

**DAS** Departamento de Automação e Sistemas  
**CTC** Centro Tecnológico  
**UFSC** Universidade Federal de Santa Catarina

# Projeto e Detalhamento de Hardware do Sistema Embarcado para Controle de Vôo de um Aerofólio Cabeado

*Relatório submetido à Universidade Federal de Santa Catarina  
como requisito para a aprovação da disciplina:  
DAS 5511: Projeto de Fim de Curso*

*Fabio Henriques Mantelli*

*Florianópolis, Setembro de 2016*



# Projeto e Detalhamento de Hardware do Sistema Embarcado para Controle de Vôo de um Aerofólio Cabeado

*Fabio Henriques Mantelli*

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina

**DAS 5511: Projeto de Fim de Curso**

e aprovada na sua forma final pelo

**Curso de Engenharia de Controle e Automação**

*Prof. Rômulo Silva de Oliveira*

---

Banca Examinadora:

Marcelo de Lellis  
Orientador na Empresa

Rômulo Silva de Oliveira  
Orientador no Curso

Hector Bessa Silveira  
Responsável pela disciplina

Miguel Angelo Chincaro Bernuy, Avaliador

Vinicius de Moraes Justo, Debatedor

Gustavo Wolff de Carvalho, Debatedor

# Agradecimentos

A Deus por sua imensa graça. Pelo seu amor, carinho, cuidado e direcionamento em meio às minhas dúvidas e vacilos. Por me sustentar ao longo desta jornada e preencher a minha vida de sentido e propósito.

Aos meus pais pelo apoio, suporte, inspiração e exemplo.

À minha futura esposa pelo apoio, paciência e parceria.

Ao meu orientador, Prof. Rômulo Silva de Oliveira, pelas valiosas contribuições no desenvolvimento do trabalho e na estruturação deste documento.

Ao prof. Alexandre Trofino pela oportunidade e confiança.

Aos meus colegas de trabalho pela prontidão e disposição sempre que solicitados, especialmente ao Ramiro Saraiva, por ter acompanhado mais de perto o meu trabalho.

Ao CNPQ, pela bolsa de iniciação científica e por acreditar no potencial da juventude brasileira, assumindo um papel ativo no desenvolvimento da pesquisa e ciência do país.

A todos os meus professores, que cumpriram seus papéis na formação do futuro desta nação e ao fazê-lo me passaram os conhecimentos necessários para realizar esse trabalho.



# Resumo

O UFSCKite é um grupo de pesquisa situado no Departamento de Automação e Sistemas da UFSC que se propõe a investigar e desenvolver tecnologias que aproveitem a energia eólica em elevadas altitudes para geração de energia elétrica. Dentro desta área, o grupo tem dirigido seu foco para o estudo de sistemas que utilizam aerofólios flexíveis cabeados para alcançar estes objetivos. Atualmente, o UFSCKite possui um protótipo simples operacional, capaz de controlar a trajetória dos aerofólios em vôo, mas sem a capacidade de gerar energia elétrica. Um segundo protótipo capaz de realizar o controle do sistema com geração de energia elétrica está em fase de projeto.

A primeira parte do trabalho aqui apresentado consiste na revisão da primeira versão da placa eletrônica embarcada do primeiro protótipo. Inicialmente, os componentes de *hardware* e a primeira versão da placa eletrônica embarcada do primeiro protótipo são descritos. Após isso, os problemas apresentados na primeira versão da placa eletrônica embarcada são analisados e a partir dessa análise uma segunda versão é proposta. Em seguida, os esquemáticos e o leiaute da segunda versão são apresentados.

A segunda parte do trabalho aqui apresentado consiste no projeto da placa eletrônica embarcada da unidade de Vôo do segundo protótipo. Para a fundamentação deste projeto, um estudo é feito sobre o problema a ser resolvido. Primeiramente, os componentes de *hardware* do segundo protótipo são descritos. Em seguida, um projeto informacional do sistema embarcado é apresentado, contendo os seus requisitos, uma proposta de modelo funcional, uma tabela de opções de solução e algumas diretrizes a serem seguidas pelo projeto. Partindo deste projeto informacional, um projeto conceitual é proposto, apresentando de forma conceitual a arquitetura do sistema e as suas interfaces. Por fim, os elementos de *hardware* escolhidos para compor as interfaces são descritos com profundidade e os circuitos que compõem o projeto da eletrônica embarcada são apresentados.

**Palavras-chave:** Sistemas Embarcados, Eletrônica Embarcada, *Pumping Kite*, UFSCKite.





# Abstract

UFSCKite is a research group located in the Automation and Systems Department (DAS) of the Federal University of Santa Catarina (UFSC) that aims to investigate and develop technologies that take advantage of the wind power on high altitudes to generate electricity. The group focus have been the study of systems that use pumping kites to achieve such goals. Currently, the UFSCKite has a simple operational prototype that controls the flight of a kite, but can't generate electricity. A second prototype capable of both controlling the flight of the kite and generating electricity is being developed.

This work consists on a review of the first version of the first prototype's embedded electronics. First of all, the first prototype's hardware components and embedded electronics are described. Next, the problems on the first version of the embedded electronics are analysed, and based on that analysis, a second version is proposed. After that, the second version's electronic schematics and layouts are presented.

In addition to that, the embedded electronic project of the second prototype's flight unit is proposed. A study is made based on the second prototype's project. First, the hardware components are described. Then, an informational project of the embedded system is presented, containing a list of requirements, a functional model and some project guidelines. Based on this informational project, a conceptual project is proposed, presenting in a conceptual form the system's architecture and it's interfaces. Last, the hardware components of the interfaces are described and the embedded electronic's circuits are presented.

**Keywords:** Embedded Systems, Embedded Electronics, Pumping Kite, UFSCKite.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Conceito do <i>Pumping Kite</i> (PK).	22
Figura 2 – Aerofólio flexível usado em um sistema do tipo <i>Pumping Kite</i> .	23
Figura 3 – Esquemático da unidade de atuação.	23
Figura 4 – Princípio de funcionamento dos comandos para controle do PK. [1]	24
Figura 5 – Potência mecânica do PK nas fases passiva e ativa [2].	25
Figura 6 – Montagem dos três principais subsistemas da Base Fixa.	32
Figura 7 – Vista explodida dos três principais subsistemas da Base Fixa.	32
Figura 8 – Montagem da unidade de atuação.	33
Figura 9 – Unidade de atuação sem carenagem.	33
Figura 10 – Funcionalidades da Beaglebone Black [3].	34
Figura 11 – Montagem dos cabos de comando (A).	36
Figura 12 – Montagem dos cabos de comando (B).	36
Figura 13 – Anemômetro DAVIS 7911 [4].	37
Figura 14 – Esquema elétrico do anemômetro DAVIS 7911. [4].	37
Figura 15 – Mecanismo seguidor de trajetória.	39
Figura 16 – Arquitetura do sistema.	40
Figura 17 – Circuito auxiliar do LM2596 [5].	42
Figura 18 – Módulo abaixador de tensão com LM2596.	42
Figura 19 – Circuito de processamento de sinais analógicos com ganho e offset.	43
Figura 20 – Circuito de processamento dos sinais gerados pelos potenciômetros.	44
Figura 21 – Circuito de alimentação.	45
Figura 22 – Circuito de acionamento do freio.	45
Figura 23 – Conectores na placa de circuito impresso.	46
Figura 24 – Circuito de alimentação da placa	54
Figura 25 – Circuito de acionamento do freio	55
Figura 26 – Circuito de referência de precisão	56
Figura 27 – Circuito de processamento de sinais analógicos com ganho e offset.	57
Figura 28 – Conectores da placa de condicionamento de sinais	58
Figura 29 – Camada superior de cobre da placa de condicionamento de sinais	59
Figura 30 – Camada inferior de cobre da placa de condicionamento de sinais	59
Figura 31 – Plano terra analógico da placa de condicionamento de sinais	60
Figura 32 – Plano terra digital da placa de condicionamento de sinais	60
Figura 33 – Camadas de cobre da placa superpostas	61
Figura 34 – Diagrama funcional.	76
Figura 35 – Interface serial	83
Figura 36 – Interface GPIO	84

Figura 37 – Arquitetura do sistema do segundo protótipo . . . . .	87
Figura 38 – Esquemático da interface serial . . . . .	94
Figura 39 – Esquemático do circuito isolador . . . . .	95
Figura 40 – Esquemático da interface GPIO . . . . .	95
Figura 41 – Esquemático do sistema de gerenciamento de bateria . . . . .	96
Figura 42 – Diagrama da interface analógica . . . . .	97
Figura 43 – Esquemático da interface analógica . . . . .	97
Figura 44 – Esquemático da fonte de alimentação de 5 V . . . . .	99
Figura 45 – Esquemático da fonte de alimentação 3,3 V . . . . .	99
Figura 46 – Esquemático da referência analógica de 5V . . . . .	100
Figura 47 – Esquemático da interface dos potenciômetros . . . . .	100
Figura 48 – Esquemático dos conectores da placa . . . . .	101

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Especificações da célula de carga FEFA FZ500 [6]. . . . .	35
Tabela 2 – Especificações da célula de carga Sparkfun SEN - 10245 [7]. . . . .	36
Tabela 3 – Opções de solução . . . . .	78
Tabela 4 – Comparação entre arquitetura de produto integral e modular [8] . . . .	79



# Lista de abreviaturas e siglas

PFC	Projeto de Fim de Curso
BBB	Beaglebone Black
DAS	Departamento de Automação e Sistemas
LMM	Laboratório de Montagem Mecatrônica
CNC	Comando Numérico Computadorizado
RPY	<i>Roll, Pitch, Yaw</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver Transmitters</i>
GPIO	<i>General Purpose Input Output</i>
BMS	<i>Battery Management System</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
SMD	<i>Surface Mounted Device</i>
SSOP	<i>Shrink Small-Outline Package</i>
SSOP	<i>Thin-Shrink Small-Outline Package</i>
FIFO	<i>First In First Out</i>
IRQ	<i>Interrupt Request</i>
SOT	<i>Small Outline Transistor</i>
SO	<i>Small Outline</i>
HTQFP	<i>Thermally Enhanced Thin Quad Flat Pack</i>
HTSSOP	<i>Thermally Enhanced Thin Shrink Small-Outline Package</i>
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
ESD	<i>Electrostatic Discharge</i>





# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>21</b>
1.1	O <i>Pumping Kite</i>	22
1.2	UFSCKite	25
1.2.1	Primeiro Protótipo	25
1.2.2	Segundo Protótipo	26
1.3	Motivação, Justificativa e Objetivos	26
1.4	Estrutura do Documento	27
<b>I</b>	<b>Primeiro Protótipo</b>	<b>29</b>
<b>2</b>	<b>Descrição do Sistema Existente</b>	<b>31</b>
2.1	Componentes do Primeiro Protótipo	31
2.1.1	Sistema de Atuação	31
2.1.1.1	Base Fixa	31
2.1.1.1.1	Base	32
2.1.1.1.2	Garfo	32
2.1.1.1.3	Extensões	32
2.1.1.2	Unidade de Atuação	32
2.1.2	BeagleBone Black	33
2.1.3	Motores, <i>Drives</i> e freio	33
2.1.3.1	Motores <i>Faulhaber</i> 4490B	33
2.1.3.2	<i>Drives</i> <i>Faulhaber</i> MCBL3006	33
2.1.3.3	Freio MBZ24V	34
2.1.4	Potenciômetros	35
2.1.5	Células de Carga	35
2.1.5.1	FEFA FZ500	35
2.1.5.2	Sparkfun SEN - 10245	36
2.1.6	Anemômetro DAVIS 7911	36
2.1.7	<i>Encoders</i> Hohner Série 38	37
2.1.8	<i>Transceiver</i> RS-232 RS-485	38
2.1.9	Módulo Wifi Intelbras WBN241	38
2.1.10	Mecanismo Seguidor de Trajetória	38
2.1.11	Módulo WiFi ESP8266	38
2.1.12	AltIMU-10 v4	39
2.2	Arquitetura do Sistema	39
2.3	Placa de Condicionamento de Sinais	40

2.3.1	Componentes Eletrônicos . . . . .	40
2.3.1.1	INA129 . . . . .	41
2.3.1.2	LM6144 . . . . .	41
2.3.1.3	REF200 . . . . .	41
2.3.1.4	LM7810 e LM7910 . . . . .	41
2.3.1.5	Placa Buck Abaixadora de Tensão com LM2596 . . . . .	41
2.3.1.6	CSD18502KCS . . . . .	42
2.3.2	Processamento dos Sinais das Células de Carga . . . . .	43
2.3.3	Processamento de Sinais dos Potenciômetros . . . . .	43
2.3.4	Circuito de Alimentação . . . . .	44
2.3.5	Circuito de Acionamento do Freio . . . . .	44
2.3.6	Conexão com os Subsistemas . . . . .	46
<b>3</b>	<b>Análise do Sistema Existente . . . . .</b>	<b>47</b>
3.1	Problemas Observados na Primeira Placa . . . . .	47
3.1.1	Problemas de Projeto . . . . .	47
3.1.1.1	Problemas de Projeto no Esquemático . . . . .	47
3.1.1.1.1	Circuito de Referência de Tensão de Precisão Para as Pontes de Wheatstone . . . . .	47
3.1.1.1.2	Saturação das Entradas Analógicas . . . . .	47
3.1.1.1.3	Capacitores de Desacoplamento . . . . .	48
3.1.1.1.4	Diodo Zener Para Regular Tensão com Resistor em Série . . . . .	48
3.1.1.1.5	Implementar Lógica Para Alimentação da BBB e do Drive . . . . .	48
3.1.1.1.6	Sinal de Fim-de-Curso dos Potenciômetros . . . . .	48
3.1.1.1.7	Entrada Analógica Para Verificar Tensão das Baterias . . . . .	48
3.1.1.1.8	Filtro <i>Anti-Aliasing</i> no ADC . . . . .	48
3.1.1.2	Problemas de Projeto no Leiaute . . . . .	49
3.1.1.2.1	Replanejamento do Plano Terra . . . . .	49
3.1.1.2.2	Cruzamentos de Retorno . . . . .	49
3.1.1.2.3	Reduzir Laços Indutivos em Trilhas de Sinal e Retorno . . . . .	49
3.1.2	Problemas de Fabricação e Montagem . . . . .	50
3.2	Consequências Para o Processo de Desenvolvimento da Placa . . . . .	50
<b>4</b>	<b>Projeto da Placa de Circuito Impresso . . . . .</b>	<b>53</b>
4.1	Componentes Eletrônicos . . . . .	53
4.1.1	REF102 . . . . .	53
4.1.2	LM358 . . . . .	53

4.1.3	Outros Componentes . . . . .	53
4.2	Esquemático . . . . .	54
4.2.1	Alimentação . . . . .	54
4.2.2	Potenciômetro . . . . .	55
4.2.3	Freio . . . . .	55
4.2.4	Referência de Precisão . . . . .	55
4.2.5	Interface Analógica . . . . .	56
4.2.6	Conectores . . . . .	58
4.3	Leiaute . . . . .	58
4.3.1	Plano Terra . . . . .	59
4.3.2	Cruzamentos de Retorno . . . . .	59
<b>II</b>	<b>Segundo Protótipo</b>	<b>63</b>
<b>5</b>	<b>Descrição do <i>Pumping Kite</i></b> . . . . .	<b>65</b>
5.1	Descrição do Segundo Protótipo . . . . .	65
5.2	Componentes do Sistema . . . . .	67
5.2.1	Inversor WEG CFW11 . . . . .	67
5.2.2	Bateria . . . . .	67
5.2.3	Unidade Inercial . . . . .	67
<b>6</b>	<b>Projeto Informacional da Placa de Circuito Impresso</b> . . . . .	<b>69</b>
6.1	Elicitação dos Requisitos . . . . .	69
6.2	Requisitos Funcionais . . . . .	70
6.2.1	Requisitos Funcionais da Unidade de Solo . . . . .	70
6.2.2	Requisitos Funcionais da Unidade de Vôo . . . . .	71
6.3	Requisitos Não Funcionais Transversais . . . . .	74
6.4	Modelo Funcional . . . . .	76
6.5	Tabela de Opções de Solução . . . . .	76
6.6	Diretrizes do Projeto . . . . .	79
6.6.1	Arquitetura do Produto . . . . .	79
6.6.2	Reaproveitamento do Hardware do Primeiro Protótipo . . . . .	80
<b>7</b>	<b>Projeto Conceitual da Placa de Circuito Impresso</b> . . . . .	<b>81</b>
7.1	Hardware . . . . .	81
7.1.1	Unidade de Processamento . . . . .	81
7.1.2	Barramento de Comunicação . . . . .	81
7.1.2.1	Isolador . . . . .	82
7.1.3	Subsistemas Funcionais . . . . .	82
7.1.3.1	Interface Serial . . . . .	82
7.1.3.2	Interface GPIO . . . . .	83
7.1.3.3	Interface Bateria . . . . .	83

7.1.3.4	Interface do Freio . . . . .	84
7.1.3.5	Interface Analógica . . . . .	85
7.1.3.6	Interface Potenciômetros . . . . .	85
7.1.4	Arquitetura do Sistema . . . . .	85
<b>8</b>	<b>Detalhamento do Hardware . . . . .</b>	<b>89</b>
8.1	Hardware . . . . .	89
8.1.1	Raspberry Pi Zero . . . . .	89
8.1.2	WiFi . . . . .	89
8.1.3	Componentes Eletrônicos . . . . .	89
8.1.3.1	<i>Transceiver</i> SPI-UART SC16IS762 . . . . .	90
8.1.3.2	Porta Lógica Configurável Multi-Função SN74LVC1G57 . . . . .	90
8.1.3.3	<i>Buffer e Line driver</i> SN74AHC1G125 . . . . .	90
8.1.3.4	Transceiver UART-RS-232 MAX3227 . . . . .	91
8.1.3.5	Comparador Analógico TLV1704A . . . . .	91
8.1.3.6	Conversor Analógico-Digital ADS1220 . . . . .	91
8.1.3.7	Expansor de GPIO MAX7301A . . . . .	91
8.1.3.8	Sistema de Gerenciamento de Bateria BQ76PL536A . . . . .	92
8.1.3.9	Referência de Precisão MAX6143 . . . . .	92
8.1.3.10	Isolador Digital ADUM24xE . . . . .	92
8.1.3.11	Regulador de Tensão LM3150 . . . . .	92
8.1.3.12	Regulador de Tensão LM43602 . . . . .	92
8.1.3.13	Outros Componentes . . . . .	93
8.1.4	Esquemáticos . . . . .	93
8.1.4.1	Interface Serial . . . . .	93
8.1.4.2	Isolador . . . . .	93
8.1.4.3	Expansor GPIO . . . . .	94
8.1.4.4	Sistema de Gerenciamento de Bateria . . . . .	94
8.1.4.5	Acionamento do Freio . . . . .	94
8.1.4.6	Interface Analógica . . . . .	96
8.1.5	Alimentação . . . . .	96
8.1.5.1	Referência analógica 5 V . . . . .	98
8.1.5.2	Potenciômetros . . . . .	98
8.1.5.3	Conectores . . . . .	101
	<b>III Conclusão . . . . .</b>	<b>103</b>
	<b>9 Considerações Finais . . . . .</b>	<b>105</b>

**Referências** ..... 107



# 1 Introdução

O consumo de energia elétrica vem crescendo nas últimas décadas e, juntamente com essa tendência, surgem preocupações quanto a como aumentar a sua geração de uma maneira sustentável [9]. Sistemas que aproveitam a energia cinética do vento (energia eólica) se apresentam como uma alternativa limpa, renovável, com pouco impacto ambiental e, conseqüentemente, bastante atraentes em comparação com outras alternativas [10]. Dentre as diversas variantes de sistemas de energia eólica, os aerogeradores convencionais de eixo horizontal são os responsáveis pela maior parte da produção de energia elétrica no mundo [11]. As maiores turbinas na atualidade atingem potências da ordem de 4 MW e utilizam grandes quantidade de aço, concreto e outros materiais para sua construção e instalação. Acredita-se que estes aerogeradores estejam atingido seu limite de escalabilidade, uma vez que um aumento na potência nominal não compensa o aumento de custos da estrutura. Além disso, mesmo para sistemas de menor potência, muitas vezes são necessários subsídios governamentais para tornar viável economicamente os empreendimentos eólicos [12].

Como uma alternativa à tecnologia eólica convencional que possa contornar estas limitações atuais, um novo paradigma para o aproveitamento da energia eólica vem sendo estudado na última década: a tecnologia de “energia eólica aérea” (*Airborne Wind Energy* – AWE, do original em inglês) [13]. Trata-se de uma abordagem que busca empregar dispositivos suspensos no ar – seja através da força aeroestática (balões) ou aerodinâmica (aerofólios) – para aproveitar a energia cinética do vento. Como os sistemas de AWE não precisam de torres ou estruturas mecânicas rígidas para sua operação, eles podem operar em altitudes elevadas, acima do alcance das maiores turbinas convencionais, cujas pontas das pás chegam atualmente a cerca de 200 m de altura. Como a velocidade do vento tende a crescer com a altitude, e levando-se em consideração que a potência é proporcional ao cubo da velocidade do vento, esta possibilidade de operação em elevadas altitudes caracteriza-se como uma das principais vantagens de sistemas do tipo AWE com relação à tecnologia convencional de turbinas eólicas de eixo horizontal [14]. A outra vantagem é em termos de custos: devido à redução drástica da quantidade de material empregado na estrutura – principalmente devido à substituição da torre por cabos, e das pás por uma estrutura aerodinâmica/aeroestática leve o suficiente para se manter no ar – os custos de material, transporte e instalação podem ser fortemente reduzidos. Além disso, acredita-se que a possibilidade de se realizar manutenção do sistema ao nível do solo (“pousado”) simplifique os procedimentos e barateie os custos.

Entre as diversas configurações mecânicas de sistemas do tipo AWE baseados nas forças aerodinâmicas, destacam-se aquelas que empregam aerofólios cabeados na

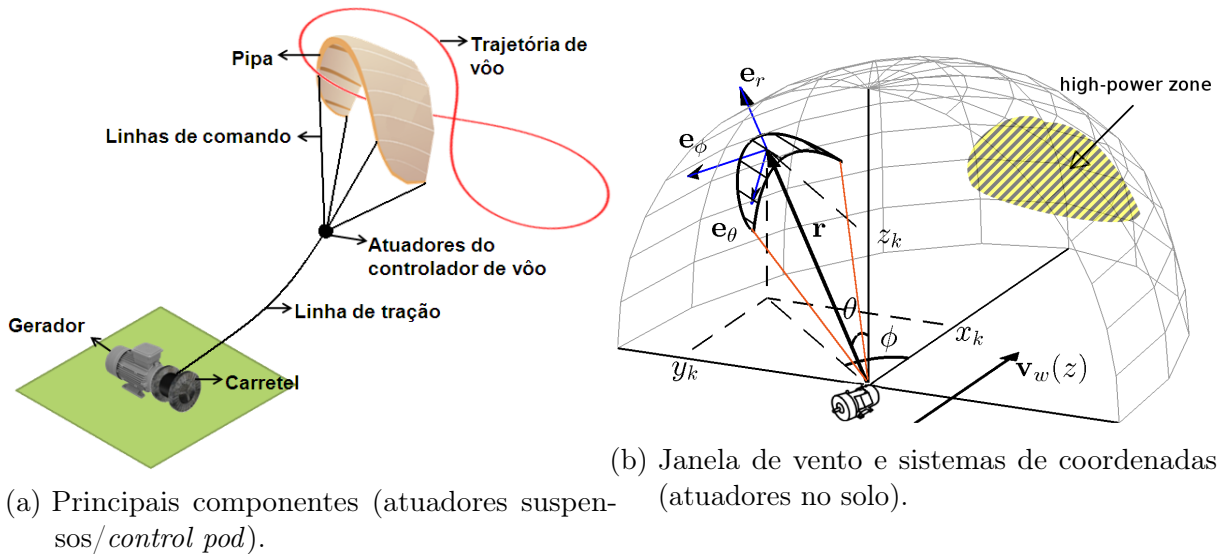


Figura 1 – Conceito do *Pumping Kite* (PK).

configuração *Pumping Kite* (PK), que são as mais investigadas na literatura até o momento. Isto se dá provavelmente devido à concepção relativamente simples do PK, tornando-o mais adequado à realização de experimentos teóricos e práticos neste estágio de Pesquisa & Desenvolvimento da tecnologia AWE.

## 1.1 O *Pumping Kite*

O PK consiste, essencialmente, de um aerofólio conectado ao solo através de um ou mais cabos. Tais cabos são enrolados em um carretel que pode estar acoplado a uma única máquina elétrica dual<sup>1</sup>, que deve alternar o modo de operação de motor para gerador e vice-versa após poucos minutos, ou a duas máquinas elétricas dedicadas – um motor e um gerador – no mesmo eixo. O conceito do PK é ilustrado na Figura 1. Existem diversas variantes do PK, especialmente no que tange à localização dos atuadores (suspensos ou no solo), quantidade e funcionalidade dos cabos, e tipo de aerofólio (rígido, flexível ou híbrido), cada qual com suas vantagens e desvantagens. Na Figura 2 é mostrado um aerofólio do tipo flexível, similar a um parapente usado para voo livre, empregado no projeto UFSCkite.

A variante de PK mostrada na Figura 1a possui um cabo principal entre o carretel no solo e um *control pod* (unidade de atuação) suspenso, onde os atuadores de controle de voo e o processamento embarcado estão localizados. Um esquemático da unidade de atuação construída para o projeto UFSCkite é mostrado na Figura 3.

O cabo principal – cuja força de tração gera um torque no carretel que aciona a máquina elétrica – ao chegar à unidade de atuação se divide em dois cabos cujas pontas estão presas ao bordo de ataque (parte frontal) do aerofólio. Complementando a

<sup>1</sup> dual no sentido em que a máquina elétrica pode operar como motor ou gerador.





Figura 2 – Aerofólio flexível usado em um sistema do tipo *Pumping Kite*.

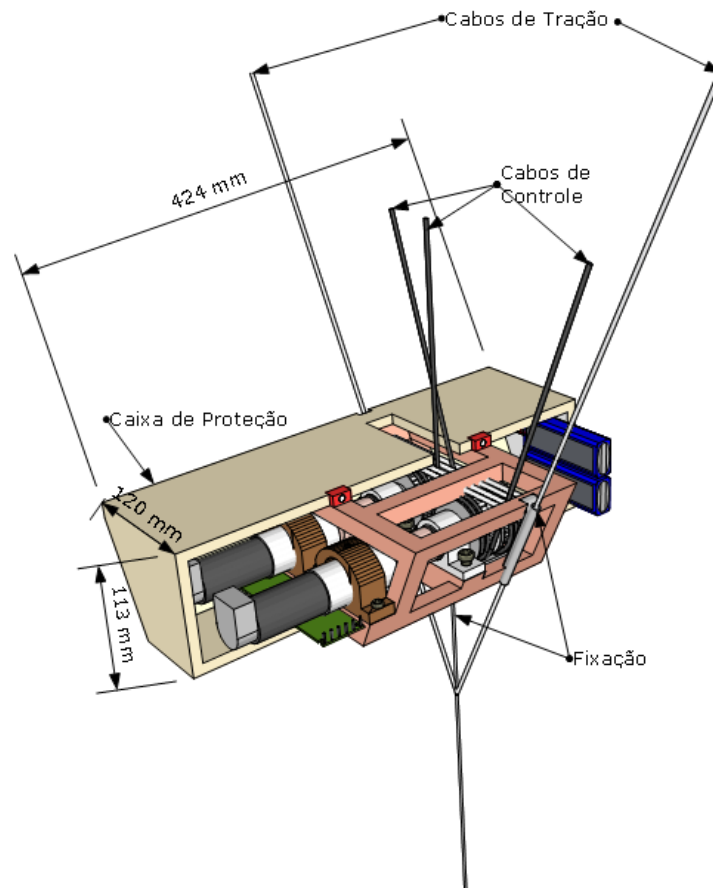


Figura 3 – Esquemático da unidade de atuação.

configuração, do interior da unidade de atuação e acionados por dois pequenos servomotores, partem dois cabos conectados ao bordo de fuga (parte traseira) da pipa. Estes cabos, sujeitos a uma pequena força de tração, são responsáveis pelos comandos de guinada e arfagem, para o controle de voo, conforme ilustrado na Figura 4.

A potência mecânica instantânea (em função do tempo  $t$ ) do PK é obtida através do desenrolamento do cabo principal segundo (1.1):

$$P(t) = T(t)\dot{r}(t), \quad (1.1)$$

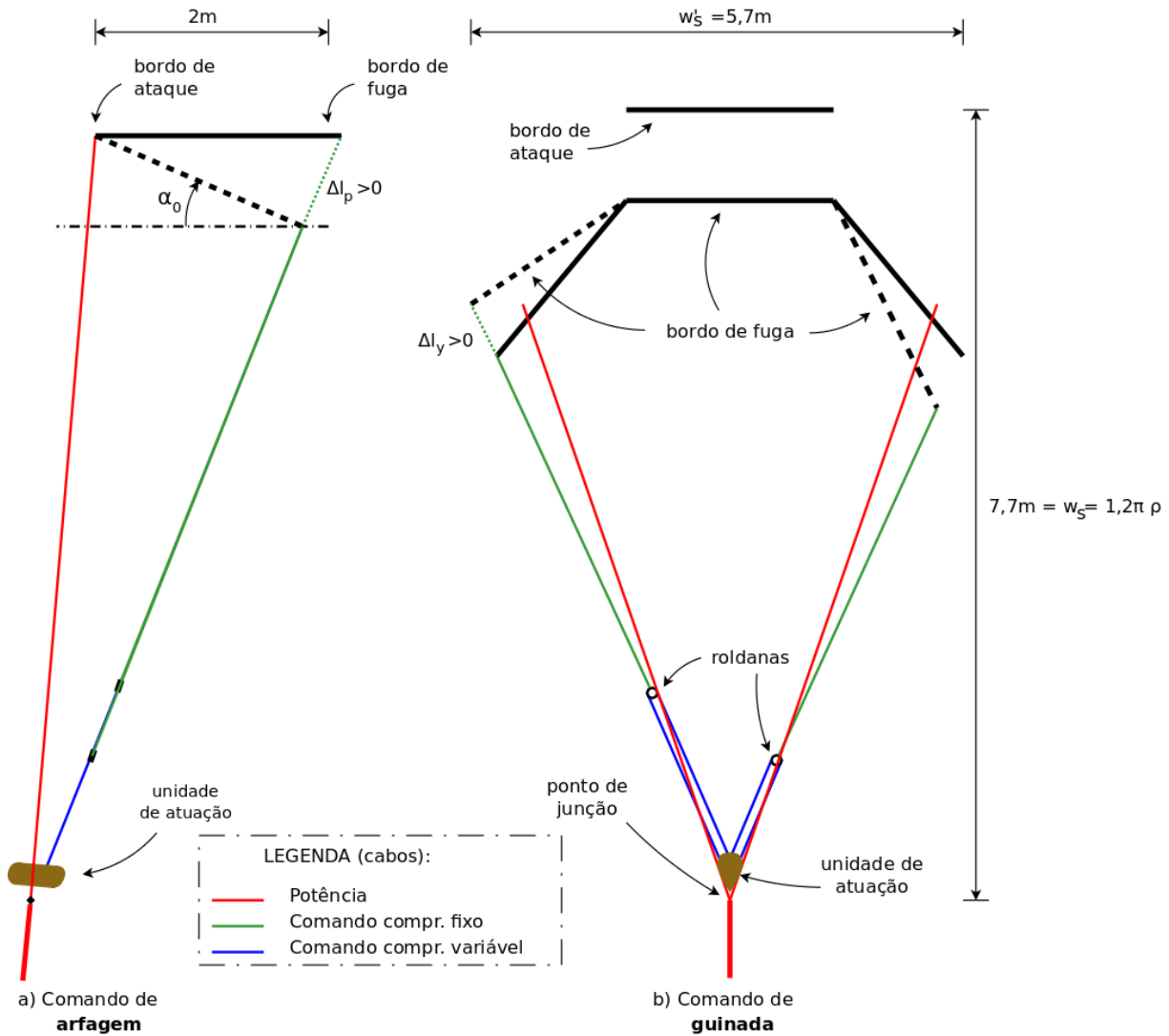


Figura 4 – Princípio de funcionamento dos comandos para controle do PK. [1]

onde  $T$  é a força de tração do cabo e  $\dot{r}$  é a velocidade de desenrolamento.

Um ciclo de operação do PK compreende duas fases, cujo efeito na potência mecânica desenvolvida pela máquina elétrica é mostrada na Figura 5. Na **fase ativa** o aerofólio voa em uma trajetória de “oito-deitado” ( $\infty$ ) [15–17], que permite maximizar a força de tração enquanto o cabo é desenrolado a uma velocidade  $\dot{r} > 0$ . Quando o cabo atinge o seu comprimento máximo pré-definido o PK entra na **fase passiva** [1, 2, 18], onde o aerofólio executa uma manobra idealmente com um pequeno ângulo de ataque, permitindo minimizar a força de tração enquanto o cabo é enrolado a uma alta velocidade  $\dot{r} < 0$ , até que o comprimento inicial para o começo do próximo ciclo seja atingido. Ao final do ciclo, a **potência mecânica média** (também chamada de **potência de ciclo**) obtida é dada pela expressão

$$P_{cyc} = \frac{\int_0^{t_o} P_{m,o}(t)dt + \int_{t_o}^{t_i} P_{m,i}(t)dt}{\Delta t_o + \Delta t_i}. \quad (1.2)$$

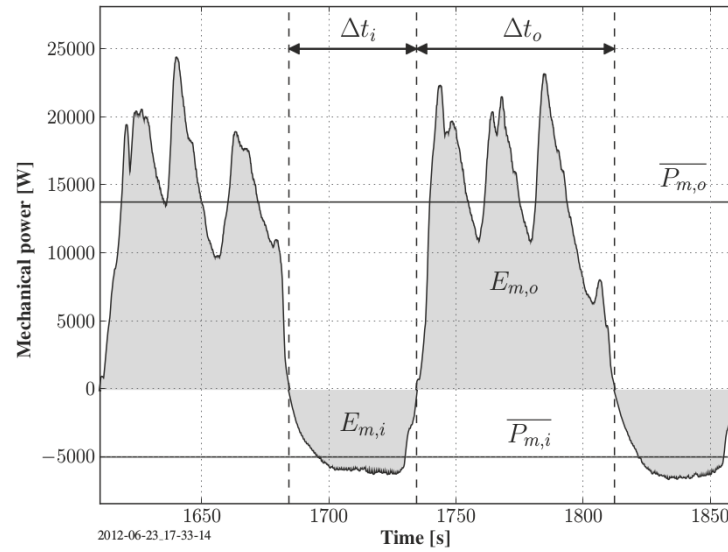


Figura 5 – Potência mecânica do PK nas fases passiva e ativa [2].

## 1.2 UFSCKite

O UFSCKite (Grupo de Pesquisa em Aerofólios Cabeados para Energia Eólica da UFSC) é um grupo dentro do Departamento de Automação e Sistemas (DAS) na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), formado em 2012, com o objetivo de realizar pesquisas no uso de aerofólios cabeados para a geração de energia elétrica [19]. Desde então o grupo vem estudando aspectos de modelagem, controle, instrumentação e viabilidade econômica da tecnologia, buscando amadurecê-la para sua introdução futura, em escala comercial, na matriz energética brasileira.

No estágio atual da pesquisa, um primeiro protótipo se encontra operacional. Tal protótipo consiste de uma unidade de atuação fixa em solo, sem a funcionalidade de geração de energia implementada. Sobre eles os primeiros algoritmos de controle criados pelo grupo [1, 15] estão sendo testados. Uma nova iteração do protótipo já está sendo projetada, onde a unidade de atuação será suspensa e a geração de energia poderá ser implementada. Uma descrição um pouco mais profunda dos protótipos será apresentada a seguir.

### 1.2.1 Primeiro Protótipo

O primeiro protótipo proposto pela equipe do UFSCKite tem o propósito de explorar alguns conceitos de controle de trajetória e instrumentação básicos da tecnologia. Busca-se com ele realizar uma versão mais simples da tecnologia, deixando de lado alguns aspectos do *pumping kite* para serem abordados apenas em iterações posteriores, como a geração de energia elétrica e a atuação no cabo de tração. O primeiro protótipo consiste em um sistema de controle de aerofólio flexível cabeado de quatro cabos com a unidade de atuação fixa ao solo. Os dois atuadores controlam os ângulos de arfagem (recolhendo

diferencialmente os cabos de comando) e guinada (recolhendo simultaneamente os cabos de comando) do aerofólio. Os sensores do sistema disponibilizam as informações dos ângulos de elevação e azimute do cabo de tração da pipa e suas derivadas. Disponibilizam, também, a força de tração no cabo de tração e nos cabos de comando do aerofólio. Esses são os dados de entrada para o sistema de controle. Uma unidade de processamento é utilizada para ler esses dados e determinar os sinais de comando enviados aos atuadores.

### 1.2.2 Segundo Protótipo

O segundo protótipo consiste em uma implementação completa do *pumping kite* com a unidade de atuação suspensa e um sistema de enrolamento e desenrolamento do cabo de tração operado por uma máquina elétrica capaz de gerar energia e recolher o cabo no carretel. A unidade de solo regula as velocidades de enrolamento e desenrolamento do carretel através do motor a ele acoplado como parte do controle da força de tração no cabo de tração principal. Esse controle toma como entrada sensores em solo que medem a força de tração no cabo principal. A unidade de vôo, semelhantemente ao primeiro protótipo, é responsável pelo processamento do controle da maior parte do sistema. Nela se concentram os atuadores responsáveis por controlar os ângulos de arfagem e guinada do aerofólio.

## 1.3 Motivação, Justificativa e Objetivos

O trabalho a seguir descrito busca contribuir para o desenvolvimento da tecnologia em formas baratas e eficientes de gerar energia elétrica a partir de recursos renováveis, especificamente, aproveitando a energia do vento em elevadas altitudes. Visando estes mesmos objetivos, o UFSCKite tem buscado explorar conceitos novos e antigos nessa tecnologia através do desenvolvimento de dois protótipos de sistemas de controle de aerofólios cabeados. Tais protótipos necessitam de um hardware embarcado para realizar a interface entre os seus diferentes subsistemas. Esse hardware embarcado deve ser projetado de forma específica para cada sistema, observando as particularidades de suas partes. Este documento busca apresentar os projetos das placas de hardware embarcado do protótipo. Busca adicionalmente também apresentar o processo de desenvolvimento do projeto das placas e os documentos gerados nessa etapa. Os projetos a serem apresentados no final devem ser corretos e funcionais e os documentos claros e coerentes. Para alcançar estes objetivos, destaca-se a importância do uso de um método no processo de projeto das placas de circuito impresso. Um bom método seguido com diligência aumenta as chances de que o sistema ao final opere funcionalmente e cumpra tudo aquilo que lhe é esperado. A partir de um sistema correto e funcional, os protótipos podem cumprir os objetivos pelos quais foram criados, ou seja, algoritmos de controle podem ser testados, implementados e validados e novos aspectos da tecnologia podem ser desenvolvidos e/ou aprimorados por seu intermédio.

Este projeto consiste na continuação das atividades de estágio relatadas em [20], onde a primeira versão do projeto de hardware embarcado do primeiro protótipo foi realizada.

## 1.4 Estrutura do Documento

O documento é dividido em três partes, as duas primeiras tratando do desenvolvimento realizado em cada um dos protótipos. A terceira parte consiste na conclusão onde as considerações finais e as sugestões para trabalhos futuros são apresentadas. As partes e os capítulos que as compõem são apresentados abaixo.

### Parte I: Primeiro Protótipo

**Capítulo 2: Descrição do Sistema Existente** Este capítulo é dedicado à apresentação do sistema do primeiro protótipo já existente. Os componentes do primeiro protótipo são descritos de acordo com a funcionalidade básica que cumprem no sistema e de acordo com as suas interfaces com os outros subsistemas. A primeira versão da placa de condicionamento de sinais, seus esquemáticos e os circuitos que as compõem também são descritos neste capítulo.

**Capítulo 3: Análise do Sistema Existente** Baseado na descrição realizada no capítulo anterior, este capítulo apresenta uma análise sobre o sistema já existente. Os problemas de projeto, de fabricação e montagem observados na primeira versão da placa do primeiro protótipo são aqui evidenciados. São também analisadas as consequências destes problemas no processo de desenvolvimento do primeiro protótipo.

**Capítulo 4: Projeto da Placa de Circuito Impresso** Este capítulo apresenta a nova iteração do projeto da placa de circuito impresso para o primeiro protótipo, buscando solucionar os problemas apresentados no capítulo 3.

### Parte II: Segundo Protótipo

**Capítulo 5: Descrição do Pumping Kite** Este capítulo é dedicado à apresentação do sistema do segundo protótipo, em processo de projeto. São descritos os componentes do segundo protótipo já especificados no projeto de acordo com a funcionalidade básica que cumprem no sistema e de acordo com as suas interfaces com os outros subsistemas.

**Capítulo 6: Projeto Informacional da Placa de Circuito Impresso** Este capítulo apresenta um breve projeto informacional da placa de circuito impresso a

ser embarcada no segundo protótipo. Isso se dá inicialmente através da elicitação dos requisitos funcionais e não funcionais do segundo protótipo. Logo após, um modelo funcional é proposto e algumas opções de solução são levantadas para realizar os requisitos. Por fim, algumas diretrizes definidas para guiar a tomada de decisões também são apresentadas.

**Capítulo 7: Projeto Conceitual da Placa de Circuito Impresso** Este capítulo apresenta o projeto conceitual das interfaces que comporão o projeto. As soluções escolhidas para compor a placa de circuito impresso são apresentadas e justificadas de maneira conceitual.

**Capítulo 8: Detalhamento do Hardware** Nesse capítulo se discutem os componentes escolhidos para atender os requisitos apresentados no capítulo 6 de acordo com os conceitos definidos no capítulo 7. Os esquemáticos utilizados para sua completa implementação são apresentados em seguida.

## Conclusão

**Capítulo 9: Considerações Finais**

Parte I

Primeiro Protótipo





## 2 Descrição do Sistema Existente

Um sistema que permite o controle automático de um aerofólio cabeado é complexo por natureza. Sensores, atuadores, unidades de processamento, partes estruturais e outros dispositivos compõem os diversos subsistemas necessários para conseguir alcançar este objetivo. Estes subsistemas precisam ser interligados entre si, mas muitas vezes possuem padrões elétricos ou de comunicação diferentes. Em alguns casos, não há padrão nenhum. Nas seções abaixo, cada dispositivo relevante que compõe o primeiro protótipo é descrito a partir de suas características físicas, elétricas e de conexão. Logo após, um diagrama apresenta o arranjo dos subsistemas considerando suas interconexões físicas, elétricas e de sinal, tendo em vista as particularidades de cada parte. A tal arranjo é dado o nome de arquitetura do sistema. Em seguida, uma seção é dedicada à primeira versão da placa de condicionamento de sinais, utilizada para realizar a interface entre os diferentes subsistemas. Nesta seção, são apresentados os esquemáticos onde são descritos cada um dos circuitos que a compõem.

O conteúdo desse capítulo foi realizado e apresentado pelo autor como resultado da disciplina de estágio obrigatório, realizada anteriormente e apresentada em [20]. A escolha dos componentes do protótipo e a arquitetura do sistema foi realizada em conjunto com outros integrantes grupo UFSCKite. O projeto da placa de condicionamento de sinais foi realizado integralmente pelo autor.

### 2.1 Componentes do Primeiro Protótipo

#### 2.1.1 Sistema de Atuação

O sistema de atuação é composto pela Unidade de Atuação (UNA) e a base fixa. Seu projeto tem como objetivo o controle o vôo de um aerofólio cabeado [21]. O sistema de atuação é responsável pela fixação do protótipo ao solo, conferindo rigidez estrutural, suporte e proteção às partes de sensoreamento e atuação. Além disso, o sistema de atuação permite a movimentação da unidade de atuação em dois graus de liberdade: elevação e azimute.

##### 2.1.1.1 Base Fixa

A Base fixa tem o objetivo de servir como suporte estrutural à unidade de atuação. A estrutura possui dois graus de liberdade e é construída de maneira que eles possam ser medidos através de *encoders*. Ela é composta de três partes principais: a base, o garfo e as extensões.

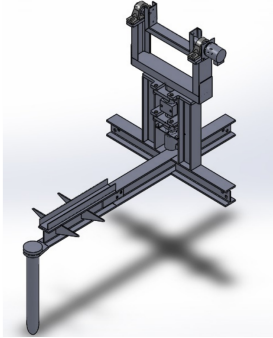


Figura 6 – Montagem dos três principais subsistemas da Base Fixa.

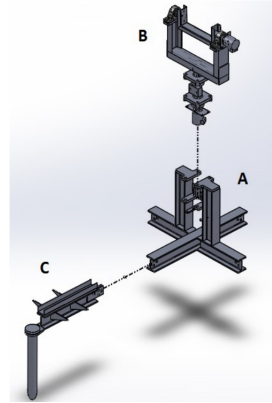


Figura 7 – Vista explodida dos três principais subsistemas da Base Fixa.

#### 2.1.1.1.1 Base

A Base é a parte fixa do sistema. Duas vigas horizontais cruzadas compõem a parte inferior que é apoiada no piso. Sobre essa parte inferior, duas vigas verticais são fixadas e compõem o apoio do garfo. Neste apoio o garfo é fixado. As extensões são fixadas nas vigas horizontais.

#### 2.1.1.1.2 Garfo

O garfo é a parte onde se encontram as duas juntas que garantem os graus de liberdade necessários para o sistema e os suportes para a fixação dos *encoders* e da unidade de atuação. A primeira junta é rotacional e seu movimento se dá em torno de um eixo vertical, correspondendo ao ângulo de *azimute* ( $\phi$ ). A segunda junta também é rotacional e seu eixo de movimento é horizontal, correspondendo ao ângulo de *elevação*, ou se complemento, o ângulo *polar* ( $\theta$ ). *Encoders* são acoplados a estas duas juntas, permitindo a medição dos respectivos ângulos.

#### 2.1.1.1.3 Extensões

As extensões são acopladas às vigas horizontais da base através de parafusos e tem como função fixar todo o sistema ao solo. Isso pode ser feito através da colocação de um lastro sobre as extensões, ou através de piquetes fixados ao solo por meio de furos localizados nas extremidades das extensões.

#### 2.1.1.2 Unidade de Atuação

A Unidade de Atuação é a parte do sistema de atuação que possui a função de comportar de forma segura a maior parte dos sensores, os atuadores do sistema e a unidade de processamento, assim como toda a parte de processamento de sinais.

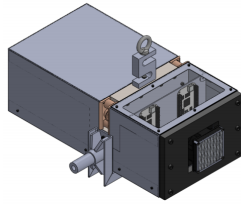


Figura 8 – Montagem da unidade de atuação.

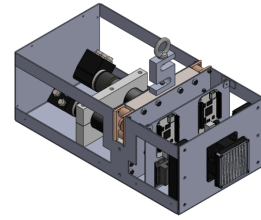


Figura 9 – Unidade de atuação sem carenação.

### 2.1.2 BeagleBone Black

O Beaglebone Black (BBB) é a opção escolhida como sistema de aquisição e processamento de dados. O BBB é uma placa de linux embarcado desenvolvida para *hobby* e para desenvolvedores [3]. Possui diversas funcionalidades, que podem ser observadas na Figura 10. Dentre as funcionalidades apresentadas na figura, as quatro portas seriais, os conversores analógico-digitais, as portas I/O e a entrada USB se destacam como relevantes para o projeto. A sua alimentação se dá por uma fonte regulada de corrente contínua de 5 V.

### 2.1.3 Motores, *Drives* e freio

Os motores, os *drives* e o freio estão aqui descritos na mesma seção porque são partes que compõem o mesmo produto. Para controlar a pipa da forma desejada, dois motores são necessários: um para recolher diferencialmente os cabos de comando, de modo a poder alterar a direção da pipa, e outro para atuar no comprimento de ambos os cabos de comando (*depower*), para alterar o ângulo de ataque. Ambos os motores escolhidos são fabricados pelo fabricante suíço *Faulhaber* e pertencem à série 4490B.

#### 2.1.3.1 Motores *Faulhaber* 4490B

Os motores *Faulhaber* da série 4490B são do tipo *brushless* e possuem um rotor no formato cilíndrico. Suas especificações podem ser observadas em [22]. Cada motor está acoplado a um *encoder* óptico incremental dos modelos 40B27 [23] e HEDM5500B [24].

#### 2.1.3.2 *Drives* *Faulhaber* MCBL3006

Os *drives* realizam a alimentação e o controle do movimento dos motores e do freio eletromagnético [25]. Os *drives* foram projetados de modo a cumprirem diferentes tarefas de acionamento e controle. Possuem adicionalmente entradas analógicas e entradas e saídas digitais. Os sinais nas entradas analógicas podem operar em duas faixas diferentes de tensão, entre 0 e 10 V e entre -10 e 10 V. O acesso às leituras e o comando se dá através da uma comunicação serial. Sua alimentação se dá por uma fonte de corrente contínua de 24 V.

Feature	
<b>Processor</b>	Sitara AM3358BZCZ100 1GHz, 2000 MIPS
<b>Graphics Engine</b>	SGX530 3D, 20M Polygons/S
<b>SDRAM Memory</b>	512MB DDR3L 800MHZ
<b>Onboard Flash</b>	4GB, 8bit Embedded MMC
<b>PMIC</b>	TPS65217C PMIC regulator and one additional LDO.
<b>Debug Support</b>	Optional Onboard 20-pin CTI JTAG, Serial Header
<b>Power Source</b>	miniUSB USB or DC Jack   5VDC External Via Expansion Header
<b>PCB</b>	3.4" x 2.1"   6 layers
<b>Indicators</b>	1-Power, 2-Ethernet, 4-User Controllable LEDs
<b>HS USB 2.0 Client Port</b>	Access to USB0, Client mode via miniUSB
<b>HS USB 2.0 Host Port</b>	Access to USB1, Type A Socket, 500mA LS/FS/HS
<b>Serial Port</b>	UART0 access via 6 pin 3.3V TTL Header. Header is populated
<b>Ethernet</b>	10/100, RJ45
<b>SD/MMC Connector</b>	microSD , 3.3V
<b>User Input</b>	Reset Button Boot Button Power Button
<b>Video Out</b>	16b HDMI, 1280x1024 (MAX) 1024x768,1280x720,1440x900 ,1920x1080@24Hz w/EDID Support
<b>Audio</b>	Via HDMI Interface, Stereo
<b>Expansion Connectors</b>	Power 5V, 3.3V , VDD_ADC(1.8V) 3.3V I/O on all signals McASP0, SPI1, I2C, GPIO(69 max), LCD, GPMC, MMC1, MMC2, 7 AIN(1.8V MAX), 4 Timers, 4 Serial Ports, CAN0, EHRPWM(0,2),XDMA Interrupt, Power button, Expansion Board ID (Up to 4 can be stacked)
<b>Weight</b>	1.4 oz (39.68 grams)
<b>Power</b>	Refer to Section 6.1.7

Figura 10 – Funcionalidades da Beaglebone Black [3].

### 2.1.3.3 Freio MBZ24V

O freio eletromagnético acoplado ao motor *depower* é do tipo normalmente fechado [26]. A liberação do freio ocorre quando uma tensão de 24 V é aplicada entre os terminais e nessa condição o freio consome 0,25 A. Seu correto uso é apenas como freio de retenção. O freio garante que haja uma grande força de torque no eixo do motor sem que se mude sua posição angular. Essas características representam a condição padrão de operação do motor *depower*. O freio e o motor não podem ser acionados ao mesmo tempo com o risco de causar dano aos equipamentos.

Sensibilidade	mV/V	$2.0 \pm 0.1$ %
Não Linearidade	%FS	<0.017
Histerese	%FS	<0.017
Repetibilidade	%FS	<0.01
Efeito Acomodação	%FS/30 min	<0.017
Balanco de Zero	%FS	$\pm 1$
Efeito da Temperatura na Sensibilidade	%FS/10°C	<0.015
Efeito da Temperatura no Zero	%FS/10°C	<0.015
Resistência de Entrada	$\Omega$	$550 \pm 30$
Resistência de Saída	$\Omega$	$500 \pm 3$
Resistência de Isolação	M $\Omega$	>5000
Tensão Recomendada	V	6 10
Máxima Tensão	V	15
Faixa de Temperatura Homologada	°C	-20 +50
Faixa de Temperatura de Operação	°C	-20 +50
Máxima Sobrecarga	%	150
Tamanho do Cabo	m	3

Tabela 1 – Especificações da célula de carga FEFA FZ500 [6].

## 2.1.4 Potenciômetros

Os potenciômetros compõem a arquitetura do sistema devido à necessidade de se fazer um procedimento de *homing* dos servomotores ao se energizar o sistema de atuação. Ou seja, é necessário que os *drives* dos motores saibam a posição atual dos respectivos motores quando o sistema for ligado para que os comandos possam ser corretamente aplicados. Devido à dificuldade em se empregar chaves de fim-de-curso para se efetuar o *homing* e à ausência de *encoders* absolutos, decidiu-se pelo uso dos potenciômetros.

Os potenciômetros escolhidos são lineares e rotacionais. Possuem uma resistência de 10 K $\Omega$  que varia ao longo de um número fixo de voltas. Seus eixos estão conectados aos eixos dos motores. Eles têm por função a determinação das posições angulares do eixo dos motores no início da operação do sistema.

## 2.1.5 Células de Carga

### 2.1.5.1 FEFA FZ500

A Célula de carga FEFA FZ500 é utilizada para a medição da força no cabo de tração. Ela é do tipo *S* e possui capacidade de 500 kgf de tração. Seus extensômetros estão configurados em ponte completa [6]. Suas especificações técnicas estão apresentadas na Tabela 1.

Capacidade	kg	40-50
Erro	mV/V	0.05
Sensibilidade	mV/V	$1.0 \pm 0.1 \%$
Não Linearidade	%FS	0.03
Histerese	%FS	0.03
Repetibilidade	%FS	0.03
Efeito Acomodação	%FS/3 min	0.03
Balanço de Zero	%FS/1 min	0.03
Efeito da Temperatura na Saída	%FS/10°C	0.05
Efeito da Temperatura no Zero	%FS/10°C	1
Resistência de Entrada	$\Omega$	$1000 \pm 20$
Resistência de Saída	$\Omega$	$1000 \pm 20$
Resistência de Isolação	M $\Omega$	$\geq 5000$
Tensão Recomendada	V	$\leq 10$
Faixa de Temperatura de Operação	°C	$0 \pm 50$
Máxima Sobrecarga	%FS	150
Tamanho do Cabo	m	3

Tabela 2 – Especificações da célula de carga Sparkfun SEN - 10245 [7].

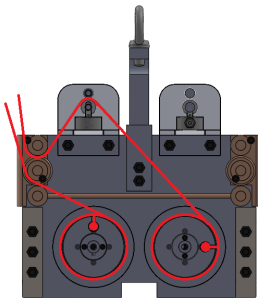


Figura 11 – Montagem dos cabos de comando (A).

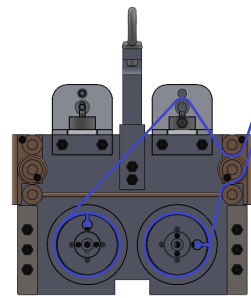


Figura 12 – Montagem dos cabos de comando (B).

### 2.1.5.2 Sparkfun SEN - 10245

A célula de carga Sparkfun SEN - 10245 é utilizada para a medição das forças de tração nos cabos de comando. Um mecanismo realiza a conversão das forças de tração nos cabos em forças de compressão na célula de carga. Este mecanismo pode ser observado nas Figuras 11 e 12. Suas especificações podem ser observadas na Tabela 2. Os extensômetros desta célula de carga estão na configuração de meia ponte. Para completar a ponte de Wheatstone uma célula de carga *dummy* é utilizada, de forma a minimizar os ruídos de medição provenientes da variação de temperatura.

### 2.1.6 Anemômetro DAVIS 7911

O anemômetro DAVIS 7911 é utilizado para a leitura da direção e intensidade do vento próximo ao solo. O leitor de velocidade do vento é do tipo copo e funciona com um interruptor de lâminas que fecha o contato a cada revolução [4]. A direção do vento



Figura 13 – Anemômetro DAVIS 7911 [4].

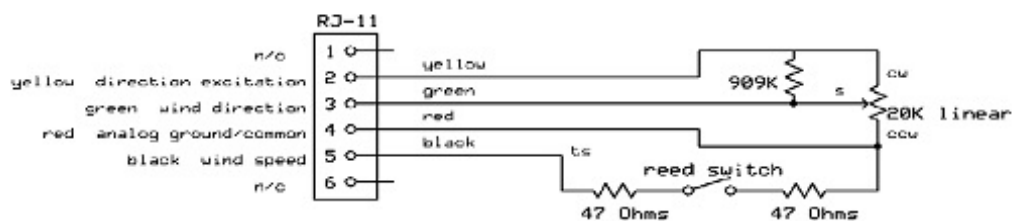


Figura 14 – Esquema elétrico do anemômetro DAVIS 7911. [4].

é medida através de um catavento acoplado à um potenciômetro. O esquema elétrico do anemômetro pode ser observado na Fig. 14. Para a leitura da velocidade do vento, é necessário que o fio preto seja conectado à uma entrada digital com um resistor *pull-up*. Para a leitura da direção do vento, o fio amarelo deve ser alimentado com uma tensão de referência de forma que e a tensão no fio verde indique a posição angular do catavento.

### 2.1.7 Encoders Hohner Série 38

Os *encoders* utilizados são absolutos e possuem resolução *single-turn* de 15 bits [27]. A interface de comunicação se dá através de padrão RS485 usando protocolo *MODBUS RTU* e opera a uma taxa de bits por segundo de 19200. O conector utilizado para a comunicação e alimentação dos *encoders* é do tipo DB-9. A função desses *encoders* é a de

leitura de posição da pipa. Eles podem estar acoplados aos dois eixos do garfo do sistema de atuação ou então conectados aos eixos do mecanismo seguidor de trajetória.

### 2.1.8 Transceiver RS-232 RS-485

Os *transceivers* RS-232 RS-485 servem para realizar a integração entre as interfaces seriais na BBB e as portas RS-485 encontradas nos *encoders*. Elas são baseadas no circuito integrado MAX13478E. O MAX13487 é um *transceiver* UART-RS485 *half-duplex* que opera com tensão de 5 V na alimentação e nas entradas [28]. Ele está disponível no encapsulamento SO de 8 pinos. Este *transceiver* possui uma máquina de estados que detecta automaticamente a direção do fluxo de dados e habilita o *driver* e o *receiver* automaticamente, eliminando a necessidade do uso de um pino I/O para indicar a direção de comunicação, diferentemente de outros *transceivers*. Ele pode efetuar a transmissão de dados numa taxa de até 500 kbps sem erros. Este dispositivo compõe um módulo de conversão UART-RS485 que suporta barramentos UART com níveis lógicos de tensão de 3,3 V e 5 V. O módulo utilizado é vendido pela *GHI Electronics* e mais informações podem ser obtidas em [29].

### 2.1.9 Módulo Wifi Intelbras WBN241

O módulo WiFi utilizado é baseado no *chipset* Ralink RT5370 [30]. O RT5370 é projetado para fornecer uma conexão WiFi de forma simples a sistemas através da porta USB. Possui uma antena externa removível e trabalha segundo os padrões IEEE802.11b/g/n em uma velocidade de até 150 MBps e frequência de 2,4 GHz.

### 2.1.10 Mecanismo Seguidor de Trajetória

Como sistema alternativo para a medição da posição angular da pipa, utilizamos o mecanismo denominado seguidor de trajetória. Ele consiste primariamente de uma haste fixa ao solo com um mecanismo que permite o seu movimento em dois graus de liberdade rotacionais. Essa haste possui uma guia em sua extremidade por entre a qual o cabo de tração passa. Dessa maneira, a orientação da haste ocorre em função da orientação do cabo de tração. Como o mecanismo foi projetado de maneira que os seus graus de liberdade possam ser medidos, através de uma função (mapeamento) geométrica e sabendo que o comprimento do cabo é fixo podemos descobrir a posição da pipa. O seguidor está apresentado na Figura 15.

### 2.1.11 Módulo WiFi ESP8266

O módulo WiFi Espressif ESP8266 contem o circuito integrado ESP8266. O circuito integrado ESP8266 é uma solução completa (SOC) para projetistas de plataformas



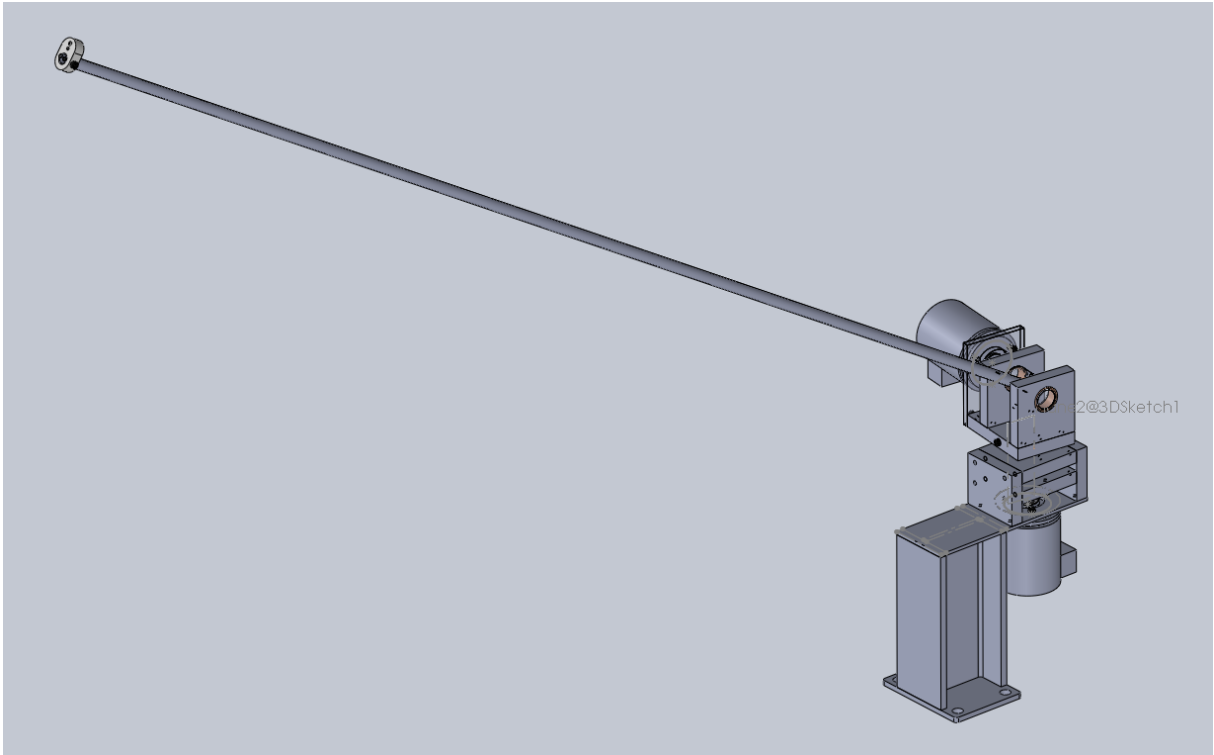


Figura 15 – Mecanismo seguidor de trajetória.

móveis que desejam embarcar em seus sistemas recursos WiFi com baixo custo e grande funcionalidade [31]. O ESP8266 permite operar como *host* da aplicação, ou como adaptador WiFi. Possui quatro tipos de interfaces para comunicação com outros sistemas: SSIO SPI GPIO I2C. Possui a implementação do protocolo 802.11b/g/n e LNA, dentre suas funcionalidades mais importantes. Existem diversos módulos WiFi da Espressif que utilizam o ESP8266, mas o utilizado neste protótipo é o ESP-01, que vem com uma antena integrada. O módulo é alimentado com uma tensão de 3,3 V.

#### 2.1.12 AltIMU-10 v4

A IMU (*Unidade de Medição Inercial*) AltIMU-v4 possui um altímetro e um conjunto triaxial de acelerômetros, giroscópios e magnetômetros. Todos os componentes são acessíveis por um barramento I2C. É um componente pequeno e leve que pode ser alimentado com uma tensão de 3,3 a 5 V.

## 2.2 Arquitetura do Sistema

Baseado na abordagem integral, o arranjo entre as partes do sistema neste primeiro protótipo é concebido considerando um subsistema único como solução para todas as interfaces do sistema. Alguns subsistemas não possuem necessidade de uma interface e estão conectados diretamente, enquanto outros subsistemas já possuem uma solução

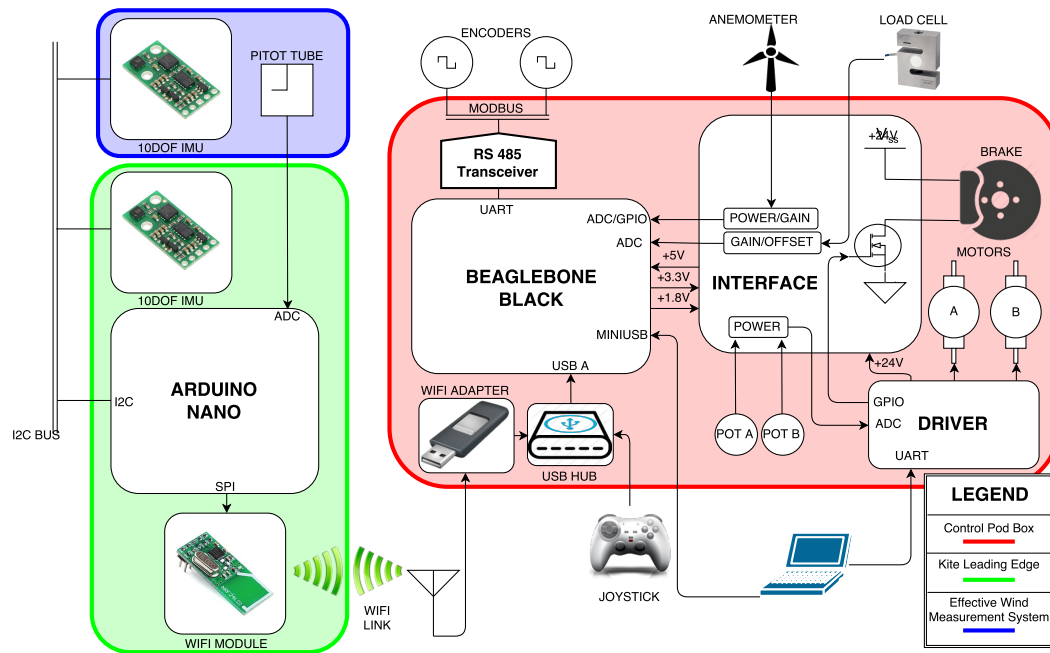


Figura 16 – Arquitetura do sistema.

pronta, utilizada no projeto. A arquitetura do sistema pode ser observada na Figura 16. A essa solução integradora é dado o nome de interface nessa figura. A interface consiste nada em menos do que a placa de condicionamento de sinais.

## 2.3 Placa de Condicionamento de Sinais

A placa de condicionamento de sinais utilizada no primeiro protótipo tem como objetivo a integração dos diversos subsistemas. Possui circuitos responsáveis pela alimentação e conexão entre os outros subsistemas, processamento de sinais analógicos e acionamento do freio. Seu projeto abaixo apresentado foi realizado como parte do trabalho de estágio que precedeu este PFC. A descrição dos componentes eletrônicos utilizados na placa é realizada abaixo e em seguida são apresentados os circuitos que compõem a placa.

### 2.3.1 Componentes Eletrônicos

Abaixo são apresentados os componentes eletrônicos utilizados na placa de processamento de sinais.

### 2.3.1.1 INA129

O INA129 é um amplificador instrumental de baixa potência para uso geral [32]. Possui um ganho ajustável de 1 a 10000 através de um resistor externo. Está disponível no encapsulamento DIP de 8 pinos. Possui uma resposta bastante linear e opera com uma tensão de alimentação de até  $\pm 18$  V. Foi escolhido como solução para realizar a amplificação dos sinais analógicos na primeira placa.

### 2.3.1.2 LM6144

O amplificador operacional LM6144 é um amplificador operacional *single-supply* de uso geral que opera com tensões de alimentação entre 1,8 V e 24 V [33]. Consome baixa potência e opera de trilho-à-trilho, além de oferecer uma boa resposta em alta frequência. Possui taxa de rejeição de modo comum e ganho de malha aberta acima de 100 dB (tipicamente) com taxa de rejeição de ruído de fonte de 87 dB. Possui uma corrente de operação de 650  $\mu$ A por amplificador, o que o faz ideal para sistemas operados por bateria. Pode ser encontrado no encapsulamento DIP ou SOIC com 8 ou 14 pinos. Essas características tornam o LM6144 uma ótima opção de amplificador operacional básico para uso geral no projeto.

### 2.3.1.3 REF200

O REF200 é um circuito fonte de corrente. Possui duas fontes de corrente de 100  $\mu$ A e um circuito de espelho de corrente [34]. É encontrado no encapsulamento DIP e funciona com tensões de alimentação entre 2,5 V e 40 V.

### 2.3.1.4 LM7810 e LM7910

Os reguladores de tensão da família LM78XX atuam como reguladores de tensão positiva fixa [35]. Vêm no encapsulamento TO-220 e possuem proteção contra sobrecorrente e sobretemperatura. Os reguladores da família LM79XX são reguladores de tensão negativa fixa e possuem as mesmas funcionalidades de proteção que os da família LM78XX [36].

### 2.3.1.5 Placa Buck Abaixadora de Tensão com LM2596

O LM2596 é um circuito que fornece todas as funcionalidades ativas necessárias para a construção de um regulador chaveado abaixador de tensão [5]. Está disponível nas configurações de tensão fixa de saída ou tensão variável. Ele pode ser alimentado com tensão de até 45 V e suporta uma corrente de carga de até 3 A. Para a sua operação, um circuito auxiliar é necessário. Tal circuito está apresentado na Figura 17 17. O circuito como apresentado na Fig. 17 gera uma diferença de tensão regulável entre os pinos '+' e '-' da saída do circuito. Se o pino '+' da saída está aterrado, o circuito fornece uma

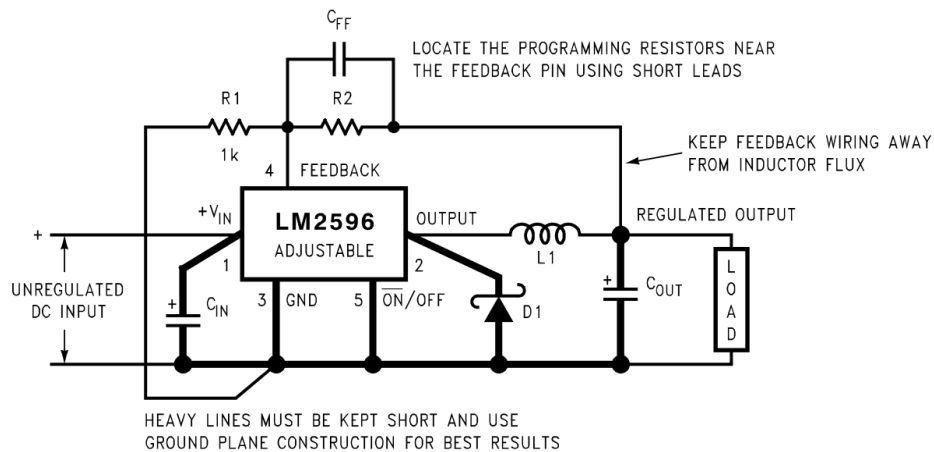


Figura 17 – Circuito auxiliar do LM2596 [5].

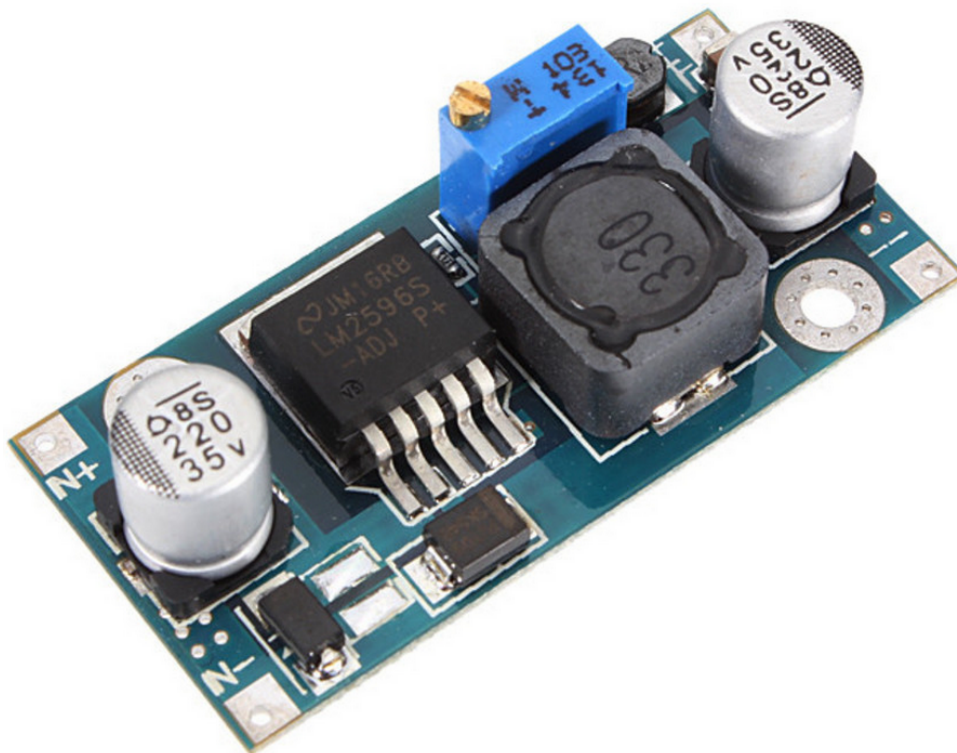


Figura 18 – Módulo abaixador de tensão com LM2596.

tensão negativa regulada no pino '-' da saída do circuito. O circuito auxiliar já se encontra implementado num módulo pronto que pode ser visto na Figura 18.

### 2.3.1.6 CSD18502KCS

O CSD18502KCS é um transistor MOSFET de potência do tipo N [37]. Possui resistência interna de 2.4 mΩ e está disponível no encapsulamento TO-220. Possui uma tensão de limiar de 1.8 V e suporta uma tensão dreno-fonte de 40 V e uma corrente de dreno contínua máxima de 100 A. Pode dissipar no máximo 259 W.

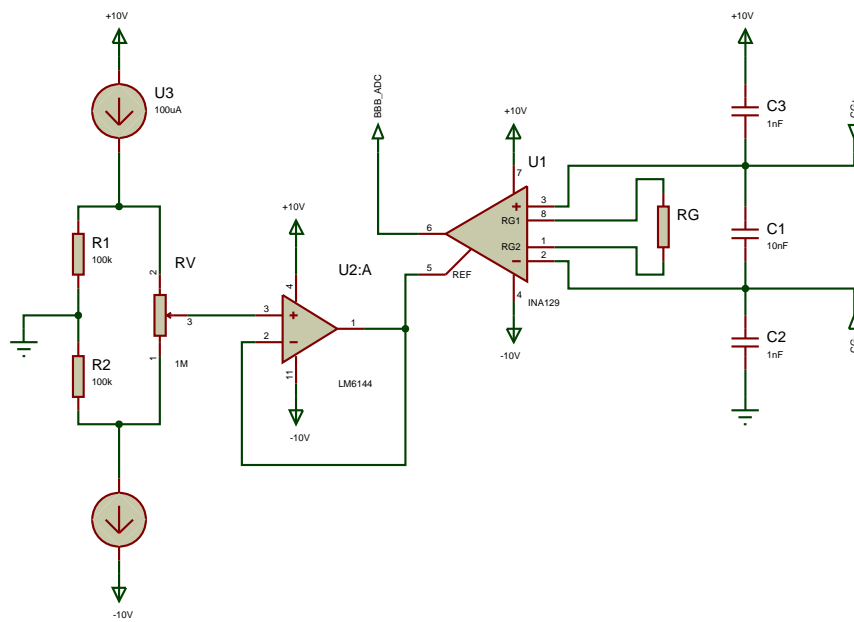


Figura 19 – Circuito de processamento de sinais analógicos com ganho e offset.

### 2.3.2 Processamento dos Sinais das Células de Carga

O circuito usado para implementar um ganho no sinal analógico das células de carga utilizando o INA129 é baseado no exemplo provido na seção de aplicação de seu *datasheet* [32]. Ele está apresentado na Fig. 19. Este circuito possui a possibilidade de ajuste de *offset* na saída de  $\pm 10$  V. Este ajuste de *offset* ocorre através do circuito fonte de corrente REF200 (U3), que provê uma corrente constante de  $100 \mu\text{A}$  ao divisor de tensão regulado por um potenciômetro linear (RV). Nesta configuração, a tensão no cursor do potenciômetro varia entre  $-10$  V a  $+10$  V. O pino cursor do potenciômetro está conectado ao pino de referência do INA129, através do ampop U2, permitindo assim o controle do *offset* da maneira desejada. O amplificador operacional LM6144 (U2) está configurado como um seguidor de tensão para garantir um acoplamento de impedâncias entre o divisor de tensão e o INA129. O sinal diferencial vindo da célula de carga (CG+, CG-) é filtrado através dos capacitores (C1, C2, C3) a fim de se eliminar ruídos de modo comum e ruídos de modo diferencial no sinal antes de sua amplificação.

### 2.3.3 Processamento de Sinais dos Potenciômetros

Os potenciômetros atuam como divisor de tensão e possuem apenas um amplificador operacional na configuração de seguidor de tensão para realizar o acoplamento de impedâncias. O sinal é filtrado com dois capacitores para eliminar ruídos de alta frequência. O diagrama do circuito pode ser observado na Figura 20

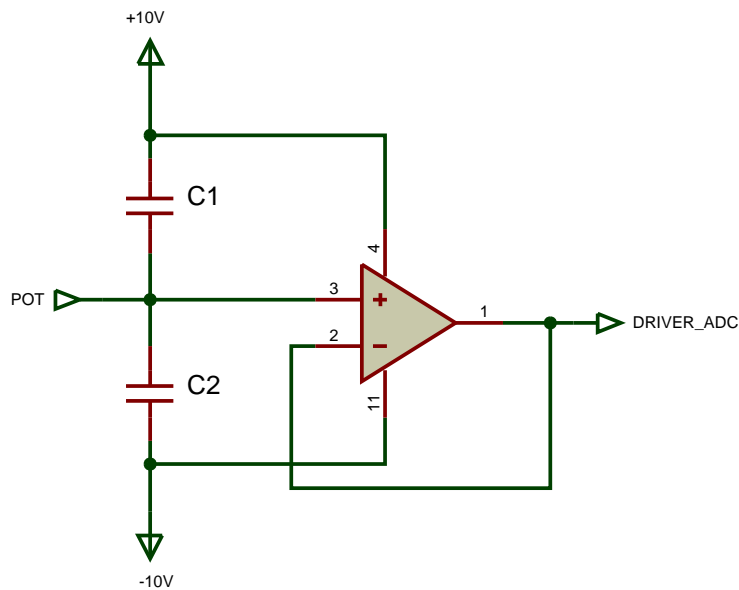


Figura 20 – Circuito de processamento dos sinais gerados pelos potenciômetros.

### 2.3.4 Circuito de Alimentação

O sistema possui vários subsistemas que precisam ser alimentados com diferentes níveis de tensão. Para se gerar as tensões necessárias para a alimentação do sistema é proposto o circuito ilustrado na Figura 21. Através dele, tensões de 24 V, -10 V, 10 V e 5 V são fornecidas para os componentes conectados na placa. Os componentes nomeados PLACA\_LM2596 são os módulos citados na seção 2.3.1.5 e apresentados na Figura 18.

### 2.3.5 Circuito de Acionamento do Freio

A saída digital do drive utilizada para o controle do freio é do tipo coletor aberto [25] e o freio é do tipo normalmente fechado. Dessa forma o freio necessita de um circuito auxiliar para seu acionamento. Para isso utiliza-se um acionamento do tipo *low-side driver* com o MOSFET do tipo N CSD18502KCS e um divisor de tensão na configuração apresentada na Figura 22. Um LED é usado para indicar o acionamento ou não do freio. O resistor R1 possui uma relação entre os valores de resistência de aproximadamente 5 para 1 para a soma das resistências dos resistores R2 e R3. Essa relação permite que quando o pino digital no *drive* for mantido num estado de alta impedância o divisor de tensão mantenha a tensão no pino *gate* do transistor em aproximadamente 5 V e acenda o LED, liberando o freio. Quando o estado do pino digital for baixo, a tensão no pino *gate* do transistor é próxima de zero, mantendo o freio acionado e o LED apagado.

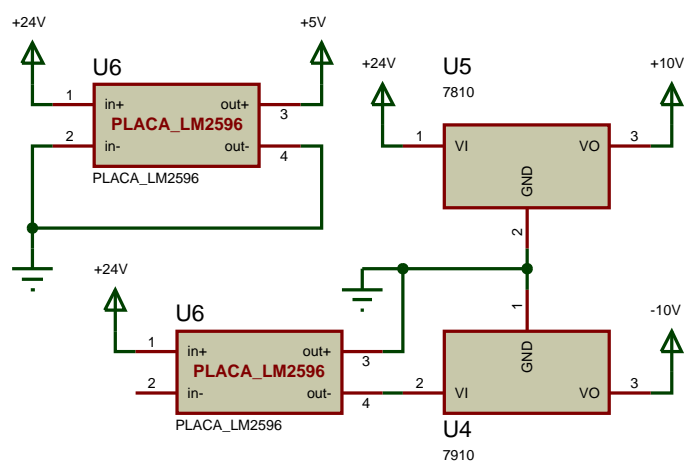


Figura 21 – Circuito de alimentação.

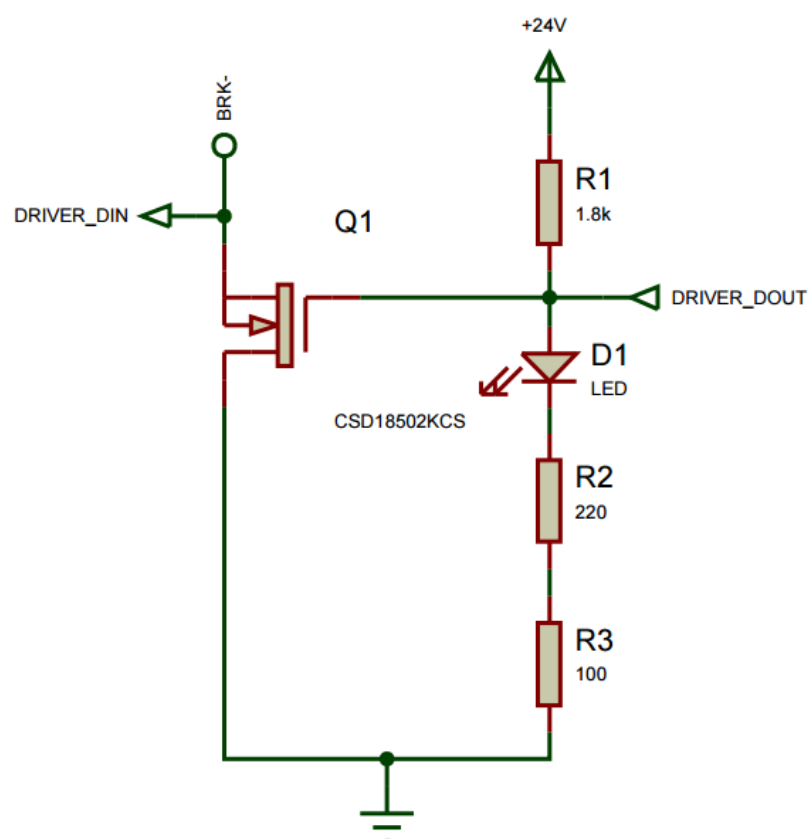


Figura 22 – Circuito de acionamento do freio.

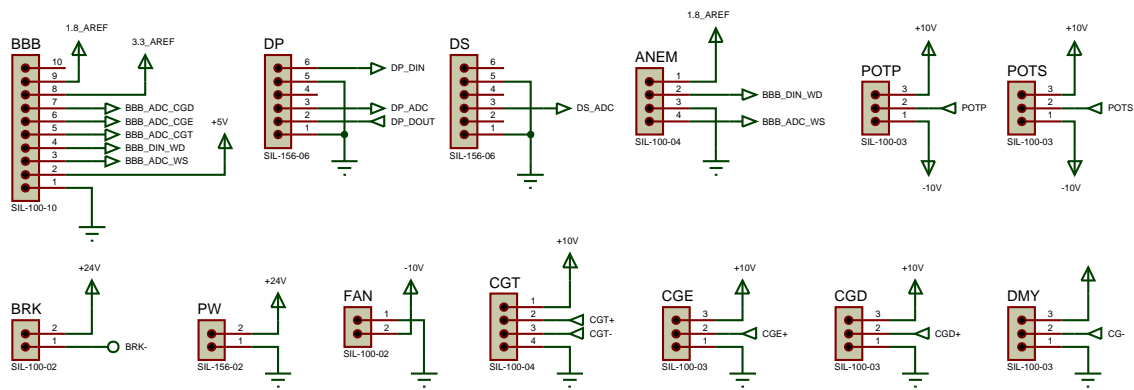


Figura 23 – Conectores na placa de circuito impresso.

### 2.3.6 Conexão com os Subsistemas

As conexões entre os subsistemas se dá como apresentado na Figura 23. Ela mostra a quais pinos dos dispositivos os pinos dos conectores estão conectados.



## 3 Análise do Sistema Existente

O trabalho apresentado neste capítulo consiste na avaliação dos resultados apresentados na disciplina de estágio realizada pelo autor anteriormente e descritos no Capítulo 2. Os problemas foram identificados e analisados pelo próprio autor através de testes e pesquisas.

### 3.1 Problemas Observados na Primeira Placa

A primeira versão da placa de circuito impresso projetada para o primeiro protótipo apresenta alguns problemas de projeto, tanto em relação aos esquemáticos dos circuitos quanto ao leiaute da placa. Os erros ocorreram principalmente devido à inexperiência da equipe, e foram diagnosticados no processo de verificação, população e teste da placa. A medida que os erros foram verificados, eles foram anotados para correção na nova versão da da placa.

#### 3.1.1 Problemas de Projeto

##### 3.1.1.1 Problemas de Projeto no Esquemático

Abaixo são descritos os erros referentes ao projeto do esquemático das placas. São os erros relativos à arquitetura dos circuitos utilizados para a interface entre os diversos sinais.

##### 3.1.1.1.1 Circuito de Referência de Tensão de Precisão Para as Pontes de Wheatstone

Na primeira versão da placa, utiliza-se um regulador de tensão que não é o mais adequado para se gerar a referência de tensão para as pontes de Wheatstone das células de carga. Ele possui uma flutuação significativa, o que insere um erro na medição. Para sistemas que necessitem de maior precisão, pode-se utilizar um circuito de referência de tensão de precisão, com muito menor variação e ruído, o que aumenta o desempenho da placa.

##### 3.1.1.1.2 Saturação das Entradas Analógicas

A BBB possui uma limitação nos pinos de suas entradas analógicas. Sinais com níveis de tensão maiores que 1,8 V podem danificar o computador embarcado. Os ganhos dos amplificadores de instrumentação são ajustados de maneira a não ultrapassar esses valores, mas é verificado que, se alguma célula de carga for desconectada ou algum fio

se romper, as tensões nas saídas dos amplificadores de instrumentação podem beirar aos 10 V (positivos e negativos). Para proteger a BBB, uma solução faz-se necessária. Uma sugestão seria criar alguma forma de limitar a tensão nas entradas analógicas.

#### 3.1.1.1.3 Capacitores de Desacoplamento

Os capacitores de desacoplamento são capacitores fisicamente próximos aos componentes eletrônicos, conectados entre as tensões de alimentação e o terra. Geralmente possuem valores de 100 nF e sua função é servir como uma fonte de energia de ação rápida quando há quedas de tensão devido à variação rápida da demanda dos componentes eletrônicos. Servem também para atenuar ruídos de alta frequência no terra do circuito.

#### 3.1.1.1.4 Diodo Zener Para Regular Tensão com Resistor em Série

Pode-se utilizar um diodo Zener como regulador de tensão para limitar as tensões de alimentação. Isso seria um dispositivo adicional de segurança bastante simples de ser implementado na placa.

#### 3.1.1.1.5 Implementar Lógica Para Alimentação da BBB e do Drive

Futuramente, podemos alimentar os *drives* e a placa com fontes separadas, ou com cabos de alimentação separados. Como não pode haver tensão nos pinos das entradas e saídas analógicas do drive quando ele não estiver alimentado, uma lógica de alimentação que garanta essa segurança se faz necessária.

#### 3.1.1.1.6 Sinal de Fim-de-Curso dos Potenciômetros

Pode-se inserir uma nova funcionalidade no sistema com um sinal de fim de curso do eixo dos motores gerado por *hardware*. Esse sinal de fim-de-curso é útil para evitar que os motores sejam acionados para uma posição angular além da faixa de operação dos potenciômetros, limitada a apenas algumas voltas.

#### 3.1.1.1.7 Entrada Analógica Para Verificar Tensão das Baterias

A próxima iteração do sistema operará com baterias, então pode-se utilizar uma entrada analógica para monitorar a tensão da bateria.

#### 3.1.1.1.8 Filtro *Anti-Aliasing* no ADC

Pode-se inserir filtros nas entradas analógicas especificamente projetados para eliminar os componentes de alta frequência do sinal e diminuir os efeitos de *aliasing*.

### 3.1.1.2 Problemas de Projeto no Leiaute

Os problemas descritos abaixo são relativos aos erros efetuados na etapa do projeto do leiaute da placa de circuito impresso. Constituem, na maior parte, de boas práticas que não foram observadas devido à inexperiência com o projeto de leiautes e roteamento das trilhas. As boas práticas aqui listadas foram baseadas no documento [38].

#### 3.1.1.2.1 Replanejamento do Plano Terra

Para a melhor performance do sistema contra ruídos no plano terra, algumas boas práticas para o projeto do leiaute podem ser adotadas ou enfatizadas, entre elas as seguintes:

**Terra em Estrela** Pode-se configurar as conexões de terra em um formato estrela, de forma a minimizar o comprimento das trilhas em comum entre diferentes dispositivos. Dessa maneira o ruído em modo serial inserido no circuito por dispositivos de alta corrente pode ser reduzido.

**Separar Plano Terra Analógico do Digital** O plano de terra é utilizado na primeira versão da placa, porém outras considerações podem ser observadas, como a separação dos planos de terra analógico e digital e de baixa e alta potência. Os planos devem ser conectados por apenas um ponto. Isto evita que ruídos gerados na parte digital e de maior potência da placa interfiram na parte analógica, que é mais sensível.

**Sem Plano Terra Próximo a Entradas Inversoras de Ampop** As entradas inversoras de ampops são especialmente vulneráveis a ruídos. Planos de terra próximos às entradas inversoras podem gerar uma capacitância, fazendo com que o sistema tenha uma característica mais oscilatória.

#### 3.1.1.2.2 Cruzamentos de Retorno

O cruzamento entre trilhas de retorno, deve ser perpendicular, de maneira a minimizar a sobreposição entre elas. Isso reduz o acoplamento capacitivo entre diferentes trilhas. Os cruzamentos também podem ser realizados na placa através de fios, com a área na superfície do plano terra onde há o cruzamento isolada. Dessa maneira essa área atuará como uma camada de blindagem, diminuindo os ruídos.

#### 3.1.1.2.3 Reduzir Laços Indutivos em Trilhas de Sinal e Retorno

Pode-se reduzir os ruídos indutivos gerados em trilhas de sinal e de retorno na própria placa. Se houver o posicionamento dessas trilhas próximo umas da outra, diminui-se as áreas dos laços, diminuindo a indutância e possivelmente os ruídos gerados.

### 3.1.2 Problemas de Fabricação e Montagem

Para a fabricação da primeira versão da placa utilizou-se a tecnologia de manufatura por fresadora CNC, disponível no Laboratório de Montagem Mecatrônica (LMM) do DAS. O circuito impresso é confeccionado a partir de uma placa de fibra de vidro com duas lâminas superficiais de cobre (placa cobreada virgem). A fresadora CNC então desbasta o contorno das trilhas e dos *pads* nas lâminas de cobre, realizando o contato elétrico entre os pinos dos componentes eletrônicos segundo o leiaute projetado a partir do esquemático. Os furos das vias também são usinados pela fresadora CNC. Essa é uma técnica amplamente utilizada para prototipagem de PCIs. A fresadora CNC utilizada foi a Roland MDX-40a. O diâmetro de broca utilizado foi de 0.3 mm.

Os contatos entre os dois lados das vias foram feitos manualmente através de soldagem. Os componentes foram soldados às placas manualmente.

A natureza manual do processo de fabricação da placa causa alguns problemas no processo de montagem e teste da placa de circuito impresso. Rebarbas do processo de usinagem das placas podem causar curtos circuitos entre trilhas diferentes e assim sendo necessário um grande esforço para testar as trilhas em busca desses eventuais curtos circuitos. O processo de soldagem manual dos componentes das vias em si é propenso a falhas. A necessidade da realização manual do contato entre os dois lado da via através de soldagem aumenta a possibilidade de ocorrência de tais problemas. Soldas frias e curtos circuitos entre vias ocasionados por falta de técnica e experiência acarretam em um esforço adicional de teste e reparo de tais problemas.

O leiaute das placas também se mostra um obstáculo para o reparo e substituição de componentes. No projeto priorizou-se a densidade da distribuição dos componentes para minimização da área de superfície das placas. Isso minimiza a quantidade de material usado na placa, mas aumenta a dificuldade do projeto da placa e do acesso aos componentes em casos de eventuais substituições necessárias.

## 3.2 Consequências Para o Processo de Desenvolvimento da Placa

Os problemas apresentados neste capítulo geram uma necessidade de realização de testes repetidas vezes no processo de verificação da placa. O próprio processo de teste insere um risco de gerar curtos circuitos acidentalmente, havendo a possibilidade de causar dano nos componentes, criando a necessidade de troca. O processo de troca de componentes, como visto anteriormente, não é simples e também insere o o risco de dano de outros componentes. Por fim, após a troca dos componentes, mais testes são necessários para validação do sistema. Tanto a necessidade de retrabalho no processo de montagem da

placa e o tempo gasto em tal processo podem ser diminuídos com a realização de algumas alterações nos projeto e no processo de manufatura da placa, como visto anteriormente.

Todos estes problemas ocasionam em um atraso no desenvolvimento da placa de circuito impresso e um custo adicional para reposição de componentes.

Tendo em vista tudo isso, é evidente a necessidade da fabricação de uma nova versão da placa endereçando os problemas citados. Com este novo projeto é esperada uma melhoria na qualidade dos sinais analógicos e digitais, reduzindo os ruídos, assim como o tempo e os custos do processo de fabricação e montagem da placa.



## 4 Projeto da Placa de Circuito Impresso

Baseado nas considerações no Capítulo 3, este capítulo apresenta uma descrição do que foi feito na nova versão do projeto. Inicialmente os componentes eletrônicos dessa versão da placa são apresentados. Então, os esquemáticos dos circuitos utilizados na nova placa são descritos e as mudanças realizadas da primeira versão são apresentadas. Por fim há uma seção com o leiaute da segunda versão da placa de condicionamento de sinais, apresentando as boas práticas implementadas nessa versão.

Os componentes eletrônicos e os esquemáticos apresentados nas seções do começo deste capítulo foram inteiramente escolhidos e desenvolvidos pelo autor do trabalho, enquanto o leiaute apresentado ao final foi realizado por outro integrante do grupo UFSCKite.

### 4.1 Componentes Eletrônicos

Nesta seção os componentes eletrônicos utilizados na nova versão da placa são apresentados. Suas características relevantes para o projeto são mencionadas.

#### 4.1.1 REF102

O REF102 é uma referência de tensão de 10v. Ele possui uma baixa corrente quiescente (1,4 mA), com excelente estabilidade e baixo ruído. Pode ser alimentado com tensões entre 11,4 V e 36 V, e encontra-se disponível no encapsulamento DIP de 8 pinos.

#### 4.1.2 LM358

O LM358 é um amplificador operacional de baixo custo que opera com tensões de alimentação em *single supply* entre 3 V e 32 V [39]. Possui um ganho de malha aberta de 100 dB e consome 0.7 mA. Opera com tensões nas suas entradas entre 0 e 32 V e na sua saída entre 0 e 1,5 V abaixo de sua tensão de alimentação.

#### 4.1.3 Outros Componentes

Os outros componentes utilizados na nova versão da placa estão apresentados na seção 2.3.1. São eles: Placa Buck Abaixadora de Tensão com LM2596, 7810, CSD18502KCS, INA129, LM6144 e REF200.

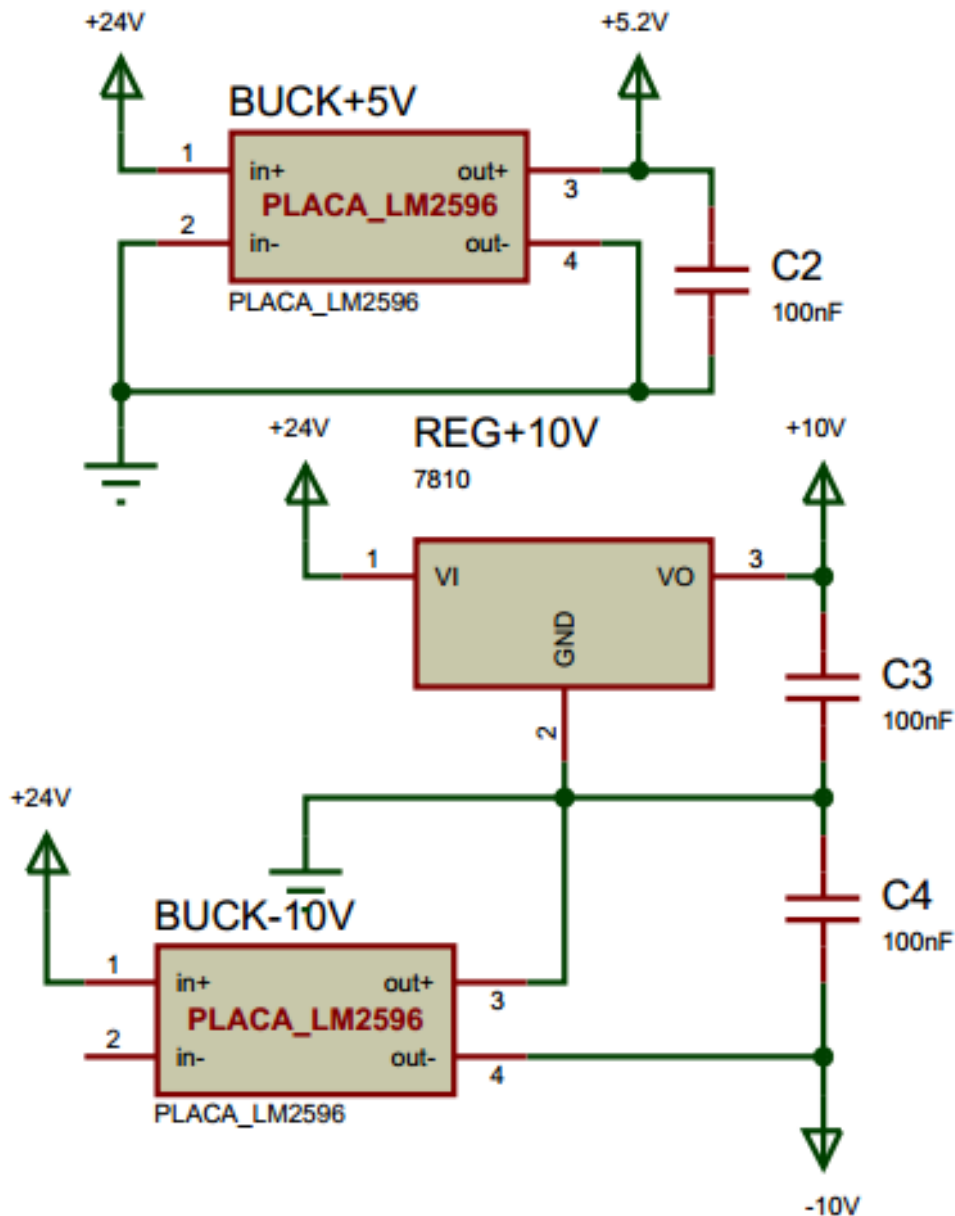


Figura 24 – Circuito de alimentação da placa

## 4.2 Esquemático

### 4.2.1 Alimentação

O circuito de alimentação é semelhante ao da versão anterior, com os capacitores C2, C3 e C4 colocados na saída dos reguladores de tensão, como apresentado na Figura 24. Os capacitores atuam como filtros que atenuam os ruídos em alta frequência nos barramentos de tensão. O regulador 7910 foi removido da primeira versão e o módulo LM2596 é o único utilizado para a geração da tensão negativa nessa nova versão da placa.



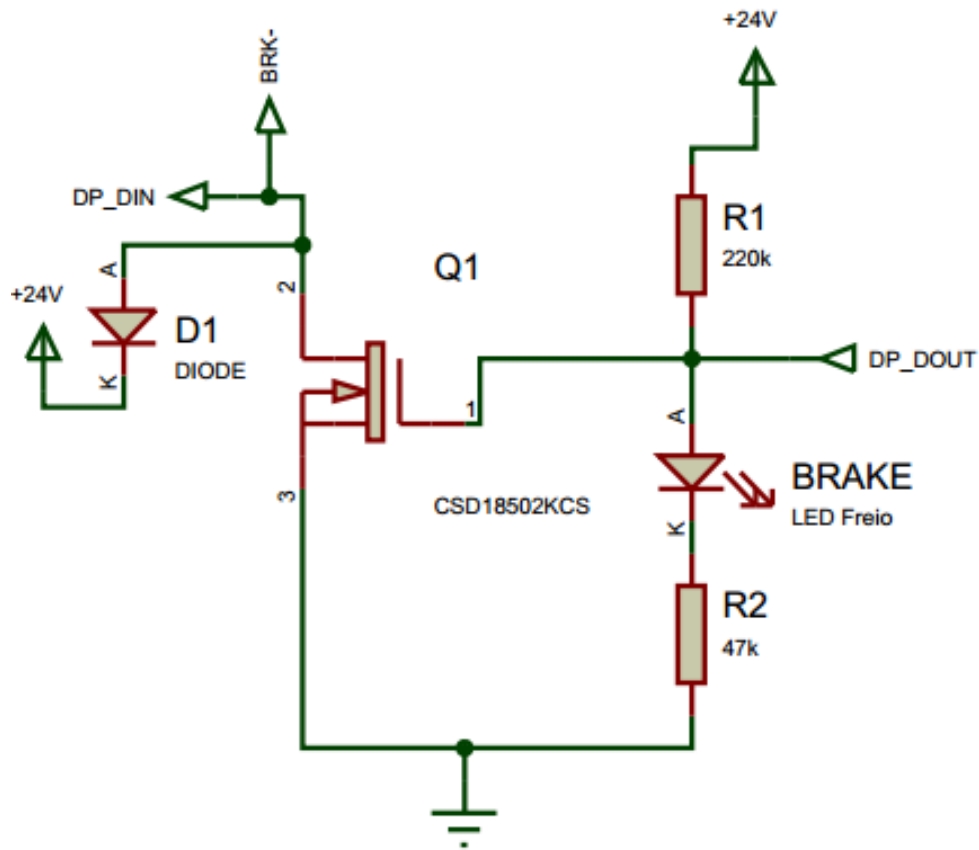


Figura 25 – Circuito de acionamento do freio

#### 4.2.2 Potenciômetro

O circuito dos potenciômetros permaneceu inalterado, uma vez que o seu projeto original não apresentou falhas. É o mesmo apresentado na Figura 20.

#### 4.2.3 Freio

O circuito de acionamento do freio é bastante semelhante ao que foi usado na primeira versão da placa de condicionamento de sinais. Seu princípio básico de funcionamento já foi descrito na seção 2.3.5. Um diodo de roda livre foi adicionado em paralelo ao freio para evitar que a tensão nele torne-se instantaneamente negativa. Devido à característica indutiva do acionamento do freio por solenóide, essas tensões negativas podem se formar quando o freio parar de ser energizado. O esquemático do circuito pode ser observado na Figura 25.

#### 4.2.4 Referência de Precisão

As células de carga precisam ser alimentadas por uma tensão de 10 V. O circuito projetado para fornecer a tensão de alimentação deve ser preciso para diminuir os ruídos nos sinais analógicos gerados pela célula de carga. Para conseguir alcançar esse objetivo,

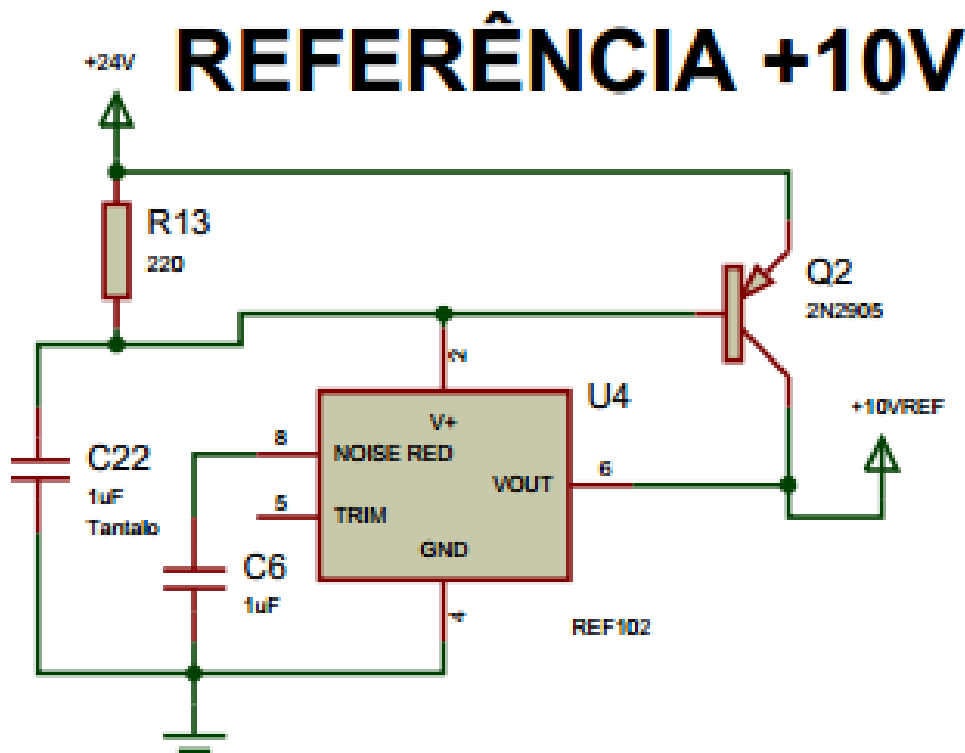


Figura 26 – Circuito de referência de precisão

um dispositivo que gera uma tensão de referência com grande precisão é utilizado. O circuito escolhido tem como base o dispositivo REF102 [40]. Consiste em uma aplicação típica apresentada em seu *datasheet* e está apresentado na Figura 26. De acordo com o *datasheet*, este circuito expande a capacidade de fornecimento de corrente do REF102 para até 100 mA, o que é mais do que o suficiente para a alimentação das quatro células de carga do sistema.

#### 4.2.5 Interface Analógica

A interface analógica da segunda versão da placa de condicionamento de sinais está apresentada na Figura 27. Embora essa nova versão corrija alguns dos problemas discutidos no Capítulo 3, ela ainda apresenta algumas semelhanças com a sua versão anterior. Podemos observar que seguindo as orientações do Capítulo 3, os capacitores de desacoplamento C12 e C13 são implementados no amplificador de instrumentação nesta versão. Já os capacitores C1, C11 e C26 são implementados nas saídas dos amplificadores operacionais e na entrada do amplificador de instrumentação para atuarem como filtros, atenuando ruídos nos sinais de entrada, de saída e de referência. A primeira versão da placa apresenta capacitores conectados entre os sinais das células de carga (CG+ e CG-) e o barramento terra e de +10 V. Esses capacitores são retirados na nova versão devido à possibilidade de eles inserirem ruídos provenientes das tensões de alimentação e terra nos sinais das células de carga.

## ANALOG FRONT END

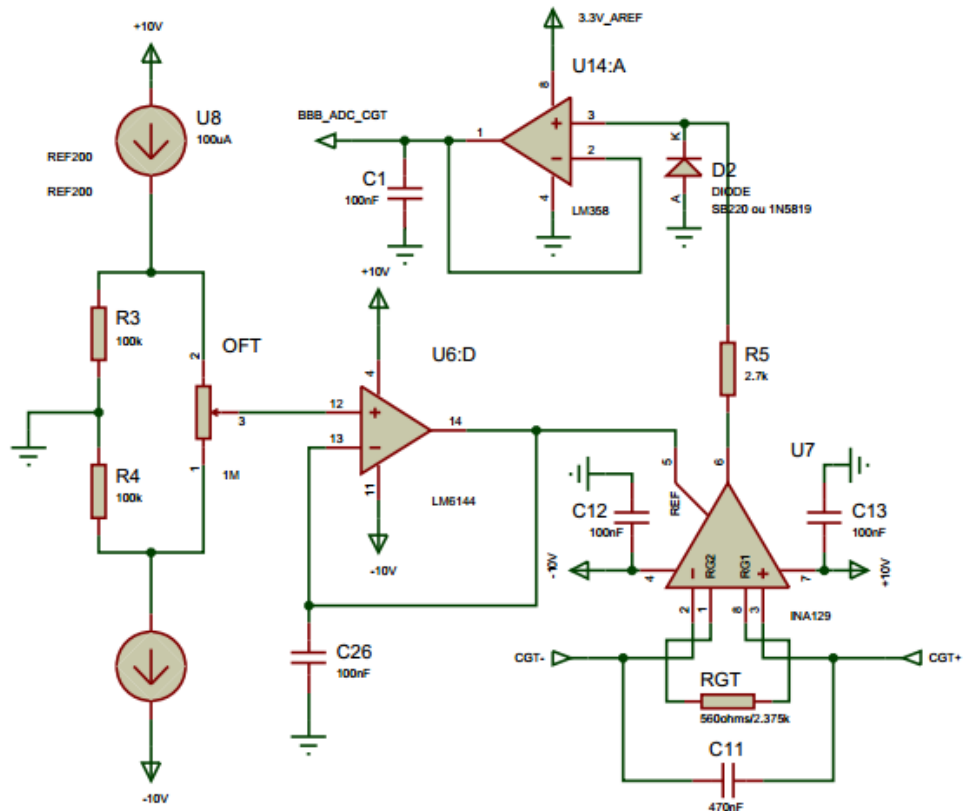


Figura 27 – Circuito de processamento de sinais analógicos com ganho e offset.

Um amplificador operacional LM358 (U14) e um diodo Schottky (D2) são implementados na saída do amplificador de instrumentação para limitar a tensão nas entradas analógicas da BBB.

Quando o amplificador de instrumentação abaixa a tensão em sua saída de forma a polarizar o diodo Schottky (abaixo de  $-0,2$  V), este passa a conduzir corrente do plano terra através do resistor R5 em direção à saída do amplificador de instrumentação. Isso ocorre pois a impedância de entrada no LM358 é alta. O resistor R5 tem o papel de limitar essa corrente de retorno. Desta forma, o Schottky evita que a tensão na entrada do LM358 fique abaixo de  $-0,2$  V. O LM358 não pode receber uma tensão nas suas entradas abaixo de  $-0,3$  V, logo o Schottky garante uma operação segura do LM358 nesse aspecto.

Segundo seu *datasheet*, o LM358 pode receber tensões de até 32 V em seus terminais de entrada e permanecer operando de forma segura. Em qualquer situação, sua saída é limitada a 1,5V abaixo da tensão de alimentação. Desta forma, se ele é alimentado com uma tensão de 3,3 V e o colocado na configuração de seguidor de tensão, ele limita as tensões em sua saída em 1,8 V, enquanto sua resposta se mantém linear para tensões abaixo desse limiar.

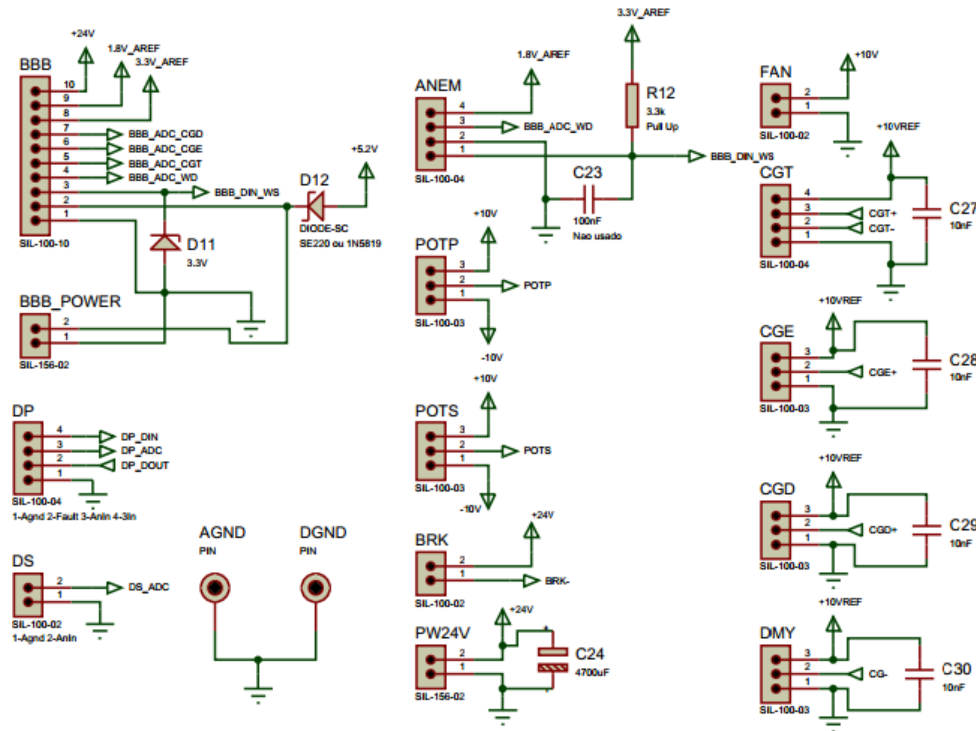


Figura 28 – Conectores da placa de condicionamento de sinais

#### 4.2.6 Conectores

O esquemático dos conectores apresentado na Figura 28 mostra algumas funcionalidades implementadas nessa nova versão. No conector do anemômetro, a funcionalidade de *pull-up* para o pino digital é implementada na própria placa de condicionamento de sinais. Os conectores das células de carga possuem capacitores (C27-C30) entre os pinos de alimentação que atuam como filtros para atenuar ruídos nas suas tensões de excitação. O conector de alimentação também possui um capacitor (C24) conectado em paralelo entre seus pinos para atenuar ruídos. O conector da BBB possui proteções contra sobretensão na entrada digital que recebe o sinal do anemômetro através de um diodo Zener (D11) e na sua tensão de alimentação através de um diodo Schottky (D12). O diodo Schottky D12 serve para evitar que a BBB, quando energizada pelo cabo USB, alimente o barramento de 5 V da placa.

### 4.3 Leiaute

O projeto do leiaute da placa busca seguir as orientações descritas na seção 3.1.1.2. O Leiaute completo está apresentado nas Figuras 29 e 30. A seguir são descritos alguns aspectos relevantes sobre o leiaute da placa de condicionamento de sinais. Os conectores dos *drives*, potenciômetros, células de carga, do BBB e do anemômetro se encontram na borda superior (nas figuras apresentadas nessa seção). Na borda inferior encontram-se os conectores de alimentação, do freio e da ventoinha. Esta disposição dos conectores é

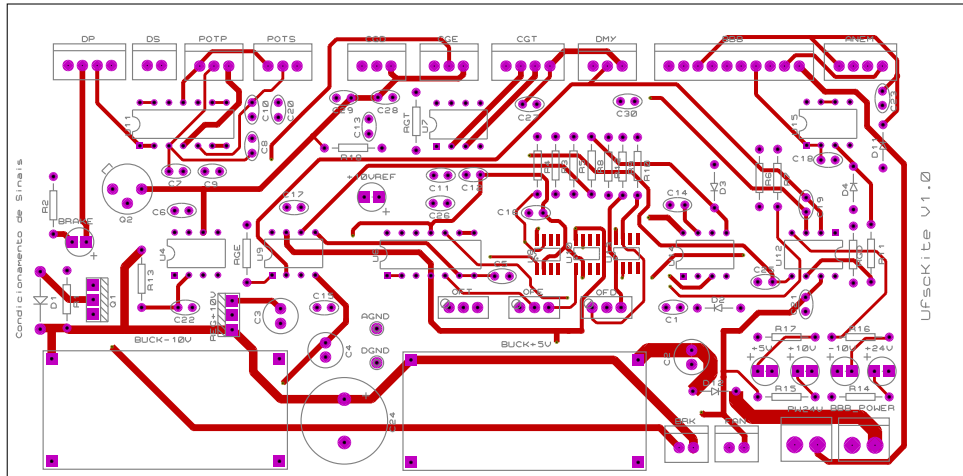


Figura 29 – Camada superior de cobre da placa de condicionamento de sinais

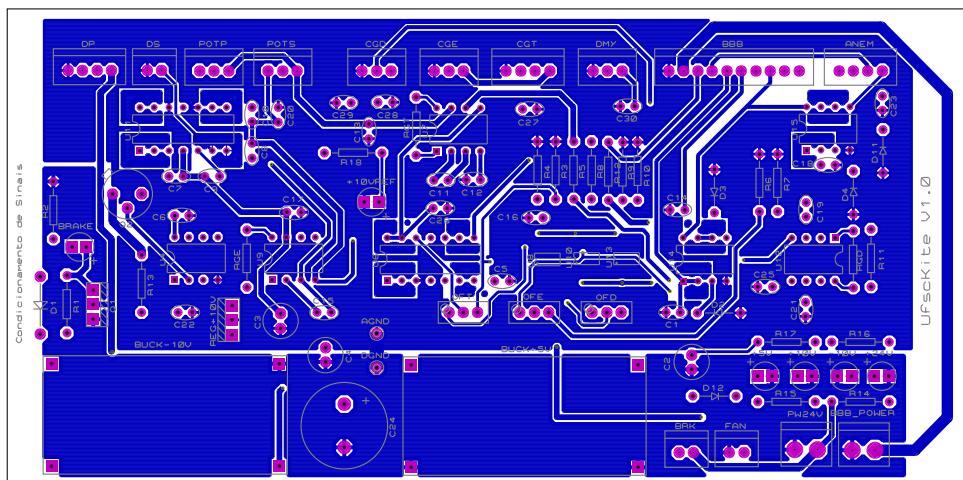


Figura 30 – Camada inferior de cobre da placa de condicionamento de sinais

de forma a separar fisicamente os sinais de alta corrente dos de baixa corrente, evitando interferências eletromagnéticas indesejadas.

### 4.3.1 Plano Terra

No leiaute dessa placa, o plano terra é implementado na camada inferior em duas partes, uma digital e uma analógica. As duas são separadas e conectadas em um ponto único. Toma-se o cuidado de retirar o plano terra de perto das entradas inversoras dos ampops para evitar a formação de capacitâncias indesejadas que podem promover oscilações nas suas saídas. O plano terra digital está destacado em branco na Figura 32 e o plano terra analógico destacado em branco na Figura 31.

### 4.3.2 Cruzamentos de Retorno

Observa-se na Figura 33 o leiaute sobreposto das camadas superior e inferior de cobre. Pode-se ver que a sobreposição de trilhas em diferentes camadas foi evitada ou

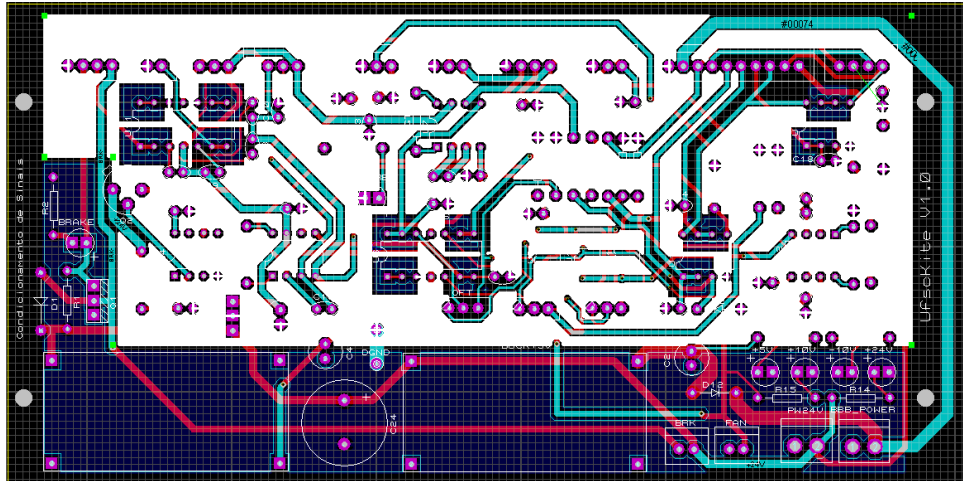


Figura 31 – Plano terra analógico da placa de condicionamento de sinais

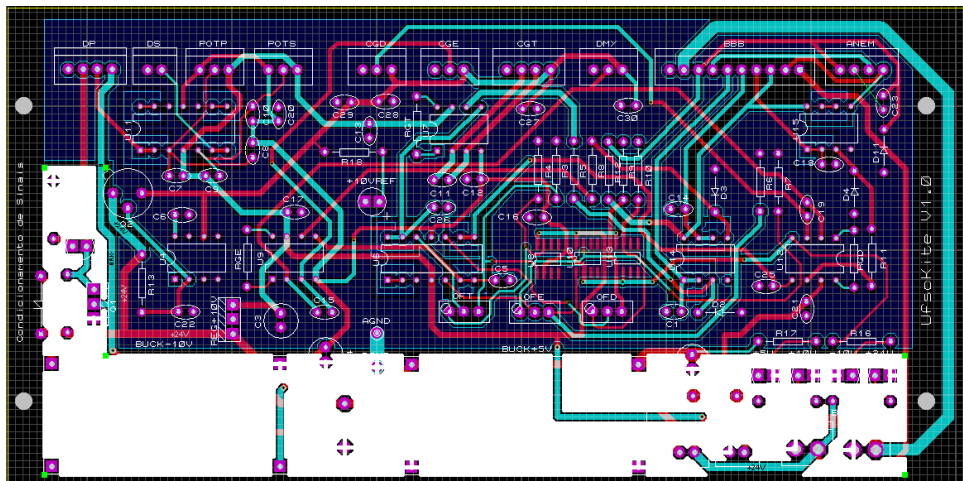


Figura 32 – Plano terra digital da placa de condicionamento de sinais

minimizada.

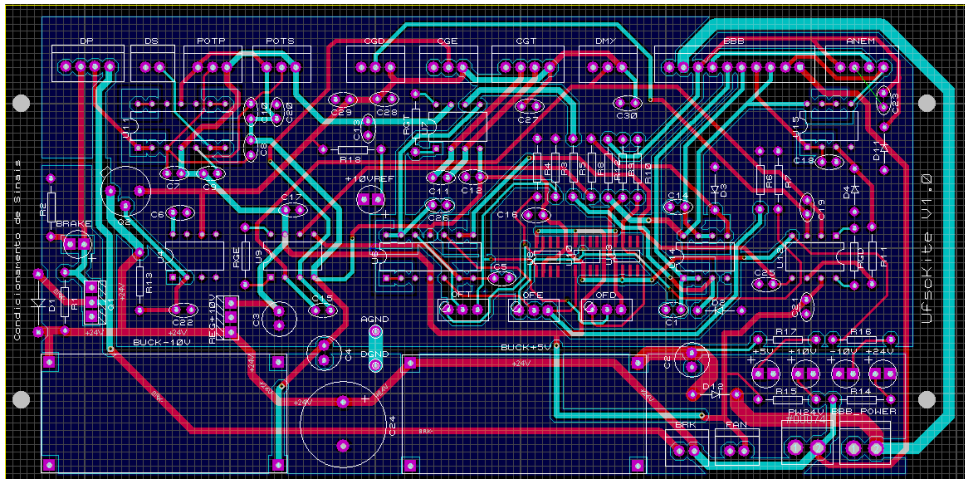


Figura 33 – Camadas de cobre da placa superpostas





Parte II

Segundo Protótipo



## 5 Descrição do *Pumping Kite*

O *Pumping Kite* está descrito conceitualmente em 1.1. Nesta seção, o conceito do segundo protótipo desenvolvido pelo UFSCKite e os dispositivos que compõem são apresentados.

O trabalho apresentado neste capítulo é resultado de um esforço coletivo do grupo UFSCKite com contribuições do autor para a definição do protótipo.

### 5.1 Descrição do Segundo Protótipo

Para que o sistema de controle funcione da maneira descrita na seção 1.1, é necessário que haja a leitura da posição, velocidade e orientação da pipa quando ela estiver em vôo. Supõe-se que a tração no cabo de tração durante a operação do sistema seja suficientemente grande a ponto de fazer com que o cabo se estique completamente e fique em linha reta. Desta forma, uma maneira de se obter a medida da posição da aerofólio é a partir dos ângulos de saída do cabo de tração em solo e do comprimento do cabo de tração. As medidas da velocidade do aerofólio cabeado podem ser obtidas através da aproximação da derivada da posição pelo método de diferenças finitas. Tais sinais podem ser filtrados digitalmente em busca de uma redução de ruído. Outras informações importantes sobre a condição de operação do sistema que podem ser usados na estrutura de controle do sistema são a velocidade e direção do vento e a força de tração no cabo de tração e nos cabos de controle do aerofólio cabeado.

A atuação do sistema de controle do aerofólio cabeado se dá pelo recolhimento diferencial e simultâneo dos cabos de controle do aerofólio e do enrolamento e desenrolamento do cabo de tração. A configuração escolhida para este protótipo prevê que os atuadores dos cabos de controle estejam em vôo, posicionados dentro de uma estrutura chamada unidade de vôo. A unidade de vôo não pode ser muito grande ou pesada. Os dispositivos escolhidos para efetuar esta atuação são os mesmos motores do primeiro protótipo, descritos na seção 2.1.3.1. Para seu acionamento, se prevê o uso dos mesmos *drives* utilizados no primeiro protótipo, descritos na seção 2.1.3.2. No motor escolhido para atuar no recolhimento simultâneo dos cabos de comando, está acoplado um freio eletromagnético de retenção, já utilizado no primeiro protótipo e descrito na seção 2.1.3.3. O comando do freio é realizado pelo *drive*, mas um circuito externo auxiliar é necessário para o seu acionamento. Este circuito precisa também enviar um sinal de retorno ao *drive* quando o freio for acionado para que o *drive* possa impedir o seu acionamento simultâneo ao acionamento do motor. De forma semelhante ao primeiro protótipo, quando o sistema é ligado, os *drives* não tem como precisar a posição angular inicial dos motores. Faz-se

necessária a utilização de um outro mecanismo externo para a determinação da posição angular inicial dos motores. No segundo protótipo, utiliza-se a mesma solução apresentada no primeiro protótipo, através dos potenciômetros descritos na seção 2.1.4. A atuação no enrolamento e desenrolamento do cabo de tração do sistema é realizada por um motor de indução capaz de operar nos quatro quadrantes do plano Torque x Velocidade. Seu acionamento é realizado pelo inversor WEG CFW11, melhor descrito na seção 5.2.1.

Devido às características do sistema, os sensores e atuadores encontram-se distribuídos em locais fisicamente separados. Para a interface com os sensores e o pré-processamento dos dados faz-se necessária a implementação de uma unidade de processamento em solo e na unidade de vôo. É importante que estas unidades de processamento comuniquem-se entre si, enviando e recebendo as informações relevantes para a operação do sistema através de uma interface de comunicação sem fio. Estas unidades de processamento devem utilizar o sistema operacional linux, por sua flexibilidade. A unidade de vôo é responsável por executar as leis de controle de trajetória do aerofólio cabeado. Para isso, toma como base as informações disponibilizadas em todas as partes do sistema e as referências de operação passadas pelo usuário. Ela então envia as referências de posição dos motores aos *drives* e de velocidade de enrolamento/desenrolamento e força de tração no cabo de tração à unidade de solo. A unidade de processamento em solo deve então repassar essas informações ao inversor. Como o laço de controle envolve comunicação entre diferentes partes do sistema, deve-se buscar baixos tempos de latência e amostragem, condizentes com a dinâmica do sistema.

O sistema deve ser capaz de receber informações de operação disponibilizadas pelo usuário, como as principais referências e os modos de operação. Deve também ser capaz de disponibilizar as informações sobre a operação, atuação e as leituras de todos os sensores do sistema.

A unidade em solo pode ser facilmente energizada pela rede elétrica. Já a unidade de vôo, nesta versão do protótipo, opera através de baterias. A bateria utilizada neste protótipo está descrita na seção 5.2.2. Por essa limitação, a unidade de vôo não pode consumir muita energia.

A eletrônica embarcada no protótipo deve possuir mecanismos de proteção contra descargas eletrostáticas, sobretensão e corrente reversa. Ela deve ser fabricada em uma cidade próxima ao grupo UFSCKite.

## 5.2 Componentes do Sistema

### 5.2.1 Inversor WEG CFW11

Uma máquina elétrica de ímã permanente da série WMagnet é a escolhida para essa aplicação devido às suas características elétricas, de forma a conciliar da melhor forma possível o custo e a eficiência do sistema em uma solução compacta. O inversor da WEG CFW11 [41] é uma solução para acionamento dos motores dessa série, do mesmo fabricante. Permite o controle de velocidade e possui tecnologia de última geração para motores de indução. Sua performance estática e dinâmica, controle de torque velocidade, posicionamento e alta capacidade de sobrecarga o fazem uma opção viável para o acionamento da máquina elétrica escolhida para o segundo protótipo. É projetado para operar os motores dentro dos quatro quadrantes de operação do plano torque x velocidade. Possui a função SoftPLC, que agrega ao CFW11 as funcionalidades de um CLP, permitindo a criação de aplicativos de *software* próprios através de programação WLP, da WEG. Possui a possibilidade de instalação de diversos acessórios para interface entre diferentes dispositivos, como *encoders*, I/Os, módulos de memória ou de comunicação e Interface Homem-Máquina (IHM). Através desses acessórios, o inversor possui suporte a diversos protocolos de comunicação, como Modbus, Devicenet, Profibus-DP, CANopen, Ethernet-IP. Possui um controlador PID para variáveis de processos através da variação da velocidade do motor. Possui diversas funções de proteção e alarmes para segurança de operação.

### 5.2.2 Bateria

A bateria utilizada é composta por uma série de sete células de íons de lítio do tipo LiFe. Cada célula produz uma diferença de potencial de 3,5 V, somando um total 24,5 V medidos nas extremidades da bateria.

### 5.2.3 Unidade Inercial

O módulo inercial consiste em uma IMU (*inercial measurement unit*) de nove graus de liberdade que se comunica com um microcontrolador Arduino Nano através de um barramento I2C. Ele se encontra fixado no aerofólio e seu objetivo é o de auxiliar a medir sua orientação e posição através dos seus sensores inerciais. A IMU utilizada já foi descrita na seção 2.1.12.



## 6 Projeto Informacional da Placa de Circuito Impresso

Analisando a descrição do sistema realizada no Capítulo 5, fica evidente a necessidade de um dispositivo adicional que realize a interface entre os componentes do sistema, tanto no aspecto físico (de montagem) quanto eletrônico. Conceber esse dispositivo é um desafio devido à característica do sistema de possuir uma grande diversidade de padrões de alimentação, de sinais elétricos, de conexão e de comunicação. Para melhor projetar esse dispositivo, é importante que a abordagem do processo de projeto seja de alguma forma sistêmica. Para isso, utiliza-se algumas ferramentas da teoria de processo de projeto e faz-se um pequeno projeto informacional, na expectativa que isto facilite a compreensão do problema e auxilie na tomada de decisões durante a fase de projeto.

Inicialmente é realizada a elicitação dos requisitos funcionais e não-funcionais do sistema. Após isso, um modelo funcional e uma tabela avaliando as opções de solução consideradas são apresentados. Por fim, algumas diretrizes para auxiliar a tomada de decisões no projeto são definidas.

O trabalho apresentado neste capítulo foi realizado pelo autor, com contribuições de outros integrantes do grupo UFSCKite na identificação de alguns requisitos. O modelo funcional, a tabela de opções de solução e as diretrizes do projeto foram realizados integralmente pelo autor.

### 6.1 Elicitação dos Requisitos

Segundo [42], um requisito é definido como:

1. Uma condição ou capacidade necessitada por um usuário para resolver um problema ou alcançar um objetivo.
2. Uma condição ou capacidade que deve ser satisfeita ou possuída por um sistema ou componente do sistema para satisfazer um contrato, um padrão ou uma especificação.
3. Uma representação documentada de uma condição ou capacidade como em (1) ou (2).

O documento de requisitos é importante para se ter conhecimento acerca da natureza do problema a ser lidado antes de haver algum tipo de comprometimento com alguma solução [43]. Tal conhecimento é essencial para sistemas complexos. Tendo em vista isso, o

processo de elicitación de requisitos se torna a etapa inicial no processo do projeto de um produto. Os requisitos contém todas as funcionalidades e características que o produto deve conter para que cumpra seu objetivo. Uma compreensão errada ou incompleta dos requisitos torna um produto incompleto ou ineficaz. Isso acarreta no desapontamento do usuário e no atraso de desenvolvimento do produto devido às modificações necessárias para sua correção. Para que a descrição dos requisitos do produto seja completa e consistente, é necessário que haja uma compreensão ampla do contexto em que o problema se situa, das funções fundamentais que o produto deve executar e das limitações cercam o desenvolvimento do produto.

Idealmente, os requisitos devem ser válidos, consistentes, claros, completos, factíveis, verificáveis, rastreáveis e indivisíveis [44]. Algumas técnicas podem ser úteis para o processo de elicitación dos requisitos, como reuniões com os interessados, pesquisas, análises, entrevistas e engenharia reversa. A partir desse ponto, uma descrição detalhada do produto a ser projetado é gerada e dela se extraem os requisitos identificados, dividindo-os em duas categorias: Funcionais e Não Funcionais. Várias iterações podem ser necessárias para a obtenção de um bom documento de requisitos.

Tendo em vista as orientações acima, abaixo estão apresentadas as listas dos requisitos do sistema tratado nessa parte do documento.

## 6.2 Requisitos Funcionais

Os requisitos funcionais são extraídos a partir da descrição do sistema realizado anteriormente nos Capítulos 5 e 1 e aprimorados após sucessivas reuniões com integrantes da equipe UFSCKite. São consideradas as particularidades de cada componente de *hardware* de uso obrigatório e a estrutura de controle proposta em [1].

### 6.2.1 Requisitos Funcionais da Unidade de Solo

**RF-S1 Obter leituras das grandezas especificadas a seguir, e ser capaz de realizar um pré-processamento dos dados através de filtragem digital:**

- RF-S1a) Direção do vento nominal;
- RF-S1b) Intensidade do vento nominal;
- RF-S1c) Ângulos de saída do cabo de tração (elevação e azimute);
- RF-S1d) Força de tração no cabo principal;
- RF-S1e) Comprimento do cabo de tração;

*Descrição:* A medição dos ângulos de saída é utilizada para o cálculo da posição e orientação da pipa. A direção do vento nominal é utilizada para a determinação da



orientação da janela de vento. A força de tração, o comprimento e a intensidade do vento podem ser utilizados no laço de controle

*Requisitos não-funcionais associados:* [RNF9](#), [RNF8](#)

**RF-S2 Disponibilizar, através da interface apropriada, as medições das grandezas realizadas na unidade de solo e descritas em [RF-S1](#);**

*Descrição:* As grandezas precisam ser acessadas por diferentes sistemas em diferentes locais.

*Requisitos não-funcionais associados:* [RNF5](#) [RNF9](#) [RNF8](#)

**RF-S3 Receber, através de uma interface de comunicação apropriada, as referências das seguintes dinâmicas:**

RF-S3a) Velocidade de enrolamento/desenrolamento do cabo de tração;

RF-S3b) Força de tração no cabo principal;

*Descrição:* O programa de controle embarcado na unidade de solo precisa receber essas informações de outro lugar para retransmitir ao inversor.

*Requisitos não-funcionais associados:* [RNF5](#) [RNF8](#) [RNF9](#)

**RF-S4 Enviar, através de uma interface adequada, as referências das seguintes dinâmicas para o controlador PID do inversor de frequência;**

RF-S4a) Velocidade de enrolamento/desenrolamento do cabo de tração;

RF-S4b) Força de tração no cabo principal;

*Descrição:* Os controladores internos do inversor de frequência serão utilizados para controlar as dinâmicas citadas e para isso é necessário que a unidade de solo envie as referências.

*Requisitos não-funcionais associados:* [RNF8](#) [RNF9](#) [RNF10](#)

## 6.2.2 Requisitos Funcionais da Unidade de Vôo

**RF-V1 Obter leituras das grandezas especificadas a seguir, e ser capaz de realizar um pré-processamento dos dados através de filtragem digital:**

RF-V1a) Força de tração nos cabos de controle;

RF-V1b) Tensão individual de cada célula da bateria;

*Descrição:* A força de tração nos cabos de controle é uma informação importante que diz respeito à condição de operação do sistema. A tensão nas células precisa ser

monitorada para que o sistema possa desligar de uma forma controlada antes de se descarregar a bateria.

*Requisitos não-funcionais associados:* [RNF9](#), [RNF8](#)

**RF-V2 Disponibilizar as medições das grandezas tomadas na unidade de vôo e descritas em RF-V1 através de uma interface de comunicação adequada;**  
*Descrição:* As grandezas precisam ser acessadas por diferentes sistemas em diferentes locais.

*Requisitos não-funcionais associados:* [RNF5](#) [RNF9](#) [RNF8](#)

**RF-V3 Receber dos drives, através de uma interface apropriada, a instrução de acionamento do freio.**

*Descrição:* É função dos *drives* implementar a lógica de controle para proteção do acionamento simultâneo dos motores e do freio. É função da placa realizar o acionamento, logo, há a necessidade de se receber a instrução de acionamento dos *drives*.

*Requisitos não-funcionais associados:* [RNF8](#), [RNF9](#)

*Requisitos não-funcionais associados:* [RNF4](#), [RNF10](#)

**RF-V4 Acionar o freio**

*Descrição:* Os *drives* não conseguem fornecer a corrente necessária para acionar os freios diretamente pelas suas saídas digitais, logo, há a necessidade de um hardware adicional para o seu correto acionamento.

*Requisitos não-funcionais associados:* [RNF4](#), [RNF10](#)

**RF-V5 Obter leituras sobre o estado de acionamento do freio**

*Descrição:* Por motivos de segurança, o motor não deve ser acionado enquanto o freio estiver no estado fechado. Há então a necessidade de se obter a leitura dessa informação para evitar que haja esta falha.

*Requisitos não-funcionais associados:* [RNF10](#)

**RF-V6 Travar o acionamento do motor.**

*Descrição:* Em algumas situações particulares, por motivos de segurança, o acionamento do motor deve ser bloqueado.

*Requisitos não-funcionais associados:* [RNF10](#)

**RF-V7 Obter leituras da posição angular absoluta de cada um dos motores;**

*Descrição:* Os motores são utilizados para acionar os cabos de comando. Para realizar o correto acionamento dos motores, a obtenção da sua posição angular absoluta inicial, quando o sistema é ligado, é necessária.

*Requisitos não-funcionais associados:* [RNF8](#) [RNF9](#)

**RF-V8 Disponibilizar para os *drives*, através de uma interface adequada, as medidas de posição angular absoluta de cada um dos motores.**

*Descrição:* O controle da posição dos motores é realizado pelos próprios *drives* que os acionam. Para que isso seja realizado, é necessário que essa informação seja passada aos *drives*.

*Requisitos não-funcionais associados:* [RNF10](#)

**RF-V9 Receber, através de uma interface de comunicação apropriada, as seguintes informações disponibilizadas por outras partes do sistema:**

RF-V9a) Ângulos de saída do cabo de tração (elevação e azimute);

RF-V9b) Força de tração no cabo principal;

RF-V9c) Comprimento do cabo de tração;

RF-V9d) Referência de quantidade de energia produzida por ciclo;

RF-V9e) Modo de operação do sistema;

RF-V9f) Velocidade do vento;

RF-V9g) Direção do vento;

*Descrição:* Como os algoritmos de controle serão executados na unidade de vôo, algumas informações disponibilizadas em outras partes do sistema precisam ser recebidas pela unidade de vôo.

*Requisitos não-funcionais associados:* [RNF8](#) [RNF9](#) [RNF10](#)

**RF-V10 Calcular os valores das seguintes variáveis de processo descritas abaixo:**

RF-V10a) Posição da pipa;

RF-V10b) Velocidade escalar da pipa;

RF-V10c) Ângulos RPY da pipa;

RF-V10d) Velocidade angular da pipa;

*Descrição:* Devido a característica de medição indireta dos sensores disponíveis, é necessário converter as leituras dos sensores em valores correspondentes às variáveis de processos.

*Requisitos não-funcionais associados:* [RNF8](#) [RNF9](#)

**RF-V11 Calcular o erro das variáveis de processo descritas em [RF-V10](#) de acordo com as suas referências.**

*Descrição:* O cálculo do erro é parte fundamental do controle de processos e se torna necessário neste projeto.

*Requisitos não-funcionais associados:* [RNF8](#) [RNF9](#)

**RF-V12 Calcular a ação de controle nos seguintes sinais:**

RF-V12a) Posição do motor *depower*;

RF-V12b) Posição do motor de *steering*;

*Descrição:* É necessário que algum processo realize os cálculos das ações de controle necessárias para que as dinâmicas tenham as características adequadas para cada aplicação.

*Requisitos não-funcionais associados:* [RNF8](#) [RNF9](#)

**RF-V13 Enviar para os drives, através de uma interface de comunicação adequada, o valor das referências dos sinais descritos em RF-V12.**

*Descrição:* Uma vez que os *drives* são os responsáveis pelo acionamento e controle dos motores, as referências calculadas precisam ser enviadas para eles.

*Requisitos não-funcionais associados:* [RNF8](#) [RNF9](#) [RNF10](#)

**RF-V14 Calcular as referências desejadas para as seguintes dinâmicas do sistema:**

RF-V14a) Velocidade de enrolamento/desenrolamento do cabo de tração;

RF-V14b) Força de tração no cabo principal;

RF-V14c) Posição da pipa;

RF-V14d) Velocidade escalar da pipa;

RF-V14e) Ângulos RPY da pipa;

RF-V14f) Velocidade angular da pipa;

*Descrição:* O cálculo das referências das dinâmicas citadas é usado nos diferentes laços de controle do sistema.

*Requisitos não-funcionais associados:* [RNF8](#) [RNF9](#)

**RF-V15 Disponibilizar, através de uma interface de comunicação adequada, os valores das referências descritas em RF-V14**

*Descrição:* Os valores dessas referências precisam ser acessados em outras partes do sistema.

*Requisitos não-funcionais associados:* [RNF8](#) [RNF9](#) [RNF10](#)

## 6.3 Requisitos Não Funcionais Transversais

Para a listagem e descrição dos requisitos não funcionais, observam-se as características que limitam ou restringem o sistema de alguma forma e que não podem ser descritas através de uma função.

**RNF1 Plataforma;**

*Descrição:* O sistema deve ser desenvolvido em torno de uma plataforma de computador embarcado com o sistema operacional linux que ofereça a possibilidade de operação em tempo real;

*Prioridade:* 8

**RNF2 Dimensões;**

*Descrição:* O hardware embarcado da unidade de vôo não deve exceder 250x200 mm

*Prioridade:* 9

**RNF3 Peso;**

*Descrição:* O hardware embarcado da unidade de vôo (excluindo a estrutura mecânica) não deve exceder 4 kg;

*Prioridade:* 10

**RNF4 Consumo;**

*Descrição:* O consumo da unidade de vôo não deve exceder 60 W;

*Prioridade:* 8

**RNF5 Comunicação entre as unidades de solo e de vôo;**

*Descrição:* A comunicação entre as unidades de solo e de vôo deve ser realizada através de uma tecnologia sem fio;

*Prioridade:* 10

**RNF6 Proteção do hardware;**

*Descrição:* Todas as interfaces de comunicação devem ser isoladas, e o hardware deve ser protegido contra ESD, sobretensão e corrente reversa;

*Prioridade:* 10

**RNF7 Fabricação;**

*Descrição:* Todo o hardware deve ser dimensionado de forma a ser compatível com os padrões de fabricação nacional. Mais especificamente, deve estar de acordo com as limitações descritas em <<https://curtacircuitos.com.br/especificacoes>>;

*Prioridade:* 10

**RNF8 Latência;**

*Descrição:* O tempo de latência da leitura de todas as variáveis não deve ser superior a 100 ms.

*Prioridade:* 10

**RNF9 Amostragem;**

*Descrição:* O tempo de amostragem do laço de controle não deve ser superior a 100

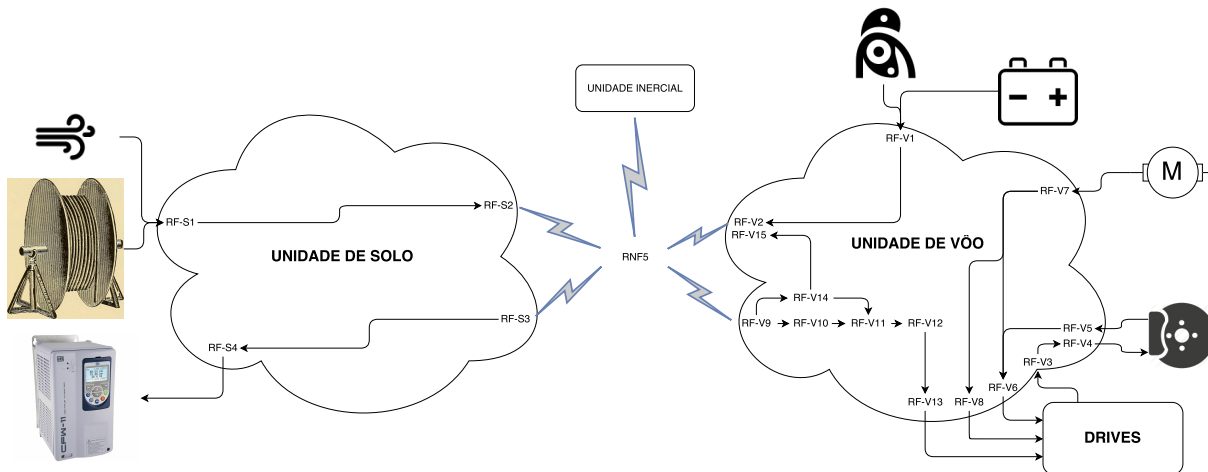


Figura 34 – Diagrama funcional.

ms.

*Prioridade: 10*

#### RNF10 **Compatibilidade Com o Hardware;**

*Descrição:* A placa realiza a interface com alguns componentes pré-selecionados. Essas interfaces devem estar de acordo com as especificações de cada um desses componentes, descritas no capítulo 5.

*Prioridade: 7*

## 6.4 Modelo Funcional

A criação de um modelo funcional é útil para descrever estática e dinamicamente o que o sistema deve fazer [45]. É uma ferramenta gráfica que pode ser usada para determinar a completude, consistência e precisão do conjunto de requisitos. A construção de tal diagrama também é importante pois ajuda a esclarecer as fronteiras e as interfaces do sistema a ser projetado com os outros elementos que interage.

Tomando como base a descrição do sistema realizada no Capítulo 5, pode-se fazer um diagrama funcional mostrando como se dá o fluxo de informação através dos requisitos e dos componentes. Tal diagrama pode ser observado na Figura 34.

## 6.5 Tabela de Opções de Solução

As tabelas de opções de solução podem ser uma etapa importante para mapear os requisitos funcionais de um produto aos componentes físicos que o constituem. Sua construção auxilia na rastreabilidade dos requisitos ao longo do processo de projeto do produto.

A partir do diagrama apresentado na Figura 34 e dos requisitos apresentados nas seções 6.2 e 6.3, uma pesquisa realizada no mercado pode ser feita levantando as soluções comerciais para executar cada tipo de função. Uma análise das soluções utilizadas por outros produtos similares em funcionamento também auxilia essa etapa do projeto, inserindo ou validando as opções encontradas no leque. Parte desse processo já havia sido feito para o primeiro protótipo, já que existem várias funções em comum entre os dois protótipos.

A Tabela 3 apresenta o resultado de tal estudo, contendo as opções de solução encontradas e relacionando-as às funções identificadas e seus respectivos requisitos funcionais.

Tabela 3 – Opções de solução

Função	Local Físico	Requisitos Funcionais Associados	Princípios de Solução
Medir direção do vento	solo	RF-S1a	birutas, cata-ventos, ventoinhas, anemômetro ultrassônico,
Medir velocidade do vento	solo	RF-S1b	anemômetro ultrassônico, anemômetro de copo e hélice, anemômetro ultrassônico, tubo de pitof.
Medir ângulos de saída do cabo de tração	solo	RF-S1c	IMU, encoders, processamento de imagens
Medir força de tração no cabo principal	solo	RF-S1d	dinamômetro, células de carga
Medir desenrolamento do cabo de tração	solo	RF-S1e	encoder optico linear, rotacional
Disponibilizar dados usando tecnologia wireless	solo	RF-S2	transmissor RF, adaptador WiFi, módulo bluetooth
Receber dados usando tecnologia wireless	solo	RF-S3	receptor RF, adaptador WiFi, módulo bluetooth
Enviar referências para o inversor de frequência	solo	RF-S4	signal analógico, porta ethernet
Medir força de tração nos cabos de controle	vôo	RF-V1a	dinamômetro, células de carga
Medir tensão das células de bateria	vôo	RF-V1b	ADC, BMS
Enviar dados usando tecnologia wireless	vôo	RF-V2, RF-V15	transmissor RF, adaptador WiFi, módulo bluetooth
Receber instrução de acionamento do freio	vôo	RF-V3	porta serial RS-232, sinal digital
Accionar o freio	vôo	RF-V4	relé, MOSFET
Ler o estado de acionamento do freio	vôo	RF-V5	porte serial RS-232, sinal digital
Travar o acionamento do motor	vôo	RF-V6	Chave lógica, relé, lógica de software
Medir posição angular dos motores	vôo	RF-V7	Encoder óptico, potenciómetro
Enviar sinal para o drive	vôo	RF-V8	porte serial RS-232, sinal digital
Receber dados usando tecnologia wireless	vôo	RF-V9	porte serial RS-232, sinal digital
Executar cálculos	vôo	RF-V10, RF-V11, RF-V12, RF-V14	Arduino Yum, BeagleBone Black, Raspbery Pi, Galileo
Enviar dados para o drive	vôo	RF-V13	porta serial RS-232



Tabela 4 – Comparação entre arquitetura de produto integral e modular [8]

<b>Modular</b>	<b>Integral</b>
Cada pedaço físico pode ser integral internamente, mas é independente dos outros funcionalmente e fisicamente	Pedaços podem ser integrais internamente e interdependentes entre si
Interfaces padrões pré-projetadas podem ser usadas e mantidas intactas mesmo se as características internas mudem	Interfaces são fixas para cada pedaço e são dependentes do comportamento funcional
Módulos podem ser especializados para suas contribuições individuais para funcionalidade global e podem ser utilizados intercambiavelmente.	Pedaços estão presos à aplicação e não podem ser trocados sem que hajam mudanças em outros pedaços
Imprevisibilidade de escolha modular requer margem de segurança grande para acomodar sistemas diferentes	Projeto global pode ser otimizado para um conjunto de funções e implementações previsíveis.
Interfaces padrão são frágeis e fisicamente separadas do módulo, desperdiçando outros recursos de projeto como espaço ou peso.	Interfaces são robustas e podem ser integradas ao pedaço, economizando espaço ou peso
Gerenciamento de interfaces, se planejado adequadamente, pode prover flexibilidade durante a fabricação	O gerenciamento de interfaces ocorre apenas durante fase de projeto e é rígido; não visa flexibilidade após o projeto.
Favorece performance de negócio	Favorece performance técnica

## 6.6 Diretrizes do Projeto

Uma vez realizado o projeto informacional, adquiriu-se uma compreensão mais aprofundada do problema. Baseado nos requisitos, no modelo funcional e na tabela de soluções, realizou-se a tomada de decisão acerca da arquitetura do produto e de outras diretrizes do projeto. Essas diretrizes conduzem o processo de escolha das soluções que integram o projeto da nova placa de circuito impresso no Capítulo 7. Essas diretrizes estão apresentadas abaixo.

### 6.6.1 Arquitetura do Produto

Para a definição do arranjo deste sistema são consideradas duas abordagens para a sua arquitetura: a modular e a integral [46]. Na abordagem modular, cada função é realizada através de um subsistema fisicamente separado e independente. Na abordagem integral, as funções compartilham os subsistemas e são dependentes. Cada sistema possui diferentes características, com suas vantagens e desvantagens, apresentadas na tabela 4.

Tratando-se de um protótipo de pesquisa em fase inicial de desenvolvimento,

havendo a possibilidade de no futuro se adicionar mais funções ao sistema embarcado, opta-se por uma arquitetura mais flexível e escalável. Isso é válido tanto para a parte de hardware, quanto a de software. Embora o sistema não seja fisicamente decomposto em módulos dependentes, outras características da arquitetura modular podem ser implementadas no sistema embarcado. Esta abordagem pode elevar o custo total da placa e piorar o desempenho do sistema, pois introduz elementos a mais no caminho da informação. O trabalho de projeto também se torna maior, uma vez que as soluções implementadas no primeiro protótipo não poderão ser reaproveitadas, já que a arquitetura de seu sistema embarcado utiliza a abordagem integral.

### **6.6.2 Reaproveitamento do Hardware do Primeiro Protótipo**

Por uma diminuição nos custos do projeto, busca-se, quando possível, reutilizar os componentes do primeiro protótipo. Um dos critérios utilizados na escolha dos componentes do primeiro protótipo é a possibilidade de reutilização para o segundo protótipo. Embora o arranjo dos sistemas seja diferente, a maior parte das funções desempenhadas no primeiro protótipo se repete no segundo e muitos componentes de hardware podem ser reaproveitados.

# 7 Projeto Conceitual da Placa de Circuito Impresso

Uma vez concluído o projeto informacional, inicia-se a parte do projeto conceitual do sistema embarcado da unidade de vôo. Este capítulo apresenta as decisões conceituais de projeto efetuadas tomando como base o hardware já descrito no Capítulo 5 e os requisitos, o modelo funcional, a tabela de opções e a arquitetura de produto descritas no Capítulo 6. A descrição se inicia pelo hardware, através da apresentação do seu diagrama funcional geral e das descrições de cada um dos seus subsistemas. Após isso apresenta-se o diagrama funcional do software.

O conteúdo apresentado neste capítulo foi realizado pelo autor. A arquitetura do sistema apresentada ao final foi definida em conjunto com outros integrantes do grupo UFSCKite.

## 7.1 Hardware

### 7.1.1 Unidade de Processamento

O diagrama funcional de *hardware* é construído tomando como base a unidade de linux embarcado. Sendo ela a unidade de processamento do sistema, a maior parte dos sinais passam por ela. Isto ocorre por que trata-se de um sistema de controle de processos. Os dados das medições dos sinais e de suas referências precisam ser enviados para a unidade de processamento como parâmetros de entrada das funções de controle. Os atuadores precisam ser acionados com os valores das variáveis manipuladas obtidos através das funções de controle.

### 7.1.2 Barramento de Comunicação

Uma vez definido o ponto de partida, é necessário que haja a escolha de uma interface de comunicação através da qual os outros módulos se conectem com a unidade de processamento. De acordo com as decisões tomadas no projeto informacional, a interface escolhida deve seguir um determinado tipo de padrão comum de conexão que não oferece muitas dificuldades na busca de componentes compatíveis. Além disso, a interface deve ser flexível e escalável. Para atender essas características, decide-se que a interface escolhida seja do tipo barramento, pois utiliza um meio físico em comum para comunicação entre diversos dispositivos. Dessa maneira, cada um dos subsistemas funcionais deve se conectar a esse barramento para trocar informações com a unidade de processamento e a unidade de

processamento precisa de apenas uma interface para se comunicar com todos os dispositivos periféricos.

Dentre as opções de interface disponíveis no mercado, duas se mostram mais atraentes por serem as que oferecem uma maior quantidade e diversidade de dispositivos compatíveis no mercado: I2C e SPI. Dentre essas duas, opta-se por utilizar no barramento o padrão SPI. O padrão SPI pode operar em taxas de transmissão muito maiores que as oferecidas pelo protocolo I2C. O padrão SPI também não apresenta possíveis problemas de conflito de endereçamento entre os dispositivos conectados ao barramento, eliminando a necessidade de preocupação com esse tipo de configuração.

### 7.1.2.1 Isolador

Uma desvantagem do uso de interfaces de comunicação do tipo barramento é que caso haja uma falha em algum dos componentes que gere uma sobretensão ou um curto circuito em algum pino conectado ao barramento, há a probabilidade de que outros dispositivos conectados ao barramento sejam danificados. Para prevenir que falhas em dispositivos periféricos causem dano à unidade de processamento, decide-se pela inserção de um dispositivo isolador entre a interface de comunicação da unidade de processamento e o barramento. O barramento SPI e os pinos *chip select* também devem ser isolados.

## 7.1.3 Subsistemas Funcionais

Como informado no Capítulo 5 e explicitado da Figura 34, o sistema embarcado deve ser capaz de realizar uma troca de informações entre diferentes elementos externos que possuem características de interface distintas. Abaixo são apresentados o diagrama funcional de cada um dos subsistemas modulares responsáveis por essas interfaces, descrevendo como se dá o fluxo de informações.

### 7.1.3.1 Interface Serial

O subsistema de interface serial na unidade de vôo tem como função principal função realizar a interface entre os componentes que utilizam o padrão de comunicação serial (*encoders* e *drives*) e o barramento SPI. A comunicação com os *drives* é necessária para o acionamento dos motores na unidade de vôo e é realizada segundo o padrão RS-232. A comunicação com os *encoders* no barramento RS-485 é implementada pensando na possibilidade futura do uso de *encoders* para a medição da posição angular dos motores. Na primeira versão do protótipo, utilizam-se potenciômetros acoplados ao eixo dos motores. O uso de *encoders* traria uma melhor precisão na medição da posição angular dos motores. Após uma pesquisa inicial, verifica-se que alguns *encoders* disponíveis possuem a interface RS-485 e decide-se a implementação de uma interface RS-485 na unidade de vôo. Como o padrão RS-485 fornece uma conexão do tipo barramento, outras funcionalidades não

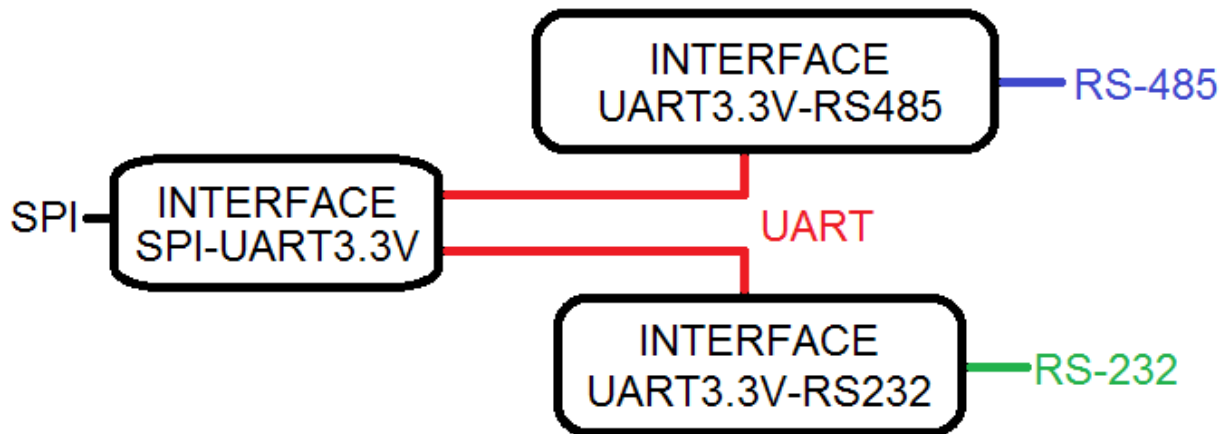


Figura 35 – Interface serial

inicialmente previstas podem ser facilmente implementadas utilizando componentes que possuem essa interface de comunicação.

A interface entre RS-232 e RS-485 é implementada no mesmo módulo, fugindo um pouco do conceito inicial de modularidade utilizado como diretriz do projeto do hardware. Essa é uma decisão de compromisso tomada buscando um menor número de componentes, um reduzido tamanho da placa de circuito impresso, um menor custo de fabricação da placa e um menor tempo de montagem e teste. A Figura 35 apresenta a arquitetura do módulo de interface serial de acordo com a descrição acima. Com essa arquitetura, apenas um módulo de interface SPI-UART possuindo dois canais UART é suficiente. Dessa maneira, um canal pode ser utilizado para a interface com o padrão RS-485 e outro pode ser utilizado para a interface com o padrão RS-232. Essa solução continua permitindo a modularização do *software*, podendo haver um processo dedicado para cada componente ligado às interfaces RS-485 e RS-232.

### 7.1.3.2 Interface GPIO

Há inúmeras possibilidades de funções que podem ser implementadas através de uma interface GPIO. Pinos de controle de componentes, interrupções de falha, proteção e fim-de-curso são alguns dos exemplos já especificados para a unidade de voo que estão sendo considerados na arquitetura do sistema. É necessário que se considere também funções adicionais que podem ser implementadas e não estão previstas na etapa do projeto. Com essas considerações, a Figura 36 apresenta a arquitetura da interface GPIO utilizada no projeto da placa de circuito impresso. Nela pode-se ver que optou-se por utilizar um expensor GPIO que possua interface SPI.

### 7.1.3.3 Interface Bateria

A unidade de atuação é alimentada através de uma série de baterias de polímero de lítio. Por questões de segurança, o sistema não pode cessar sua operação em voo de



Figura 36 – Interface GPIO

forma descontrolada. Qualquer tipo de falha na bateria pode causar um acidente. Para prevenir tal tipo de falha catastrófica, faz-se necessário o monitoramento dos níveis de tensão da bateria quando esta está em processo de descarga. Tal monitoramento permite que haja um processo de desligamento controlado do sistema antes que o nível de tensão nas baterias fiquem abaixo do necessário para operação segura de todos os componentes eletrônicos.

O dispositivo mais adequado para realizar tais funções é o sistema de gerenciamento de baterias, abreviado por BMS (do inglês *battery management system*). Os diversos tipos de BMS agregam diferentes funcionalidades, dependendo do modelo, mas em geral possuem sistemas de segurança que previnem que a bateria recarregável opere ou seja carregada pra fora de sua faixa segura de operação, que monitoram o nível de tensão, que obtêm e transmitem dados secundários, que controlam o ambiente da bateria e realizam o balanceamento de suas células [47]. Essas funcionalidades são todas úteis no contexto do trabalho aqui apresentado, e existem no mercado BMS com interface SPI, compatíveis com o barramento escolhido.

#### 7.1.3.4 Interface do Freio

O sistema de acionamento de freio, diferentemente da maior parte dos subsistemas, não é controlado pela unidade de processamento. A tarefa de controle é realizada pelos *drives*, que possuem as interfaces e a capacidade de processamento necessários para realizar tal tarefa. Um dispositivo de acionamento ainda se faz necessário, uma vez que a corrente necessária para comutar o estado do freio é maior que a fornecida pelos pinos dos *drives*. Por questões de segurança, o sistema de acionamento do freio deve fornecer também aos *drives* a informação sobre o estado de acionamento do freio, de maneira a permitir que os *drives* possam evitar o acionamento do motor quando o freio estiver também acionado. Um acionamento do tipo chave na configuração adequada é simples e é suficiente para atender a todas essas funcionalidades em conformidade com os requisitos do projeto.

### 7.1.3.5 Interface Analógica

O subsistema da interface analógica na unidade de voo é importante para realizar a conversão e o processamento dos sinais analógicos que entram no sistema. Eles devem ser convertidos para sinais digitais que possam ser transmitidos pelo barramento de comunicação para serem acessados pela unidade de processamento. Os sinais analógicos são fornecidos pelos sensores descritos em 5 e o dispositivo usado para a conversão é chamado ADC (*analog to digital converter*).

Os sinais analógicos podem possuir ruídos em altas frequências que gerem problemas de *aliasing*. Uma forma de mitigar tais problemas é implementando um filtro antes do conversor analógico-digital que reduza ou elimine as componentes de alta frequência do sinal que não podem ser adequadamente representadas pelo conversor digital. Esse filtro é denominado filtro *antialiasing*.

Certo tipo de pré-amplificação pode ser também útil. Aumentando a intensidade do sinal na entrada, pode-se aproveitar melhor a faixa de entrada do ADC e portanto, obter uma resolução maior.

Uma solução integrada que possui todas as funcionalidades descritas nessa seção é denominada *Analog Front End*.

### 7.1.3.6 Interface Potenciômetros

Os potenciômetros são utilizados ligados aos *drives* como sensores da posição angular do eixo dos motores. Embora não necessitem de nenhuma interface para desempenhar essa função, algumas outras funcionalidades ligadas à segurança e impedância de saída desse sistema podem ser implementadas.

Um fim-de-curso do eixo do motor implementado em hardware pode ser usado para evitar que o motor acione para além dos limites mecânicos dos potenciômetros, garantindo a segurança de operação nesse aspecto. Um sinal gerado por um comparador quando o sinal na saída do potenciômetro se encontra perto dos níveis de tensão limítrofes pode ser enviado para os *drives* para implementar tal funcionalidade.

Um seguidor de ganho unitário na saída do potenciômetro permite que haja um perfeito acoplamento de impedâncias.

## 7.1.4 Arquitetura do Sistema

A arquitetura completa do sistema, mostrando todas os subsistemas e suas interfaces pode ser observada na Figura 37. O diagrama apresenta as partes de *software* e *hardware* do sistema. Os três barramentos estão localizados nas três partes físicas que compõem o sistema: a unidade de solo, a unidade de voo e a unidade inercial. Cada uma delas tem

uma unidade de processamento onde os processos que acessam as informações localizadas no seu barramento são executados. Essas unidades de processamento estão interconectadas através de uma rede WiFi. Cada sensor e atuador possui um processo dedicado para realizar as operações de interface particulares a cada componente. Cada processo é executado na unidade de processamento localizada na parte física onde os respectivos sensores e atuadores se encontram. Através dessa rede WiFi, é possível a comunicação entre processos em diferentes unidades de processamento. Além dos processos dedicados às interfaces, um processo do tipo servidor armazena as informações obtidas pelos processos que acessam as grandezas do sistema e um processo de controle utiliza essas informações disponibilizadas pelo servidor para calcular a ação de controle e enviar os comando aos atuadores. A transmissão dos dados entre os processos deve ser padronizada através de um protocolo de transporte e de serialização de dados. Essa arquitetura permite uma grande flexibilidade no sistema, tanto no hardware quanto no software.



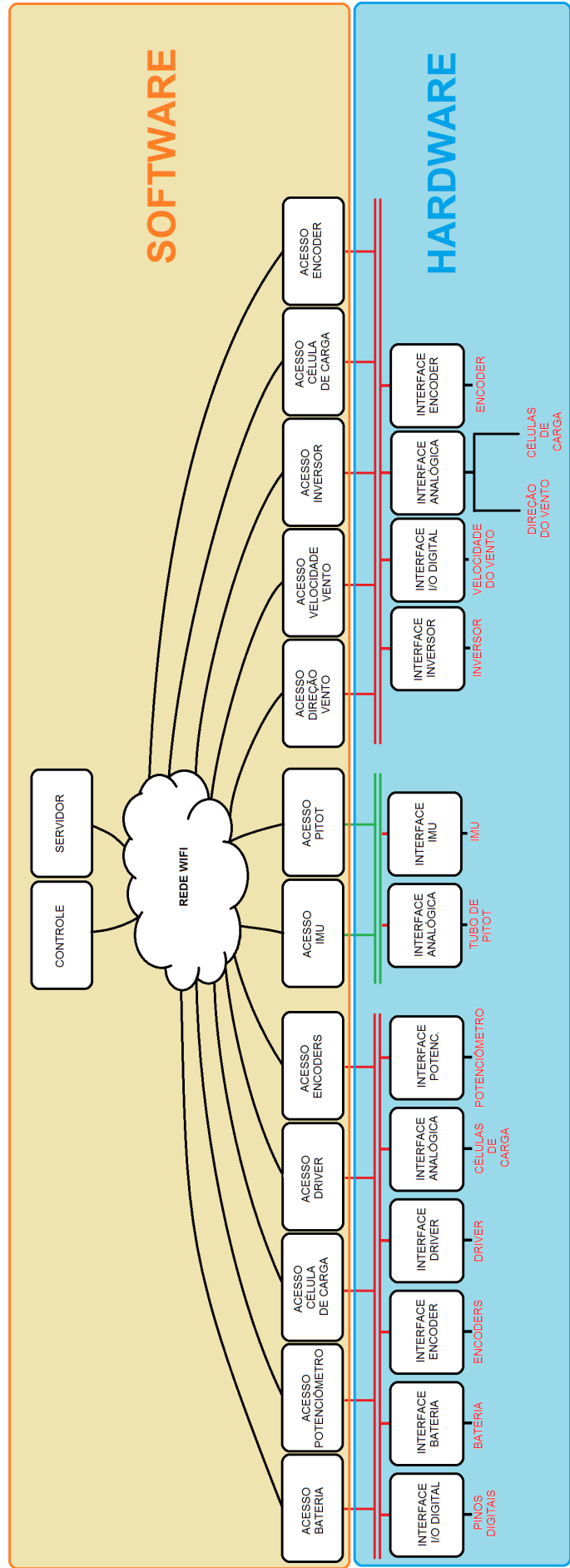


Figura 37 – Arquitetura do sistema do segundo protótipo



## 8 Detalhamento do Hardware

Neste capítulo são descritos com uma maior profundidade os elementos de *hardware* escolhidos para integrar a placa de condicionamento de sinais da unidade de vôo do segundo protótipo. São também apresentadas as razões que motivaram tais escolhas e algumas especificações técnicas relevantes para o desempenho das funcionalidades esperadas. Após essa seção, este capítulo contém a descrição dos circuitos necessários para a implementação de cada uma das funcionalidades previamente especificadas, apresentando as versões finais do esquemático da PCB projetada para o sistema de aerofólio cabeado.

O conteúdo apresentado neste capítulo foi em sua totalidade realizado pelo autor.

### 8.1 Hardware

#### 8.1.1 Raspberry Pi Zero

O Raspberry Pi Zero é um sistema de linux embarcado de baixo custo e pequeno volume [48]. Possui um processador de 1 GHz, 512 MB de memória RAM, soquetes para cartões micro-SD e para cabos micro-USB. Possui também um *header* de 40 pinos com 8 pinos GPIO e interface SPI com dois pinos *chip-select*. É alimentado por 5 V e consome de 100 a 350 mA.

O Raspberry Pi Zero é a escolha de unidade de processamento para a unidade de vôo. Suas funcionalidades atendem os requisitos do sistema, mas seu baixo custo a destacou dentre as outras opções consideradas e foi o fator decisivo para sua escolha.

#### 8.1.2 WiFi

Uma rede WiFi é a escolha para a camada de rede da interface de comunicação sem fio entre as diferentes partes do sistema. O estabelecimento de uma rede WiFi permite o uso de diversos protocolos diferentes sobre as camadas superiores de rede fazendo com que haja uma grande flexibilidade no sistema.

#### 8.1.3 Componentes Eletrônicos

Os componentes eletrônicos apresentados abaixo são escolhidos preferencialmente na configuração SMD, a fim de diminuir a superfície total e o peso da placa de circuito impresso projetada. Opta-se por padronizar o nível de tensão de alimentação dos circuitos integrados na placa em 3.3 V *single-supply*. Ao evitar níveis de tensão diferentes, pode-se simplificar o circuito de alimentação da placa, minimizando o número de circuitos conversores de

tensão. Os circuitos conversores de tensão possuem uma eficiência energética abaixo de 100% o que introduz perdas de energia no sistema e conseqüentemente um menor tempo de operação com baterias. Opta-se também, sempre que possível, pela escolha de dispositivos com baixo consumo de energia. Desta forma, pode-se estender ao máximo o tempo de operação do sistema na bateria. Dá-se preferência também por dispositivos com alta taxa transferência de dados pela porta SPI. Isto é importante para o sistema, pois uma alta taxa de transferência de dados possibilita um menor tempo de amostragem do laço de controle do sistema, permitindo tempos de resposta menores e controladores mais robustos.

#### 8.1.3.1 *Transceiver* SPI-UART SC16IS762

O SC16IS762 é uma interface I2C/SPI (modo escravo) para um canal dual *full-duplex* UART de alta performance [49]. Possui baixa corrente de operação e de estado de espera. Ele está disponível no encapsulamento TSSOP de 28 pinos. Opera em dois níveis de tensão (2,5V e 3,3V). Possui um *buffer* FIFO de 64 bytes tanto no transmissor quanto no receptor. Esta funcionalidade é necessária pois o barramento SPI estará sendo compartilhado por outros dispositivos e nem sempre o dispositivo mestre ou o barramento SPI poderá estar imediatamente disponível para efetuar a leitura da mensagem quando o *transceiver* desejar transmitir uma mensagem pelo barramento SPI. As mensagens então são armazenadas em um *buffer* a espera das operações de leitura. O SC16IS762 também possui uma alta taxa de transferência de dados, de até 15 Mbit/s. O *transceiver* também possui um pino por onde pode mandar pedidos de interrupções (IRQ) quando ocorrem erros ou outros eventos.

#### 8.1.3.2 Porta Lógica Configurável Multi-Função SN74LVC1G57

O SN74LVC1G57 é uma porta lógica configurável multi-função projetada para operar com tensões contínuas de 1,65 V a 5,5 V [49]. Está disponível no encapsulamento SOT-23. Possui múltiplas funções lógicas a serem escolhidas pelo usuário, de forma que o estado da saída é determinado pelos níveis lógicos dos 3 pinos de entrada. Possui disparador Schmitt nos pinos de entrada, que podem receber tensões de até 5.5 V. Este dispositivo é o escolhido para compor um módulo de conversão UART-RS485 que suporta barramentos UART com níveis lógicos de tensão de 3,3 V e 5 V. Tal módulo é projetado tendo como base o circuito apresentado em [29].

#### 8.1.3.3 *Buffer e Line driver* SN74AHC1G125

O SN74AHC1G125 é um *buffer* com uma porta de saída com três estados [50]. Pode ser alimentado com tensões entre 2 V e 5,5 V, com baixo consumo de energia. Está disponível no encapsulamento SOT-23.

#### 8.1.3.4 Transceiver UART-RS-232 MAX3227

O *transceiver* MAX3227 é um dispositivo que realiza as conversões de nível lógico das interfaces UART de 3,3 V ou 5 V para o padrão elétrico RS232 [51]. Ele possui a função *AutoShutdown Plus* que reduz os níveis de corrente de operação, podendo alcançar correntes tão baixas quando 1  $\mu\text{A}$ . O dispositivo permite a operação em taxas de transmissão de até 1 Mbps. Ele está disponível no encapsulamento SSOP de 16 pinos.

#### 8.1.3.5 Comparador Analógico TLV1704A

O TLV1704A é um comparador analógico que possui entradas *rail-to-rail* e uma ampla faixa de tensão de alimentação (+2.2 V a 36 V) [52]. A saída em coletor aberto permite que o pino seja acionado para tensões de até 36 V acima da tensão negativa de alimentação do circuito. Este dispositivo possui quatro canais, tensão de *offset* de 300  $\mu\text{V}$  e corrente quiescente de 55  $\mu\text{A}$ . Estas características aliadas à sua disponibilidade no encapsulamento TSSOP de 14 pinos fazem com que este dispositivo seja ideal para a aplicação pretendida.

#### 8.1.3.6 Conversor Analógico-Digital ADS1220

O ADS1220 é um conversor analógico-digital do tipo  $\Delta\Sigma$  de alta precisão com 24 bits que possui diversas funcionalidades para reduzir o custo e o número de componentes de sistemas que usam sensores de baixos sinais [53]. Possui um multiplexador de entradas com quatro canais e um amplificador de ganho programável de 1 V/V a 128 V/V, além de correntes de excitação de sensores e referência de tensão. Pode realizar conversões em até 2000 amostras por segundo, com a opção de utilizar um filtro digital integrado para diminuir a quantidade de ruído no sinal. Pode realizar medições de sinais diferenciais ou pseudo-diferenciais, com uma alta impedância de entrada. Está disponível no encapsulamento TSSOP de 16 pinos e possui consumo de corrente tão baixo quanto 120  $\mu\text{A}$  em modo de economia de energia. Sua interface de comunicação é no padrão SPI de 4 pinos.

#### 8.1.3.7 Expansor de GPIO MAX7301A

O módulo expansor de GPIO MAX7301 possui capacidade de expandir em 28 a quantidade de pinos GPIO de um microprocessador através de uma interface SPI [54]. Cada porta é individualmente configurável com opções de lógica *push-pull*, *pullup* com lógica de disparador Schmitt ou detector de transição com interrupção. O módulo é controlável através de uma interface SPI de 4 pinos que pode operar em velocidades de até 26 MHz. Opera em tensões de alimentação de 2,5 V até 5,5 V com consumo de corrente entre 5,5  $\mu\text{A}$  e 270  $\mu\text{A}$ .

### 8.1.3.8 Sistema de Gerenciamento de Bateria BQ76PL536A

O Sistema de gerenciamento de bateria BQ76PL536A possui capacidade de suportar de 3 a 6 células de bateria de íons de lítio com qualquer composição química [55]. Possui uma interface SPI de até 1 MHz que permite que múltiplos BQ76PL536A sejam empilhados para o monitoramento de unidades de bateria com mais células. Possui um conversor analógico-digital de alta precisão para medir a tensão das células individualmente. Possui monitoramento de sub e sobretensão em cada canal para proteção. Possui também saídas para controle de balanceamento das células da bateria. Consome 45  $\mu\text{A}$  em modo ocioso. Está disponível no encapsulamento HTQFP de 64 pinos.

### 8.1.3.9 Referência de Precisão MAX6143

A referência de tensão MAX6143 possui baixo ruído e alta precisão [56]. Consome 340  $\mu\text{A}$  de alimentação e pode fornecer 300 mA de corrente na sua saída. Possui opção de desligamento com baixo consumo de corrente para economizar energia. Está disponível no encapsulamento SO de 8 pinos.

### 8.1.3.10 Isolador Digital ADUM24xE

O ADUM24xE é um circuito isolador de quatro canais que opera em tensões de 2,7 V a 5,5 V com baixas correntes de entrada e alta taxa de transmissão de dados [57]. Está disponível no encapsulamento SOIC de 16 pinos.

### 8.1.3.11 Regulador de Tensão LM3150

O regulador de tensão LM3150 é um controlador do tipo *step-down* simples e fácil de usar capaz de fornecer até 12 A de corrente de saída em aplicações típicas [58]. Pode operar com tensões de entrada de 6 V a 42 V e possui uma tensão de saída regulável de até 0.6V. A velocidade da frequência de chaveamento é ajustável até 1 MHz e a sua arquitetura permite projetos de alta eficiência. Possui diversas funcionalidades de proteção, como desligamento térmico, travamento de subtensão, proteção de sobretensão, proteção de curto-circuito e limite de corrente permitem uma operação segura e robusta. Está disponível no encapsulamento HTSSOP de 14 pinos.

### 8.1.3.12 Regulador de Tensão LM43602

O LM43602 é um conversor de tensão DC-DC do tipo *step-down* capaz de acionar 2 A de corrente na carga de uma faixa de tensão de entrada de 35V a 36V [59]. Possui grande eficiência, precisão e está disponível em um encapsulamento pequeno. Possui como funcionalidades de proteção o desligamento térmico, o travamento de subtensão, o limite de corrente ciclo-a-ciclo e a proteção de curto-circuito na carga. Está disponível no encapsulamento HTSSOP de 16 pinos.

### 8.1.3.13 Outros Componentes

Alguns outros componentes já descritos são utilizados nesse projeto, como o LM6144, descrito na seção 2.3.1.2, e o MAX13487, descrito na seção 2.1.8.

## 8.1.4 Esquemáticos

A seguir os esquemáticos usados para implementar as interfaces do sistema previstas no Capítulo 7 são explicados em detalhe.

### 8.1.4.1 Interface Serial

A Figura 38 apresenta o circuito utilizado para implementar a interface serial no sistema. O componente base ao redor do qual é montada essa seção do circuito é o SC16IS762, melhor descrito na seção 8.1.3.1. De acordo com a Figura 35, o SC16IS762 é o componente utilizado para implementar a funcionalidade da interface SPI-UART3,3V. A função da interface UART3,3V-RS485 é realizada pelos componentes MAX13487 e SN74LVC1G57, descritos nas seções 2.1.8 e 8.1.3.2, enquanto a função da interface UART3,3V-RS232 é desempenhada pelo MAX3227, descrito na seção 8.1.3.4.

A interface SPI do SC16IS762 está conectada no barramento através dos pinos 11 a 13 desse dispositivo. O pino de requisição de interrupção do tipo coletor aberto (que necessita do resistor *pull-up* (R1) e o pino de *hardware reset* estão conectados à pinos do expander de GPIO para que ele trate estes sinais gerados e recebidos pelo SC16IS762. O SC16IS762 precisa de um cristal externo com um pequeno circuito para gerar um sinal de *clock* para o dispositivo. O circuito foi determinado com base no circuito referência apresentado em [49]. O cristal (Q1) possui uma frequência compatível com a *baud rate* necessária para a comunicação com o *encoder* especificado na seção 2.1.7, de acordo com o requisito RNF10. A frequência do cristal é escolhida de forma que também seja compatível com a *baud rate* máxima que o MAX3227 suporta, de modo a maximizar a taxa de transferência de dados, como sugerido na seção 8.1.3. A porta UART A do SC16IS762 está conectada à interface RS-485 e a porta B ao MAX3227. O circuito utilizado para implementar a interface UART3,3V-RS485 é baseado em [29]. O circuito auxiliar do MAX3227 é determinado baseado em suas aplicações típicas descritas em [51].

### 8.1.4.2 Isolador

Os dispositivo usado para realizar o isolamento dos pinos do barramento é o ADuM24x, melhor descrito na seção 8.1.3.10. Os capacitores de desacoplamento (C48-C53) são utilizados nos ADuM24x segundo as recomendações da seção de aplicação no seu *datasheet* [57]. As resistências são utilizadas nas entradas e saídas para limitar as

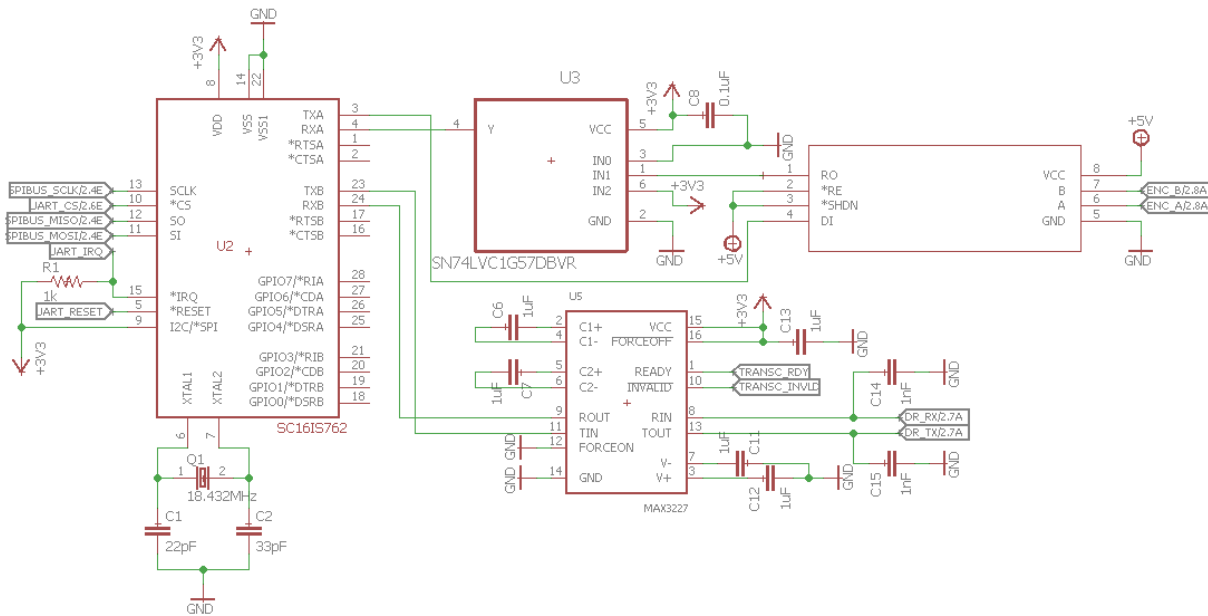


Figura 38 – Esquemático da interface serial

correntes que passam por esse dispositivo, como uma maneira de proteger os isoladores e os dispositivos a eles conectados.

### 8.1.4.3 Expansor GPIO

O circuito utilizado é o típico indicado no *datasheet* do MAX7301 [54]. Para seu uso com outros dispositivos ligados ao barramento SPI, é necessário implementar uma porta de três estados na porta DOUT de sua interface SPI. O padrão SPI espera que o pino DOUT dos dispositivos escravos tenha três estados, mas o pino DOUT do MAX7301 não possui o estado de alta impedância [54]. A implementação da porta de três estados é baseada na nota de aplicação indicada pelo próprio *datasheet* [60] utilizando o SN74AHC1G125.

### 8.1.4.4 Sistema de Gerenciamento de Bateria

O circuito do sistema de gerenciamento de bateria, melhor descrito na seção 8.1.3.8, é baseado nas orientações apresentadas em seu *datasheet* [55]. Filtros *anti-aliasing* são colocados nas entradas analógicas e capacitores são colocados nas saídas dos reguladores de tensão para garantir estabilidade. A unidade de processamento está conectada ao BQ76PL536A pela interface SPI *host-to-device*.

### 8.1.4.5 Acionamento do Freio

O circuito de acionamento do freio é o mesmo apresentado na seção 4.2.3.



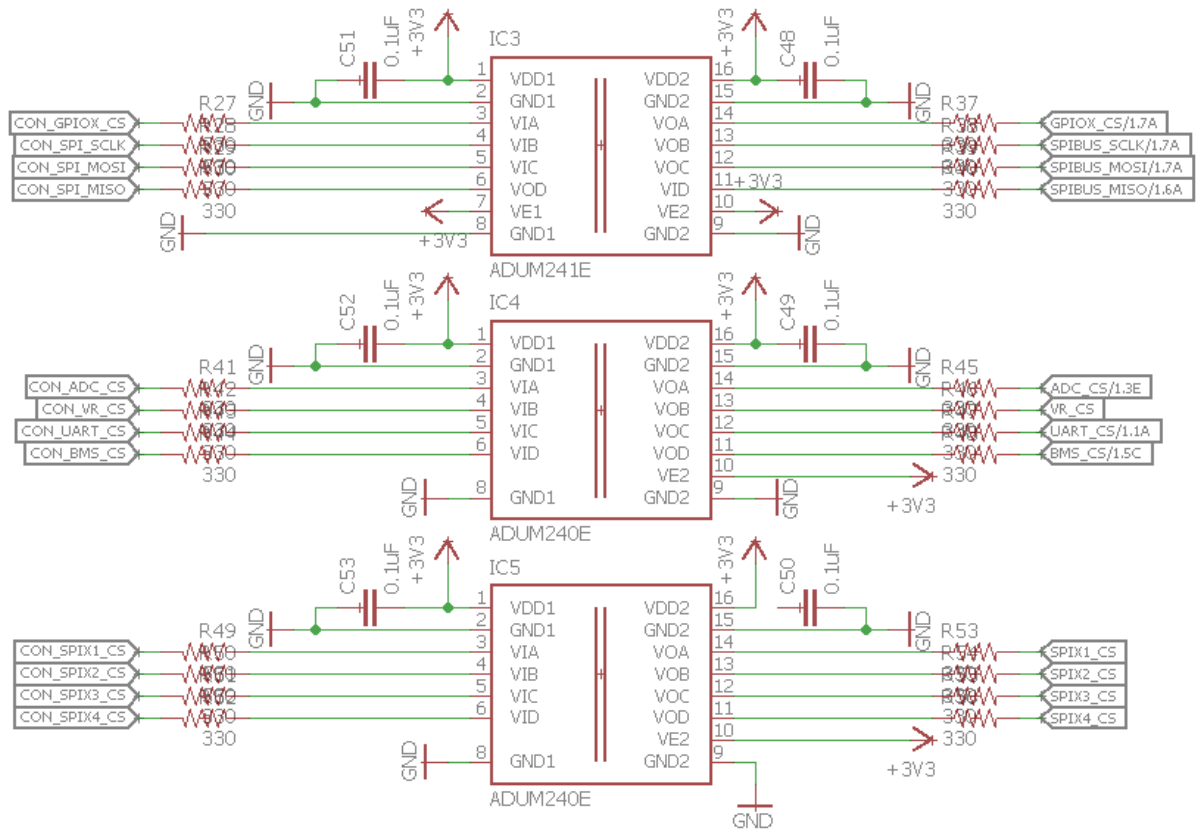


Figura 39 – Esquemático do circuito isolador

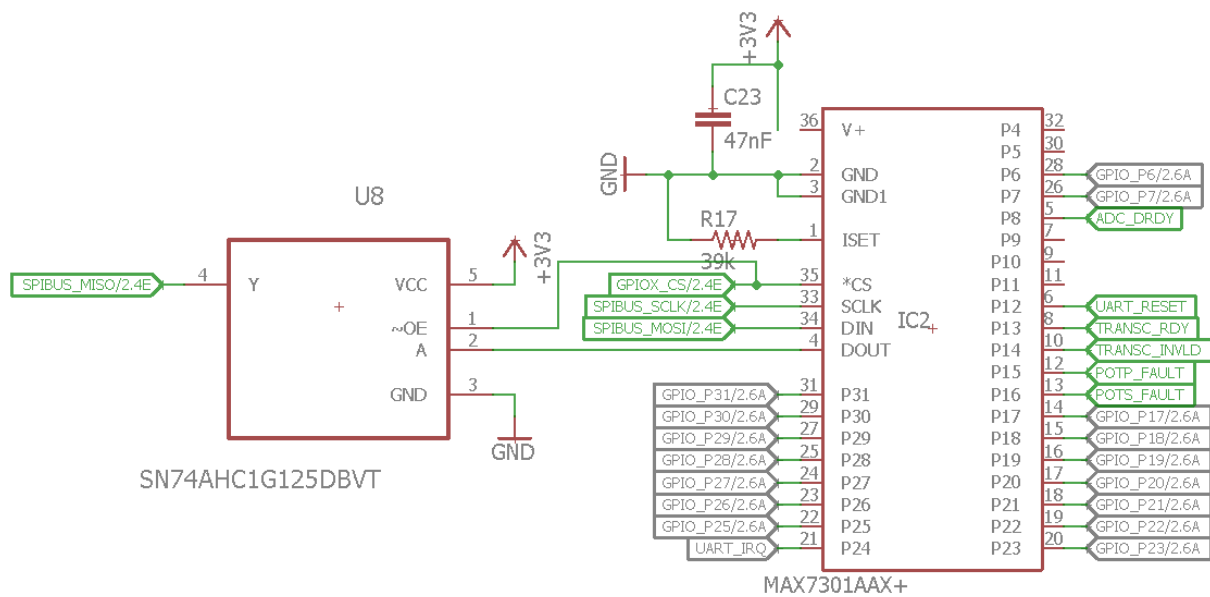


Figura 40 – Esquemático da interface GPIO

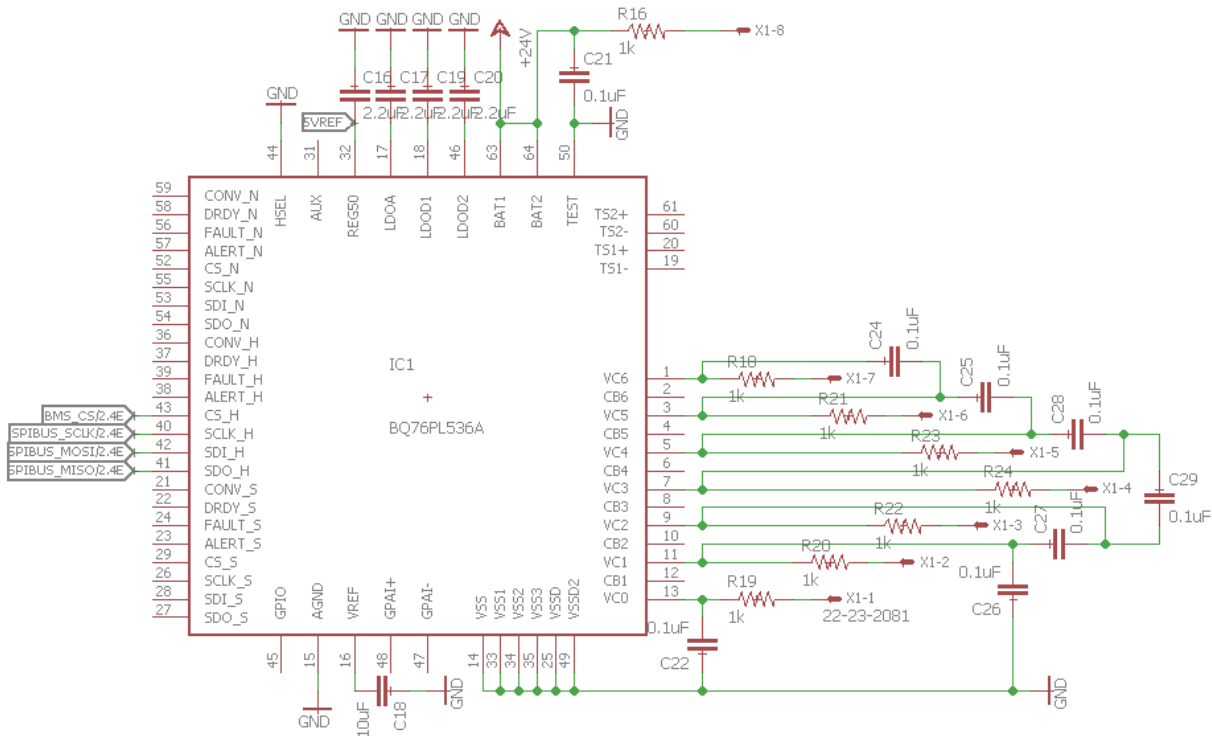


Figura 41 – Esquemático do sistema de gerenciamento de bateria

#### 8.1.4.6 Interface Analógica

A interface analógica é projetada tendo como base as considerações apresentadas em [61] e o diagrama apresentado na Figura 42. O diagrama apresenta uma ponte de Wheatstone completa alimentada por uma tensão de excitação de 5 V. As saídas da ponte de Wheatstone são conectadas às entradas diferenciais do ADC e tensão que alimenta a ponte está conectada aos pinos de referência do ADC. Opta-se pela simplicidade do design dessa parte, evitando a inserção de novos componentes que possam gerar ruídos. Os capacitores C3, C4 e C5 são opcionais e podem ser utilizados para atenuar os ruídos nesses sinais. O esquemático está apresentado em 43.

#### 8.1.5 Alimentação

Todos os sistemas apresentados nesse capítulo necessitam ser energizados de acordo com as especificações dos dispositivos que os compõem. Pode-se observar essas especificações apresentadas na seção 8.1.3 e verificar que os componentes possuem três níveis diferentes de tensões de entrada: 3,3 V; 5 V e 24 V. Tem-se disponível como fonte primária de energia a tensão na bateria, que é de aproximadamente 24 V. É necessário, então, o projeto de uma fonte de tensão que abaixe essa tensão e atenda as especificações de todos os sistemas.

Os circuitos das fontes 3,3 V e 5V digitais são projetados utilizando a ferramenta de projeto de fontes de alimentação da Texas Instruments chamada WEBENCH® *Power Designer*. O WEBENCH® *Power Designer* cria projetos customizados de fontes de

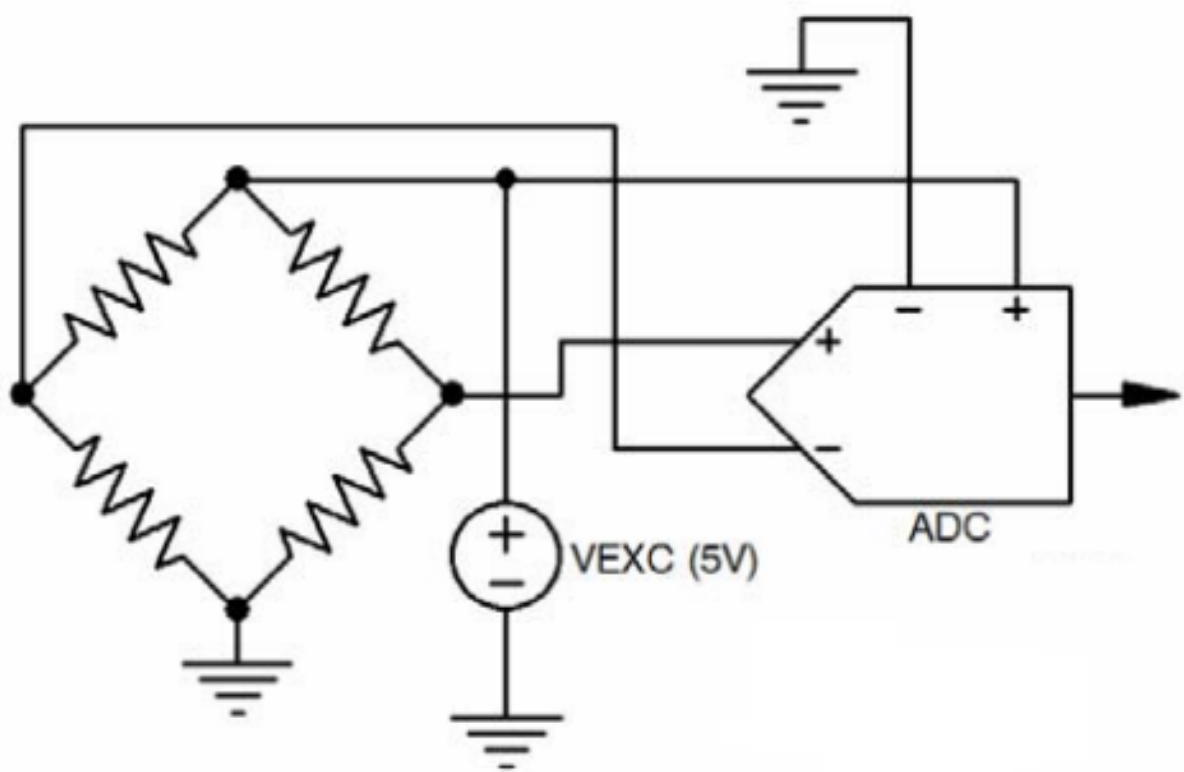


Figura 42 – Diagrama da interface analógica

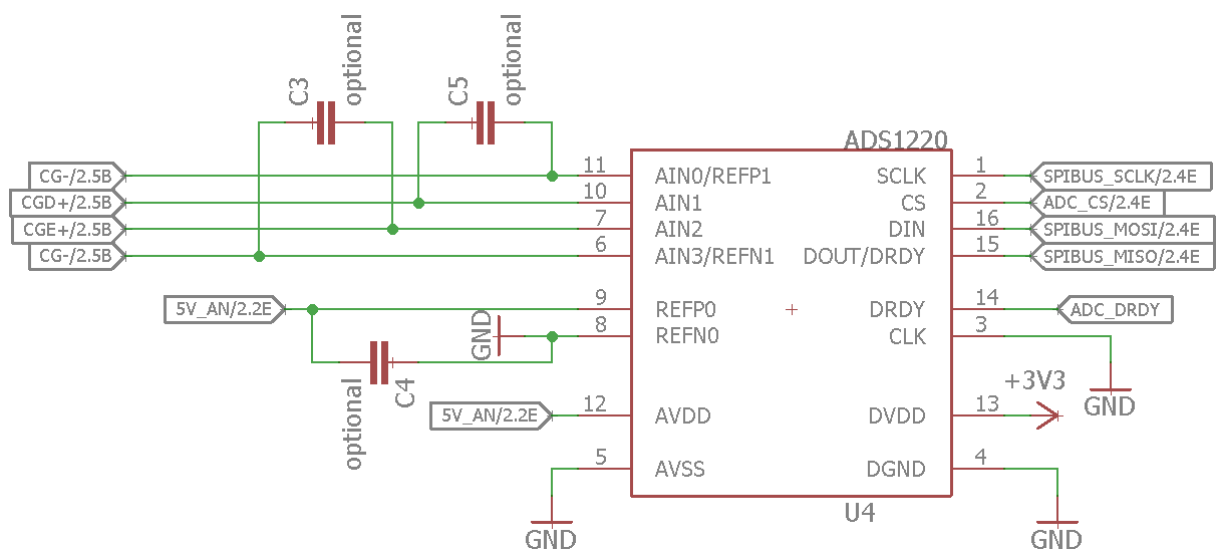


Figura 43 – Esquemático da interface analógica

energia, e recebe diversos parâmetros de entrada para o projeto, como faixa de tensão na entrada, as tensões e correntes das cargas e a faixa de tolerância para as tensões das cargas. Possui um ajuste de otimização que altera o projeto para que seja mais barato, compacto ou mais eficiente. Estes são os parâmetros mais relevantes da ferramenta utilizados para a elaboração desse projeto.

Para a definição dos parâmetros, um valor de 2 A é considerado para o barramento de 5 V. Este valor surge da análise das especificações das unidades de processamento, os elementos que exigem uma maior corrente da fonte de alimentação. Entre as unidades consideradas, a que apresenta um maior consumo de corrente exige 600 mA. Somado a isso, o módulo WiFi é o segundo componente que mais consome energia, com aproximadamente 350 mA. O restante dos dispositivos neste barramento possuem um consumo de energia desprezível. Adicionando uma margem de segurança prevendo novas funcionalidades que possam ser adicionadas ao sistema, utilizamos o valor de 2 A para o projeto dessa fonte.

Por análise semelhante, os dispositivos conectados ao barramento de tensão 3,3 V consomem somados no máximo 335 mA. Adicionando uma margem de segurança, o parâmetro de corrente utilizado para o projeto é de 0,5 A.

O ajuste de otimização é setado para a criação de um projeto mais eficiente, de maneira a estender o tempo de operação do sistema. A partir do projeto criado com tais parâmetros, são necessárias pequenas modificações para adequar o projeto. Os indutores sugeridos pelo WEBENCH<sup>®</sup> *Power Designer* atendem ao ajuste de otimização, porém os componentes escolhidos são muito grandes e pesados. Ocorre então a substituição de tais componentes por outros menores e ligeiramente menos eficientes, como parte de uma solução de compromisso.

Os esquemáticos dos circuitos de alimentação obtidos dessa forma são apresentados nas Figura 44 e 45.

#### 8.1.5.1 Referência analógica 5 V

A referência analógica é utilizada para a alimentação de toda a parte analógica e para excitação das pontes de Wheatstone. O circuito é montado tomando como base o componente MAX6143, melhor descrito na seção 8.1.3.9. O MAX6143 é um componente de simples utilização que necessita apenas de uma tensão de alimentação de 2 V acima da tensão desejada. Segundo a orientação do *datasheet* [56], os capacitores C32 e C37 são opcionais.

#### 8.1.5.2 Potenciômetros

O circuito da interface dos potenciômetros é baseado no circuito utilizado no primeiro protótipo, descrito na seção 2.3.3. Um sinal de fim-de-curso implementado em

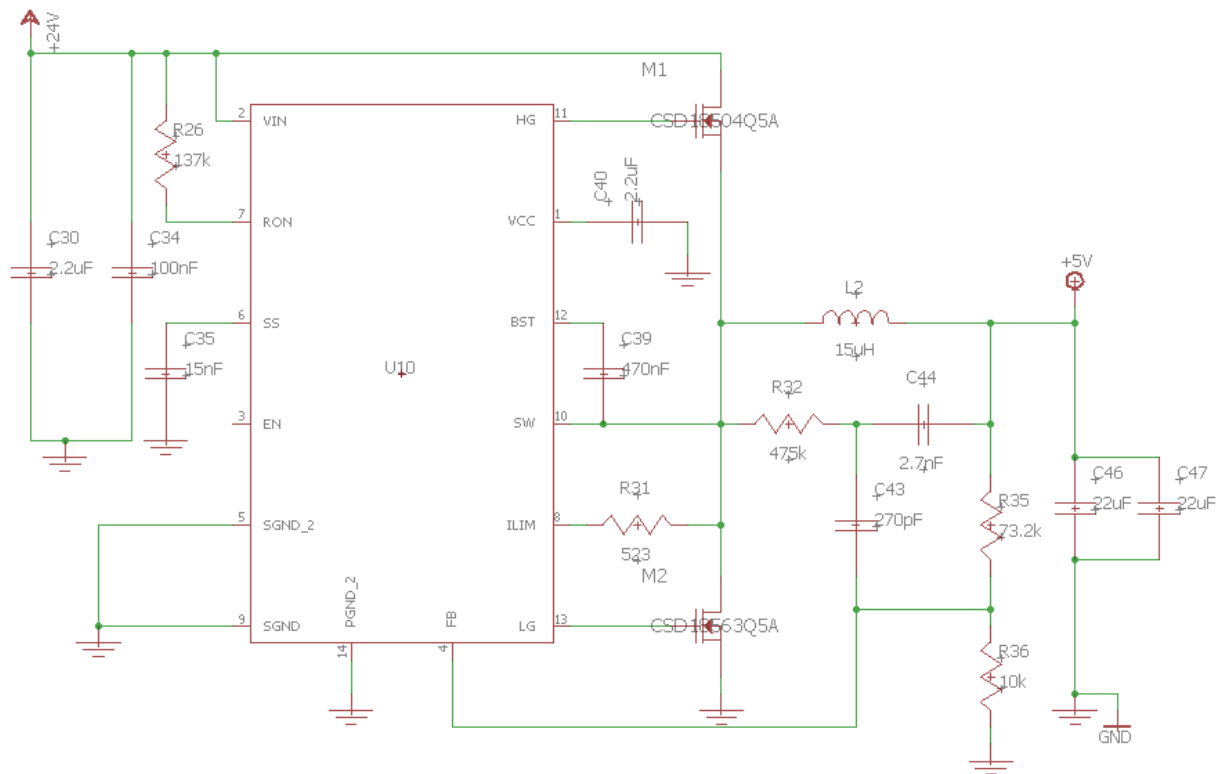


Figura 44 – Esquemático da fonte de alimentação de 5 V

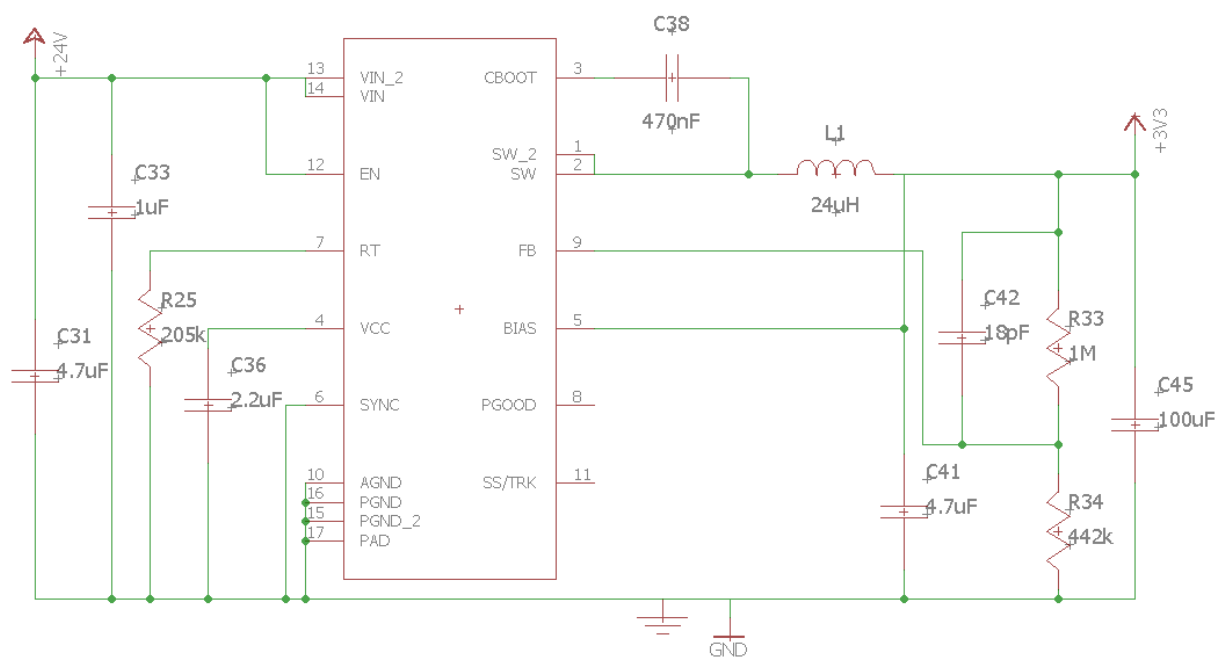


Figura 45 – Esquemático da fonte de alimentação 3,3 V

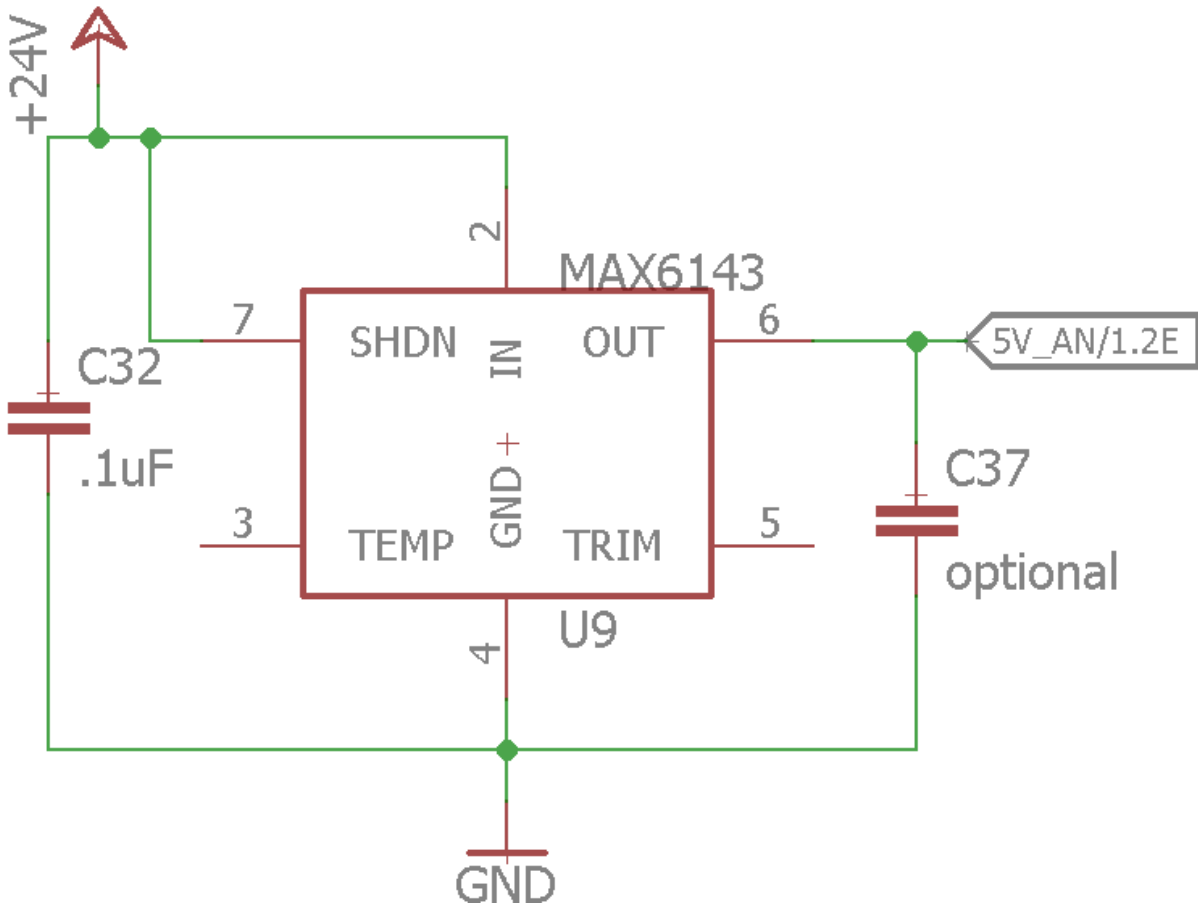


Figura 46 – Esquemático da referência analógica de 5V

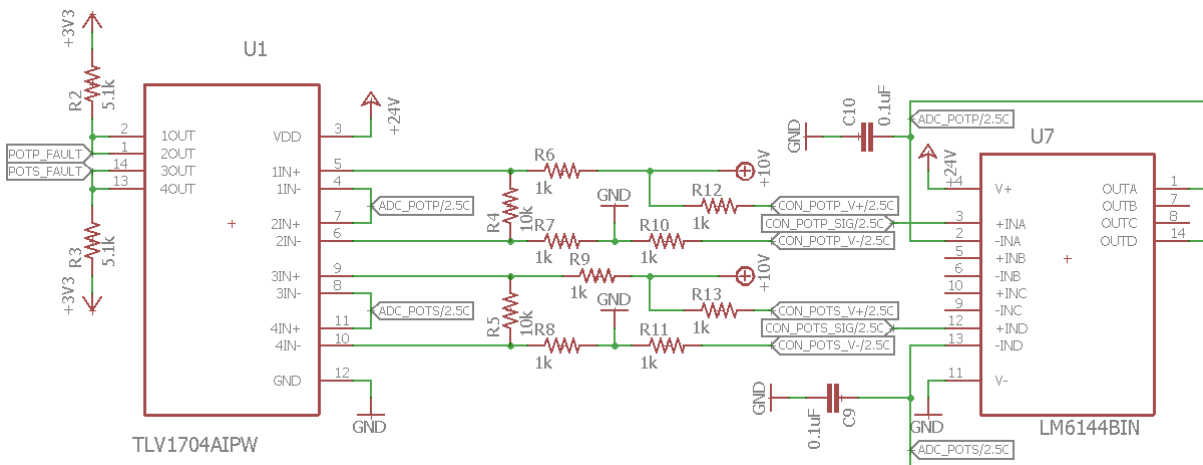


Figura 47 – Esquemático da interface dos potenciômetros

*hardware* é adicionado através do TLV1704A. O TLV1704A compara a tensão do cursor do potenciômetro com a tensão que representa os limites de 10 e 90 % de sua extensão. Se a tensão no cursor estiver fora desses limites, um sinal de fim-de-curso é gerado nos pinos POTP\_FAULT e POTS\_FAULT. O circuito pode ser visto na Figura 47.

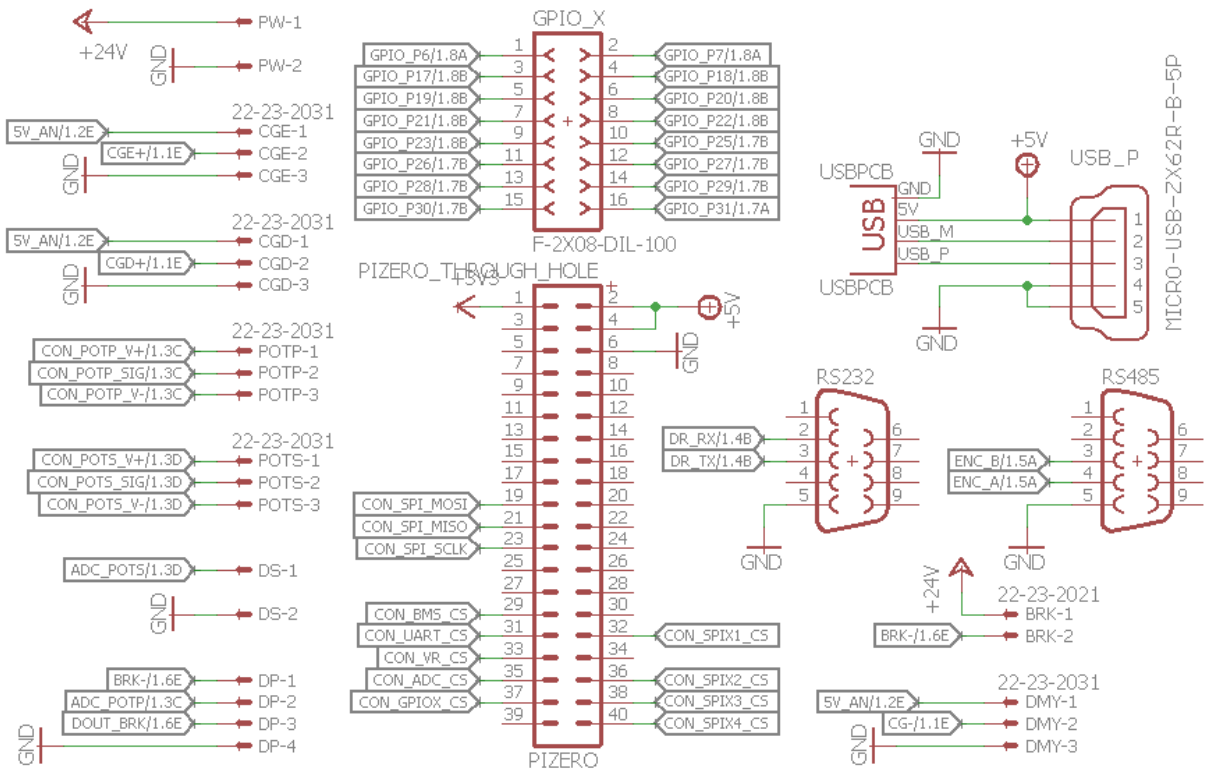


Figura 48 – Esquemático dos conectores da placa

### 8.1.5.3 Conectores

O esquemático que apresenta as conexões entre os subsistemas está apresentado em 48. Ele mostra a quais pinos dos dispositivos os pinos dos conectores estão conectados. Observa-se que os pinos *extra* disponíveis no expensor GPIO são conectados a um conector genérico, para que se possa ter acesso a eles de fora da placa caso haja alguma outra funcionalidade que se deseje implementar no futuro.





Parte III

Conclusão



## 9 Considerações Finais

Os esquemáticos apresentados nesse documento nos Capítulos 4 e 8 compõem o projeto das últimas versões das placas de circuito impresso embarcadas nos protótipos do UFSCKite. A placa para o primeiro protótipo foi fabricada e atualmente é a solução adotada como interface eletrônica para esses experimentos. Ela se encontra operando de forma funcional. Sobre esse *hardware*, alguns algoritmos de controle foram testados e outros continuam a ser desenvolvidos e experimentados. Um vídeo apresentando alguns resultados com o *hardware* aqui descrito na primeira parte do documento pode ser visto em [62]. Podemos observar desta forma que o primeiro protótipo atingiu os objetivos propostos na seção 1.3 e tem sido utilizado para o desenvolvimento de novas tecnologias em AWE.

O segundo protótipo, até o momento final da redação deste documento, encontra-se em processo de fabricação. O projeto informacional e conceitual realizado permite uma compreensão detalhada para o desenvolvimento do seu *hardware* e *software* embarcado. Essa compreensão permitiu que o projeto da placa de circuito impresso do segundo protótipo pudesse ser realizado de maneira que cumprisse as expectativas criadas no momento de sua concepção. O trabalho descrito nesse documento estabelece um sólido fundamento sobre o qual as próximas etapas no desenvolvimento do segundo protótipo podem se basear. Os esquemáticos apresentados na seção 8.1.4 estão prontos para serem tomados como base para a criação do leiaute da placa de circuito impresso utilizada na unidade de voo. O esboço da arquitetura do sistema apresentado na seção 7.1.4 pode ser tomado como base para o desenvolvimento do *software* que operará em todo o sistema. Novas funcionalidades podem ser observadas, implementadas e adequadas ao protótipo seguindo as diretrizes propostas. A continuação do processo de desenvolvimento do segundo protótipo pode trazer mais informações acerca dos resultados aqui apresentados. Futuramente, o segundo protótipo se encontrará operacional, expandindo consideravelmente os limites do potencial do desenvolvimento de tecnologias do grupo UFSCKite. Novas estratégias de controle, análises sobre a viabilidade econômica da tecnologia, sistemas de geração de energia e muitas outros aspectos podem ser testados e validados através de experimentos nesse protótipo no futuro.

De forma geral, são claras as contribuições deste trabalho para o desenvolvimento de ambos os protótipos do UFSCKite, auxiliando a continuidade e a expansão dos trabalhos de pesquisa do grupo. Esses trabalhos de pesquisa realizados no grupo buscam um melhor conhecimento, domínio e desenvolvimento de tecnologias na área de aproveitamento de energia eólica em elevadas altitudes para a geração de energia elétrica. Desta maneira, é evidente a relevância deste trabalho para o alcance desses objetivos.

As atividades apresentadas neste documento consistem na monografia apresentada como trabalho final da disciplina de projeto de fim de curso do curso de engenharia de controle e automação. Segundo [63], a disciplina busca "arraigar no aluno os conhecimentos auferidos no curso e desenvolver sua capacitação e auto-confiança na geração de soluções através da execução de um projeto prático a nível laboratorial ou industrial". O projeto descrito nesse documento cumpre os objetivos propostos pela disciplina. Foram arraigados conhecimentos auferidos pelo curso nas áreas de microcontroladores e informática industrial, circuitos e eletrônica, metrologia e instrumentação e metodologias de projeto. Através do projeto foi possível o desenvolvimento do autor na geração de soluções de engenharia, produzindo capacitação e auto-confiança. Tudo isto através do desenvolvimento deste projeto que trouxe experiência prática de engenharia dentro do contexto de um laboratório de pesquisa.

# Referências

- 1 SILVA, R. Saraiva da; LELLIS, M. D.; TROFINO, A. Passive phase design of a pumping kite wind generator. In: BOJE, E.; XIA, X. (Ed.). *Proceedings of the 19th IFAC World Congress*. Cape Town, South Africa: International Federation of Automatic Control, 2014. v. 19, n. 1, p. 6764–6769. Citado 4 vezes nas páginas 9, 24, 25 e 70.
- 2 FECHNER, U.; SCHMEHL, R. Model-Based Efficiency Analysis of Wind Power Conversion by a Pumping Kite Power System. In: AHRENS, U.; DIEHL, M.; SCHMEHL, R. (Ed.). *Airborne Wind Energy*. [S.l.]: Springer-Verlag, 2014. cap. 14, p. 249–269. Citado 3 vezes nas páginas 9, 24 e 25.
- 3 BEAGLEBONE Black wiki. <<http://elinux.org/Beagleboard:BeagleBoneBlack>>. Accessed: 2015-08-09. Citado 3 vezes nas páginas 9, 33 e 34.
- 4 DAVIS 7911 product description website. <<http://www.universmeteo.com/detail-article-r-7911-t-anemometre-davis-instruments-7911-c-station-davis-instruments-sc-pieces-de-rechange>>. Accessed: 2015-08-09. Citado 3 vezes nas páginas 9, 36 e 37.
- 5 TEXAS INSTRUMENTS. *SIMPLE SWITCHER® Power Converter 150 kHz 3A Step-Down Voltage Regulator*. 2013. <<https://www.fairchildsemi.com/datasheets/LM/LM2596.pdf>>. Accessed: 2015-08-09. Citado 3 vezes nas páginas 9, 41 e 42.
- 6 FEFA FZ product description website. <[http://fefasensores.com.br/loja/produto\\_detalhe.php?id\\_prod=61](http://fefasensores.com.br/loja/produto_detalhe.php?id_prod=61)>. Accessed: 2015-08-09. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 35.
- 7 SPARKFUN load cell SEN - 10245 product description website. <<https://www.sparkfun.com/products/10245>>. Accessed: 2015-08-09. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 36.
- 8 WHITNEY, D. E. *Mechanical Assemblies: Their Design, Manufacture, and Role in Product Development*. Oxford University Press, 2004. ISBN 0195157826. Disponível em: <<http://www.amazon.com/Mechanical-Assemblies-Manufacture-Product-Development/dp/0195157826%3FSubscriptionId%3D0JYN1NVW651KCA56C102%26tag%3Dtechkie-20%26linkCode%3Dxm2%26camp%3D2025%26creative%3D165953%26creativeASIN%3D0195157826>>. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 79.
- 9 ECONOMIC, U. N. D. P. U. N. D. of; AFFAIRS., S. *World Energy Assessment—Overview*. New York: World Energy Council: [s.n.]. Citado na página 21.
- 10 EVANS, A.; STREZOV, V.; EVANS, T. J. Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, n. 5, p. 1082 – 1088, 2009. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032108000555>>. Citado na página 21.
- 11 PIK. *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation - Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 2011.

- 1088 p. ISBN 9781139151153. Disponível em: <<http://ebooks.cambridge.org/ref/id/CBO9781139151153>>. Citado na página 21.
- 12 THRESHER ROBINSON, V. To capture the wind. *Power and Energy Magazine, IEEE*, v. 5, p. 34–46, 2007. Citado na página 21.
- 13 FAGIANO, L.; MILANESE, M. Airborne wind energy: an overview. In: *American Control Conference*. Montreal, Canada: [s.n.], 2012. p. 3132–3143. ISBN 9781457710964. Disponível em: <[http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs/\\_all.jsp?arnumber=6314801](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs/_all.jsp?arnumber=6314801)>. Citado na página 21.
- 14 ARCHER, C. L.; CALDEIRA, K. Global Assessment of High-Altitude Wind Power. *Energies*, v. 2, n. 2, p. 307–319, maio 2009. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1996-1073/2/2/307/>>. Citado na página 21.
- 15 De Lellis, M.; SARAIVA, R.; TROFINO, A. Turning angle control of power kites for wind energy. In: *52nd IEEE Conference on Decision and Control*. Firenze, Italy: Ieee, 2013. p. 3493–3498. ISBN 978-1-4673-5717-3. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6760419>>. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- 16 JEHLE, C.; SCHMEHL, R. Applied Tracking Control for Kite Power Systems. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, p. 1–12, fev. 2014. ISSN 0731-5090. Disponível em: <<http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/1.62380>>. Citado na página 24.
- 17 BAAYEN, J.; OCKELS, W. Tracking control with adaption of kites. *IET Control Theory & Applications*, v. 6, n. 2, p. 1–20, 2012. Disponível em: <[http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs/\\_all.jsp?arnumber=6129552](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs/_all.jsp?arnumber=6129552)>. Citado na página 24.
- 18 ZGRAGGEN, A. U.; FAGIANO, L.; MORARI, M. Automatic Retraction Phase of Airborne Wind Energy Systems. In: *19th IFAC World Congress*. Cape Town, South Africa: [s.n.], 2014. p. 5826–5831. Citado na página 24.
- 19 UFSCKITE homepage. <<http://trofino.das.ufsc.br/pesquisa/ufस्कite>>. Accessed: 22-09-2015. Citado na página 25.
- 20 MANTELLI, F. H. Projeto e integração de hardware de um sistema de energia eólica com aerofólio cabeado. Relatório de estágio. 2015. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 31.
- 21 SOLUTIONS, R. *Sistema de Atuação. Manual do Usuário*. [S.l.]. Citado na página 31.
- 22 FAULHABER. *Brushless DC-Servomotors*. <[https://fmcc.faulhaber.com/resources/img/EN\\_4490\\_B\\_FMM.PDF](https://fmcc.faulhaber.com/resources/img/EN_4490_B_FMM.PDF)>. Accessed: 2015-08-09. Citado na página 33.
- 23 FAULHABER. *Encoders*. <[http://microprivod.ru/catalogue/pdf/ Faulhaber/encoders/EN\\_40B\\_MIN.pdf](http://microprivod.ru/catalogue/pdf/ Faulhaber/encoders/EN_40B_MIN.pdf)>. Accessed: 2015-08-09. Citado na página 33.
- 24 FAULHABER. *Encoders*. <[https://fmcc.faulhaber.com/resources/img/EN\\_HEDM-5500\\_DFF.PDF](https://fmcc.faulhaber.com/resources/img/EN_HEDM-5500_DFF.PDF)>. Accessed: 2015-08-09. Citado na página 33.
- 25 FAULHABER. *Motion Controller*. <[https://fmcc.faulhaber.com/resources/img/EN\\_MCBL3006\\_V2\\_5\\_DFF.PDF](https://fmcc.faulhaber.com/resources/img/EN_MCBL3006_V2_5_DFF.PDF)>. Accessed: 2015-08-09. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 44.

- 26 FAULHABER. *Brakes*. <[https://fmcc.faulhaber.com/resources/img/EN\\_MBZ\\_DFF.PDF](https://fmcc.faulhaber.com/resources/img/EN_MBZ_DFF.PDF)>. Accessed: 2015-08-09. Citado na página 34.
- 27 HOHNER. *Serie 38 Encoder Absoluto*. <<http://admin.csprojetos.com.br/api/download/anexo.php?id=677>>. Accessed: 2015-08-09. Citado na página 37.
- 28 INTEGRATED, M. *MAX13487E/MAX13488E*. [S.l.]: Maxim integrated, 2015. <<http://www.maximintegrated.com/en/products/interface/transceivers/MAX13487E.html>>. Accessed: 2015-08-09. Citado na página 38.
- 29 GHI. *RS485 Module*. <<https://www.ghielectronics.com/catalog/product/479>>. Accessed: 2016-08-11. Citado 3 vezes nas páginas 38, 90 e 93.
- 30 INTELBRAS. Adaptador USB Wireless Alcance. <<http://www.intelbras.com.br/residencial/wireless/adaptadores-usb/wbn-241>>. Accessed: 2015-08-09. Citado na página 38.
- 31 ESPRESSIF SMART CONNECTIVITY PLATFORM: ESP8266. <[http://www.esp8266.com/wiki/lib/exe/fetch.php?media=esp8266\\_specifications\\_english.pdf](http://www.esp8266.com/wiki/lib/exe/fetch.php?media=esp8266_specifications_english.pdf)>. Accessed: 2016-01-06. Citado na página 39.
- 32 TEXAS INSTRUMENTS. *Precision, Low Power INSTRUMENTATION AMPLIFIERS*. 2005. <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina129.pdf>>. Accessed: 2015-08-09. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 43.
- 33 TEXAS INSTRUMENTS. *17 MHz Rail-to-Rail Input-Output Operational Amplifiers*. 2013. <<https://www.fairchildsemi.com/datasheets/LM/LM6144.pdf>>. Accessed: 2015-08-09. Citado na página 41.
- 34 TEXAS INSTRUMENTS. *Dual Current Source and Current Sink*. 2015. <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ref200.pdf>>. Accessed 2015-08. Citado na página 41.
- 35 FAIRCHILD SEMICONDUCTOR. *3-Terminal 1A Positive Voltage Regulator*. 2014. <<https://www.fairchildsemi.com/datasheets/LM/LM7805.pdf>>. Accessed: 2015-08-09. Citado na página 41.
- 36 FAIRCHILD SEMICONDUCTOR. *3-Terminal 1A Negative Voltage Regulator*. 2011. <<https://www.fairchildsemi.com/datasheets/LM/LM7905.pdf>>. Accessed: 2015-08-09. Citado na página 41.
- 37 TEXAS INSTRUMENTS. *CSD18502KCS 40-V N-Channel NexFET™ Power MOSFET*. 2014. <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/csd18502kcs.pdf>>. Accessed: 2015-08-09. Citado na página 42.
- 38 INSTRUMENTS, T. The pcb is a component of op amp design. *Analog Applications Journal*, p. 42–47, 8 2000. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/an/slyt166/slyt166.pdf>>. Citado na página 49.
- 39 TEXAS INSTRUMENTS. *LMx58, LMx58x, LM2904, LM2904V Dual Operational Amplifiers*. 1976. <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm358.pdf>>. Accessed 2016-08. Citado na página 53.
- 40 TEXAS INSTRUMENTS. *10V Precision Voltage Reference*. 2000. <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ref102.pdf>>. Accessed 2016-08. Citado na página 56.

- 41 WEG. *Inversor de Frequência CFW11 Manual do Usuário*. [S.l.]. Citado na página 67.
- 42 IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology. [S.l.], 1990. 1+ p. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/ieeestd.1990.101064>>. Citado na página 69.
- 43 LEITE, J. C. S. P. *Engenharia de Requisitos*. 1994. <<http://livrodeengenhariaderequisitos.googlepages.com/ERNOTASDEAULA.pdf>>. Notas de Aula, Parte I. Citado na página 69.
- 44 IEEE Recommended Practice for Software Requirements Specifications. *IEEE Std 830-1998*, p. 1–40, Oct 1998. Citado na página 70.
- 45 PRESSMAN, R. S. *Engenharia de Software - Uma Abordagem Profissional*. 7. ed. [S.l.]: McGrawHill, 2011. Citado na página 76.
- 46 ULRICH, K. The role of product architecture in the manufacturing firm. *Research Policy*, v. 24, n. 3, p. 419–440, 1995–05–01T00:00:00. Disponível em: <<http://www.ingentaconnect.com/content/els/00487333/1995/00000024/00000003/art00775>>. Citado na página 79.
- 47 BARSUKOV, Y.; QIAN, J. *Battery Power Management for Portable Devices*. Artech House, 2013. (Power Engineering). ISBN 9781608074914. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?id=r\\\_QfAgAAQBAJ](https://books.google.com.br/books?id=r\_QfAgAAQBAJ)>. Citado na página 84.
- 48 FOUNDATION, R. P. *Raspberry Pi Foundation*. <<https://www.raspberrypi.org/products/pi-zero/>>. Accessec 2016-08. Citado na página 89.
- 49 NXP. *Dual UART with I2C-bus/SPI interface, 64 bytes of transmit and receive FIFOs, IrDA SIR built-in support*. 2012. <[http://www.nxp.com/documents/data\\_sheet/SC16IS752\\_SC16IS762.pdf](http://www.nxp.com/documents/data_sheet/SC16IS752_SC16IS762.pdf)>. Accessed 2016-08. Citado 2 vezes nas páginas 90 e 93.
- 50 TEXAS INSTRUMENTS. *SN74AHC1G125 Single Bus Buffer Gate With 3-State Output*. 2014. <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74ahc1g125.pdf>>. Accessed: 2016-08-09. Citado na página 90.
- 51 INTEGRATED, M. *1uA Supply Current, 1Mbps, 3.0V to 5.5V, RS-232 Transceivers with AutoShutdown Plus*. [S.l.]: Maxim integrated, 2011. <<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX3224-MAX3245.pdf>>. Accessed: 2016-08-09. Citado 2 vezes nas páginas 91 e 93.
- 52 TEXAS INSTRUMENTS. *TLV170x 2.2-V to 36-V, microPower Comparator*. 2015. <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlv1704.pdf>>. Accessed: 2016-08-09. Citado na página 91.
- 53 TEXAS INSTRUMENTS. *Low-Power, Low-Noise, 24-Bit, ADC for Small-Signal Sensors*. 2015. <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1220.pdf>>. Accessed: 2016-08-09. Citado na página 91.
- 54 INTEGRATED, M. *4-Wire-Interfaced, 2.5V to 5.5V, 20-Port and 28-Port I/O Expander*. [S.l.]: Maxim integrated, 2015. <<http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX7301.pdf>>. Accessed: 2016-08-09. Citado 2 vezes nas páginas 91 e 94.



- 55 TEXAS INSTRUMENTS. *3-to-6 Series Cell Lithium-Ion Battery Monitor and Secondary Protection IC for Applications*. 2016. <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq76pl536a.pdf>>. Accessed 2016-08. Citado 2 vezes nas páginas 92 e 94.
- 56 INTEGRATED, M. *High-Precision Voltage Reference with Temperature Sensor*. [S.l.]: Maxim integrated, 2004. <<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX6143.pdf>>. Accessed: 2016-08-09. Citado 2 vezes nas páginas 92 e 98.
- 57 ANALOG DEVICES. *5.0 kV rms Quad Digital Isolators*. 2016. <[http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADuM240D\\_240E\\_241D\\_241E\\_242D\\_242E.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADuM240D_240E_241D_241E_242D_242E.pdf)>. Accessed: 2016-08-09. Citado 2 vezes nas páginas 92 e 93.
- 58 TEXAS INSTRUMENTS. *LM3150 Wide-VIN Synchronous Buck Controller*. 2014. <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm3150.pdf>>. Accessed: 2016-08-09. Citado na página 92.
- 59 TEXAS INSTRUMENTS. *SIMPLE SWITCHER® 3.5 V to 36 V 2-A Synchronous Step-Down Voltage Converter*. 2014. <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm43602.pdf>>. Accessed: 2016-08-09. Citado na página 92.
- 60 MAXIM INTEGRATED. *Using Maxim SPI-compatible Display Drivers with other SPI Peripherals*. 2003. <<https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/1879>>. Accessed: 2016-08-09. Citado na página 94.
- 61 TEXAS INSTRUMENTS. *Bridge Measurement Systems*. <<http://www.ti.com/lit/ml/slyp163/slyp163.pdf>>. Accessed: 2016-08-09. Citado na página 96.
- 62 UFCKITE field experiment 8, July 5th 2016. <<https://www.youtube.com/watch?v=YxszJJvihfM>>. Accessed: 09-08-2016. Citado na página 105.
- 63 CURRICULO do Curso. 2016. <<http://cagr.sistemas.ufsc.br/relatorios/curriculoCurso?curso=220&curriculo=19911>>. Engenharia de Controle e Automação. Citado na página 106.