



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA PARA
GERAÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO CONTROLÁVEL
COM GAIOLA DE HELMHOLTZ**

Thiago Henrique Ferreira da Silva

Brasília, setembro de 2022

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA PARA
GERAÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO CONTROLÁVEL
COM GAIOLA DE HELMHOLTZ**

Thiago Henrique Ferreira da Silva

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

Banca Examinadora

Prof. Renato Alves Borges, ENE/UnB
Orientador

Geovany Araújo Borges, ENE/UnB
Co-orientador

Prof. Fulano de Tal 3, EESC/USP
Examinador externo

Prof. Fulano de Tal 4, ENE/UnB
Examinador interno

Dedicatória

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

Thiago Henrique Ferreira da Silva

Agradecimentos

A inclusão desta seção de agradecimentos é opcional e fica a critério do(s) autor(es), que caso deseje(em) inclui-la deverá(ao) utilizar este espaço, seguindo esta formatação.

Thiago Henrique Ferreira da Silva

RESUMO

Este trabalho, executado no âmbito do Laboratório de Controle e Simulação de Sistemas Aeroespaciais (LODESTAR), tem por objetivo o desenvolvimento de hardware e firmware para a geração de campo magnético controlável voltado para aplicações no simulador de pequenos satélites em desenvolvimento no LODESTAR. O sistema atual conta com uma gaiola de Helmholtz com dois pares de bobinas por eixo, estação de trabalho, e fontes de tensão controláveis. A proposta deste trabalho contempla atualizações e desenvolvimento de novas funcionalidades para a plataforma atual do laboratório. Dentre as possíveis aplicações destaca-se a reprodução do campo magnético de acordo com diferentes tipos de modelos existentes, tais como o World Magnetic Model (WMM), International Geomagnetic Reference Field (IGRF), e o Tsyganenko Geomagnetic Field Model, dentre outros. Este último modelo, diferente do WMM e IGRF, permite considerar distúrbios no campo magnético decorrente de tempestades geomagnéticas. Com esta funcionalidade é possível analisar o comportamento de controladores por atuação magnética para diferentes situações, simulando cenários de instabilidade no clima espacial em vários planos orbitais. Por fim, esse trabalho contempla testes preliminares para validação do novo sistema no contexto dos projetos em curso no LODESTAR.

ABSTRACT

This work, carried out in the scope of the Laboratory of Control and Simulation of Aerospace Systems, (LODESTAR), has the objective of developing hardware and firmware for the generation of controllable magnetic field aimed at applications in the small satellite simulator in development at LODESTAR. The current system has a Helmholtz cage with two coil pairs per axis, workstation, and controllable voltage sources. The proposal of this work includes updates and development of new features for the platform laboratory current. Among the possible applications stands out the reproduction of the magnetic field according to different types of existing models, such as the World Magnetic Model (WMM), International Geomagnetic Reference Field (IGRF), and the Tsyganenko Geomagnetic Field Model, among others. This last model, different from WMM and IGRF, allows to consider disturbances in the magnetic field due to geomagnetic storms. With this functionality it is possible analyze the behavior of controllers by magnetic actuation for different situations, simultaneously lying scenarios of space weather instability in various orbital planes. Finally, this work includes preliminary tests for validation of the new system in the context of ongoing projects in the LODESTAR.

SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	2
1.3	OBJETIVOS DO PROJETO	2
1.4	APRESENTAÇÃO DO MANUSCRITO.....	2
2	Dinâmica Orbital e Sistemas de Referência	3
2.1	INTRODUÇÃO.....	3
3	Modelos de Campos Geomagnéticos.....	4
3.1	INTRODUÇÃO	4
4	Desenvolvimento da Plataforma.....	5
4.1	INTRODUÇÃO.....	5
5	Resultados.....	7
5.1	INTRODUÇÃO	7
6	Conclusões.....	8
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	9
	Anexos.....	10
I	ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO PARA CONTROLE DO SENTIDO DA CORRENTE NAS BOBINAS DA GAIOLA DE HELMHOLTZ	11

LISTA DE FIGURAS

1.1	Nanosatélite AlfaCrux desenvolvido pela Universidade de Brasília.	1
4.1	Layout da placa de circuito impresso.	5
4.2	Simulação 3D do hardware desenvolvido.	6
4.3	Hardware após a montagem dos componentes.	6

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

E	Campo elétrico	[V/m]
B	Campo magnético	[T]
D	Campo de deslocamento elétrico	[C/m ²]
H	Campo magnetizante	[A/m]
J_f	Densidade de corrente livre	[A/m ²]
V	Tensão DC	[V]
v	Velocidade	[m/s]
Q	Carga pontual	[C]
F	Força magnética	[N]
r	Posição	[m]

Símbolos Gregos

∇	Gradiente
$\nabla \cdot$	Divergente
$\nabla \times$	Rotacional

Subscritos

x	Referente ao eixo x
y	Referente ao eixo y
z	Referente ao eixo z
P	Referente ao eixo P

Sobrescritos

\cdot	Variação temporal
T	Trasposta da matriz

Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
------	--

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo tem por objetivo a contextualização e a exposição do projeto.

1.1 Contextualização

Nanosatélites é uma classe de satélites de pequeno porte com massa entre 1 e 10 kg tendo em si subsistemas necessários para a realização de missões espaciais. Dentre os satélites pertencentes na categoria de nanosatélites destacam-se os CubeSats, desenvolvidos em conjuntos entre a Cal Poly (*California Polytechnic State university*) e Universidade de Stanford. Assim, foi tido como a dimensão padrão de unidade "1U", unidade na qual os satélites medindo $10 \times 10 \times 10$ cm, podendo esses serem estendidos a várias unidades.

No dia primeiro de abril de 2022 foi lançado o AlfaCruX, um nanosatélite de dimensão 1U desenvolvido pela Universidade de Brasília (UnB) que tem por objetivo ajudar a melhorar a comunicação via rádio em áreas isoladas no país, onde não há sinal de telefonia.

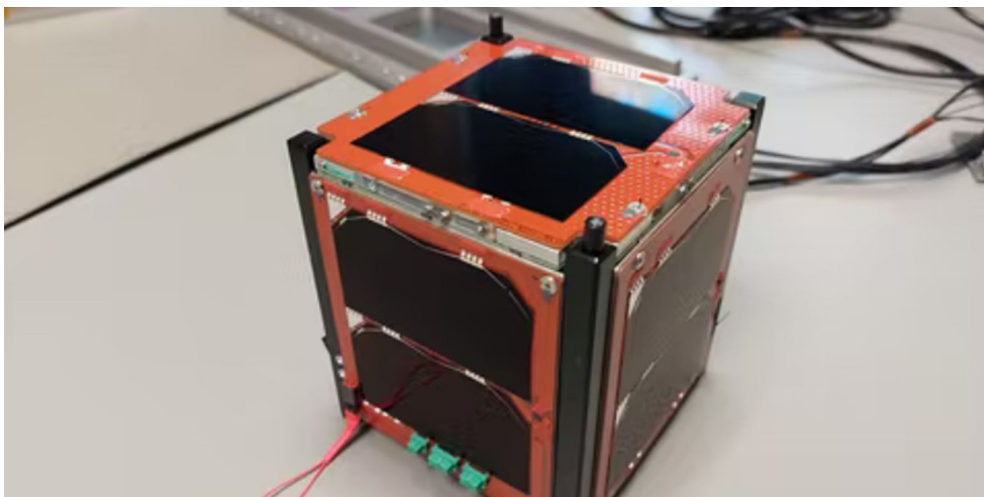


Figura 1.1: Nanosatélite AlfaCruX desenvolvido pela Universidade de Brasília.

Nesse contexto, com a finalidade de se estudar o ambiente espacial foi desenvolvido na UnB pelo Laboratório de Simulação e Controle de Sistemas Aeroespaciais (LODESTAR) uma plataforma

de testes, o Simulador de Sistemas de Determinação e Controle de Atitude de Pequenos Satélites.

O sistema atual do simulador conta com uma gaiola de Helmholtz com dois pares de bobinas por eixo, fontes de tensão controláveis, sensor de campo magnético e estação de trabalho.

1.2 Definição do problema

Esse trabalho descreve as atualizações e desenvolvimentos de novas funcionalidades para a plataforma atual do laboratório, dessa forma, são requisitos desse trabalho:

- Simular o dinamicamente o campo magnético de orbitas baixas (LEO).
- Analisar o comportamento de controladores por atuação magnética em diferentes situações.
- A reprodução do campo magnético com diferentes modelos existentes tais como World Magnetic Model (WMM), International Geomagnetic Reference Field (IGRF), Tsyganenko Geomagnetic Field Model.
- Simular cenários de instabilidade no clima espacial e vários planos orbitais.

1.3 Objetivos do projeto

O objetivo desse trabalho consiste na simulação do campo magnético em orbitas baixas, utilizando fontes controladas e uma gaiola de Helmholtz.

1.4 Apresentação do manuscrito

No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica sobre o tema de estudo. Em seguida, o capítulo ?? descreve a metodologia empregada no desenvolvimento do projeto. Resultados experimentais são discutidos no capítulo ??, seguido das conclusões no capítulo 6. Os anexos contém material complementar.

Capítulo 2

Dinâmica Orbital e Sistemas de Referência

Esse capítulo trata dos fundamentos a respeito de dinâmica orbital e sistemas de referência que serão adotados ao longo dos capítulos seguintes.

2.1 Introdução

Nesse capítulo será apresentado todos os fundamentos a respeito de conceitos tais como: eletromagnetismo, gaiola de Helmholtz, dinâmica de orbitas e outros simuladores ao longo do mundo. Tendo assim um bom embasamento para a evolução do projeto.

Capítulo 3

Modelos de Campos Geomagnéticos

Esse capítulo trata da modelos de reprodução de campos geomagnéticos, tais como: World Magnetic Model (WMM), International Geomagnetic Reference Field (IGRF), e o Tsyganenko Geomagnetic Field Model

3.1 Introdução

Nesse capítulo será abordados conceitos de modelos existentes que serão testados na plataforma de simulação.

Capítulo 4

Desenvolvimento da Plataforma

Esse capítulo contém o desenvolvimento do projeto do simulador de campo magnético, tanto o hardware quanto o firmware.

4.1 Introdução

Nesse capítulo serão tratadas questões a respeito de como foi feito o *hardware* e *firmware* da plataforma, tais como: como foi estabelecido a comunicação do Matlab com as fontes, a comunicação do Matlab com a ponte H, como os modelos de campos foram implementados, que tipo de controle foi adotado, como será medido o quão certo está o sistema.

Dentre eles já foi executado o esquemáticos, o layout da placa de circuito impresso e sua simulação e por último a execução da montagem do hardware.

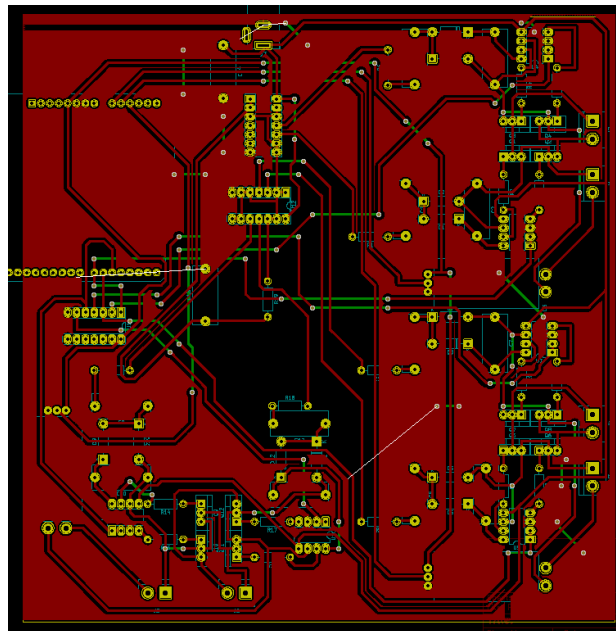


Figura 4.1: Layout da placa de circuito impresso.

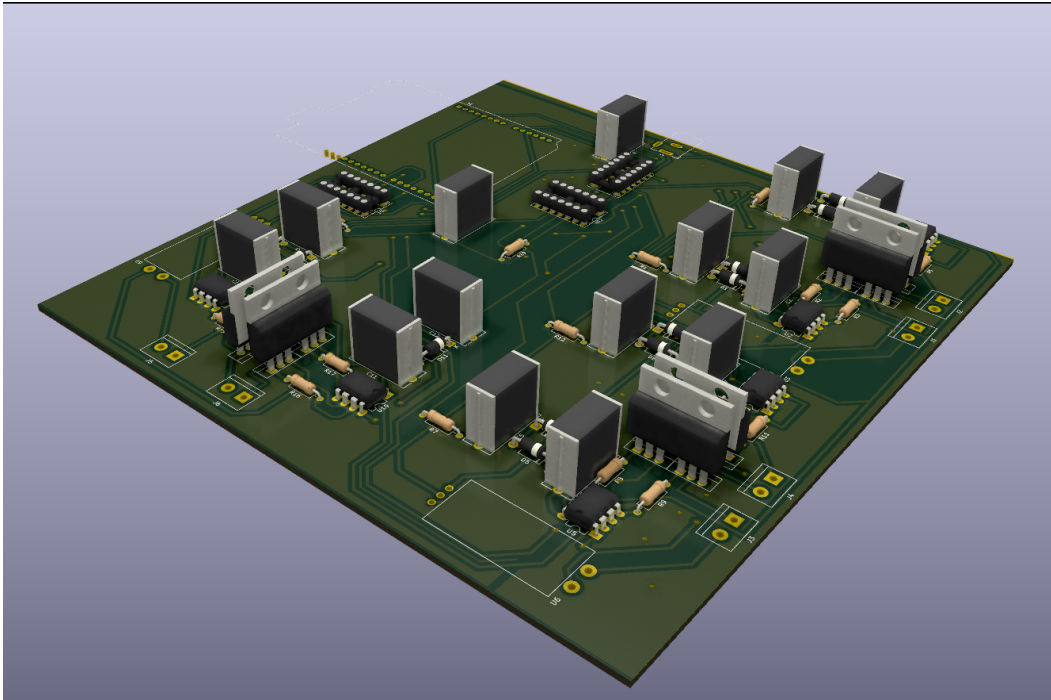


Figura 4.2: Simulação 3D do hardware desenvolvido.

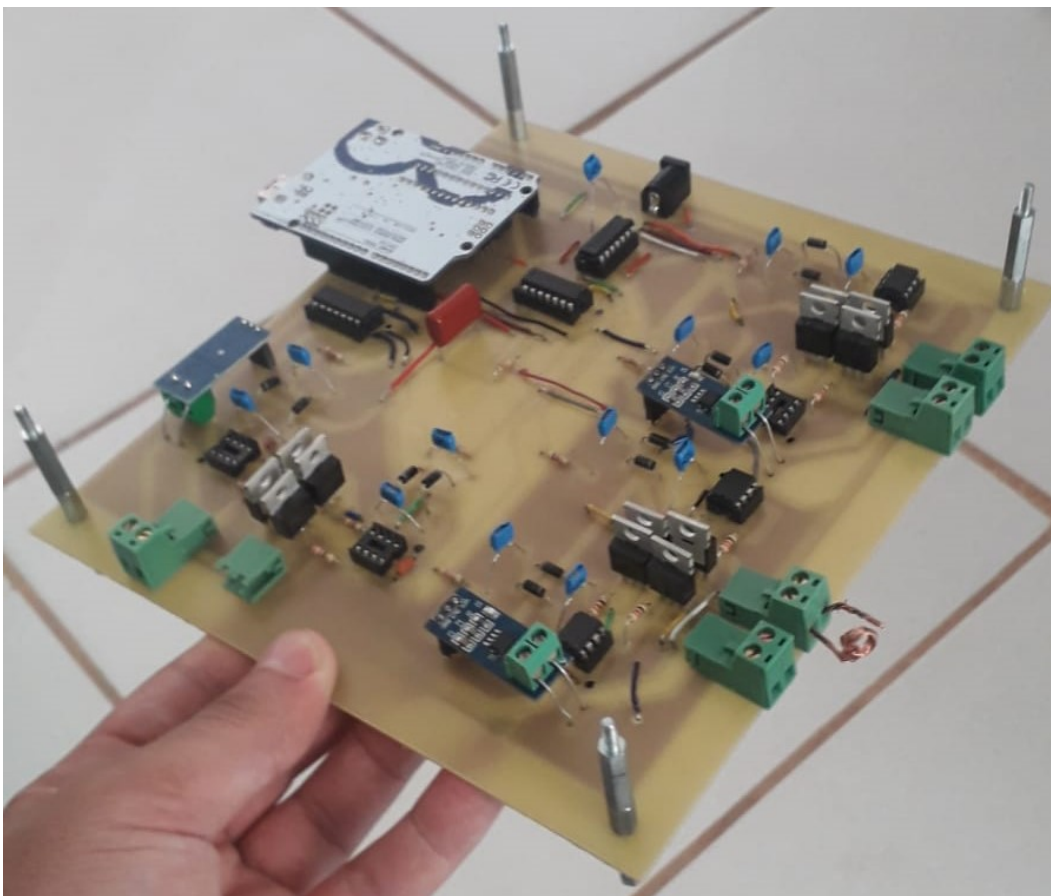


Figura 4.3: Hardware após a montagem dos componentes.

Capítulo 5

Resultados

Esse capítulo trata dos resultados das simulações realizadas na plataforma.

5.1 Introdução

Nesse capítulo será apresentado todos os resultados colhidos durante as simulações e suas implicações trazendo gráficos, tabelas e descrições obtidas nas simulações dos modelos na gaiola de Helmholtz.

Capítulo 6

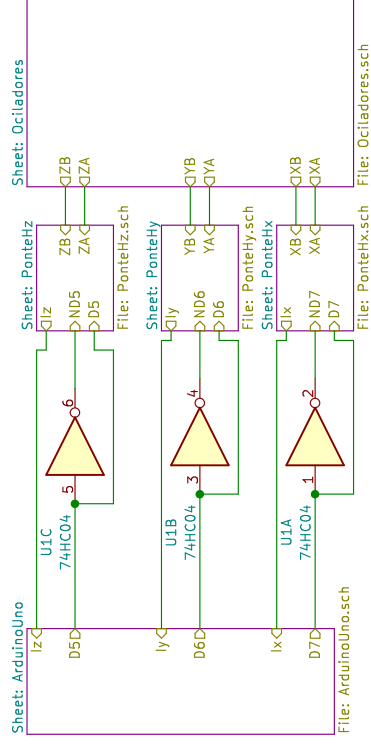
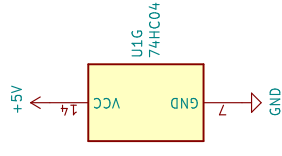
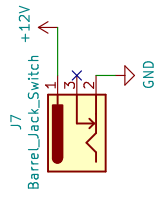
Conclusões

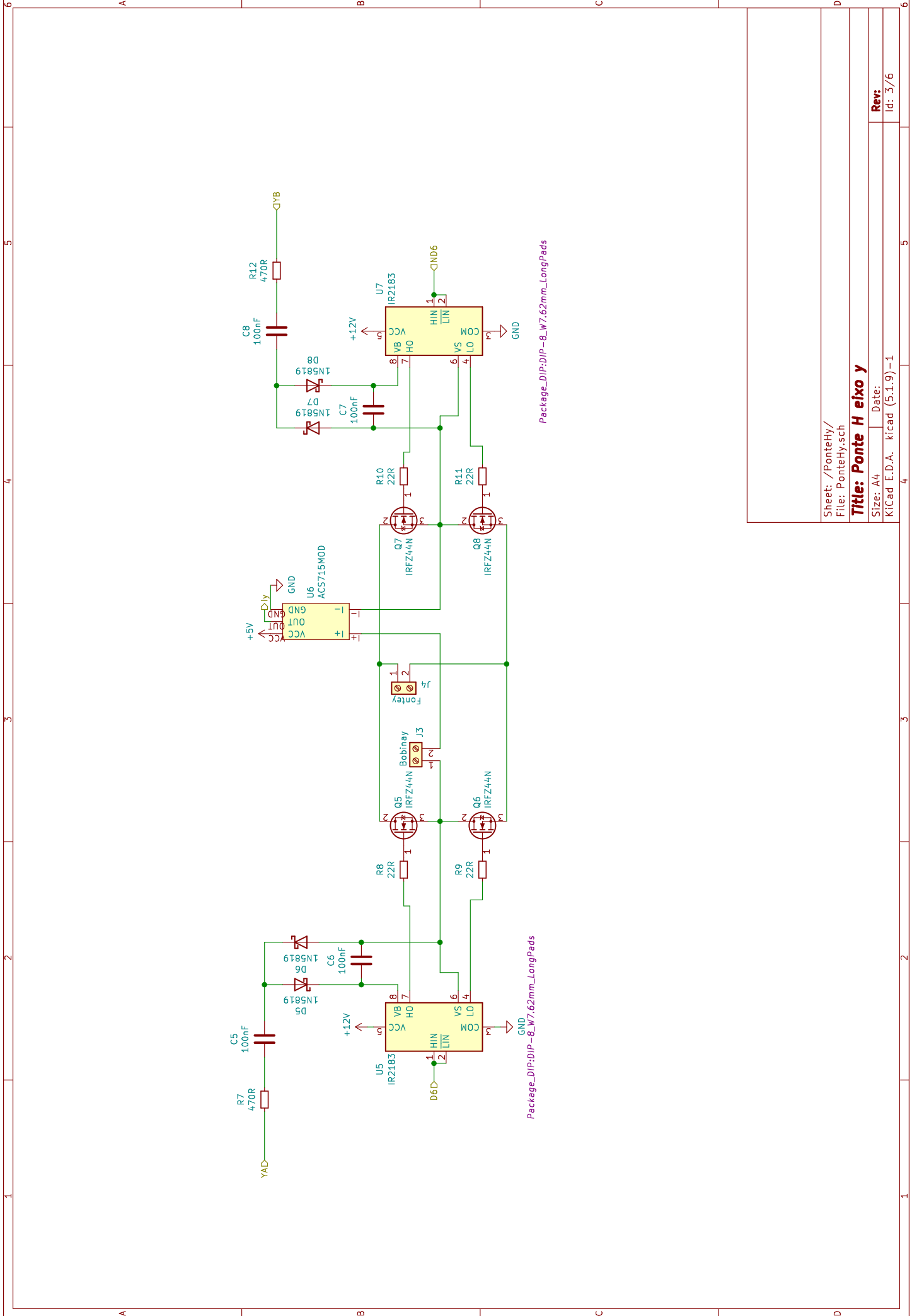
Nesse capítulo terá um breve resumo do que foi apresentado ao longo do trabalho, conclusões das simulações dos modelos e propostas de trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

I. ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO PARA CONTROLE DO SENTIDO DA CORRENTE NAS BOBINAS DA GAIOLA DE HELMHOLTZ

[illegible]



Package_DIP-8_W7.62mm_LongPads

Package_DIP-8_W7.62mm_LongPads

Sheet: /Pontelly/
File: Pontelly.sch

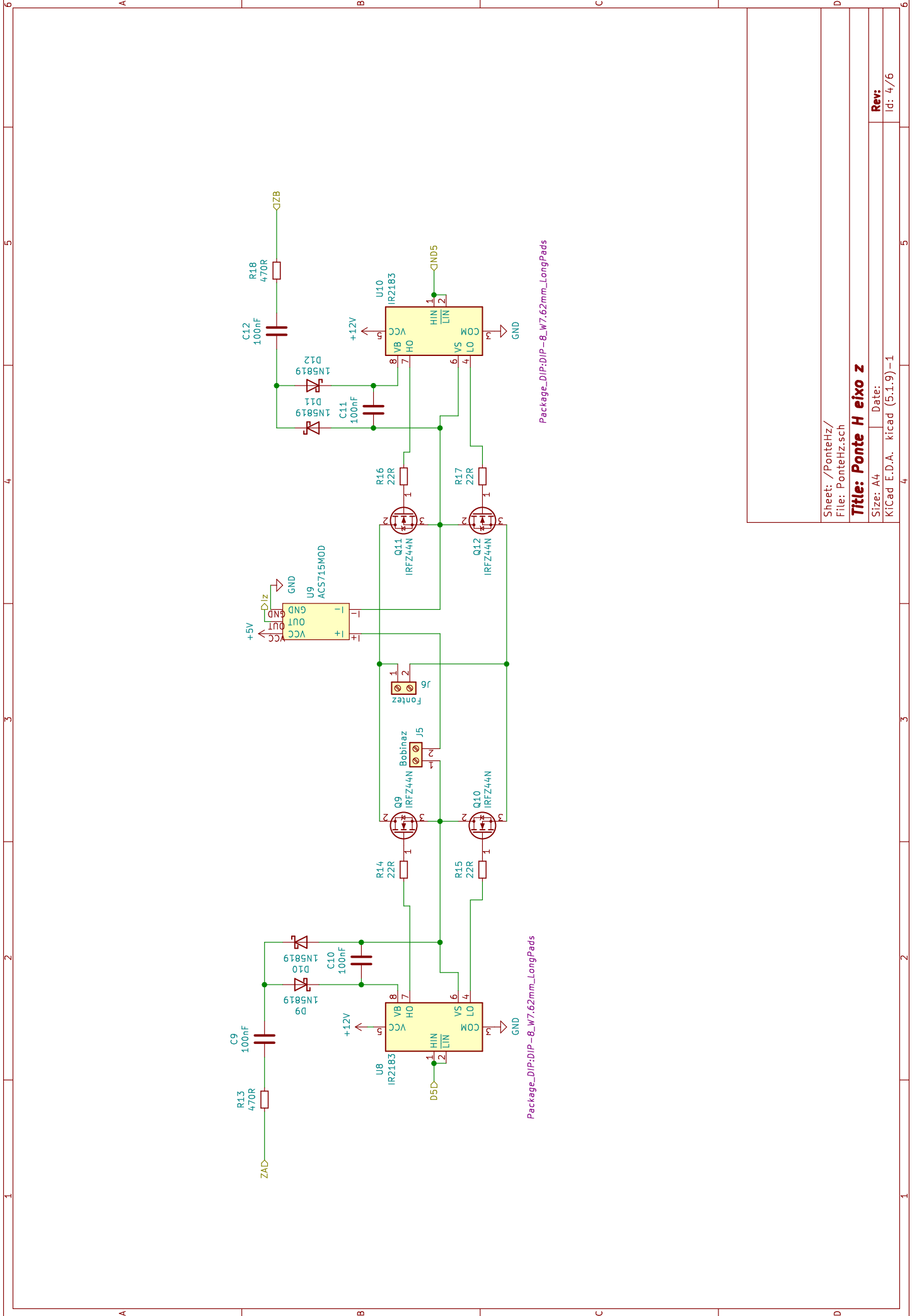
Title: Ponte H eixo y

Size: A4 Date:

KiCad E.D.A. kicad (5.1.9) - 1

Rev:

Id: 3/6



Sheet: /PonteHz/
File: PonteHz.sch

Title: Ponte H eixo z

Size: A4 Date:

KiCad E.D.A. kicad (5.1.9) - 1

Rev:

Id: 4/6

