solares, juntamente com atuadores, como bobinas de magnetorquer ou rodas inerciais, para ajustar e estabilizar a orientação do satélite.
4. **Sistema de Comando e Manuseio de Dados (Command and Data Handling System):** É o encarregado de processar os comandos enviados à missão e pelo manuseio e armazenamento de dados gerados a bordo. Isso inclui o processador central, memória, interfaces de comunicação, como USB ou Ethernet, e outros componentes relacionados ao controle e fluxo de dados.
5. **Sistema de Controle Térmico (Thermal Control System):** Esse sistema é responsável por manter a temperatura do CubeSat dentro de uma faixa de operação adequada. Para isso utiliza dissipadores de calor, materiais isolantes, aquecedores e resfriadores.

6. **Carga Útil (Payload):** A carga útil varia dependendo dos objetivos do projeto e refere-se aos instrumentos científicos, equipamentos de observação ou outras cargas específicas da missão.



**Figura 2.2.** Exemplo de implementação de interface PC/104 (GEIB, 2021).

Os subsistemas são empilhados e conectados através dos pinos do conector PC104. Assim, essa interface fornece uma base comum que permite o acoplamento desses submódulos de forma compacta. Entretanto, apesar de essa interface ter se tornado padrão, é importante deixar claro que na prática, apenas os aspectos mecânicos são adotados enquanto a atribuição de função aos pinos é inconsistente (BOUWMEESTER *et al.*, 2017). Portanto, durante o desenvolvimento de um submódulo, deve-se verificar a implementação utilizada pelos demais subsistemas e adequar o projeto de modo a garantir sua modularidade e compatibilidade.

## 2.2 COMUNICAÇÃO SERIAL SPI

Interface de comunicação serial SPI é um protocolo de comunicação síncrono normalmente utilizado para comunicação entre microcontroladores, sensores e periféricos (LEENS, 2009). Ele permite transferência e recebimento de dados em alta velocidade de modo simultâneo (*full duplex*). Devido a sua simplicidade e eficiência, é amplamente utilizado em sistemas embarcados.

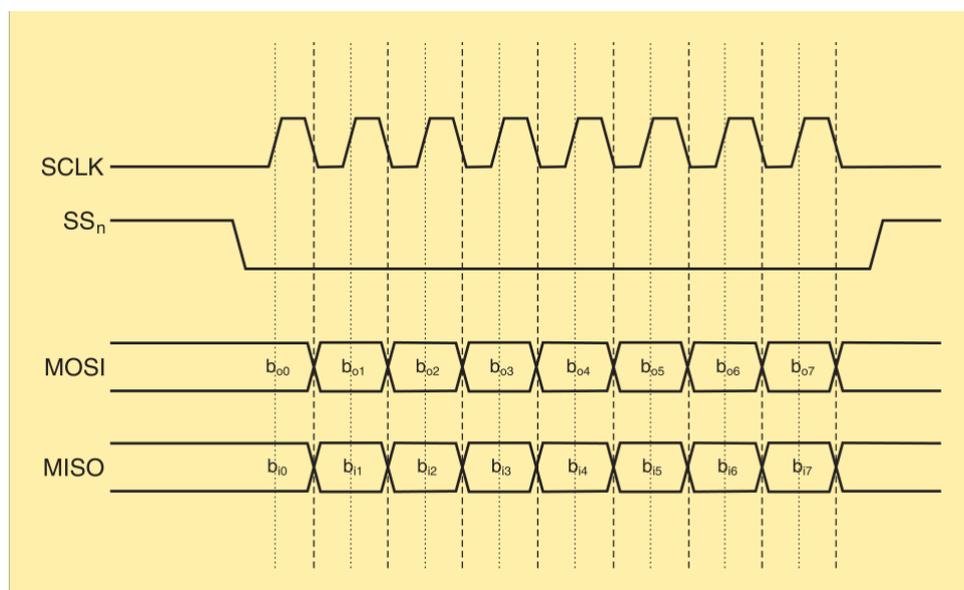
Tipicamente, a interface SPI é utilizada para conectar múltiplos dispositivos através de um barramento em comum, em que um deles age como mestre e os demais como escravos. É papel

do mestre iniciar a comunicação e controlar a transferência de dados.

O barramento SPI é composto de pelo menos 4 sinais:

1. *Slave Select* (SS): Sinaliza qual escravo o mestre irá se comunicar.
2. *Serial Clock* (SCK): O mestre gera pulsos ditando a frequência da comunicação.
3. *Master Output Slave Input* (MOSI): Utilizado pelo mestre para transmitir dados para os escravos.
4. *Master Input Slave Output* (MISO): Utilizado pelos escravos para transmitir dados para o mestre.

Inicialmente, o mestre irá selecionar o dispositivo com o que se comunicará ativando a linha *SS* correspondente. Em seguida, serão gerados pulsos através de *SCK* na frequência desejada. Cada pulso é correspondente à transferência simultânea de 1 bit entre mestre e escravo. Um flanco é reservado para a escrita na linha e o flanco complementar é usado para a leitura. Os flancos podem ser selecionados através das configurações de polaridade (POL) e fase (PHA). A polaridade indica o valor do clock quando não há comunicação (idle) e a fase indica se o primeiro flanco é leitura ou escrita. Após o término do envio do pacote a linha *SS* será desativada. Esse processo pode ser resumido através da Figura 2.3



**Figura 2.3.** Diagrama de transmissão de 1 byte através do protocolo SPI (LEENS, 2009).

Desse modo, a interface SPI pode ser utilizada como barramento de comunicação entre os submódulos de um CubeSat, visto que ela apresenta flexibilidade e robustez. Através dela, é possível estabelecer uma conexão entre o processador central, os sensores, atuadores e outros sistemas presentes no CubeSat.

A sincronização dos dados por meio do sinal de clock, juntamente com os canais dedicados para envio e recebimento de dados, permite a transferência de dados rápida e confiável. Além disso, a capacidade de suportar vários dispositivos em um mesmo barramento simplifica a arquitetura e a integração dos submódulos do CubeSat. Logo, a interface SPI desempenha um papel fundamental na comunicação interna do satélite, contribuindo para a integração dos diversos sistemas embarcados.

### 2.3 ATUAÇÃO MAGNÉTICA

Bobinas helicoidais de fio condutor, também conhecidos como solenoides, são essenciais para a geração de campos magnéticos e constituem a base de funcionamento dos magnetorquers. Por meio da aplicação de uma tensão em seus terminais, é gerada uma corrente elétrica que induz um momento dipolo magnético. Conseqüentemente, os solenoides atuam como indutores capazes de serem acionados eletricamente, funcionando como eletroímãs (VÁZQUEZ, 2013).

De forma geral, o momento dipolo magnético induzido pela corrente pode ser representado pela Equação 2.1

$$\mathbf{m} = \mu_r N I \mathbf{A} \quad (2.1)$$

em que  $\mathbf{m}$  é o vetor momento magnético,  $\mu_r$  é a permeabilidade magnética relativa,  $N$  é o número de voltas da bobina,  $I$  a corrente e  $\mathbf{A}$  é o vetor da área de secção transversal (LOVERA, 2001). Ademais, o torque aplicado às bobinas é dado pela Equação 2.2

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{m} \times \mathbf{B} \quad (2.2)$$

onde  $\boldsymbol{\tau}$  é o torque aplicado ao dispositivo e  $\mathbf{B}$  é o campo magnético do local (LOVERA, 2001).

### 2.3.1 Núcleo Ferromagnético

Como o momento magnético ( $\mathbf{m}$ ) é diretamente proporcional à permeabilidade magnética relativa ( $\mu_r$ ), é possível ainda aumentar a intensidade do momento dipolo magnético gerado com a inclusão de um núcleo ferromagnético ou paramagnético. Esses materiais possuem susceptibilidade magnética ( $\chi_m$ ) positiva, uma grandeza adimensional que mensura a capacidade de um material ser magnetizado por um campo externo (REITZ *et al.*, 2003).

Diferentemente dos materiais paramagnéticos, os ferromagnéticos reagem fortemente quando na presença de um campo externo, além de possuírem capacidade de serem imantados permanentemente. Existem ainda os materiais diamagnéticos, ou seja, que reduzem a intensidade do campo. Esta propriedade se dá quando a susceptibilidade é negativa (REITZ *et al.*, 2003).

O efeito do núcleo na geração de momento magnético pode ser visualizado na Equação 2.1, pois a permeabilidade depende da susceptibilidade de acordo com a seguinte fórmula (JILES, 2015):

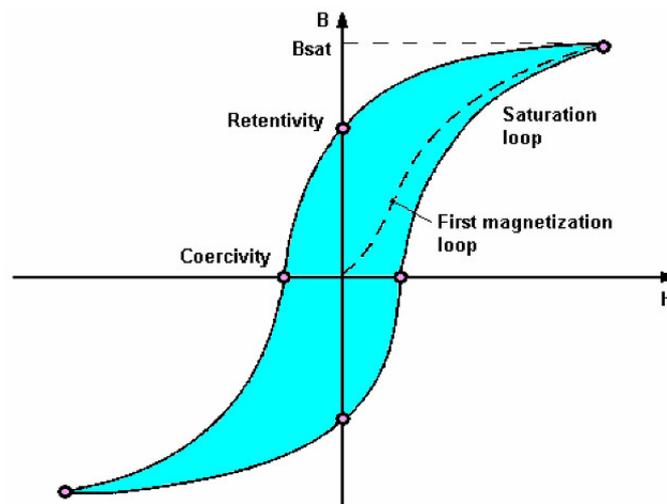
$$\mu_r = 1 + \chi_m \quad (2.3)$$

**Table 12.5** Selected magnetic properties of different soft magnetic materials

	Composition	Relative permeability		Coercivity $H_c$ (A m <sup>-1</sup> )	Saturation induction $B_s$ (T)
		$\mu_i$	$\mu_{max}$		
Iron	100% Fe	150	5000	80	2.15
Silicon-iron (nonoriented)	96% Fe 4% Si	500	7000	40	1.97
Silicon-iron (grain-oriented)	97% Fe 3% Si	1500	40 000	8	2.0
78 Permalloy	78% Ni 22% Fe	8000	100 000	4	1.08
Hipernik	50% Ni 50% Fe	4000	70 000	4	1.60
Supermalloy	79% Ni 16% Fe, 5% Mo	100 000	1 000 000	0.16	0.79
Mumetal	77% Ni, 16% Fe 5% Cu, 2% Cr	20 000	100 000	4	0.65
Permendur	50% Fe 50% Co	800	5000	160	2.45
Hipereo	64% Fe 35% Co, 0.5% Cr	650	10 000	80	2.42
Supermendur	49% Fe 49% Co, 2% V		60 000	16	2.40

**Figura 2.4.** Valores de permeabilidade magnética para diversos materiais (JILES, 2015).

Diferentes valores de permeabilidade magnética são apresentados na Figura 2.4. Apesar de alguns materiais apresentarem permeabilidade relativa máxima muito elevada, como no caso do Mumetal que é 100000, o campo gerado é limitado pela saturação, como ilustra a Figura 2.5. Ou seja, o núcleo só é capaz de amplificar o campo gerado até determinado valor. Ademais, a adição de material ferromagnético no meio adiciona histerese ao sistema, o que pode ser prejudicial ao sistema de controle (BOS, 2019).



**Figura 2.5.** Curva de histerese generalizada. (LAURENTIU, 2021).

A Figura 2.5 ilustra uma curva de magnetização, também conhecida como curva de histerese ou curva  $B - H$ . Nesse contexto, o campo  $H$  é denominado campo magnético aplicado, enquanto o campo  $B$  é referido como densidade de fluxo magnético. Quando o dispositivo é magnetizado pela primeira vez, a curva será como a da linha tracejada. Por outro lado, caso o sistema já esteja saturado e  $H$  seja reduzido a 0, o material ainda apresentará campo  $B$ . Esse fenômeno é chamado retentividade. Coercividade é o valor de  $H$  necessário para fazer  $B = 0$  (LAURENTIU, 2021).

As propriedades ideais para um núcleo de magnetorquer não são claramente definidas na literatura científica. No entanto, é de suma importância obter uma baixa coercividade, a fim de minimizar as perdas por histerese, além de garantir uma alta permeabilidade relativa. Entretanto, é importante ressaltar que a baixa coercividade geralmente está associada a um ponto de saturação baixo. Por outro lado, um ponto de saturação magnética elevado seria mais vantajoso, uma vez que aumentaria a intensidade do torque (BOS, 2019).

Em resumo, a adição de um núcleo ferromagnético intensifica o campo gerado. Consequen-

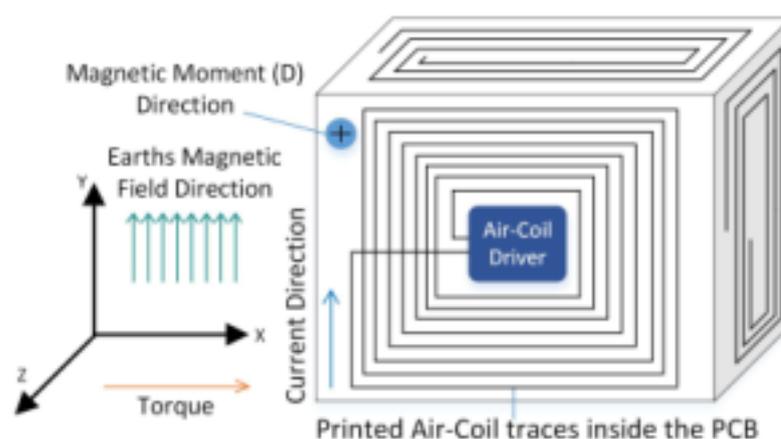
temente, aumenta o torque aplicado, o que torna o magnetorquer mais eficiente. Contudo, suas limitações devem ser consideradas desde o início do projeto. A adição de massa pode ser crítica em missões mais restritivas. Ademais, os efeitos de histerese podem comprometer o correto funcionamento do controlador, caso a lei de controle não seja projetada para lidar com essa adversidade, levando a instabilidade e redução na precisão.

## 2.4 TIPOS DE BOBINAS DE MAGNETORQUER

A forma de implementação das bobinas é fundamental para garantir o bom desempenho do magnetorquer. Existem diferentes abordagens para a implementação das bobinas, incluindo a opção de incorporá-las diretamente no satélite, tornando-as embarcadas ou compactas, ou instalá-las em hastes separadas (ALI *et al.*, 2018). A escolha da configuração depende das características específicas da missão e dos requisitos de espaço, peso e consumo de energia.

### 2.4.1 Embarcadas

Os bobinas embarcadas são estruturas em formato espiral, constituídas por trilhas de cobre impressas em placas de circuito impresso. Essa abordagem apresenta uma solução simples, de baixo custo, leve e facilmente reproduzível. Todavia, sua principal limitação reside na baixa capacidade de produzir torque em comparação com outros métodos (ELWELL *et al.*, 2021). A Figura 2.6 ilustra a implementação dessas bobinas aos painéis do CubeSat.



**Figura 2.6.** Representação de bobina embarcada em CubeSat (KHAN *et al.*, 2021).

Outra grande vantagem dessa implementação é o seu desempenho térmico. Como as espiras estão separadas entre si e distribuídas por uma superfície relativamente grande, elas conseguem dissipar o calor de forma eficiente. Portanto, essa solução é especialmente relevante em missões cuja a massa e quantidade de calor gerada são mais restritivas.

### 2.4.2 Compactas

Esta abordagem envolve a incorporação de bobinas de fios de cobre na estrutura do CubeSat, normalmente acoplada aos painéis solares (ALI *et al.*, 2018) ou a PCI do próprio módulo de controle (BOS, 2019). Desse modo, é possível elevar a quantidade de voltas e maximizar a área da bobina conseqüentemente incrementando o torque gerado. No entanto, é importante destacar que essa abordagem apresenta menos flexibilidade em comparação com outras alternativas, uma vez que depende da configuração específica de cada CubeSat. Isso pode resultar em um maior nível de complexidade no processo de fabricação e validação do dispositivo. Na Figura 2.7 é apresentado a bobina compacta MT01, modelo distribuído de forma comercial.



**Figura 2.7.** Magnetorquer compacto MT01 (ERTÜRK, 2022)

Sendo assim, quando comparada com as bobinas embarcadas, nota-se que elas possuem capacidade superior de gerar torque. Entretanto, devido aos seus aspectos construtivos, o seu desempenho térmico é prejudicado. Ou seja, dado que suas espiras fazem contato direto entre

si e possuem diversas camadas internas, a temperatura se eleva mais rapidamente (ALI *et al.*, 2018). Logo, a implementação de bobinas compactas é ideal para casos onde é necessário que a bobina seja leve e ao mesmo tempo gere torque elevado. Entretanto, deve-se planejar o sistema de controle térmico de modo a mitigar o aquecimento.

### 2.4.3 Hastes

Por fim, os eletroímãs podem ser implementados em hastes externas com núcleos de ar ou metálicos, sendo essa a abordagem que apresenta a maior capacidade de produzir torque (ALI *et al.*, 2018). Especificamente, a inclusão de núcleos ferromagnéticos na estrutura do eletroímã possibilita intensificar o campo magnético gerado, resultando em um maior torque aplicado. Todavia, é válido ressaltar que a necessidade de núcleos ferromagnéticos adiciona peso e volume ao dispositivo, o que deve ser levado em conta em missões espaciais que possuem restrições de massa. Na Figura 2.8 é apresentado um exemplo de magnetorquer em haste utilizado na missão NeAtO.



**Figura 2.8.** Atuador magnético em haste utilizado pela missão NeAtO (GALLIATH *et al.*, 2020)

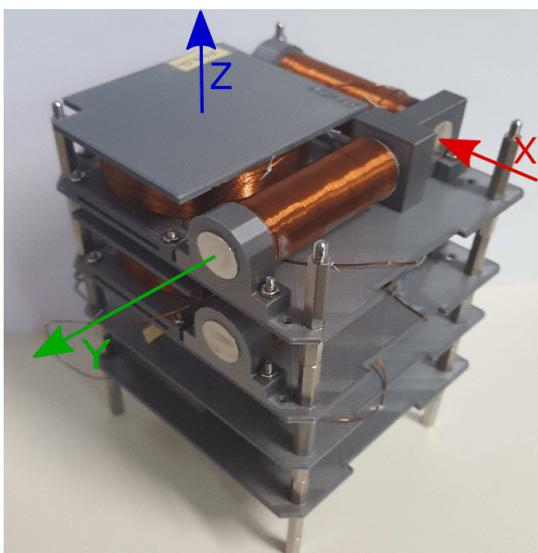
A equação que descreve o momento magnético gerado é bem conhecida e é dada por,

$$m = \frac{r_c V}{2\rho} \left[ 1 + \frac{\mu_r - 1}{1 + (\mu_r - 1)N_d} \right] \quad (2.4)$$

em que  $r_c$  representa o raio do núcleo,  $V$  a tensão aplicada aos terminais  $\rho$  a resistividade elétrica,  $\mu_r$  a permeabilidade magnética relativa e  $N_d$  é o fator de desmagnetização dado pela Equação 2.5, onde  $l_c$  é comprimento do núcleo (ELWELL *et al.*, 2021).

$$N_d = \frac{4[\ln(l_c/r_c) - 1]}{(l_c/r_c)^2 - 4 \ln(l_c/r_c)} \quad (2.5)$$

No que diz respeito aos aspectos térmicos, os magnetorquers em hastes demonstram um desempenho intermediário em comparação com as bobinas compactas e embarcadas. Como resultado, essa solução é amplamente utilizada na prática. No entanto, é importante destacar que, devido à característica intrínseca dos CubeSats de agruparem suas placas verticalmente, a implementação dessas bobinas no eixo  $Z$  pode enfrentar desafios. Portanto, é comum encontrar soluções no mercado em que mais de um tipo de bobina é empregado. Para os eixos  $X$  e  $Y$ , o torque é gerado por bobinas em haste, enquanto para o eixo  $Z$ , são utilizadas bobinas compactas ou embarcadas, como demonstra a Figura 2.9.



**Figura 2.9.** Combinação de magnetorquer compacto e em hastes (NANOAVIONICS, 2021).

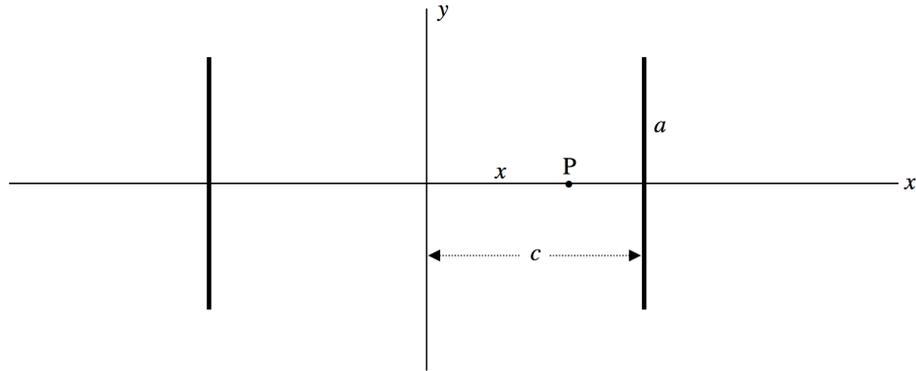
## 2.5 GAIOLA DE HELMHOLTZ

Gaiola de Helmholtz é um dispositivo utilizado para gerar um campo magnético uniforme em um espaço definido. Sua principal aplicação é para a geração de ambientes controlados, o que permite a calibração e validação de dispositivos sensíveis. Ela consiste de duas bobinas em paralelo separados por uma distância igual ao seu raio, formando o que é conhecido como par de Helmholtz.

A intensidade do campo magnético em um ponto  $P$  dentro de uma gaiola composta por duas bobinas circulares pode ser calculado pela seguinte equação:

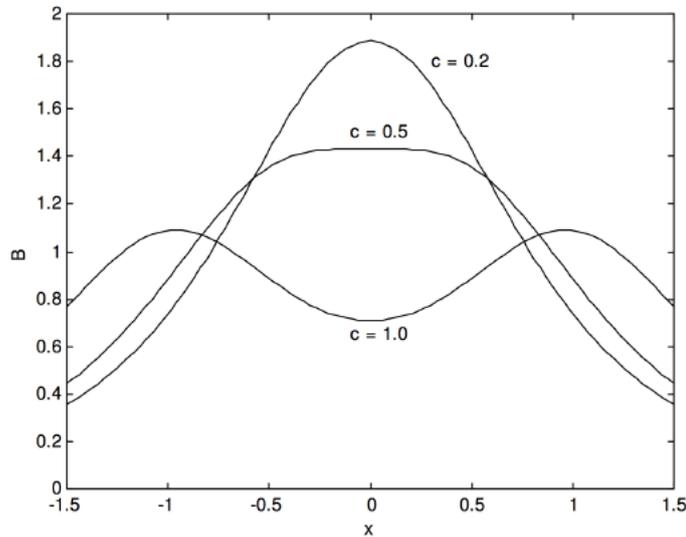
$$B(x) = \frac{\mu N I a^2}{2} \left( \frac{1}{[a^2 + (c - x)^2]^{3/2}} + \frac{1}{[a^2 + (c + x)^2]^{3/2}} \right) \quad (2.6)$$

onde  $\mu$  é a constante de permeabilidade do meio,  $a$  é o raio das bobinas e  $c$  a distância entre a bobina e o centro (TATUM, 2023), como demonstrado na Figura 2.10.



**Figura 2.10.** Representação gaiola de Helmholtz (TATUM, 2023).

Desse modo, é possível determinar a variação do campo magnético ao longo do eixo  $x$ . Pode-se perceber, pelo resultado exibido na Figura 2.11, que o valor ideal de distância de separação entre as bobinas é  $c = 0.5$ , que é justamente quando a distância é igual ao raio. Desse modo, o valor do campo é mantido constante pelo maior intervalo possível ao redor da origem (TATUM, 2023).



**Figura 2.11.** Intensidade do campo magnético dentro da gaiola ao longo do eixo  $x$  para diferentes valores de  $c$  (TATUM, 2023).

Por fim, o valor de campo magnético no centro do par de bobinas pode ser obtido de forma simplificada através da Fórmula 2.7 ao se desenvolver a Equação 2.6 (TATUM, 2023).

$$B = \frac{8\sqrt{5}}{25} \cdot \frac{\mu NI}{a} = \frac{0.7155\mu NI}{a} \quad (2.7)$$

Portanto, a gaiola de Helmholtz é um dispositivo fundamental no desenvolvimento de um magnetorquer. Ela permite a criação de um ambiente de testes capaz de gerar um campo magnético uniforme e ajustável no qual o controlador pode ser inserido. Assim, pode-se validar diferentes aspectos, como sensores e atuadores, além de avaliar parâmetros de desempenho.

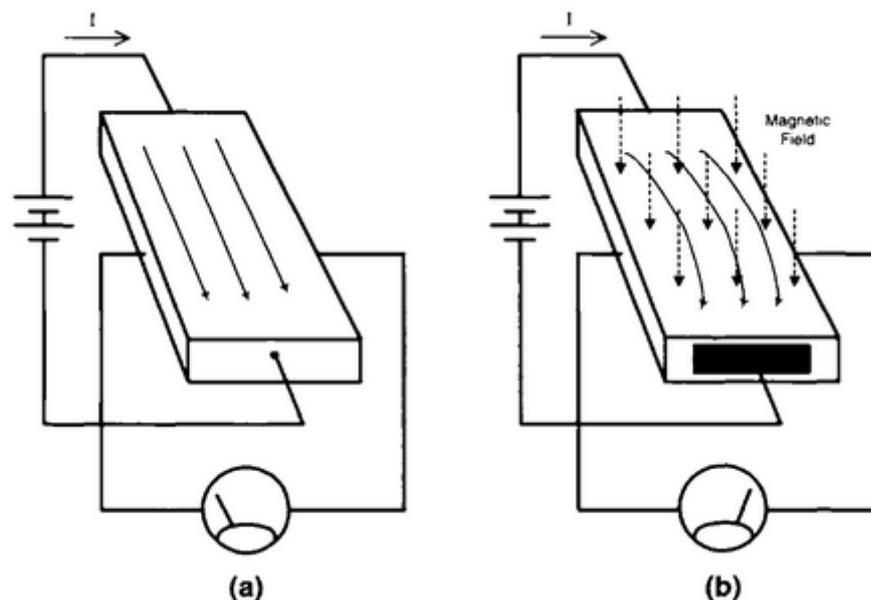
## 2.6 SENSORES

Os sensores permitem que os CubeSats percebam e monitorem sua atitude, posição e condições locais, fornecendo dados críticos para determinação da posição e realização de manobras de controle precisas. Eles permitem que os CubeSats respondam a perturbações externas, como forças gravitacionais, arrasto atmosférico e radiação solar, garantindo seu alinhamento com os objetivos da missão. Com avanços na tecnologia de sensores, incluindo unidades de medição inercial (IMUs), sensores solares, sensores terrestres, magnetômetros e receptores GPS, os CubeSats podem alcançar maior autonomia, capacidades de navegação aprimoradas e melhor desempenho.

### 2.6.1 Magnetômetro

Os magnetômetros são dispositivos utilizados para a detecção e medição de campos magnéticos. Esses dispositivos baseiam-se na interação entre o campo magnético e uma bobina ou semicondutor, gerando um sinal elétrico proporcional à intensidade do campo ao qual estão expostos. Dentre os diversos métodos disponíveis para a medição de campos magnéticos, os sensores de efeito Hall são os mais comumente utilizados devido às suas vantagens, tais como baixo custo, tamanho reduzido e baixo consumo energético. Esses sensores consistem de um material semicondutor que, quando submetido a um campo magnético, gera uma diferença de potencial elétrico perpendicular a ambos o campo e a corrente elétrica aplicada. Essa diferença de potencial pode ser medida e convertida em uma leitura de campo magnético (RAMSDEN, 2011), como ilustra a Figura 2.12.

No contexto de missões espaciais os magnetômetros são fundamentais para o funcionamento adequado do controlador de atitude. Ao amostrarem o campo magnético em uma direção



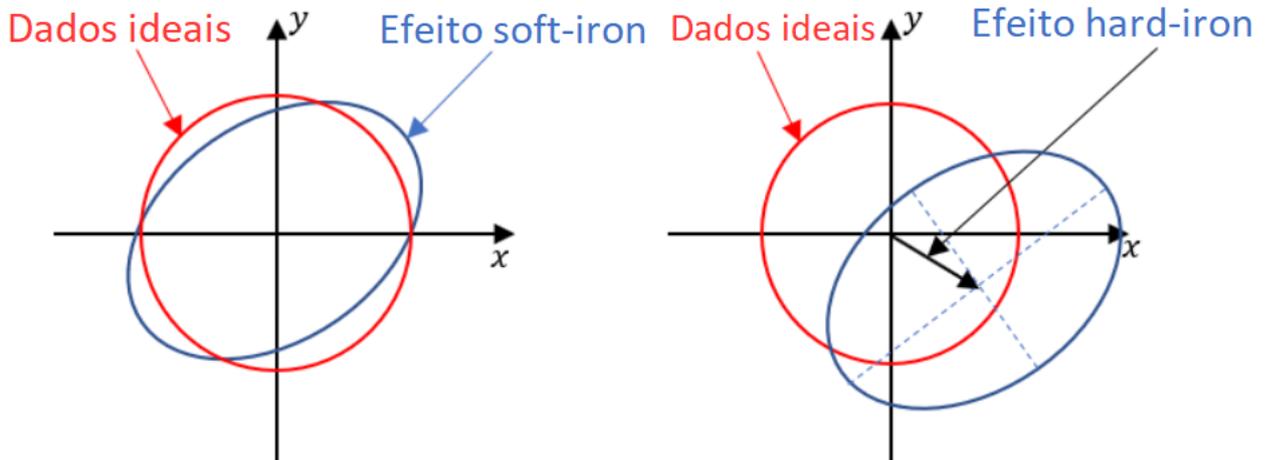
**Figura 2.12.** Efeito Hall em um material semiconductor (RAMSDEN, 2011).

específica, esses dispositivos possibilitam a estimativa da velocidade angular de um satélite, bem como a determinação do torque gerado por uma determinada bobina. No entanto, é importante considerar as não-linearidades, como a saturação, e as interferências inerentes aos componentes eletrônicos do satélite e às bobinas do magnetorquer. Esses fatores podem afetar a precisão e a confiabilidade das medições realizadas pelo magnetômetro. Portanto, é essencial realizar calibrações adequadas e implementar técnicas de compensação de erros para obter resultados mais precisos e confiáveis.

As principais fontes de erro na medição podem ser categorizadas da seguinte forma:

- *soft iron*: Refere-se à distorção do campo magnético causada pela presença de materiais ferromagnéticos nas proximidades do magnetômetro. Esses materiais, como ferro ou aço, podem alterar as linhas do campo magnético, levando a uma resposta não linear ou distorcida. A distorção de *soft iron* normalmente resulta em rotação e aumento ou redução do campo magnético medido, causando imprecisões na orientação e na magnitude dos valores medidos (VASCONCELOS *et al.*, 2011).
- *hard iron*: É uma distorção que surge pela presença de campos magnéticos permanentes na proximidade do magnetômetro. Esses campos podem ser gerados por ímãs, correntes elétricas, ou outras fontes estacionárias. Distorções de *hard iron* causam um deslocamento

ou desvio no campo magnético, resultado em um *offset* na medição. Esse *offset* se mantém constante independente da intensidade e orientação do campo (VASCONCELOS *et al.*, 2011).



**Figura 2.13.** Efeito da distorção *soft iron* e *hard iron* (OZYAGCILAR, 2012).

Uma das metodologias de se corrigir esses efeitos é denominado método dos 6 parâmetros. Ele consiste em determinar constantes de fator de escala e *offset* para cada um dos três eixos. Esses parâmetros são obtidos ao se determinar quais valores melhor satisfazem a Equação 2.8

$$\frac{(x - x_0)^2}{a^2} + \frac{(y - y_0)^2}{b^2} + \frac{(z - z_0)^2}{c^2} = R^2 \quad (2.8)$$

na qual  $R$  é o módulo do campo magnético no local de medição,  $x$ ,  $y$  e  $z$  correspondem ao campo magnético medido em cada eixo,  $x_0$ ,  $y_0$  e  $z_0$  são os coeficientes de *offset*, enquanto  $a$ ,  $b$  e  $c$  são os fatores de escala (SILVA, 2022).

Dessa forma, o valor corrigido é facilmente obtido através das relações

$$\begin{aligned} x_c &= \frac{x - x_0}{a} \\ y_c &= \frac{y - y_0}{b} \\ z_c &= \frac{z - z_0}{c} \end{aligned} \quad (2.9)$$

onde  $x_c$ ,  $y_c$  e  $z_c$  são os valores de campo corrigidos. Logo, através de um processo simples de calibração é possível obter estimativas mais precisas do campo magnético do local.

Na prática, esses coeficientes são estimados ao se obter um conjunto de  $N$  amostras do campo magnético do local em cada um dos 3 eixos em conjunto. Em seguida, adota-se um valor real

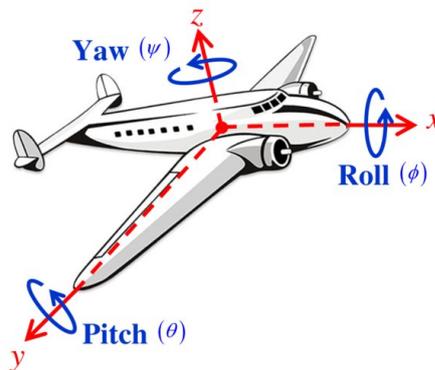
para as medições através de um aparelho calibrado, ou através de estimativas fornecidas pela *World Magnetic Model*. Enfim, utiliza-se o métodos dos mínimos quadrados como forma de se encontrar a função que melhor se ajusta a equação 2.8 (SILVA, 2022).

### 2.6.2 Unidade de Medição Inercial

Unidade de Medição Inercial (IMU) é um dispositivo que combina acelerômetro e giroscópio para medir aceleração linear e velocidade angular. Através da combinação dessas duas grandezas é possível determinar a orientação de um objeto no espaço tridimensional. Desse modo, o ADCS depende dos dados fornecidos por esse sensor para prever sua posição e fazer ajustes em seu apontamento em tempo real. Portanto, é crítico para o sucesso da missão o pleno funcionamento desses dispositivos.

A estimação da posição do CubeSat através das medições do acelerômetro pode ser realizado através da Equação 2.10, onde  $a_x$ ,  $a_y$  e  $a_z$  são as medições de aceleração linear em cada eixo,  $\phi$  e  $\theta$  são os ângulos de Euler que representam a orientação da IMU (MONTALVO, 2022), como explicitado na Figura 2.14.

$$\begin{bmatrix} \phi \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan\left(\frac{a_y}{a_z}\right) \\ \arctan\left(\frac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}}\right) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$



**Figura 2.14.** Representação dos ângulos de Euler (HASHIM, 2019).

Nota-se que apenas com as medições de aceleração linear não é possível estimar o ângulo Yaw ( $\psi$ ). Dessa forma, faz-se necessário utilizar também as medições de velocidade angular

fornecida pelo giroscópio através da Equação 2.11, em que  $\dot{\phi}$ ,  $\dot{\theta}$  e  $\dot{\psi}$  são as medições de velocidade angular (MONTALVO, 2022).

$$\begin{bmatrix} \phi(t+1) \\ \theta(t+1) \\ \psi(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi(t) \\ \theta(t) \\ \psi(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} dt \quad (2.11)$$

Todavia, assim como nos magnetômetros, as IMU também possuem erros associados às suas medições que devem ser considerados. Os mais comuns são classificados da seguinte forma: (FERGUSON, 2015):

- *Bias*: Pode ser definido como uma diferença constante entre o valor real e o medido. É um erro sistemático que surge mesmo quando o sensor está em repouso.
- *Fator de Escala*: Resulta em uma amplificação ou redução do valor medido proporcionalmente à entrada. Por exemplo, para uma aceleração real de  $100 \text{ m/s}^2$ , caso o sensor possua um erro de fator de escala de 2%, o valor medido será de  $102 \text{ m/s}^2$ .
- *Desalinhamento*: Idealmente, os sensores de cada eixo devem ser ortogonais entre si. Entretanto, devido a limitações de fabricação, esses sensores possuem pequenos desalinhamentos. Isso resulta em desvios na medição, mesmo quando o movimento ocorre em apenas um eixo.

Para mitigar esses erros e melhorar a precisão das medições da IMU, deve-se realizar a calibração regular dos sensores. Além disso, algoritmos de fusão de sensores podem ser aplicados para combinar os dados da IMU com outros sensores, como GPS, magnetômetros e sistemas de visão, a fim de obter estimativas mais precisas da posição, velocidade e orientação.

Uma das formas mais simples de se realizar a técnica de fusão de sensores é através do filtro complementar, que consiste em aplicar um filtro passa-altas no sinal dos ângulos estimados pelo acelerômetro e um filtro passa-baixas nos ângulos estimados pelo giroscópio. O resultado é a soma desses sinais (MONTALVO, 2022).

Matematicamente, o filtro complementar pode ser expressada pela equação 2.12

$$\theta_{fusion} = K \cdot \theta_{gyro} + (1 - K) \cdot \theta_{accel} \quad (2.12)$$

Na qual  $\theta_{fusion}$  é a estimativa final do ângulo,  $\theta_{gyro}$  e  $\theta_{accel}$  são os ângulos obtidos através do giroscópio e acelerômetro respectivamente e  $K$  é um parâmetro que deve ser ajustado manualmente a fim de se obter estimativas mais precisas. Usualmente é um valor próximo, mas menor do que 1 (e.g. 0.98). Portanto, a inclusão da IMU no sistema oferece a capacidade de obter estimativas precisas em relação à posição do satélite por meio de operações matemáticas simples.

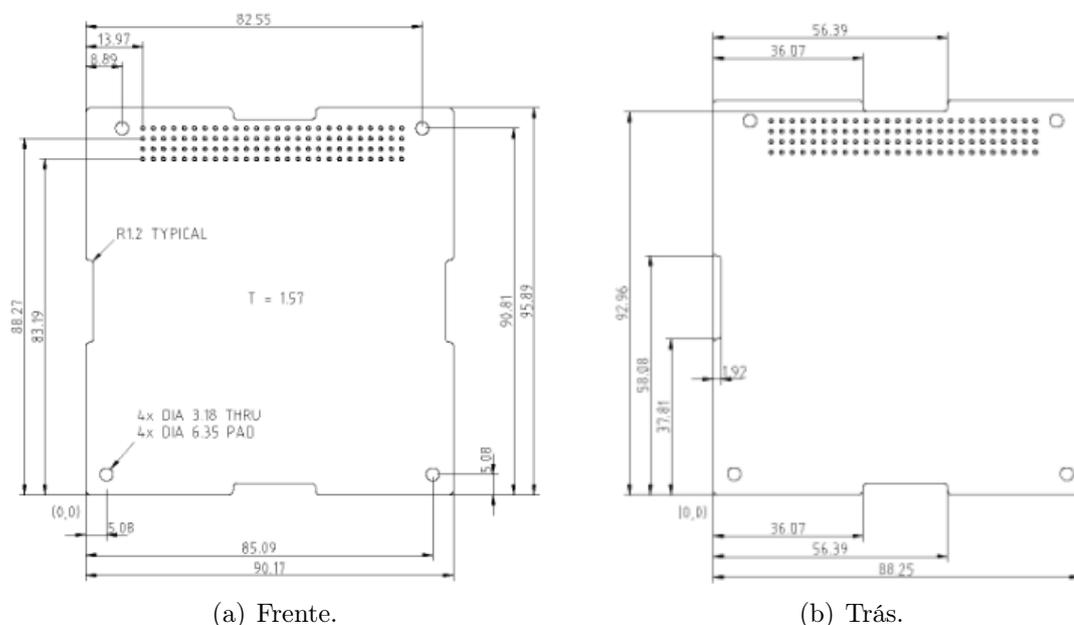
### 3.1 LEVANTAMENTO DE REQUISITOS

O sucesso de um projeto de hardware depende em grande parte do levantamento de requisitos. Este processo estabelece as bases para o desenvolvimento de um produto que atenda às demandas do usuário, dentro do escopo e com os recursos disponíveis. Nesta seção, serão discutidos os problemas observados na versão anterior do magnetorquer, bem como as soluções obtidas para mitigá-las.

#### 3.1.1 Aspectos Mecânicos

Tendo em vista que o objetivo do magnetorquer é ser utilizado em missões de *CubeSats* a placa deve possuir as dimensões compatíveis com a de satélites 1U ( $10 \times 10 \times 10$  cm). Ademais, para garantir uma conexão mecânica estável entre as placas, deve-se adotar a interface PC/104 como padrão, como ilustrado na Figura 3.1. Ou seja o tamanho máximo da PCI, o diâmetro e distanciamento dos parafusos deve respeitar o padrão estabelecido (GEIB, 2021). A versão anterior do projeto já seguia a maioria dessas diretrizes. Entretanto, devido à forma como os componentes foram alocados, o conector de 104 pinos não foi implementado.

Assim, nessa versão havia algumas limitações em termos de conectividade e gerenciamento de cabos. O magnetorquer só podia se conectar a um único módulo por vez e era necessário que este tivesse um conector compatível. Além disso, a placa anterior era totalmente quadrada e não possuía vazados nas laterais para permitir a passagem de cabos, o que dificultava o gerenciamento dos fios entre as placas. Outro problema era que o conector utilizado tinha menos suporte mecânico, aumentando a chance da conexão ser desfeita durante o lançamento, quando ocorrem muitos choques e vibrações. Logo, essa revisão deve incorporar o conector de 104 pinos como forma de melhorar a estabilidade mecânica e aumentar a modularidade.



**Figura 3.1.** Desenho técnico de exemplo de implementação de interface PC/104 (GEIB, 2021).

### 3.1.2 Processamento

Uma melhoria desejável para o magnetorquer seria a implementação de um modo de operação autônomo. Na versão anterior, a placa do dispositivo só podia responder a comandos externos, por meio de uma interface SPI, que indicavam o sentido e a intensidade da corrente. Isso significava que todo o algoritmo de controle tinha que ser implementado em outro módulo. Isso oferece maior flexibilidade para os usuários que desejam implementar seus próprios algoritmos para atender às demandas específicas de suas missões. No entanto, a possibilidade de o microcontrolador na PCI do magnetorquer realizar o controle pode reduzir a carga de processamento do computador central.

A revisão do magnetorquer deve incluir a capacidade de alternar entre modos de operação manual e automático. No modo manual, os comandos implementados devem ser compatíveis com a versão anterior do dispositivo, permitindo o reaproveitamento de códigos previamente desenvolvidos. Já no modo automático, o microcontrolador deve ser capaz de realizar o controle de forma autônoma. Dessa forma, o projeto final deve incorporar as características positivas da versão anterior e adicionar novas funcionalidades que aumentem sua modularidade e permitam a realização de mais testes.

Assim, levando em conta que o objetivo principal do dispositivo é controlar a posição do

satélite através de algoritmos computacionais, é necessário a adição de um microcontrolador com poder de processamento suficiente para realizar as operações matemáticas complexas. Ademais, é importante que o microcontrolador opere em frequências elevadas para garantir que o atraso introduzido seja o mínimo possível. Por fim, como o software do magnetorquer proposto será modificado constantemente, com o objetivo de se testar novos algoritmos, é desejável que o ambiente de desenvolvimento seja robusto e forneça ferramentas de depuração que agilizem esse processo.

### 3.1.3 Acionamento das Bobinas

Através da comparação dos modelos disponíveis no mercado, concluiu-se que a potência das bobinas pode variar muito dependendo dos objetivos da missão. Entretanto, na maioria dos casos a corrente não é superior a 500 mA (SATSEARCH, 2019). Assim, a placa deve possuir *drivers* de corrente que suportem essa especificação, mas que ao mesmo tempo forneçam flexibilidade de ajustar a potência entregue. Além disso, o controle desses componentes deve ser realizado de forma digital através do microcontrolador, seja por comunicação serial, seja por modulação de largura de pulso (PWM).

Na versão anterior do dispositivo, observou-se que as bobinas associadas aos eixos  $X$  e  $Y$  apresentavam superaquecimento, resultando na deformação de seus suportes mecânicos. Além disso, o ar quente presente no núcleo do dispositivo intensificava a dissipação do campo magnético gerado. Como consequência, o torque produzido era insuficiente para rotacionar o CubeSat no ambiente de testes. Para solucionar essas questões, a nova versão do dispositivo incluirá núcleos ferromagnéticos nas bobinas em hastes, aumentando a intensidade do campo magnético gerado e reduzindo a corrente elétrica e a geração de calor.

### 3.1.4 Sensoriamento

Sabendo que o novo projeto de magnetorquer tem como objetivo a criação de um módulo independente capaz de realizar o controle do apontamento do satélite, a adição de sensores é imprescindível. Durante a estabilização inicial, o acionamento das bobinas é feito de forma

que o campo gerado produza um torque que se opõe ao movimento do satélite. Desse modo, é fundamental que o processador receba informações de sensores de posição, como acelerômetro e giroscópio.

Considerando que o dispositivo possui um propósito experimental, é importante adicionar circuitos que forneçam dados sobre seu desempenho. Por exemplo, a inclusão de magnetômetros pode fornecer informações sobre o torque gerado em cada eixo, permitindo a comparação da eficiência de diferentes bobinas. Pode-se ainda aplicar métodos de fusão de sensores para aumentar a precisão da estimativa de posição do satélites. No entanto, é necessário ter cuidado ao medir o campo magnético, pois a interação entre o campo gerado e o campo magnético terrestre pode afetar a precisão da medição.

A medição dos magnetômetros depende diretamente da forma como eles estão orientado em relação ao campo magnético. Como o objetivo é medir o campo nos 3 eixos, a escolha de um componente SMD (Surface Mounted Device) pode prejudicar a montagem. As opções são restritas a sensores PTH (Pin Through Hole). Assim, o magnetômetro pode ser ajustado de forma manual dependendo das características da bobina.

Os principais requisitos podem ser sumarizados na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1.** Requisitos de Hardware do novo magnetorquer.

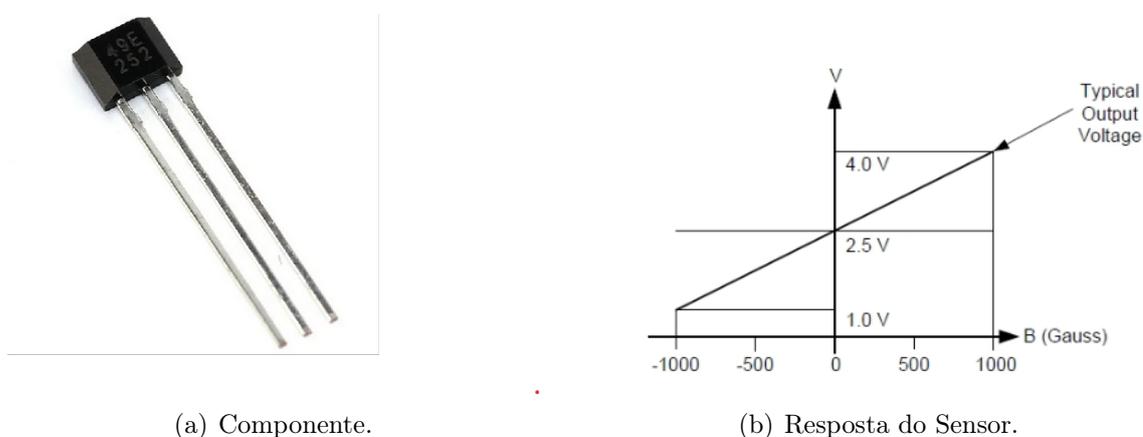
<b>Componente do Projeto</b>	<b>Especificação</b>
Aspectos Mecânicos	Interface PC/104 (conectores e encaixes)
Barramentos Elétricos	Alimentação Interface SPI Depuração
Sensores	IMU (Acelerômetro e giroscópio) Magnetômetro Temperatura
Bobinas	Corrente ajustável de até 500 mA Núcleo ferromagnético (eixos X e Y)
Microcontrolador	Frequência de operação elevada Múltiplos periféricos de comunicação serial Conversores AD com desempenho adequado

## 3.2 ESCOLHA DOS COMPONENTES

É importante mencionar que durante o desenvolvimento do projeto atual, o mercado global de semicondutores enfrentava uma crise, resultando em escassez de componentes e aumento de preços. Isso afetou o projeto na medida em que, frequentemente, componentes que melhor se ajustavam às demandas se esgotavam rapidamente. Como resultado, em alguns casos, foi necessário optar por componentes alternativos que estavam disponíveis no momento, mesmo que não oferecessem o desempenho ideal. Essa situação demonstrou a importância da flexibilidade e do planejamento durante o processo de seleção de componentes, considerando não apenas a performance, mas também a disponibilidade e a viabilidade do fornecimento.

### 3.2.1 Magnetômetros

O magnetômetro escolhido foi o OH49e (NANJING OUZHUO TECH, 2018). Ele possui alta sensibilidade, que permite medir pequenas variações no campo. Sua faixa de operação é ampla, possibilitando a medição de campos em uma gama de intensidades diferentes, como pode ser observado no gráfico da Figura 3.2. O consumo energético é de 4.5 mA. Além de tudo, suas dimensões são compactas e flexíveis, o que permite que o sensor seja ajustado de acordo com as características da bobina. Logo, esse componente é uma solução adequada para o projeto proposto.

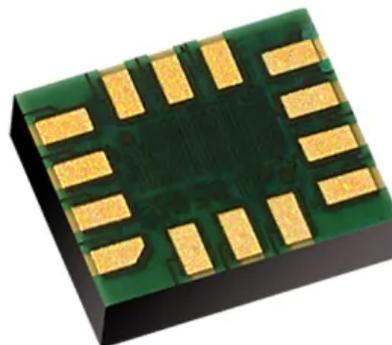


**Figura 3.2.** Sensor de efeito HALL modelo OH49e (NANJING OUZHUO TECH, 2018).

### 3.2.2 Sensor Inercial

Foi adotada a abordagem de utilizar um circuito integrado único que realiza as funções de acelerômetro e giroscópio. Essa estratégia visa reduzir a quantidade de chips, simplificando o sistema e diminuindo custos. Nesse contexto, o chip LSM6DS3TR se apresentou como uma solução adequada, pois além de realizar medições precisas nos três eixos, ele possui modos de baixo consumo, o que pode ser vantajoso em missões com maiores restrições energéticas.

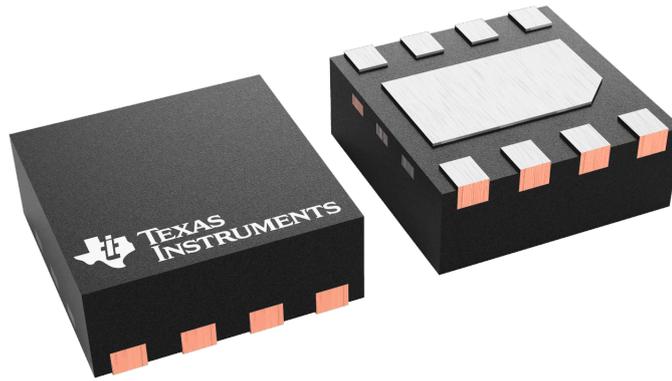
A interface de comunicação do LSM6DS3TR é flexível e funciona tanto com protocolo I2C quanto com SPI. Suas dimensões são compactas ( $2.5\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 0.83\text{ mm}$ ). Por fim, o LSM6DS3TR inclui sensor de temperatura embarcado, que pode ser utilizado por outros submódulos, ou como parâmetro de desempenho do magnetorquer. A Figura 3.3 mostra a parte de trás do sensor.



**Figura 3.3.** Sensor LSM6DS3 (STMICROELECTRONICS, 2017)

### 3.2.3 Driver de Corrente

Para acionar bobinas eletromagnéticas, é comum o uso de topologias de ponte H, permitindo o controle do sentido da corrente e, conseqüentemente, do campo gerado. Com o objetivo de reduzir a complexidade e o tempo de desenvolvimento, foi escolhido um circuito integrado que incorpora essas funções. O chip DRV8837 da Texas Instruments foi selecionado como uma solução adequada por ser capaz de acionar a bobina por meio de uma ponte H, suportando correntes de até 1.8 A e sendo controlável por sinal PWM, facilmente gerável por um microcontrolador.



**Figura 3.4.** Chip DRV8837 (TEXAS INSTRUMENTS, 2021a).

### 3.2.4 Microcontrolador

Devido ao fato de que o projeto anterior utilizou um microcontrolador da família MSP430 da Texas Instruments, optou-se por utilizar um microcontrolador da mesma família no novo projeto. Isso permitirá o reaproveitamento de códigos previamente desenvolvidos com maior facilidade. Além disso, esses microcontroladores são comumente utilizados como ferramentas didáticas nos laboratórios da UnB, alunos e professores já possuem familiaridade com o ambiente de desenvolvimento desses dispositivos.

Visando atender às demandas de processamento e frequência de operação, o modelo de microcontrolador escolhido foi o MSP430FR6972. Quando acoplados a osciladores externos adequados, sua frequência de operação chega a até 16 MHz. Além de atender aos requisitos de funcionamento, esse modelo possui diversos perfis de baixo consumo que podem ser úteis quando o magnetorquer não estiver em uso. Também incluem uma interface serial para depuração via *spy-bi-wire*, a fim de facilitar o desenvolvimento do software embarcado.

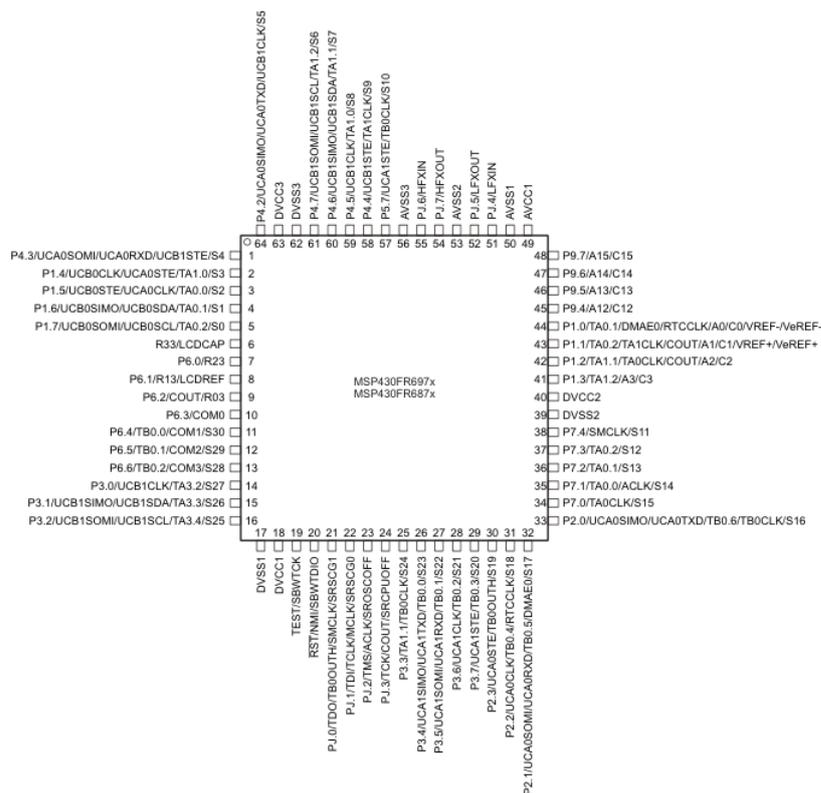
A Figura 3.5 apresenta o diagrama de pinagem do MSP430FR9672 fornecido pelo datasheet da fabricante (TEXAS INSTRUMENTS, 2021b). Ademais, a funcionalidade atribuída a cada pino é exposta na Tabela 3.2.

## 3.3 DESIGN DA PCI

O esquemático e prototipação da placa foram realizados por meio do software *KiCad*. A etapa inicial no processo de design da placa de circuito impresso (PCI) envolve a elaboração do

**Tabela 3.2.** Atribuição de pinos para o projeto.

<b>MSP430</b>		
Número	Nome	Função
43	P1.0	LED de sinalização
44	P1.1	
19	SBWTCK	Gravação do software embarcado e depuração via spy-bi-wire
20	SBWTDIO	
33	UCA0SIMO	Barramento de comunicação SPI com a IMU
32	UCA0SOMI	
31	UCA0CLK	
30	UCA0STE	
34	P3.0	Interrupções da IMU
35	P3.1	
26	UCA1SIMO	Barramento de comunicação SPI com o conector PC/104
27	UCA1SOMI	
28	UCA1CLK	
29	UCA1STE	
51	LFXIN	Cristal oscilador externo de 32.768 kHz
52	LFXOUT	
36	TA0.1	Saída PWM do timer. Controla a bobina do eixo Y
37	TA0.2	
14	TA3.2	Saída PWM do timer. Controla a bobina do eixo X
15	TA3.3	
60	TA1.1	Saída PWM do timer. Controla a bobina do eixo Z
61	TA1.2	
11	P6.4	Habilita o modo de baixo consumo nos drivers de corrente
45	A12	Leitura do magnetômetro posicionado no eixo Y
46	A13	Leitura do magnetômetro posicionado no eixo X
47	A14	Leitura do magnetômetro posicionado no eixo Z
49	AVCC1	Pinos de alimentação
18	DVCC1	
40	DVCC2	
63	DVCC3	
50	AVSS1	Pinos de referência de tensão
53	AVSS2	
56	AVSS3	
17	DVSS1	
39	DVSS2	
62	DVSS3	
<b>Conector PC/104</b>		
Número	Barramento	Função
51	H1	Saída de 5 V
52	H1	Saída de 3.3 V
12	H1	Comunicação SPI - <i>SS</i>
11	H1	Comunicação SPI - <i>MOSI</i>
10	H1	Comunicação SPI - <i>MISO</i>
9	H1	Comunicação SPI - <i>CLK</i>
84	H2	GND

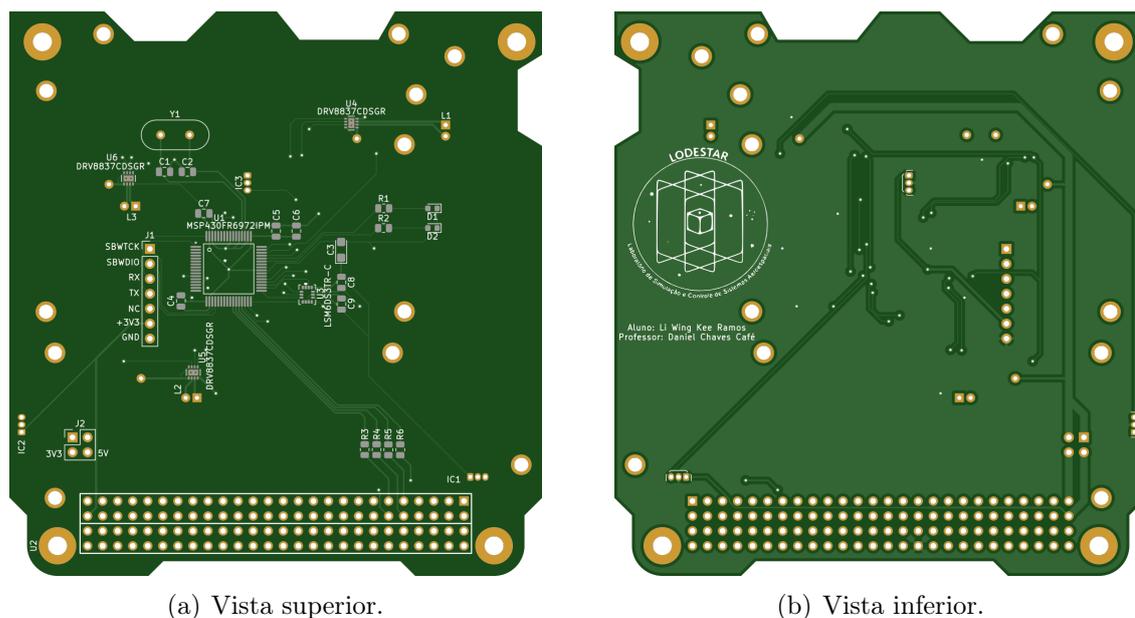


**Figura 3.5.** Diagrama de Pinagem do MSP430FR6972 (TEXAS INSTRUMENTS, 2021b).

esquemático do circuito. Nesse sentido, o esquemático foi desenvolvido seguindo uma abordagem modular, em que cada componente do sistema é dividido em blocos funcionais distintos. As principais vantagens dessa abordagem são: permite a sistematização dos testes e possíveis erros não se propagam entre subsistemas que não estão relacionados.

Posteriormente, foi realizado o desenvolvimento do *layout* da placa de circuito impresso. Durante essa etapa, os componentes foram posicionados de maneira conveniente para o roteamento das trilhas. Para garantir a compatibilidade e a integração com o sistema, foram adicionados os encaixes mecânicos correspondentes à interface PC/104. Além disso, a atribuição das funções dos pinos do conector foi estabelecida de acordo com o padrão utilizado pelo computador de bordo ABACUS, conforme descrito no documento técnico fornecido pela fabricante (GAUSS SRL, 2017). Uma consideração adicional foi a inclusão de suporte mecânico para as bobinas utilizadas no projeto anterior. Isso possibilita o reaproveitamento dos modelos em CAD já desenvolvidos, proporcionando economia de recursos durante o processo de fabricação.

O *layout* foi desenvolvido através do software KiCad e o resultado é apresentado na Figura 3.6. Nota-se que existem dois conectores a mais além do PC/104, denominados J1 e J2. O



**Figura 3.6.** *Layout* da Placa de Circuito Impresso desenvolvida.

conector J1 tem como propósito ser utilizado como interface de gravação depuração. Por isso os pinos são compatíveis com as placas de desenvolvimento da família MSP430. Por outro lado, J2 permite que a tensão que alimenta as bobinas seja alternada entre 3.3 V e 5 V, dependendo dos requisitos de cada missão.

### 3.4 PRODUÇÃO

Nesta etapa do projeto, foi realizada a fabricação dos dispositivos. Inicialmente, foi produzida a PCI e, posteriormente, as bobinas.

#### 3.4.1 Placa de Circuito Impresso

A produção da Placa de Circuito Impresso foi encomendada através da empresa JLCPCB, que também fornece o serviço de solda dos componentes. Esse serviço foi considerado vantajoso, pois a compra de componentes separadamente e em baixas quantidades é mais custosa. Além de que o serviço de montagem automática possui um acabamento superior. Logo, é possível economizar tempo e reduzir a chance de ocorrerem erros na soldagem dos componentes. A Figura 3.7 evidencia a PCI produzida para o magnetorquer.

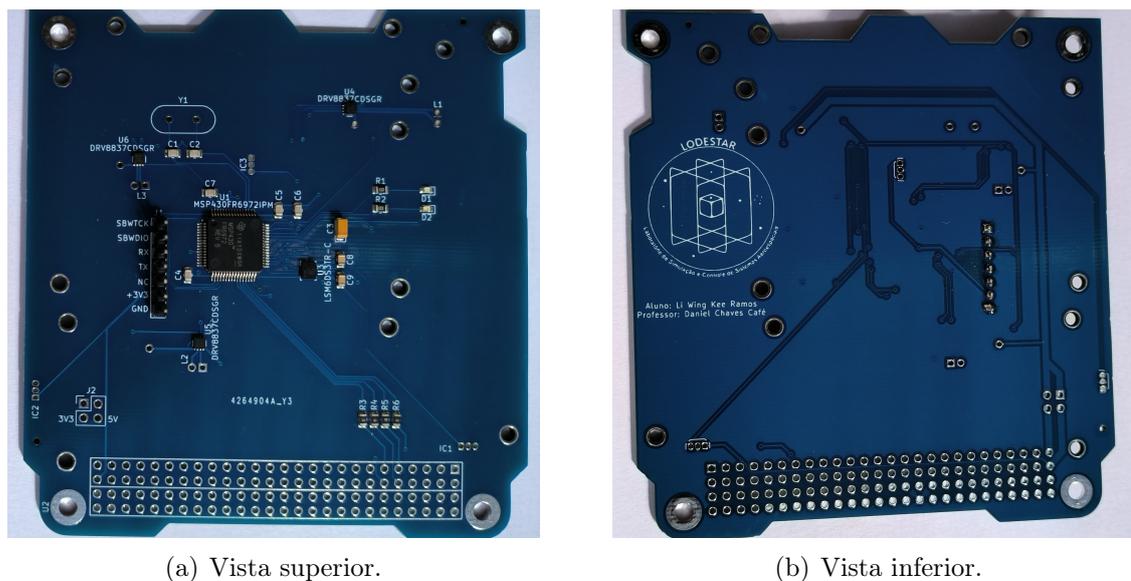
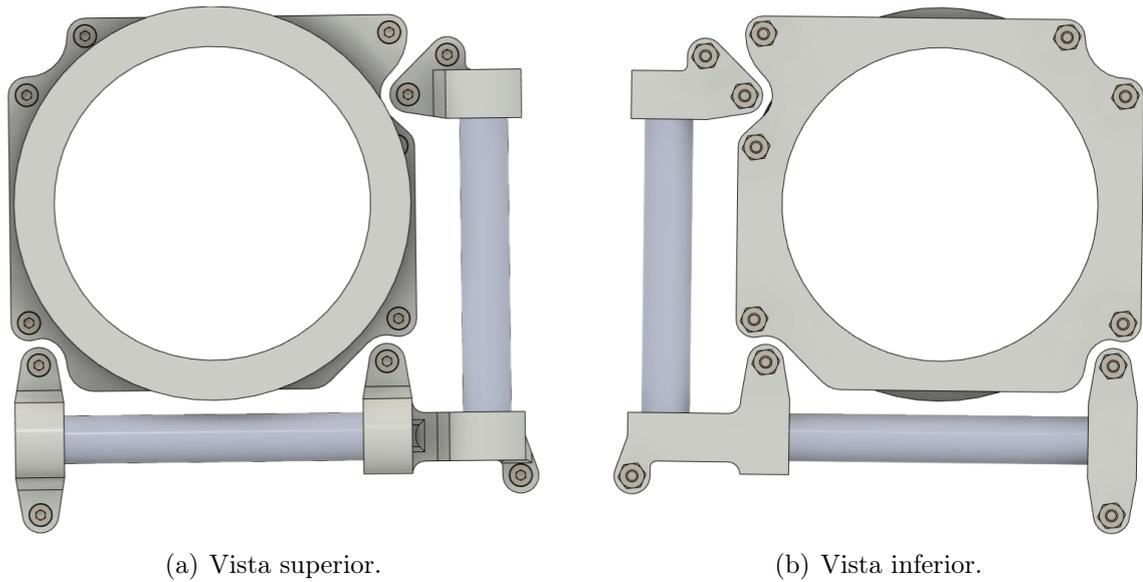


Figura 3.7. Placa do magnetorquer montada.

### 3.4.2 Atuadores Magnéticos

No início do processo de produção dos atuadores magnéticos, foi dada prioridade à fabricação dos suportes mecânicos, representados na Figura 3.8. Levando em consideração a informação de que as bobinas podem alcançar temperaturas superiores a  $150^{\circ}\text{C}$  (ALI *et al.*, 2018), foi tomada a decisão de fabricar essas peças utilizando o material ABS. Essa escolha é baseada nas propriedades do ABS, que é conhecido por sua resistência ao calor e à temperatura elevada. Além disso, foi estabelecida uma parceria entre o Laboratório Aberto e o laboratório LODESTAR para aproveitar a tecnologia de impressão 3D disponível. Com a utilização de impressoras 3D, foi possível fabricar os suportes mecânicos de forma precisa, atendendo às especificações necessárias para o projeto dos atuadores magnéticos. Essa colaboração entre os laboratórios permitiu a otimização do processo de fabricação, agilizando a produção das peças.

A etapa subsequente envolveu a incorporação do núcleo ferromagnético às peças previamente produzidas. Todavia, deparou-se com a dificuldade de se encontrar no mercado materiais com as dimensões adequadas e cuja composição atendessem às especificações. Diante dessa situação, foi decidido utilizar uma barra de ferro redonda comumente aplicada na construção civil como alternativa. Posteriormente, o material foi submetido a um processo de caracterização para determinar suas propriedades e garantir sua adequação para a aplicação no projeto dos atuadores magnéticos.



**Figura 3.8.** Suporte mecânico das bobinas.

Na etapa final, procedeu-se a enrolação do fio de cobre sobre o núcleo nos eixos X e Y, e sobre o suporte de ABS no eixo Z. Para essa tarefa, foi selecionada uma bitola de fio AWG 31, que foi considerada a mais apropriada devido à maior quantidade de espiras por camada (ISHIOKA *et al.*, 2017). O processo de bobinação foi realizado manualmente, exigindo um investimento de tempo e esforço considerável para garantir que as espiras estivessem o mais próximas possível umas das outras e que o fio estivesse corretamente tensionado. A cada camada enrolada, aplicou-se uma capa de supercola sobre a bobina para assegurar a sua fixação e estabilidade. A Figura 3.9 mostra uma etapa intermediária do processo de montagem das bobinas, quando apenas o eixo Z estava enrolado.



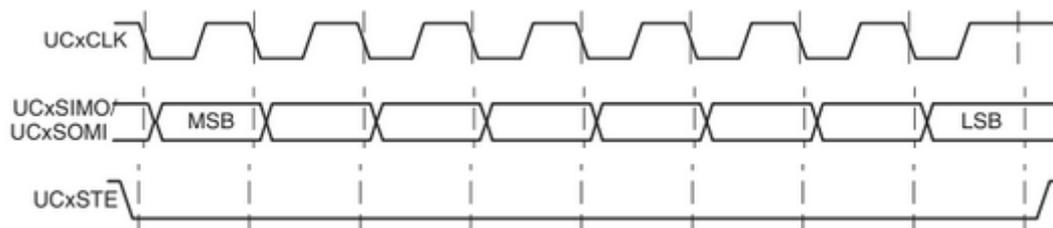
**Figura 3.9.** Etapa de montagem das bobinas.

## 3.5 PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO

O protocolo de comunicação proposto tem como principal objetivo viabilizar o controle do magnetorquer por meio de comandos externos. Para possibilitar a troca de dados, foi selecionado o barramento Serial Peripheral Interface (SPI).

### 3.5.1 Convenções Adotadas

Nesse protocolo, o primeiro bit a ser transmitido é o mais significativo (MSB) e o último é o menos significativo (LSB). Quanto à configuração do sinal de clock, é estabelecido que o nível lógico em estado de repouso (IDLE) seja alto, enquanto a captura de dados ocorre na borda de subida. Conforme a convenção adotada pela Texas Instruments, essa configuração é denominada Fase = 0 e Polaridade = 1. Além disso, foi estabelecido que o canal de comunicação é habilitado quando o pino STE (Slave Transmit Enable) é levado ao nível lógico baixo. Na Figura 3.10 pode-se observar o comportamento de cada um dos canais quando configurados desta forma.



**Figura 3.10.** Diagrama de comunicação SPI configurado como 8bit-MSB, Fase = 0 e Polaridade = 1 (TEXAS INSTRUMENTS, 2021b).

### 3.5.2 Comandos

Os comandos são enviados pelo mestre e a resposta é transmitida pelo magnetorquer em sequência. Para realizar a leitura da resposta, o mestre deve manter a transmissão habilitada e continuar gerando o sinal de clock após o envio do comando. Para garantir a integridade dos dados recebidos, o mestre precisa esperar o número de bytes correspondente à resposta antes de encerrar a comunicação.

Dessa forma, a comunicação se inicia com a transmissão do byte de comando pelo mestre,

seguido por bytes adicionais 0x00, de acordo com a quantidade de bytes esperada para a resposta do magnetorquer.

Os comandos utilizados são enumerados da seguinte forma:

1. **Echo:** Tem como finalidade verificar o funcionamento da comunicação e também pode ser utilizado para validar a máxima velocidade de transmissão. Para realizar essa validação, basta aumentar gradualmente a frequência de transmissão até que ocorra uma falha na comunicação.
2. **Get Status:** É utilizado para obter o estado operacional do magnetorquer. A resposta é composta de 18 bytes, sendo que cada grupo de 6 bytes é relacionado a uma bobina. O valor da intensidade pode variar de 0% até 100% e corresponde ao ciclo de trabalho do PWM utilizado para ativar as bobinas. Na tabela 3.3, pode-se visualizar qual informação está contida em cada *frame* enviado como resposta pelo dispositivo.

**Tabela 3.3.** Status das bobinas.

Resposta										
Formato								Intensidade	Tempo Restante	Período Configurado
-	-	M1	M0	-	-	S1	S0	[0-100]	2 bytes	2 bytes

As bobinas podem atuar em 4 diferentes modos, que é selecionado pelos bits M1 e M0, de acordo descrito na Tabela 3.4. Além disso, os bits S1 e S0 informam a escala de tempo dos bytes correspondentes ao tempo restante e período configurado, evidenciado na Tabela 3.5.

**Tabela 3.4.** Modos de atuação das bobinas.

M1	M0	Modo
0	0	Always On/Off
0	1	Timed actuation
1	0	Periodic mode
1	1	Automatic Actuation

3. **Coil Control:** Através desse comando pode-se acionar ou desligar as 3 bobinas simultaneamente. Também é possível ajustar a intensidade de cada eixo independentemente. Este comando é composto de 2 bytes, o primeiro deles indica quais bobinas serão controladas, e o segundo qual a intensidade desejada.

**Tabela 3.5.** Escalas de tempo.

S1	S0	Escala
0	0	Segundos
0	1	Minutos
1	0	Horas
1	1	Dias

4. **Timed Actuation:** Funciona de modo similar ao comando anterior, com a adição de controlar também o intervalo de tempo que as bobinas serão acionadas.
5. **Periodic Actuation:** Esse comando tem a função de configurar o acionamento intermitente das bobinas de forma automática. Assim, é fornecido o período do ciclo, e o tempo dentro deste período que as bobinas serão ativadas.
6. **Automatic Actuation:** Permite habilitar e desabilitar o modo de controle autônomo. Quando este modo é habilitado, o mestre perde acesso ao controle das bobina e o satélite é ajustado para a posição desejada por meio do algoritmo implementado internamente. O bit ED (vide tabela 3.6) habilita ou desabilita esse modo. Se ED for 1 deve-se fornecer, no formato *float*, os valores de Roll, Pitch e Yaw, em radianos, no qual o satélite irá se ajustar. Caso ED seja 0, os valores fornecidos serão ignorados, e o mestre poderá utilizar os demais comandos para acionar as bobinas.

A Tabela 3.6 apresenta a função de cada bit para os comandos de 1 a 6.

### 3.6 AMBIENTE DE TESTES

O projeto do ambiente de testes consistiu na elaboração de uma gaiola de Helmholtz simplificada, a qual gera um campo magnético em apenas uma direção. A concepção das bobinas da gaiola foi realizada de modo a gerar um campo magnético com intensidade suficiente para permitir a rápida rotação do magnetorquer. Dessa forma, será posicionado um suporte para a placa com um rolamento que permite a rotação da placa no plano XY. Assim, é possível demonstrar de maneira rápida e econômica a funcionalidade do magnetorquer, em vez de simular com precisão as condições do ambiente espacial.

Portanto, o projeto do ambiente de testes priorizou a criação de uma gaiola de Helmholtz

**Tabela 3.6.** Lista de comandos de controle do magnetorquer.

Núm	Bits										
1	Comando			Teste							
	0	0	0	E[4:0]							
2	Comando			-							
	0	0	1	-	-	-	-	-			
3	Comando			Bobinas				Intensidade			
	0	1	1	X	Y	Z	-	-	1 byte [-100:100]		
4	Comando			Bobinas			Escala		Intensidade	Tempo	
	1	0	0	X	Y	Z	S1	S0	1 byte [-100:100]	2 bytes	
5	Comando			Bobinas			Escala		Intensidade	Tempo	Periodo
	1	1	0	X	Y	Z	S1	S0	1 byte [-100:100]	2 bytes	2 bytes
6	Comando			Enable				Roll		Pitch	Yaw
	1	1	1	-	-	-	-	ED	4 bytes (float)	4 bytes (float)	4 bytes (float)

simplificada, que proporciona um campo magnético unidirecional suficiente para demonstrar de forma simples e prática o funcionamento do magnetorquer. Essa solução permite uma avaliação inicial do desempenho do magnetorquer de forma econômica e ágil, sem a necessidade de simulações extremamente precisas do ambiente espacial.

### 3.6.1 Produção do Ambiente de Testes

Para a produção da gaiola de Helmholtz foi elaborado o suporte das bobinas e da PCI. Através da parceria com o Laboratório Aberto, foi possível imprimir as peças desenvolvidas utilizando o material ABS, que confere resistência a temperaturas mais elevadas. A representação em CAD dos suportes desenvolvidos pode ser visualizada na Figura 3.11. A estrutura em vermelho é responsável por abrigar o rolamento, a base laranja tem a função de fixar a PCI, enquanto as peças em azul foram projetadas para acomodar as espiras das bobinas.

A alimentação da gaiola é realizada através de fontes de bancada, enquanto o magnetorquer é alimentado por duas baterias de lítio recarregáveis de 3.7 V. O nível de tensão das baterias em série (7.4 V) é ajustado para 5 V através do regulador de tensão LM7805CV. O nível de 3.3 V é obtido através de um divisor de tensão seguido por um buffer construído a partir do LM741, conforme a Figura 3.12.

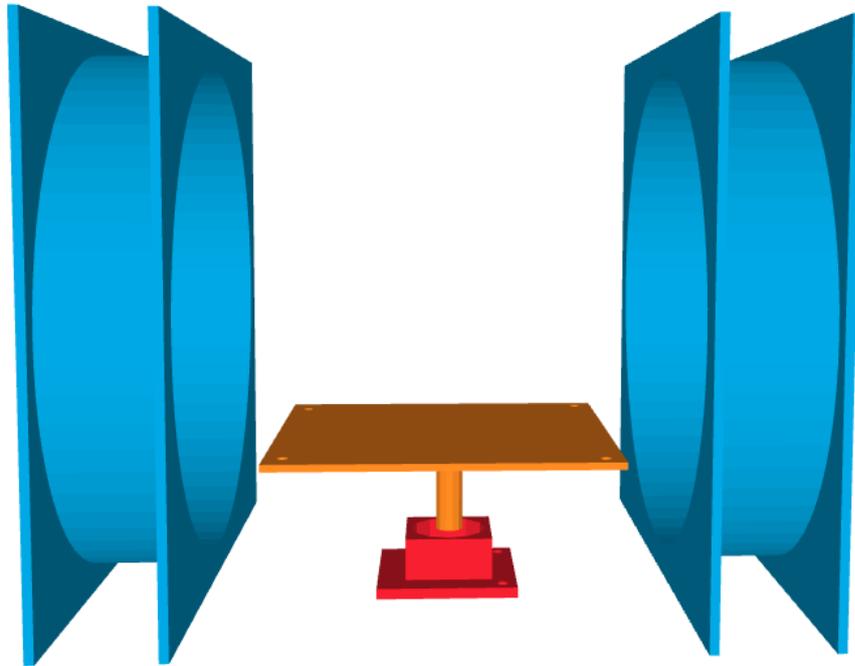


Figura 3.11. Representação CAD gaiola de Helmholtz 1D.

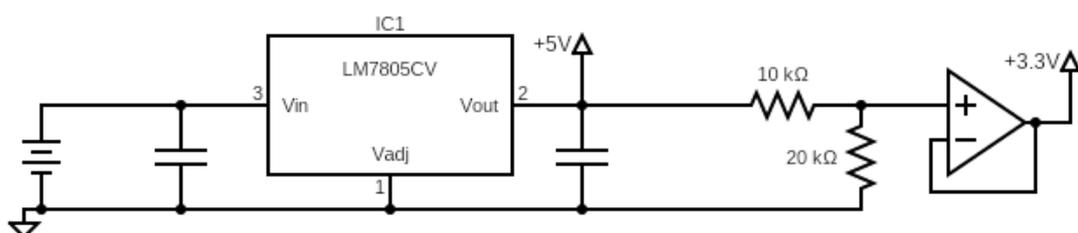


Figura 3.12. Circuito de alimentação magneto-torque.

É importante ressaltar que esse circuito foi projetado para ser utilizado de forma provisória para atender aos testes básicos deste projeto, pois no momento da fabricação, um regulador de 3.3 V não estava disponível. Entretanto, o ideal seria usar reguladores dedicados tanto para a tensão de 5 V como a de 3.3 V. A saída do amplificador possui limitação de 25 mA. Logo, apenas o microcontrolador deve ser alimentado por esse terminal, enquanto as bobinas são alimentadas pela saída do regulador de tensão. Assim, todos os componentes foram soldados em uma placa de fenolite de tamanho 10 cm × 10 cm, na qual a PCI do magnetorquer será empilhada.

Dessa forma, a gaiola de Helmholtz simplificada permite criar um ambiente controlado para realizar testes e verificar o desempenho do magnetorquer em uma configuração específica. Embora essa abordagem não reproduza fielmente as condições encontradas no espaço, ela possibilita avaliar a funcionalidade e a eficiência do magnetorquer dentro das limitações do ambiente de teste.

### 4.1 TESTE DOS COMPONENTES ELETRÔNICOS

A fim de se verificar o funcionamento básico de todos os componentes que foram escolhidos para a montagem da placa, é proposto que sejam realizados testes modulares em cada subsistema. Esses testes permitem avaliar individualmente o desempenho de cada componente antes de integrá-los completamente, facilitando a identificação de eventuais problemas.

#### 4.1.1 Microcontrolador

Como o microcontrolador é o principal componente, primeiramente deve-se certificar-se que é possível realizar a gravação de códigos simples, como por exemplo piscar os LEDs vermelho e verde da placa de periodicamente. Assim, é possível inspecionar rapidamente o funcionamento do componente.

Ademais, por se tratar de um sistema crítico, as tarefas realizadas devem ser em tempo real. Desse modo, para se assegurar de que a frequência do sistema de clock do microcontrolador atende a esse requisito é possível configurar seu timer interno para uma frequência específica, e assim acoplar a saída timer para algum pino de GPIO. Com o auxílio de um osciloscópio ou frequencímetro é possível verificar se o valor é adequado.

Em seguida, deve-se avaliar o funcionamento dos periféricos de saída serial (SPI, I2C e UART). O teste pode ser realizado programando-se uma transmissão de dados periodicamente e acoplar nos pinos terminais algum osciloscópio, ou analisador lógico. Assim, verificando se aspectos como baudrate, polaridade, fase e nível lógico em IDLE estão de acordo com o configurado.

### 4.1.2 Sensores

Após assegurar-se de que o microcontrolador está dentro das especificações, resta testar os demais circuitos integrados. Para os sensores, caso estes possuam saída serial, o teste pode ser realizado via software por meio da leitura dos valores requisitados.

Devido à natureza analógica do magnetômetro, é importante considerar sua resposta temporal. Atrasos na acomodação do sinal de saída podem afetar negativamente a sua amostragem. Para mitigar esse efeito, deve ser realizado a caracterização da resposta do sensor. Para isso, o sensor foi posicionado o mais próximo possível de uma das bobinas do magnetorquer, que será acionada em diferentes frequências. O terminal de saída do magnetômetro foi conectado a um osciloscópio. Para cada frequência de teste, o ciclo de trabalho é incrementado de 0% a 100%. Isso permite a determinação da frequência de operação ideal do PWM das bobinas.

É importante ainda considerar os efeitos de *hard iron* e *soft iron*. Para isso, utilizou-se o método dos 6 parâmetros, que é o mesmo utilizado pela gaiola de Helmholtz no laboratório LODESTAR (SILVA, 2022). Assim, a partir de uma amostra de referência, são obtidas as constantes de *offset* e de fator de escala de modo que as medições obtidas pelos sensores possam ser facilmente corrigidas.

Por outro lado, o teste do sensor inercial envolveu a medição dos dados do acelerômetro e giroscópio enquanto era realizado um movimento de 360 graus sobre a base do ambiente de testes do magnetorquer ao longo de 5 segundos. Para o processamento dos dados, foi aplicado a técnica de fusão de sensores por meio do uso do filtro complementar. Por fim, o resultado obtido é transmitido para o computador por meio da porta serial de depuração, de modo a permitir a geração do gráfico da variação da posição em função do tempo.

### 4.1.3 Consumo Energético

Com todos os sistemas integrados na placa, é possível realizar a medição do consumo energético de todos os componentes, com exceção das bobinas, que serão analisadas separadamente devido à sua potência significativamente maior.

Para avaliar o consumo energético dos componentes, utiliza-se o software EnergyTrace da

Texas Instruments. Esse software é capaz de fornecer informações detalhadas sobre o consumo total do sistema, bem como a energia consumida por cada periférico isoladamente. Com base nessas informações, é possível gerar curvas de consumo em diferentes modos de funcionamento. Essa ferramenta é facilmente habilitada dentro da sessão de depuração do código.

Assim, o desempenho energético é avaliado em três cenários diferentes:

1. Consumo máximo: Microcontrolador e driver de corrente habilitado. Sensor inercial é configurado para modo de alta performance;
2. Consumo médio: Microcontrolador e sensor inercial acessam modo de baixo consumo de maneira intermitente, enquanto os drivers de corrente estão acionados continuamente;
3. Consumo mínimo: Microcontrolador no modo de baixo consumo e periféricos desabilitados.

Com as curvas de consumo obtidas pelo EnergyTrace, é possível implementar estratégias de gerenciamento de energia mais eficientes, contribuindo para a otimização do consumo energético da placa.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS ATUADORES

Em relação à caracterização dos atuadores, inicialmente foi realizado a medição das dimensões e da massa de cada uma das bobinas. Posteriormente, foram amostrados os dados relacionados ao seu desempenho, a intensidade do campo magnético gerado em função da corrente.

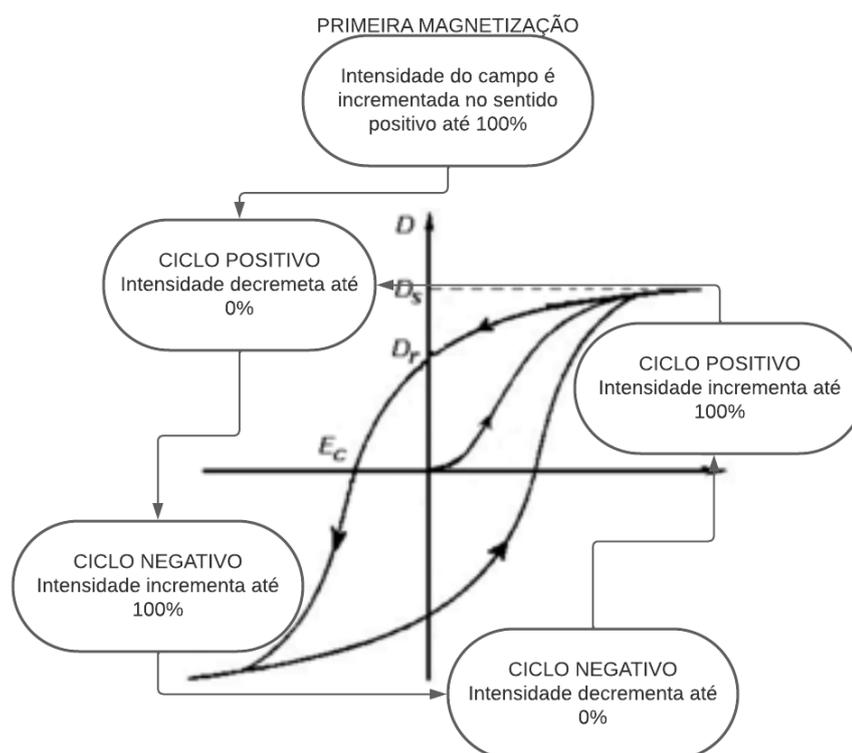
A distância ideal entre o magnetômetro e a bobina não é bem definida na literatura. Entretanto, foi observado que a menor introdução de erros às medições ocorre quando os sensores são posicionados o mais próximo possível das bobinas. Nessa configuração, o fluxo magnético sobre a superfície do sensor é maximizado. Todavia, as amostras se tornam mais sensíveis às curvaturas do campo (LEE *et al.*, 2005).

Sabendo disso, as bobinas foram posicionadas perpendicularmente à face frontal do sensor a uma distância de 1 mm. A abordagem de medir o campo magnético desacoplado da PCI oferece

a vantagem de permitir a avaliação do desempenho máximo da bobina, sem a interferência dos demais circuitos eletrônicos. No entanto, foi decidido realizar a amostragem dos dados no próprio ambiente da PCI, através do conversor analógico-digital do microcontrolador, pois os dados obtidos refletem com maior precisão o cenário real da atuação magnética.

#### 4.2.1 Obtenção da Curva de Magnetização

A curva de magnetização foi obtida através do circuito de acionamento das bobinas do magnetorquer. O ciclo de trabalho foi incrementado até o máximo e decrementado até desligar totalmente. Em seguida, a bobina é acionada no sentido contrário até a potência máxima e decrementada novamente. Esse processo pode ser resumido pelo diagrama da figura 4.1.



**Figura 4.1.** Diagrama de estados de acionamento das bobinas para obtenção da curva de magnetização.

Dessa forma, é possível obter da curva de magnetização e conseqüentemente seus parâmetros e área, que fornecem informações valiosas sobre o comportamento magnético do magnetorquer. Esses dados são essenciais para avaliar o desempenho e a eficiência do dispositivo.

### 4.2.2 Dimensionamento do Par de Bobinas

O primeiro passo para a confecção das bobinas é dimensionar a quantidade de voltas necessárias para gerar um campo magnético com intensidade suficiente para rotacionar o magnetorquer.

Assim, utilizando a Equação 4.1

$$\tau_{nec} = I\alpha \quad (4.1)$$

pode-se estimar o torque necessário para rotacionar um solenoide em 90 graus. Na qual  $\tau_{nec}$  se refere ao torque necessário,  $I$  é o momento de inercia do solenoide que possui formato de haste e  $\alpha$  é a aceleração angular.

O momento de inercia da haste é dado pela Equação 4.2:

$$I = \frac{1}{12}mL^2 \quad (4.2)$$

onde  $m$  é a massa de haste e  $L$  o seu comprimento. Foram utilizados os parâmetros das bobinas da missão SERPENS (ISHIOKA *et al.*, 2017), haja visto que elas possuem dimensões aproximadas das produzidas. Logo  $m = 200$  g e  $L = 7$  cm. O valor de momento de inercia obtido foi de  $I = 8.1666 \times 10^{-5}$  Nm<sup>2</sup>.

Para o cálculo da aceleração angular foi considerado uma rotação de 90 graus ao longo de 1 segundo. Dessa forma, utilizou-se a Equação 4.3

$$\theta = \frac{1}{2}\alpha t^2 \quad (4.3)$$

na qual  $t$  indica o tempo necessário para a rotação. Isolando  $\alpha$  e adotando os valores de ângulo em radianos obtêm-se que  $\alpha = 1.5708$  rad/s<sup>2</sup>. Assim, com a Equação 4.1 determina-se que  $\tau_{nec} = 1.282817 \times 10^{-4}$  N m.

Combinando as equações 2.1, 2.2 e considerando a direção do momento como sendo ortogonal ao campo. Obtêm-se a intensidade de campo magnético necessário para rotacionar a bobina em 90 graus:

$$B_{nec} = \frac{\tau_{nec}}{m} \quad (4.4)$$

Dado que o momento magnético gerado pelas bobinas do eixo X e Y da missão SERPENS é de  $0.358528$  Am<sup>2</sup>. O campo magnético necessário para rotacionar essa bobina é  $B_{nec} = 3.5780 \times 10^{-4}$  T.

Por fim, foi calculado o número de espiras para o par de bobinas modificando a Equação 2.7 para a forma

$$N_h = \frac{5\sqrt{5}}{8} \cdot \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B_{nec}a}{I_h} \quad (4.5)$$

na qual  $N_h$  é o número de espiras das bobinas da gaiola de Helmholtz,  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética no vácuo, e  $I_h$  a corrente injetada.

Foi definido o raio como 15 cm pois a PCI possui diagonal de aproximadamente 14 cm. Assim a placa pode ser inserida dentro da gaiola facilmente. Ademais, estabeleceu-se que cada bobina não deveria consumir mais que 1 A para evitar que o fio se aqueça demasiadamente e afete a geração do campo.

Ao substituir os valores de  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ ,  $a = 7.5$  cm e  $I_h = 1$  A na Equação 4.5, obteve-se uma estimativa mínima de espiras para cada bobina  $N_h = 29$ . Assim, considerando que a PCI do magnetorquer irá suportar as 3 bobinas com aproximadamente a mesma massa, a quantidade de espiras aplicadas é multiplicada por 3. Além disso, como forma de compensar as outras perdas do sistema, causada possíveis atritos e interferências eletromagnéticas, o número de espiras foi aumentado em 20%. Logo, o valor estimado de espiras que as bobinas utilizadas na gaiola foi de  $N_h = 105$ .

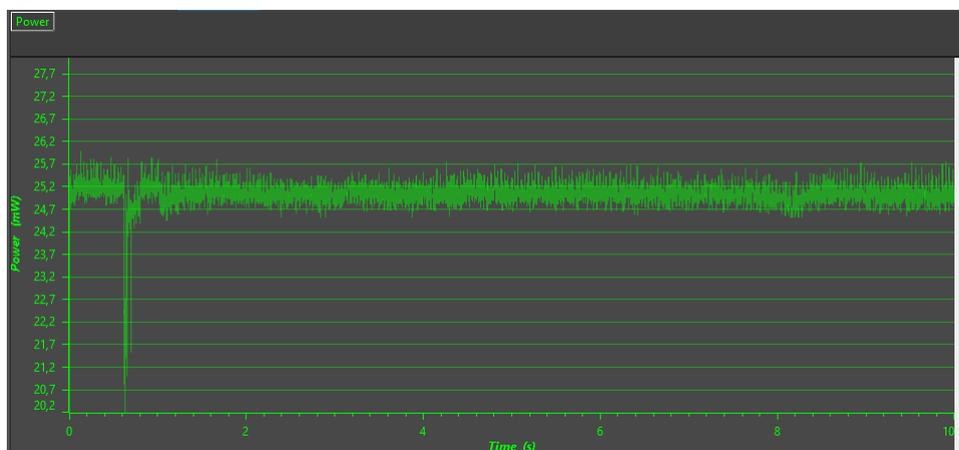
### 5.1 MICROCONTROLADOR

O firmware que realiza a leitura dos sensores analógicos e digitais e o acionamento dos atuadores foi desenvolvido e testado no MSP430, verificando-se seu correto funcionamento. Em seguida, foram obtidas as curvas de consumo para os três perfis de operação propostos. Esses dados permitem dimensionar o EPS adequadamente e aumentar a eficiência do sistema como um todo.

O consumo mínimo corresponde à potência necessária para manter os componentes em modo de baixo consumo, no qual podem ser despertados por uma interrupção via interface SPI. Esse modo permite economizar energia e habilitar a leitura dos sensores ou o controle dos atuadores quando necessário.

Nota-se, pela figura 5.1, que a potência varia pouco ao redor da média. Isso é refletido pela corrente consumida que apresentou uma variação de apenas 5% ao longo de todo o período amostrado, como demonstra a Tabela 5.1.

O perfil de consumo médio, mostrado na figura 5.2, apresenta uma maior potência de base

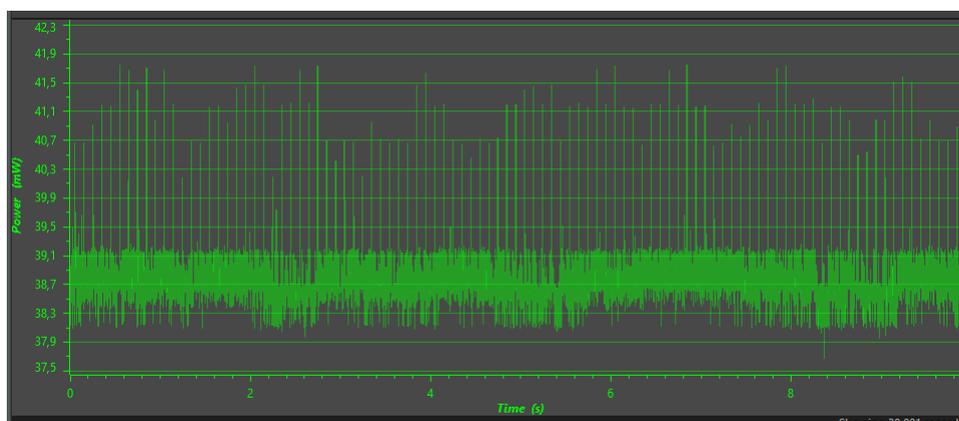


**Figura 5.1.** Potência ao longo de 10 segundos no perfil de consumo mínimo.

**Tabela 5.1.** Parâmetros do perfil de consumo mínimo.

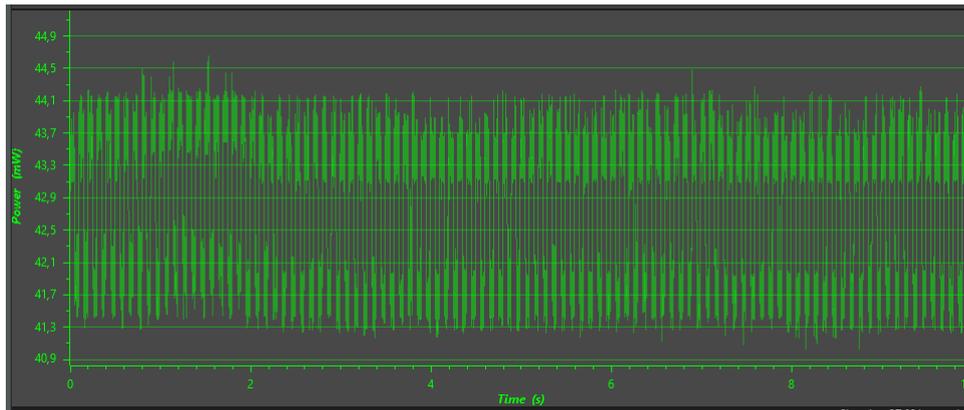
	<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Potência	Leitura Máxima	25,993 mW
	Leitura Média	25,0417 mW
	Leitura Mínima	24,685 mW
	Tensão	3,2834 V
Corrente	Leitura Máxima	7,9126 mA
	Leitura Média	7,6267 mA
	Leitura Mínima	7,5181 mA
	Energia (10 s)	251,647 mJ

e vários picos de consumo. Esses picos são causados pela leitura dos sensores a cada 100 ms, que fazem o microcontrolador sair do modo de baixo consumo e amostrar os dados da IMU e dos magnetômetros. A Tabela 5.2 indica os parâmetros do consumo de energia nesse perfil.

**Figura 5.2.** Potência ao longo de 10 segundos no perfil de consumo médio.**Tabela 5.2.** Parâmetros do perfil de consumo médio.

	<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Potência	Leitura Máxima	41,7452 mW
	Leitura Média	38,7438 mW
	Leitura Mínima	37,6724 mW
	Tensão	3.2839 V
Corrente	Leitura Máxima	12,7117 mA
	Leitura Média	11,7982 mA
	Leitura Mínima	11,4785 mA
	Energia (10 s)	389,349 mJ

O modo de consumo máximo tem uma taxa de amostragem de 100 Hz. A figura 5.3 mostra que os picos de consumo são mais intensos e duradouros do que no modo de consumo médio e que o consumo nos vales também é maior. A Tabela 5.3 evidencia o fato de a potência ter pouca variação em torno da média nesse modo.



**Figura 5.3.** Potência ao longo de 10 segundos no perfil de consumo máximo.

**Tabela 5.3.** Parâmetros do perfil de consumo máximo.

	<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Potência	Leitura Máxima	44,6534 mW
	Leitura Média	42,7557 mW
	Leitura Mínima	41,0263 mW
	Tensão	3.2839 V
Corrente	Leitura Máxima	13,6097 mA
	Leitura Média	13,0284 mA
	Leitura Mínima	12,5043 mA
	Energia (10 s)	429,932 mJ

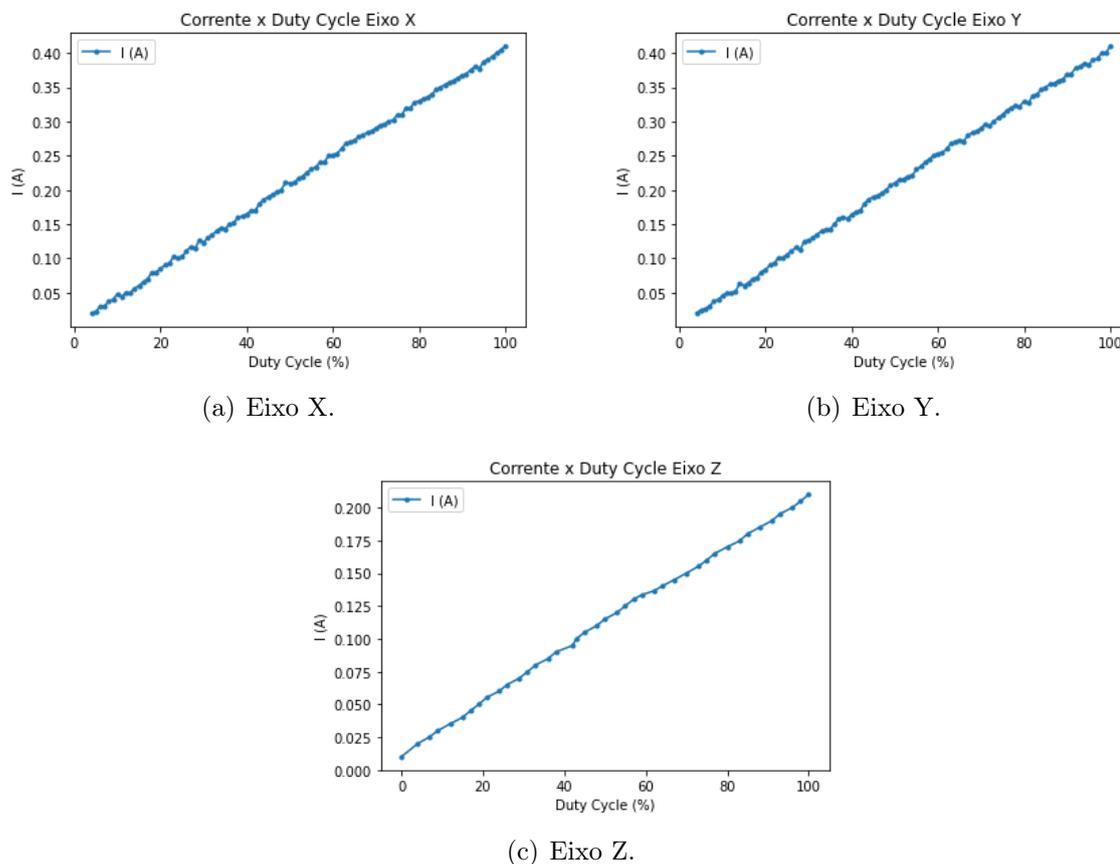
Em resumo, os perfis de consumo propostos atenderam às expectativas. No entanto, é importante ressaltar que há a possibilidade de reduzir ainda mais o consumo usando cristais osciladores externos. No exemplo de validação, foi usado o oscilador digital interno, que consome mais energia. Além disso, os modos de baixo consumo da IMU podem ser configurados conforme os requisitos da missão, diminuindo o consumo ainda mais.

## 5.2 DRIVER DE CORRENTE

Os drivers de corrente foram validados pela sua capacidade de acionar as bobinas. Para isso, foi aplicado um sinal PWM com ciclo de trabalho que aumenta progressivamente. A figura 5.4 ilustra que a corrente consumida tem uma relação linear com o ciclo de trabalho e que as bobinas dos eixos X e Y têm um consumo similar, enquanto que a bobina do eixo Z consome cerca de metade da corrente dos outros eixos.

Essa relação linear entre o ciclo de trabalho do sinal PWM e o consumo de corrente é um resultado esperado, uma vez que a impedância da bobina é constante, e indica que os drivers de

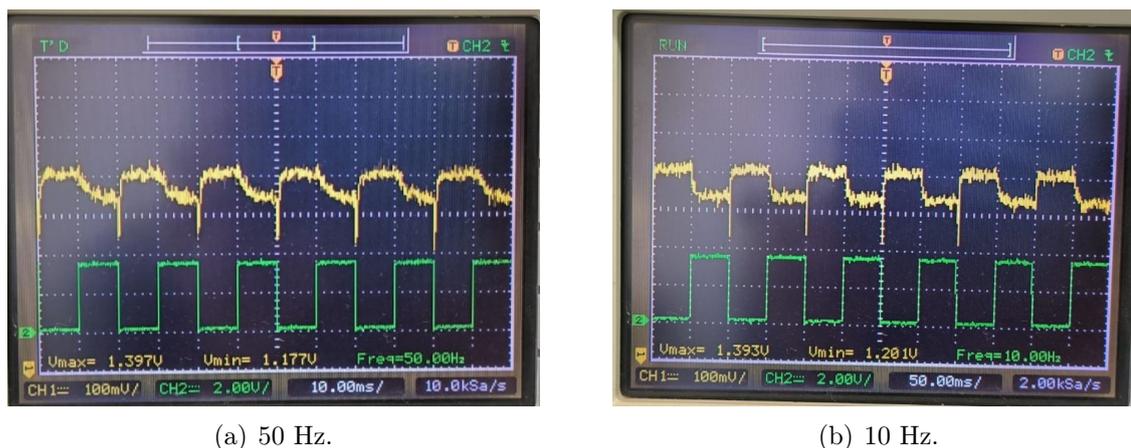
corrente estão funcionando adequadamente. Além disso, a similaridade no consumo de corrente entre as bobinas dos eixos X e Y é um indicativo de que os drivers estão proporcionando o acionamento equilibrado dessas bobinas.



**Figura 5.4.** Corrente consumida pelas bobinas.

### 5.3 MAGNETÔMETROS

Inicialmente, a avaliação dos magnetômetros envolveu o ajuste da frequência de operação do PWM dos drivers de corrente. O sinal de saída do sensor foi observado em um osciloscópio. A figura 5.5 mostra a medição do sensor para duas frequências diferentes, 50 Hz e 10 Hz. O canal 1, em amarelo, é a saída do magnetômetro, e o canal 2, em verde, é o sinal de acionamento da bobina. A frequência de 50 Hz não permite que o sinal se estabilize. Desse modo, ciclos de trabalho menores afetam ainda mais negativamente o sinal. Por outro lado, a frequência de 10 Hz proporciona mais tempo para a saída do sensor se acomodar. Por isso, esse valor foi o escolhido para o acionamento das bobinas.

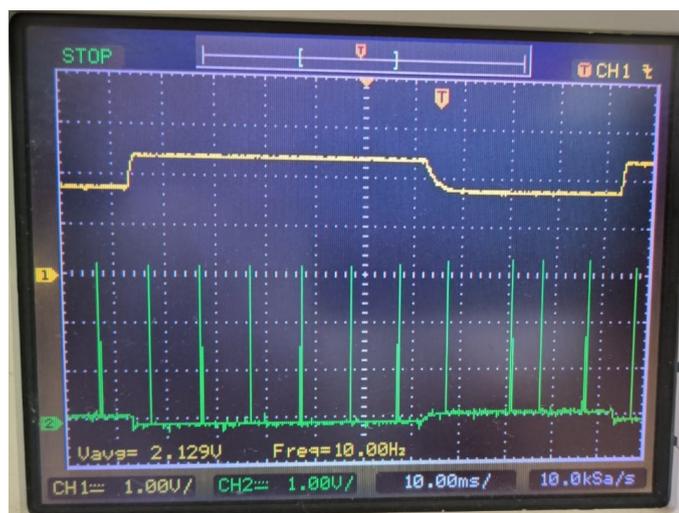


(a) 50 Hz.

(b) 10 Hz.

**Figura 5.5.** Resposta do magnetômetro para diferentes frequências.

A média da tensão de saída do sensor representa o valor de campo magnético gerado pela bobina. Para prevenir o efeito de *aliasing*, o sinal é amostrado pelo conversor AD em uma frequência 10 vezes maior que a frequência original. Os picos do canal 2 da figura 5.6 ilustram o tempo de amostragem.

**Figura 5.6.** Amostras do sinal magnetômetro.

Vale ressaltar que os valores medidos estão sujeitos a efeitos de *hard iron* e *soft iron*. Portanto, deve-se obter as constantes de escala e offset de cada um dos magnetômetros. Para isso, foi realizado a medição do campo magnético no local do laboratório sem nenhuma bobina acionada e com a placa do magnetorquer em diversas posições. Além disso, foi adotado o valor real como sendo  $25 \mu\text{T}$ , uma vez que essa é a média do campo em Brasília (SILVA, 2022). Os parâmetros de calibração obtidos para cada eixo são expostos na Tabela 5.4.

A partir desses valores, pode-se aplicar a equação 2.9 a fim de se obter medições de campo

**Tabela 5.4.** Parâmetros de Calibração Magnetômetros

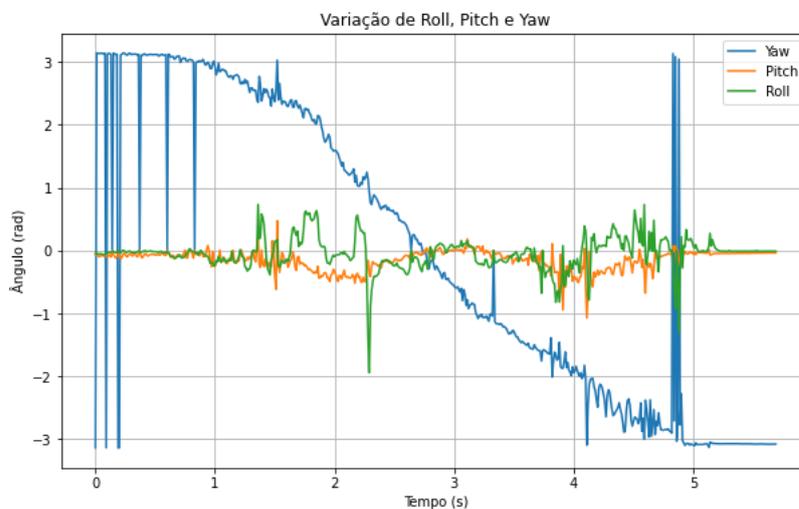
Parâmetro	Valor
x0	1.649
y0	1.627
z0	1.671
a	0.00198465
b	0.00200144
c	0.00201641

magnético mais precisas.

## 5.4 SENSOR INERCIAL

A verificação de funcionamento do sensor inercial é realizado através da amostragem dos dados do acelerômetro e giroscópio seguido pelo cálculo da estimativa de posição. Foi realizado um movimento de rotação apenas em Yaw (eixo vertical). Entretanto, pela figura 5.7 percebe-se que Roll e Pitch também indicaram variação ao longo do tempo.

Isso pode ser atribuído ao modo inconsistente que foi aplicado força ao sistema durante os testes. Além disso, a presença dos cabos de comunicação serial limitaram a fluidez do movimento. A combinação desses fatores pode ter contribuído para introduzir vibrações e movimentos indesejados. Enfim, apesar das inconsistências apontadas, o filtro complementar foi capaz de identificar o movimento de rotação na qual a posição variou de 3.14 rad a  $-3.14$  rad. O que posteriormente pode ser aproveitado para a realização do controle de atitude.

**Figura 5.7.** Posição estimada.

É importante ressaltar ainda que essa técnica de fusão de sensores foi utilizada apenas como forma de validação inicial. Para obter resultados mais precisos é recomendada a aplicação de métodos mais avançados como filtro de Kalman ou Madgwick, além da utilização dos magnetômetros para a obtenção de Yaw, uma vez que a integração das medições do giroscópio apresentam *drift* ao longo do tempo.

## 5.5 CARACTERIZAÇÃO DA BOBINA

A caracterização da bobina consistiu em medir o campo gerado em função da corrente fornecida pela ponte H. A figura 5.8 mostra que as bobinas dos eixos X e Y tiveram desempenhos similares, o que era esperado, pois possuem parâmetros semelhantes. Além disso, dentro das limitações de potência para a tensão de 5 V, o campo gerado teve uma relação linear com a corrente. Não foram detectados efeitos significativos de histerese, como saturação ou campo remanescente após a magnetização inicial.

Em contra-partida, uma vez que a bobina do eixo Z não possui núcleo ferromagnético, as medições partiram da corrente máxima no sentido negativo e em seguida incrementada para sentido positivo até o máximo. É fácil perceber que a curva apresenta comportamento menos linear do que nos casos anteriores. Isso pode ser explicado pela ausência de núcleo ferromagnético. Dessa forma, as linhas de campo ficam difusas pela área da bobina o que torna a medição menos consistente.

Em relação a intensidade do campo, observa-se que nos eixos X e Y foi gerado um campo máximo de aproximadamente 400 GS enquanto que no eixo Z o máximo observado foi de 25 GS. Essa diferença novamente se dá pela ausência do núcleo ferromagnético no eixo Z, uma vez que ele é responsável por amplificar o campo no qual é submetido. Além disso, por possuir diâmetro maior, foi utilizado uma quantidade de fio de cobre maior, o que eleva a resistência da bobina e limita a corrente. A Figura 5.9 demonstra o projeto final montado.

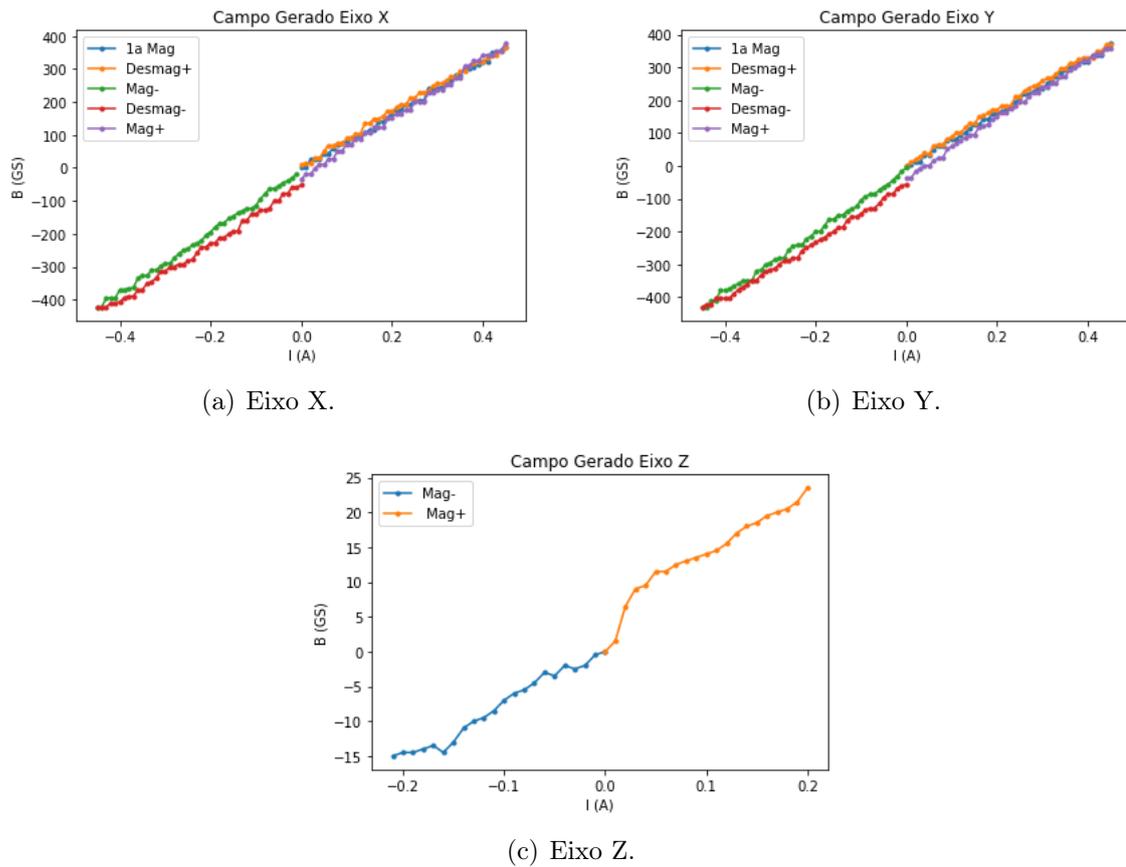


Figura 5.8. Campo gerado pelas bobinas.

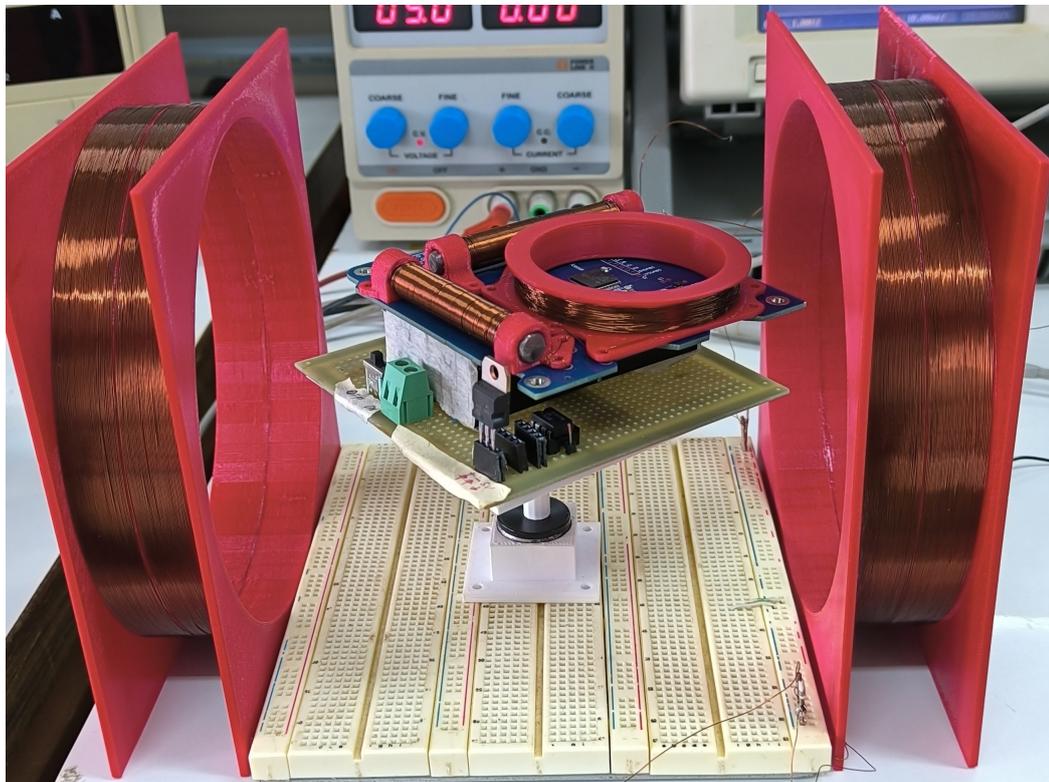


Figura 5.9. Projeto montado com todos os componentes.

# CONCLUSÃO

A motivação inicial do trabalho partiu de demandas pontuais de melhorias para a versão antiga do magnetorquer. Além das dificuldades de conectividade da PCI pela falta de um conector PC104, ainda foram abordados os problemas relacionados a baixa intensidade do campo gerado pelas bobinas.

A adição de um núcleo ferromagnético nos eixos X e Y permitiu a amplificação do campo gerado com um custo de aumento de massa. Verificou-se que os materiais utilizados no núcleo não demonstraram grandes efeitos de histerese na faixa de corrente de operação.

Com a adição do conector PC104, a PCI desenvolvida pode ser mais facilmente incorporada por diversas missões. Através do protocolo SPI proposto o magnetorquer possui flexibilidade para atuar como controlador de apontamento de forma autônoma, ou acionar as bobinas de acordo com os comandos enviados

Além disso, foram incluídos novos sensores que possibilitam extrair mais informações relacionadas ao apontamento do satélite. O sensor inercial utilizado foi capaz de fornecer dados com precisão para estimar a posição da placa no ambiente de teste mesmo com um algoritmo simples. A inclusão dos magnetômetros permitiu com que a placa desenvolvida colete dados sobre o desempenho das bobinas constantemente.

Desse modo, todos os algoritmos de controle e sensoriamento que previamente deveriam ser realizados em outras unidades de processamento agora são executados pelo microcontrolador do próprio magnetorquer. Isso alivia a carga de processamento sobre os demais módulos além de facilitar o desenvolvimento do CubeSat como um todo.

A produção da gaiola Helmholtz 1D simplificada também adiciona uma etapa intermediária de validação do magnetorquer. É possível realizar testes iniciais de desempenho de algoritmos de estimação de posição ou de controle de atitude de forma acessível.

Nesse contexto, o trabalho desenvolvido apresentou melhorias significativas para o hardware do magnetorquer. Além das correções dos problemas apontadas no projeto anterior, foram implementadas diversas melhorias com o intuito de tornar o sistema mais flexível.

## 6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O sistema desenvolvido apresenta flexibilidade para suportar diversos algoritmos de controle. Assim, é sugerido como trabalho futuro que seja realizado um estudo comparativo entre diferentes leis de controle. Para isso, pode-se comparar aspectos que são facilmente medidos através do ambiente de testes produzido. Como o tempo para estabilização na posição desejada, consumo energético e precisão.

Ademais, a implementação do firmware atual teve como objetivo apenas a validação dos componentes escolhidos. Como projeto futuro, é possível otimizar o consumo do microcontrolador utilizando rotinas de interrupção no modo de baixo consumo de forma mais eficiente e incluindo osciladores externos. Também é possível implementar algoritmos de estimação de posição mais eficientes, que utilizam técnicas de fusão de sensores como o magnetômetro ou GPS.

## REFERÊNCIAS

- ALI, H.; MUGHAL M, R.; PRAKS, J.; REYNERI L, M.; ISLAM, Q. Analysis and design of integrated magnetorquer coils for attitude control of nanosatellites. *Proceedings of the Conference on Small Satellites*, DigitalCommons Utah State University Research, p. 340, 2018. Cited 4 times in pages 15, 16, 17, and 36.
- BORGES, R. A.; SANTOS, A. C. dos; SILVA, W. R.; AGUAYO, L.; BORGES, G. A.; KARAM, M. M.; SOUSA, R. B. de; GARCÍA, B. F.-A.; BOTELHO, V. M. d. S.; FERNÁNDEZ-CARRILLO, J. M. *et al.* The alfacruz cubesat mission description and early results. *Applied Sciences*, MDPI, v. 12, n. 19, p. 9764, 2022. Cited 2 times in pages iv and 2.
- BOS, M. van den. Design and testing of magnetic torquers for pico satellite attitude control. 2019. Cited 2 times in pages 14 and 16.
- BOUWMEESTER, J.; LANGER, M.; GILL, E. Survey on the implementation and reliability of cubesat electrical bus interfaces. *Ceas space journal*, Springer, v. 9, p. 163–173, 2017. Cited 2 times in pages 9 and 10.
- CHO, D.-H.; CHOI, W.-S.; KIM, M.-K.; KIM, J.-H.; SIM, E.; KIM, H.-D. *et al.* High-resolution image and video cubesat (hirev): Development of space technology test platform using a low-cost cubesat platform. *International Journal of Aerospace Engineering*, Hindawi, v. 2019, 2019. Cited in page 1.
- ELWELL, J.; HIGGINS, J.; MAXWORTH, A.; QUALLS, J. Comparison of pcb, square loop and rod type magnetorquers for cubesatellites. In: IEEE. *2021 USNC-URSI Radio Science Meeting (USCN-URSI RSM)*. [S.l.], 2021. p. 052–054. Cited 2 times in pages 15 and 17.
- ERTÜRK, M. F. *MAGNETIC ATTITUDE CONTROL OF A NANOSATELLITE*. Tese (Doutorado) — ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY, 2022. Cited 2 times in pages iv and 16.
- FERGUSON, J. Calibration of deterministic imu errors. 2015. Cited in page 24.
- GALLIATH, R.; HASSON, O.; MONTERO, A.; RENFRO, C.; RESMINI, D.; DEMETRIOU, M. A. Design and analysis of a cubesat. *Worcester Polytechnic Institute, Worcester, Massachusetts*, 2020. Cited 2 times in pages iv and 17.
- GAUSS SRL. *GAUSS OBC ABACUS 2017 Datasheet*. 2017. Disponível em: <[https://www.gaussteam.com/wordpress/wp-content/uploads/2017/11/Datasheet\\_OBC\\_ABACUS\\_2017.pdf](https://www.gaussteam.com/wordpress/wp-content/uploads/2017/11/Datasheet_OBC_ABACUS_2017.pdf)>. [Online; acessado em 21-Junho-2023]. Cited in page 34.
- GEIB, F. On-board computer for pc104 format cubesats. *Czech Technical University in Prague*, 2021. Cited 5 times in pages iv, v, 10, 26, and 27.
- GUERRA, G. B. *Implementação e análise de desempenho de algoritmos para estabilização da atitude em um simulador de pequenos satélites*. 2022. Cited in page 1.

- HASHIM, H. A. Special orthogonal group  $so(3)$ , euler angles, angle-axis, rodriguez vector and unit-quaternion: Overview, mapping and challenges. *ArXiv*, abs/1909.06669, 2019. Cited 2 times in pages iv and 23.
- ISHIOKA, I. K.; BATTISTINI, S.; CAPPELLETTI, C.; BORGES, R. A. Design and development of an active magnetic actuator for attitude control system of nanosatellites. In: *4th IAA Conference on Small Satellites. International Academy of Astronautics*. [S.l.: s.n.], 2017. Cited 3 times in pages 1, 37, and 48.
- JILES, D. *Introduction to magnetism and magnetic materials*. [S.l.]: CRC press, 2015. Cited 2 times in pages iv and 13.
- KHAN, S. A.; SHIYOU, Y.; ALI, A.; TONG, J.; GUERRERO, J. M. Analysis and design of embedded printed air-coil for various dimensions small satellites. 2021. Cited 2 times in pages iv and 15.
- LÄTT, S.; SLAVINSKIS, A.; ILBIS, E.; KVELL, U.; VOORMANSIK, K.; KULU, E.; PAJUSALU, M.; KUUSTE, H.; SÜNTER, I.; EENMÄE, T. *et al.* Estcube-1 nanosatellite for electric solar wind sail in-orbit technology demonstration. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, Teaduste Akadeemia Kirjastus (Estonian Academy Publishers), n. 2, p. 200, 2014. Cited in page 9.
- LAURENTIU, C. *Modeling and simulation of nonlinear magnetic hysteresis*. 2021. <<https://x-engineer.org/modeling-simulation-nonlinear-magnetic-hysteresis/>>. [Online; acessado em 18-Junho-2023]. Cited 2 times in pages iv and 14.
- LEE, S.-H.; SEO, H.-H.; RHEE, S.-W. Performance analysis of magnetic torquer for spacecraft control. *Proceedings of the International Conference on Control and Robot Systems*, p. 1313–1317, 2005. Cited in page 46.
- LEENS, F. An introduction to i 2 c and spi protocols. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, IEEE, v. 12, n. 1, p. 8–13, 2009. Cited 3 times in pages iv, 10, and 11.
- LOVERA, M. Periodic attitude control for satellites with magnetic actuators: an overview. *IFAC Proceedings Volumes*, Elsevier, v. 34, n. 12, p. 113–118, 2001. Cited in page 12.
- MONTALVO, C. *Aerospace Mechanics And Control*. [S.l.]: LibreTexts, 2022. Cited 2 times in pages 23 and 24.
- NANJING OUZHUO TECH. *OH49E Series LINEAR HALL-EFFECT IC*. 2018. Disponível em: <[https://www.progrexa.com/file\\_PDF/OH49E.pdf](https://www.progrexa.com/file_PDF/OH49E.pdf)>. [Online; acessado em 21-Junho-2023]. Cited 2 times in pages v and 30.
- NANOAVIONICS. *CubeSat Magnetorquer SatBus MTQ*. 2021. Disponível em: <<https://nanoavionics.com/cubesat-components/cubesat-magnetorquer-satbus-mtq/>>. [Online; acessado em 18-Julho-2023]. Cited 2 times in pages iv and 18.
- OZYAGCILAR, T. Calibrating an ecompass in the presence of hard and soft-iron interference. *Freescale Semiconductor Ltd*, p. 1–17, 2012. Cited 2 times in pages iv and 22.
- RAMSDEN, E. *Hall-effect sensors: theory and application*. [S.l.]: Elsevier, 2011. Cited 3 times in pages iv, 20, and 21.

REITZ, F.; MILFORD, J.; CHRISTY, R. *Foundations of Electromagnetic Theory*. [S.l.: s.n.], 2003. Cited in page 13.

SATSEARCH. *Magnetorquers available on the global marketplace*. 2019. Disponível em: <<https://blog.satsearch.co/>>. [Online; acessado em 21-Junho-2023]. Cited in page 28.

SILVA, R. C. da; ISHIOKA, I. S. K.; CAPPELLETTI, C.; BATTISTINI, S.; BORGES, R. A. 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. Cited 2 times in pages iv and 5.

SILVA, T. H. F. da. *DESENVOLVIMENTO DE HARDWARE E SOFTWARE PARA GERAÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO CONTROLÁVEL UTILIZANDO GAIOLA DE HELMHOLTZ*. 2022. Cited 4 times in pages 22, 23, 45, and 54.

STMICROELECTRONICS. *iNEMO inertial module: always-on 3D accelerometer and 3D gyroscope*. 2017. Disponível em: <<https://www.st.com/resource/en/datasheet/lsm6ds3tr-c.pdf>>. [Online; acessado em 21-Junho-2023]. Cited 2 times in pages v and 31.

TATUM, J. *Electricity and Magnetism*. [S.l.]: LibreTexts, 2023. Cited 2 times in pages iv and 19.

TEXAS INSTRUMENTS. *DRV883x Low-Voltage H-Bridge Driver*. 2021. Disponível em: <<https://www.ti.com/product/DRV8837>>. [Online; acessado em 21-Junho-2023]. Cited 2 times in pages v and 32.

TEXAS INSTRUMENTS. *MSP430FR697x(1), MSP430FR687x(1), MSP430FR692x(1), MSP430FR682x(1) Mixed--Signal Microcontrollers*. 2021. Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430fr6972.pdf>>. [Online; acessado em 21-Junho-2023]. Cited 4 times in pages v, 32, 34, and 38.

VASCONCELOS, J. F.; ELKAIM, G.; SILVESTRE, C.; OLIVEIRA, P.; CARDEIRA, B. Geometric approach to strapdown magnetometer calibration in sensor frame. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic systems*, IEEE, v. 47, n. 2, p. 1293–1306, 2011. Cited 2 times in pages 21 and 22.

VÁZQUEZ, A. L. R. *Purely magnetic attitude control algorithm for low earth orbit satellites= Algoritmo de control magnético puro para satélites de órbita baja*. Tese (Doutorado) — Universidad de Sevilla, 2013. Cited in page 12.

VINAY, G.; SAINI, S. A review on cube satellites. 2022. Cited 2 times in pages iv and 8.