



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas  
Departamento de Ciência da Computação

**Sistema Embarcado para Controle de Motores  
Brushless DC sensored e sensorless para Veículos  
Portáteis de Transporte Individual**

Matheus Ervilha Gomes

Monografia apresentada como requisito parcial  
para conclusão do Curso de Engenharia da Computação

Orientador

Prof. Dr. Marcus Vinicius Lamar

Brasília  
2018

Universidade de Brasília — UnB  
Instituto de Ciências Exatas  
Departamento de Ciência da Computação  
Curso de Engenharia da Computação

Coordenador: Prof. Dr. Ricardo Jacobi

Banca examinadora composta por:

Prof. Dr. Marcus Vinicius Lamar (Orientador) — CIC/UnB

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Carla M. C. C. Koike — CIC/UnB

Prof. Dr. Marcelo G. Mandelli — CIC/UnB

### **CIP — Catalogação Internacional na Publicação**

Gomes, Matheus Ervilha.

Sistema Embarcado para Controle de Motores Brushless DC sensored e sensorless para Veículos Portáteis de Transporte Individual / Matheus Ervilha Gomes. Brasília : UnB, 2018.

155 p. : il. ; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) — Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

1. Motor Brushless, 2. Microcontrolador, 3. Bateria LiPo,  
4. Longboard, 5. Transporte alternativo

CDU 004

Endereço: Universidade de Brasília  
Campus Universitário Darcy Ribeiro — Asa Norte  
CEP 70910-900  
Brasília-DF — Brasil



# Agradecimentos

À minha mãe, **Terezinha Angélica Monteiro Ervilha Gomes**, pelos conselhos, pelas palavras, pela ternura e carinho, pela paciência de aguentar o meu quarto frequentemente bagunçado e por tolerar sustos de capacitores explodindo e fumaças misteriosas.

Ao meu pai, **Sydnei Moreira Gomes**, pelo apoio completo à todas as ideias malucas, pela amizade, pelos conselhos de mecânica, de eletrônica e de vida, por debater soluções e pela ajuda em testes duvidosos e perigosos.

Ao meu irmão, **Daniel Ervilha Gomes**, pela amizade verdadeira, por ser o meu *debugger patinho* oficial, por me entreter nos momentos mais chatos da escrita da monografia com vídeos "excêntricos", por me ajudar a segurar os polos da bateria quando os testes ficavam tensos e por filmar minhas voltas experimentais na Garagem às 2h da madrugada.

À minha melhor amiga, **Ana Catarina Ferreira Lima**, por aturar o assunto de Longboard e "motorzinho" constante, pelo amor, pelo companheirismo, pelas risadas, pelo incentivo e por me ajudar a entender que plaquinhas e urbanismo tem tudo a ver.

Ao meu professor orientador, **Marcus Vinícius Lamar**, pela paciência, por todos os conhecimentos e conselhos durante essa jornada e por ter sempre comemorado comigo mais uma semana sem que eu tivesse colocado fogo em tudo.

À minha família por estar sempre ao meu lado.

Aos meus amigos por terem fé e aguardarem ansiosamente um resultado que parecia não chegar nunca, e por tornarem a minha passagem pela UnB mais enriquecedora e prazerosa.

À equipe **Apuama Racing** por toda a consultoria de mecânica envolvida no projeto e todas as noites viradas no Bloco G com o intuito de "botar o carro no chão" que fizeram parte essencial da minha formação.

Aos professores **Carla M. C. C. Koike** e **Marcelo G. Mandelli** por terem aceitado o convite para participarem do meu trabalho na condição de examinadores e proporem melhorias para o meu trabalho.

À todos os componentes da **E-sporte SE**, **LoopCE** e da **D7** por acompanharem o desenvolvimento do meu trabalho e estarem sempre dispostos a me dar consultorias para solucionar problemas misteriosos.

À todos professores e funcionários do Departamento de Ciência de Computação e Engenharia Elétrica da UnB pelo suporte, pela orientação e pelo compartilhamento de seus conhecimentos.

# Resumo

Hoje, meios de transporte alternativos e menos poluentes estão cada vez mais populares e suas tecnologias ainda mais acessíveis.

O objetivo principal desse trabalho é aprofundar nessa revolução de mercado e propor um meio de transporte simples, barato, seguro e 100% elétrico para um consumidor comum: O *Longboard Elétrico*, seguindo a tendência do mercado de criações de *Last Mile Vehicles* (Veículos de Última Milha) (LMV). Também será importante estudar o estado da arte em tecnologias de bateria e motores elétricos.

Esse projeto apresenta e compara aplicações de técnicas de controle de motores *Brushless* (sem escova) e gerenciamento de alta potência de baterias LiPo (*lítio-polímero*) usando um microcontrolador ATmega328 e comunicação *Bluetooth Low Energy* para o controle dos dispositivos.

Foi construído um protótipo de um Longboard elétrico capaz de atingir 33 km/h com uma bateria LiPo 8S 5000 mAh e um controle remoto Bluetooth capaz de alterar configurações do Longboard e controlar sua velocidade.

**Palavras-chave:** Motor Brushless, Microcontrolador, Bateria LiPo, Longboard, Transporte alternativo

# Abstract

Today, alternative and less polluting means of transportation are becoming increasingly popular and their technologies even more accessible.

The main objective of this work is to deepen this market revolution and propose a simple, cheap, safe and 100% electric means of transportation for a common consumer: *The Electric Longboard*, following the trend of the LMV. It will also be important to study the state of the art in battery technologies and electric motors.

This project presents and compares applications of *Brushless* motor control techniques and high-power *LiPo* battery management using an ATmega328 microcontroller and *Bluetooth Low Energy* to control the devices.

This project builds a prototype electric Longboard capable of reaching 33 km/h with a LiPo 8S 5000 mAh battery and a Bluetooth remote controller capable of changing the Longboard settings and controlling its speed.

**Keywords:** Brushless Motor, Microcontroller, LiPo Battery, Longboard, Alternative transportation

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Contextualização . . . . .	1
1.2	Definição do Problema e Objetivo . . . . .	2
1.3	Organização do Projeto . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Fundamentação Teórica</b>	<b>4</b>
2.1	Longboard . . . . .	4
2.1.1	Estrutura Mecânica . . . . .	5
2.1.2	<i>Longboard</i> vs. Skate . . . . .	5
2.1.3	Os componentes . . . . .	6
2.1.4	Modalidades do Esporte . . . . .	8
2.1.5	Curvas . . . . .	9
2.2	Motores Elétricos . . . . .	10
2.2.1	Princípio de Funcionamento . . . . .	10
2.2.2	Tipos de Motores . . . . .	11
2.2.3	Motores <i>Brushless DC</i> vs. <i>Brushed DC</i> . . . . .	14
2.2.4	<i>Brushless DC</i> vs. Indução AC . . . . .	15
2.2.5	<i>Brushless DC</i> vs. Motor de Passo vs. Servo . . . . .	16
2.3	Motor <i>Brushless</i> . . . . .	18
2.3.1	Aplicação . . . . .	19
2.3.2	Funcionamento . . . . .	19
2.4	Hardware para o controle de Motores <i>brushless</i> . . . . .	22
2.4.1	Estrutura básica do controlador . . . . .	22
2.4.2	O Sistema Embarcado . . . . .	31
2.5	Controle do Motor <i>Brushless</i> . . . . .	35
2.5.1	Controle básico do motor . . . . .	37
2.5.2	Controle com sensores . . . . .	38
2.5.3	Controle sem sensores . . . . .	41
2.5.4	FOC . . . . .	44



2.5.5	Arrancada . . . . .	47
2.6	Baterias . . . . .	50
2.6.1	Tipos de Bateria . . . . .	50
2.6.2	Perigos do controle da bateria . . . . .	51
2.6.3	Monitoramento de Temperatura e Tensão . . . . .	53
2.6.4	Recarregamento da bateria por frenagem . . . . .	53
2.7	Bluetooth . . . . .	57
2.7.1	Funcionamento . . . . .	57
2.7.2	<i>Bluetooth Low Energy</i> . . . . .	57
2.8	O mercado atual de controladores de Motores Brushless . . . . .	58
2.8.1	Produtos Comerciais . . . . .	58
2.8.2	VEESC . . . . .	59
<b>3</b>	<b>Solução Proposta</b>	<b>60</b>
3.1	Visão geral . . . . .	60
3.2	ESC . . . . .	61
3.2.1	Controle de Motores com sensores . . . . .	62
3.2.2	Controle de Motores sem Sensores . . . . .	68
3.3	Controlador da Bateria e Controlador Central . . . . .	73
3.3.1	Hardware . . . . .	73
3.3.2	Firmware . . . . .	76
3.4	Placa de Circuito Impresso . . . . .	79
3.4.1	Placa do modo com sensores . . . . .	79
3.4.2	Placa do modo sem sensores . . . . .	79
3.5	Mecânica . . . . .	82
3.5.1	O Longboard . . . . .	82
3.5.2	Tração da Roda . . . . .	82
3.5.3	Suporte do sensor Hall . . . . .	85
3.5.4	Encapsulamento dos eletrônicos . . . . .	85
3.5.5	Análise da Movimentação do <i>longboard</i> . . . . .	86
3.6	Aplicativo do iPhone . . . . .	89
3.7	Controle Remoto . . . . .	89
3.7.1	Circuito . . . . .	90
3.7.2	Firmware . . . . .	90
3.7.3	Placa de Circuito Impresso . . . . .	93
3.7.4	Mecânica . . . . .	93

<b>4</b>	<b>Resultados e Testes</b>	<b>95</b>
4.1	Mecânica . . . . .	95
4.1.1	Construção . . . . .	95
4.1.2	Montagem final . . . . .	97
4.1.3	Testes . . . . .	97
4.2	Controlador sem sensores . . . . .	100
4.2.1	Construção . . . . .	100
4.2.2	Resultados . . . . .	100
4.3	Controlador com sensores . . . . .	101
4.3.1	Construção . . . . .	102
4.3.2	Resultados . . . . .	102
4.4	Controle remoto . . . . .	103
4.4.1	Construção . . . . .	103
4.4.2	Resultados . . . . .	104
4.5	Aplicativo do iPhone . . . . .	106
4.5.1	Funcionalidades . . . . .	106
4.5.2	Resultados . . . . .	109
4.6	Módulo de Testes . . . . .	110
4.6.1	Componentes . . . . .	110
4.6.2	Resultados . . . . .	111
4.7	Central de Processamento dos testes . . . . .	113
4.8	O Produto Final . . . . .	114
4.8.1	Arrancada . . . . .	114
4.8.2	Frenagem regenerativa e velocidades altas . . . . .	115
4.8.3	Modos de aceleração . . . . .	116
4.8.4	Corrente média . . . . .	119
4.9	Custos . . . . .	120
4.9.1	Custos do Produto Final . . . . .	121
4.9.2	Comparação com o mercado . . . . .	122
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>125</b>
5.1	Trabalhos Futuros . . . . .	126
	<b>Referências</b>	<b>128</b>
	<b>Anexo</b>	<b>132</b>
<b>I</b>	<b>Manual do Usuário</b>	<b>133</b>

# Lista de Figuras

1.1	Produtos comerciais . . . . .	2
2.1	Longboard. . . . .	4
2.2	Um <i>longboard</i> comum [1] . . . . .	5
2.3	Um <i>longboard</i> (em baixo) e um Skate (em cima). . . . .	6
2.4	Os componentes de um <i>longboard</i> . . . . .	6
2.5	Encaixe do Eixo na Prancha. . . . .	7
2.6	Curvas em um <i>longboard</i> e um Skate. . . . .	9
2.7	Espira com um campo eletromagnético. . . . .	11
2.8	Imãs permanentes em volta da espira. . . . .	11
2.9	Troca da alimentação da espira e do sentido com campo eletromagnético. . . . .	11
2.10	Contato da escova com o eixo do motor. . . . .	12
2.11	Parte interna de um Motor com Escova. . . . .	14
2.12	Corte de um motor por indução. . . . .	15
2.13	Estrutura interna de um motor Servo. . . . .	16
2.14	Controle de Duty Cycle de um sinal PWM. . . . .	16
2.15	Um motor de Passo. . . . .	17
2.16	Esquema de funcionamento de um motor de passo simplificado. . . . .	17
2.17	Estrutura interna de um motor <i>brushless</i> . . . . .	18
2.18	Um motor brushless pequeno e um grande. . . . .	19
2.19	Modelo simplificado do Motor DC. . . . .	21
2.20	Transistores NPN . . . . .	24
2.21	Transistores PNP . . . . .	24
2.22	MOSFETs Canal-N . . . . .	25
2.23	MOSFETs Canal-P . . . . .	26
2.24	Circuito de uma Ponte H com interruptores . . . . .	27
2.25	Circuito de uma Meia Ponte H Tripla com interruptores . . . . .	28
2.26	Circuito de uma Meia Ponte H Tripla com MOSFETs N e P. . . . .	29
2.27	Circuito com um MOSFET no lado positivo da carga. . . . .	30
2.28	Circuito do Driver de MOSFET IR2101. . . . .	30

2.29	Microcontroladores . . . . .	31
2.30	Placa de desenvolvimento do microcontrolador ESP32. Progressão de complexidade da placa de desenvolvimento. . . . .	33
2.31	Resistores Shunt de diferentes tipos. . . . .	35
2.32	CI ACS758 em uma placa. . . . .	35
2.33	Esquema do modelo simplificado de um motor BLDC. . . . .	36
2.34	Gráfico do PWM de excitação das bobinas com base nos passos. . . . .	36
2.35	Movimentação do rotor com base nos passos da comutação. O video dessa animação pode ser visto no link <a href="https://youtu.be/tfh0CKG3s2k">https://youtu.be/tfh0CKG3s2k</a> . . . . .	38
2.36	Sensor de efeito Hall. . . . .	39
2.37	Sensor <i>encoder</i> em um motor <i>brushless</i> (vermelho). . . . .	40
2.38	Sensor <i>encoder</i> óptico. (1) disco com os traços, (2) centro de rotação do disco, (3) sensor de luminosidade. . . . .	40
2.39	Fase flutuante e Zero Crossing. . . . .	42
2.40	Zero Virtual e o Zero Real. . . . .	43
2.41	Comparação do PWM Phase-Correct com um PWM comum . . . . .	44
2.42	Ângulo entre o campo eletromagnético do estator e do rotor. . . . .	45
2.43	Ondulações no torque do motor. . . . .	46
2.44	Diferentes tipos de ondas de excitação (Fonte: [2]) . . . . .	46
2.45	Geração de um sinal trapezoidal com um sinal PWM. . . . .	47
2.46	Variação da indutância do estator com base na posição do rotor. . . . .	48
2.47	Lista de pulsos que serão enviados para o motor . . . . .	49
2.48	Análise dos pulsos de corrente. Nessa imagem, o pulso 2 encontrou a posição 2 do motor. . . . .	49
2.49	Bateria Lipo sendo perfurada. Imagem do video <a href="https://www.youtube.com/watch?v=gisdMQbtJqk">https://www.youtube.com/watch?v=gisdMQbtJqk</a> . . . . .	51
2.50	Usuário relatando acontecimento em que suas baterias explodiram por não utilizar um carregador com balanceador. Uma das células ultrapassou o seu limite de tensão, aumentou o volume e estourou a camada protetora. Na última imagem podemos ver o seu drone com a bateria.. . . . .	52
2.51	Divisor de tensão para a leitura do termistor. . . . .	53
2.52	Bateria Lipo 5Ah 5S. Podemos ver os fios positivo e negativo (vermelho e preto) e fios coloridos que permitem o acesso a cada célula individualmente da bateria. . . . .	54
2.53	Circuito elevador de tensão. . . . .	54
2.54	Circuito elevador de tensão . . . . .	55
2.55	Freio Regenerativo com o PWM ligado. . . . .	55

2.56	Freio Regenerativo com o PWM desligado. . . . .	56
2.57	ESCs e respectivos motores Comerciais . . . . .	58
2.58	ESC Open Source VESC. . . . .	59
3.1	Os módulos do projeto . . . . .	61
3.2	Desenho esquemático do microcontrolador ATMEGA328 . . . . .	62
3.3	Portas de conexão com o sensor Hal . . . . .	63
3.4	Portas de gravação do microcontrolador . . . . .	63
3.5	Limitador de corrente e resistores Pull Down . . . . .	64
3.6	Portas AND para o PWM . . . . .	65
3.7	Driver dos MOSFETS IR2101 . . . . .	66
3.8	Meia Ponte-H Tripla . . . . .	66
3.9	Conexões de entrada e saída do sistema . . . . .	67
3.10	Fluxo do <i>firmware</i> de controle de motores com sensor . . . . .	68
3.11	Comparação da velocidade de leitura do ATmega com o STM32 . . . . .	69
3.12	Microcontrolador STM32. Central do modo sem sensores . . . . .	70
3.13	Divisor de tensão para o Zero Virtual do motor . . . . .	71
3.14	Divisão de tensão para a leitura do Back-EMF de cada fase . . . . .	71
3.15	Fluxo do Firmware de controle de motores sem sensor . . . . .	72
3.16	Microcontrolador ATMEGA328 . . . . .	74
3.17	Conexão com o módulo Bluetooth HM-10 . . . . .	74
3.18	Divisor de tensão para a leitura do nível da bateria . . . . .	74
3.19	Conexão com os sensores de temperatura . . . . .	75
3.20	Todos os níveis de tensão da placa completa . . . . .	75
3.21	<i>Buck Converter</i> . . . . .	76
3.22	Capacitores de potência . . . . .	76
3.23	Circuito de controle de liga e desliga do ESC . . . . .	77
3.24	Fluxo do Módulo central . . . . .	78
3.25	Placa de circuito impresso do modo com sensores . . . . .	80
3.26	Placa de circuito impresso do modo sem sensores . . . . .	81
3.27	Os componentes do <i>longboard</i> . . . . .	83
3.28	Montagem do eixo e do <i>longboard</i> . . . . .	83
3.29	Componentes de tração da roda . . . . .	83
3.30	Visão explodida da montagem da tração da roda . . . . .	84
3.31	Montagem da tração da roda . . . . .	84
3.32	Montagem da tração da roda com a roda escondida . . . . .	85
3.33	Suporte para os sensores Hall . . . . .	86
3.34	Encapsulamento de plástico dos eletrônicos . . . . .	86

3.35	Imagem do encapsulamento . . . . .	87
3.36	Imagem do <i>longboard</i> finalizado . . . . .	87
3.37	Análise da movimentação do <i>longboard</i> . . . . .	88
3.38	Teste de colisão da estrutura mecânica nas curvas do <i>longboard</i> . . . . .	88
3.39	Diagrama de Blocos do Aplicativo do iPhone . . . . .	89
3.40	Circuito do controle remoto . . . . .	90
3.41	Modos de aceleração do Controle Remoto . . . . .	91
3.42	Efeito da variação da sensibilidade no controle do <i>joystick</i> . . . . .	92
3.43	Efeito da variação da aceleração no controle do <i>joystick</i> . . . . .	92
3.44	Gráficos com os parâmetros escolhidos para cada modo . . . . .	92
3.45	Placa de circuito impresso para o controle remoto . . . . .	93
3.46	O projeto do controle remoto completo . . . . .	94
3.47	Partes do controle remoto . . . . .	94
4.1	Suporte do motor sendo cortado em uma CNC usando o alumínio como material . . . . .	96
4.2	Peças do suporte do motor cortadas em alumínio . . . . .	96
4.3	Polia da roda impressa em 3D no material PLA . . . . .	97
4.4	Placa com os sensores Hall . . . . .	98
4.5	Suporte dos sensores Hall posicionados no suporte do motor de protótipo . . . . .	98
4.6	Suporte protótipo montado . . . . .	99
4.7	Suporte final montado . . . . .	99
4.8	Placa do controlador sem sensor . . . . .	100
4.9	Placa do controlador sem sensor dentro do encapsulamento com as baterias . . . . .	101
4.10	Placa do controlador com sensores . . . . .	102
4.11	Placa do controlador com sensores com os componentes . . . . .	103
4.12	Placa do controle remoto sem solda . . . . .	104
4.13	Placa do controle remoto com os componentes . . . . .	105
4.14	Controle Impresso em 3D . . . . .	105
4.15	Controle da conta do usuário . . . . .	107
4.16	Tela principal da aplicação . . . . .	108
4.17	Tela de Controle Remoto da aplicação . . . . .	109
4.18	Módulo de testes montado no <i>longboard</i> . . . . .	110
4.19	Diagrama de blocos do Módulo de testes . . . . .	111
4.20	Módulo de testes montado . . . . .	112
4.21	Tela de Controle Remoto da aplicação . . . . .	112
4.22	Aplicação da central de processamento de testes . . . . .	113
4.23	Dados gerados pela central de processamento de testes . . . . .	113

4.24	Teste com o <i>longboard</i> completo usando o aplicativo no celular . . . . .	115
4.25	Descida com o <i>longboard</i> em 50% da potência . . . . .	116
4.26	Falcon Mode . . . . .	117
4.27	Vulcan Mode . . . . .	118
4.28	Eco Mode . . . . .	118
4.29	Baby Mode . . . . .	119
4.30	Superfície plana no Vulcan Mode . . . . .	120
4.31	Subida no Vulcan Mode . . . . .	120

# Lista de Tabelas

2.1	Comparação de motores elétricos parte 1. . . . .	13
2.2	Comparação de motores elétricos parte 2. . . . .	13
2.3	Comparação entre tipos de baterias. . . . .	50
2.4	Comparação entre as versões de Bluetooth [3]. . . . .	57
4.1	Custos do <i>longboard</i> comum. . . . .	121
4.2	Custos da Mecânica do Projeto. . . . .	122
4.3	Custos da Eletrônica do Projeto. . . . .	122
4.4	Custos do Controle Remoto. . . . .	123
4.5	Custos Totais do Produto Final. . . . .	123



# Lista de Abreviaturas e Siglas

- ADC** Analog to Digital Converter. 32, 33, 42, 68, 116
- BLDC** *Brushless DC Motor*. 14, 18, 35, 36
- BLE** *Bluetooth Low Energy*. 57, 125
- CNC** Comando Numérico Computadorizado. 95
- CPU** Central Processing Unit. 31
- DAC** Digital to Analog Converter. 32, 45
- DIY** *Do It Yourself* (Faça você mesmo). 2
- ESC** Electronic Speed Controller. 57, 60–63, 77, 123, 124
- FOC** *Field Oriented Control*. 44, 127
- FPS** Frames per Second. 106
- GPIO** General Purpose Input/Output. 31
- ICSP** In-Circuit Serial Programming. 63
- ISM** Industrial, Scientific and Medical Band. 56
- LMV** *Last Mile Vehicles* (Veículos de Última Milha). 1–3, 123
- MOSFET** *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*. 18, 25
- PWM** Pulse Width Modulation. 16, 32, 39, 40
- r.p.m.** Rotações por minuto. 20, 21, 69

**RMS** Root Mean Square. 20

**SDK** Software Development Kit. 89

**SoC** System on Chip. 31

**SPI** Serial Peripheral Interface. 63

**TBJ** *Transistor Bipolar de Junção*. 23

**TTL** Transistor-Transistor Logic. 63

# Capítulo 1

## Introdução

Desde a criação do motor elétrico, cientistas e engenheiros tentam alcançar o sonho da comodidade: eficiência e conveniência na mobilidade e no trajeto da rotina diária.

O desenvolvimento desse ideal representa o desafio do compromisso entre peso das baterias, eficiência, potência e preço. Com isso, novas ideias são sempre bem-vindas e avanços significativos na área de transportes alternativos estão em constante desenvolvimento.

### 1.1 Contextualização

Atualmente, podemos observar diversos avanços na área de transportes alternativos. Carros e motos elétricas estão presentes no mercado desde 1828, porém somente agora essas tecnologias estão mais acessíveis ao público geral. Empresas como a *Tesla* e a *GM* estão progressivamente mais próximas de uma tecnologia confiável e eficiente.

Hoje, ainda assim, essas tecnologias têm o preço como um problema. Ao comparar o preço de um carro à combustão com um carro 100% elétrico podemos observar que apesar de todas as suas vantagens, a troca nem sempre é viável economicamente. E para isso, são necessárias novas alternativas mais simples e talvez, para o apelo do marketing, mais divertidas.

O conceito de *Last Mile Vehicles* (Veículos de Última Milha) (LMV) surgiu com o objetivo principal de praticidade e preço [4]. Os LMV são meios de transporte simples e baratos que não precisam de bateria de longa duração, mas que sejam fáceis de transportar dentro de um metrô ou ônibus e fazer uma pequena parte do percurso de um modo mais simples e rápido.

No mercado atual, podemos encontrar algumas marcas que conseguiram focar a inovação em um produto simples para o público e que cumprem muito bem a função de LMV.

Entre os produtos comerciais, podemos destacar o **One Wheel**, mostrado na Figura 1.1(a), um veículo que se equilibra automaticamente em cima de apenas uma roda. Com uma roda maior do que normalmente encontrada em um skate, esse veículo se destaca por ser ágil e próprio para qualquer tipo de terreno. Seu controle é realizado pela inclinação do usuário sobre a prancha. Ao inclinar para frente ou para trás, o veículo acelera ou freia. Seu preço varia de US\$1500 (aproximadamente R\$5000,00) a US\$1799 (aproximadamente R\$6000,00).

O **Boosted Boards**, mostrado na Figura 1.1(b) é semelhante ao projeto aqui proposto. Um *longboard* de alta qualidade com dois motores menores nas duas rodas traseiras. Seu controle é feito por um controle remoto Bluetooth que fica na mão do usuário. Uma das desvantagens desse veículo é o preço, que fica em torno de US\$1500 (aproximadamente R\$5000,00).



Figura 1.1: Produtos comerciais

Além disso, podemos encontrar diversas outras marcas que trazem diferentes tamanhos e tipos de controle, como é o caso do **ZBoard 2**, mostrado na Figura 1.1(c), em que o controle é feito por *pads* na prancha do *longboard* que alteram a velocidade de acordo com a inclinação do usuário e o seu preço pode chegar a US\$1500 (aproximadamente R\$5000,00).

## 1.2 Definição do Problema e Objetivo

Hoje, a produção e comercialização de LMV se concentra no exterior. Assim, os seus preços de importação impossibilitam difundir a tecnologia no Brasil. Os produtos encontrados no mercado nacional são importações chinesas de baixa qualidade, que trazem perigos ao consumidor, e modelos *Do It Yourself* (Faça você mesmo) (DIY).

Os objetivos deste trabalho são o projeto de um LMV no formato de um *longboard*, e a construção de um protótipo plenamente funcional de baixo custo usando tecnologia disponível no mercado nacional.

Este projeto visa ainda comparar duas técnicas de controle de motores *brushless*, o método com sensores e o método sem sensores. A decisão do tipo de controle impacta diretamente no custo e na qualidade do produto. Para avaliar a eficácia de cada método, foram desenvolvidos testes que avaliam consumo de energia do motor, velocidades máxima e mínima, aceleração e torque. Com isso, podemos decidir qual é o melhor método a ser usado no projeto.

### 1.3 Organização do Projeto

Este texto encontra-se organizado conforme segue. No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica sobre os componentes de um *longboard*, realizando uma análise comparativa entre os diversos tipos de motores elétricos e das partes que compõem o sistema embarcado, tais como baterias, microcontroladores, transistores de potência e peças de hardware em geral. Nesse capítulo abordaremos também as técnicas de controle de motores *brushless* e explicaremos seus algoritmos de funcionamento. O Capítulo 3 apresenta o projeto da solução proposta para o *longboard* elétrico, especificando os seus componentes eletrônicos, mecânicos e de software. Em seguida, no Capítulo 4, os resultados obtidos são apresentados. Testes de campo e custos para produção são descritos. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões deste projeto e sugestões de trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## Fundamentação Teórica

Neste capítulo será realizada uma revisão da literatura em *longboards* e em motores elétricos, bem como todos os acessórios eletrônicos necessários para o seu controle. O foco do assunto será dado com base na tecnologia e não no esporte em si.

### 2.1 Longboard



Figura 2.1: Longboard (Fonte: [8]).

Criado no Havaí na década de 60, o *longboard*, conforme ilustrado na Figura 2.1, surgiu como uma maneira de divertir os surfistas em dias que as ondas estavam calmas. Eles improvisavam madeiras compensadas com o mesmo formato de suas pranchas de surf e faziam, em cima de rodas de skate, os mesmos movimentos que faziam no mar [9]. Em

1990 uma das maiores empresas de skate, a Sector 9 [10], começou a fabricação em massa de *longboards* e assim deu início à popularização desse esporte.

Hoje, o *longboard* é um esporte espalhado pelo mundo em diferentes categorias de competição.

### 2.1.1 Estrutura Mecânica

A mecânica de um *longboard* é similar a de um skate. A diferença principal entre as duas plataformas é o tamanho da prancha, sendo que no *longboard* a prancha pode ter mais que 80cm [11].



(a) Vista Inferior



(b) Vista Superior

Figura 2.2: Um *longboard* comum [1]

A Figura 2.2 mostra as vistas superior e inferior de um *longboard* típico.

### 2.1.2 *Longboard* vs. Skate

Como dito anteriormente, as diferenças entre o *longboard* e o skate são relativamente pequenas, conforme pode ser observado pela Figura 2.3.

A prancha e os eixos de um *longboard* são normalmente maiores, proporcionando melhor estabilidade. Seus objetivos não são sempre manobras. Outro aspecto que diferencia o *longboard* de um skate são as rodas. Em um *longboard*, as rodas são maiores proporcionando uma maior velocidade e menor transferência de vibrações da superfície, possibilitando seu uso em diversos tipos de terreno.



Figura 2.3: Um *longboard* (em baixo) e um Skate (em cima) (Fonte: [12]).

### 2.1.3 Os componentes

Os componentes do *longboard* podem ser divididos nas partes apresentadas na Figura 2.4.

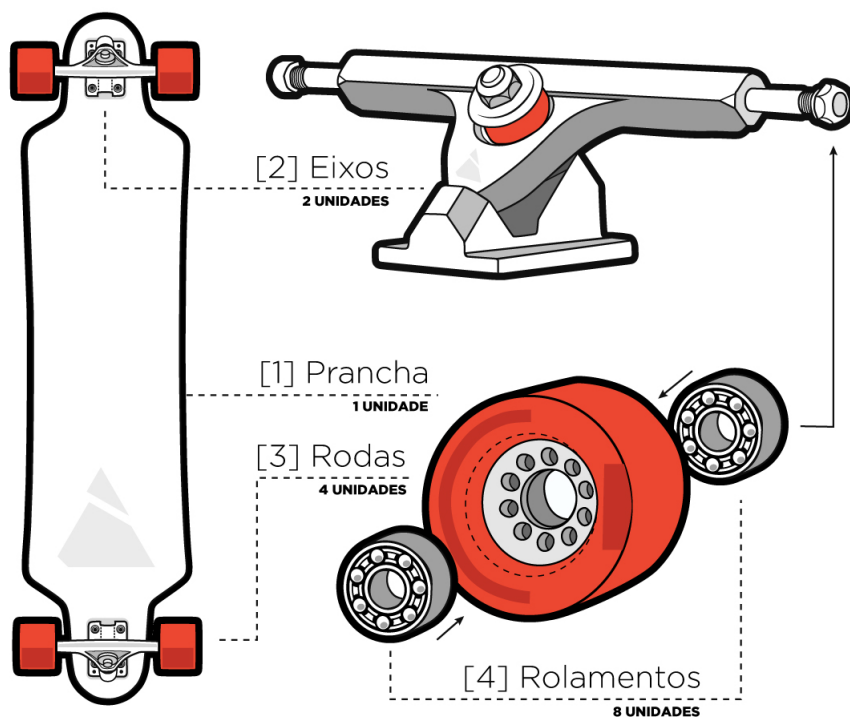


Figura 2.4: Os componentes de um *longboard*.

1. **Prancha:** Também conhecida como *Deck*, a prancha do *longboard* é maior e mais flexível que a de um skate. Quanto maior o tamanho da prancha, maior é sua estabilidade e menor é sua manobrabilidade. Sua parte superior é normalmente coberta por uma lixa de aderência. [13]



**Material** A prancha pode ser construída de qualquer material. Porém os mais comuns são o carvalho, o bambu e a fibra de carbono. Cada vez mais popular, o bambu oferece maior flexibilidade enquanto a fibra de carbono, apesar de mais cara, é muito mais leve. Compósitos de fibra de carbono com Kevlar<sup>TM</sup> deixam a prancha mais resistente e mais flexível.

**Formato** O formato da prancha é ditado pela modalidade do praticante. *Longboards* de passeio possuem pranchas largas e formatos semelhantes às pranchas de surfe, permitindo melhor distribuição de peso. *Longboards* de velocidade têm uma altura menor, passando o eixo por dentro da prancha, como representado pela Figura 2.5b, e são ainda mais compridos, proporcionando maior estabilidade.

**Nose e Tail** A parte da frente e a parte de trás da prancha pode também diferenciar dependendo do objetivo da modalidade. *Longboards* de manobras dependem de um *Nose* ou *Tail* mais alongado.

**Encaixe do eixo** Conforme apresentado na Figura 2.5, o encaixe do eixo pode ser de três tipos:

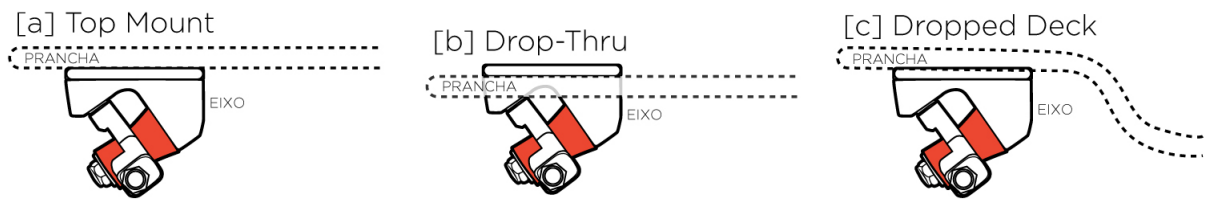


Figura 2.5: Encaixe do Eixo na Prancha.

- (a) **Top Mount** A prancha é encaixada em cima do eixo, proporcionando uma altura maior e curvas com um raio menor.
  - (b) **Drop-Thru** O eixo do *longboard* passa por dentro da prancha e parafusada por cima, possibilitando o *longboard* ficar mais baixo e, portanto, mais estável.
  - (c) **Dropped Deck** A prancha tem um formato inclinado, deixando o *longboard* mais baixo no centro, favorecendo um maior controle de derrapagem.
2. **Eixos**: Mais conhecido como *Trucks*, os eixos são as partes que gerenciam as curvas e o controle das rodas do *longboard*. Sua estrutura é similar a dos skates. A diferença é o tamanho, que possibilita rodas maiores e maior estabilidade.
  3. **Rodas**: As rodas de um *longboard* variam de 60mm a 107mm de diâmetro, sendo 60mm as rodas que se assemelham às dos skate.

- **Diâmetro:** O diâmetro das rodas influencia na velocidade máxima e na aceleração do *longboard*.
- **Dureza:** A dureza da roda se relaciona com a capacidade de aderência à superfície.

4. **Rolamentos:** O rolamento, mostrado na Figura 2.4, é a relação entre as rodas e o eixo do *longboard*. Geralmente são utilizados dois rolamentos por roda.

### 2.1.4 Modalidades do Esporte

Mesmo sendo composto basicamente de um prancha, dois eixos e quatro rodas, o *longboard* ainda pode ser personalizado de diferentes maneiras dependendo do seu objetivo. Seja ele andar no campus da universidade ou aproveitar a descida de uma ladeira.

As modalidades mais populares são: [14]

- *Cruising:* Esta é a modalidade mais básica dos *Longboards*. Consiste em apenas passear e "*deslizar*" em um ambiente urbano. Esse estilo é o mais comum e não necessita de uma configuração especializada. É ideal que o praticante busque um *longboard* mais clássico, com rodas macias para amortecer diferentes tipos de terreno e uma prancha de tamanho médio para proporcionar uma boa manobrabilidade.
- *Downhill Slide:* Nessa modalidade, o objetivo do praticante é descer uma ladeira enquanto derrapa no skate controlando a sua velocidade durante a descida. Para derrapar mais facilmente, o entre-eixos do *longboard* deve ser um pouco maior. Nesta modalidade as pranchas tendem a ser maiores e as rodas mais duras para facilitar o deslizamento.
- *Freestyle ou Street:* Com uma velocidade um pouco menor, essa modalidade é destinada a manobras com o *longboard* similares às manobras do skate. As pranchas variam muito de tamanho de acordo com o usuário. No entanto, sempre podemos ver a existência de um *kicktail* na prancha, possibilitando levantar um dos eixos do chão.
- *Dancing:* Com o aproveitamento da prancha maior, o praticante pode ficar trocando o posicionamento dos pés em cima da prancha e guiando o seu movimento. Este estilo é muito parecido com o praticado nas pranchas de *longboard* de surfe. As rodas são bem macias, pois não precisam de alta velocidade. A prancha é uma das maiores entre as modalidades, deixando o praticante mais confortável para andar sobre a mesma.

- *Downhill Speed*: Novamente em uma ladeira, o objetivo do praticante é alcançar a maior velocidade com o *longboard*, às vezes chegando a mais de 100km/h. Esses são os *longboard* mais específicos de todos. Suas pranchas são grandes, baixas e suas rodas são largas e grandes. Tudo para assegurar maior estabilidade e velocidade durante a prática.

### 2.1.5 Curvas

As curvas no *longboard* são executadas graças à inclinação dos eixos, conforme apresentado na Figura 2.6. O praticante aplica um peso maior em uma das laterais do *longboard* e o eixo transforma essa inclinação lateral na prancha do *longboard* em uma curva nas rodas.

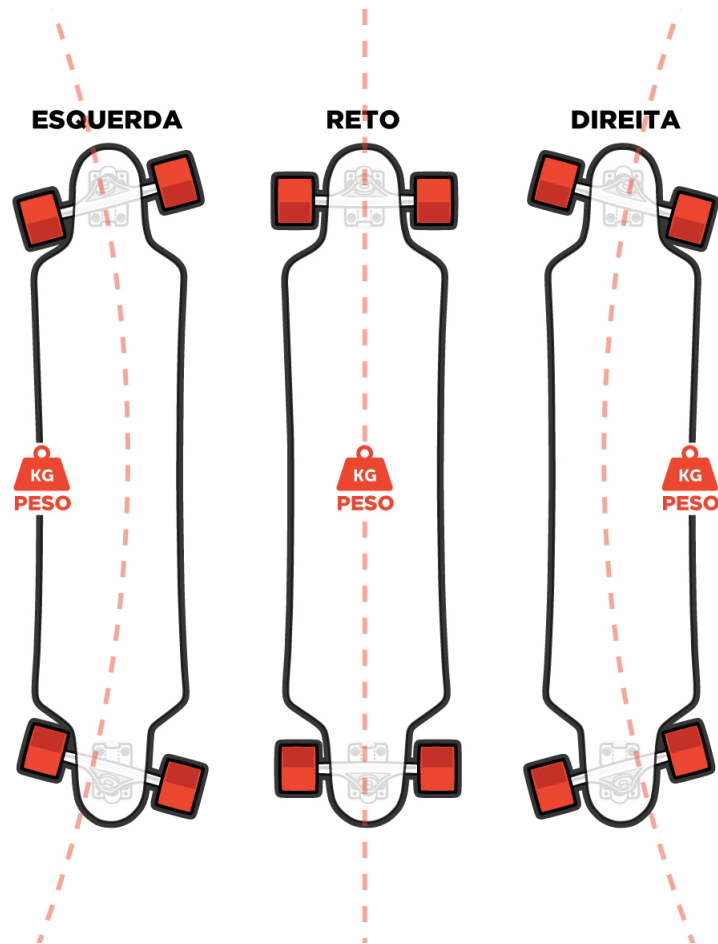


Figura 2.6: Curvas em um *longboard* e um Skate.

## 2.2 Motores Elétricos

Um motor elétrico é uma máquina que transforma energia elétrica em energia mecânica. Ele depende da criação e movimentação do campo eletromagnético em volta de ímãs. A interação entre bobinas geradoras de campo magnético e os ímãs permanentes gera uma força mecânica que é então transferida para o eixo do motor [15].

Em 1824 [16], o motor elétrico AC foi concebido, mas só foi no fim dos anos 1880 que os primeiros protótipos surgiram por Galileo Ferraris [16] e Nikola Tesla [16]. Sendo de Tesla três diferentes patentes, envolvendo um motor de quatro polos de relutância, um motor de indução e um motor síncrono com uma fonte DC, este último inspirou a criação do moderno motor *brushless DC*.

No entanto, apenas em 1932 o primeiro motor verdadeiramente DC com o torque suficiente para mover carga paga foi criado pelo cientista britânico William Sturgeon [16]. Seu motor era capaz de girar em até 600 rotações por minuto e foi usado para movimentar máquinas de impressão e ferramentas pesadas.

### 2.2.1 Princípio de Funcionamento

Existem hoje diversos tipos de motores elétricos no mercado. Suas partes principais são:

- **Rotor** é o eixo móvel do motor. O rotor é a parte em movimento de um motor e que aplica a potência mecânica a uma carga. Em alguns motores, o rotor é constituído por bobinas e em outros, por ímãs permanentes.
- **Estator** é a parte estacionária de um motor. Assim como o rotor, é composto ou pelas bobinas ou por ímãs permanentes
- **Bobinas** eletromagnéticas são compostas por fios condutores enrolados que armazenam energia em seu campo magnético. São responsáveis pela criação do campo em volta do ímã permanente e movimentar o rotor
- **Comutador**: Em alguns motores, o controle não é externo e isso é feito usando algum tipo de comutador interno. Como é o exemplo dos motores *DC com Escova* que usam uma escova e um anel de condução para alternar as fases do motor.

Embora tenham funcionamentos diferentes, todos os motores se baseiam no mesmo princípio descrito a seguir.

1. Uma espira com o campo eletromagnético demonstrado seguindo a **Lei de Ampère**, que pode ser visualizada na Figura 2.7.

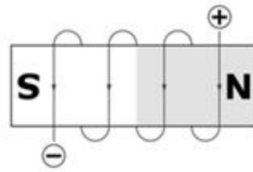


Figura 2.7: Espira com um campo eletromagnético.

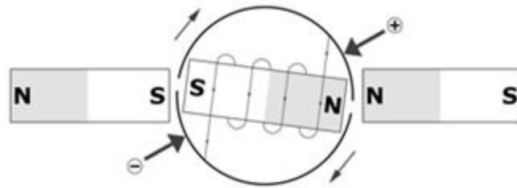


Figura 2.8: Ímãs permanentes em volta da espira.

2. Ímãs permanentes são colocados no seu caminho e as forças repulsivas e atrativas dos ímãs produzem um torque, conforme mostrado na Figura 2.8.
3. Quando a posição dos ímãs muda, como observado na Figura 2.9, a alimentação da espira muda de sentido e a força contrária é produzida. Essa troca na alimentação é feita por um circuito controlador ou um anel de comutação ligado ao rotor.

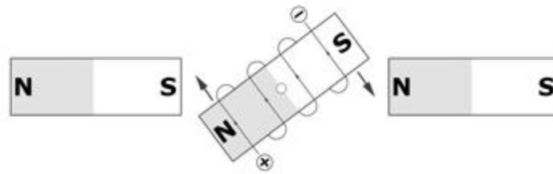


Figura 2.9: Troca da alimentação da espira e do sentido com campo eletromagnético.

O motor é dito como "*com escova*" porque o anel de comutação possui uma parte que está sempre em atrito com a escova conectada à fonte, como visto na figura 2.10. A escova conecta o anel à fonte DC. Devido a esta parte em constante atrito, os motores DC precisam de manutenção mais frequente pois há desgaste nas escovas.

### 2.2.2 Tipos de Motores

Para cada tipo de aplicação existe um tipo de motor elétrico que melhor se adequa à necessidade, um brinquedo ou um carro. Algumas características interessantes a serem consideradas para a escolha do motor mais adequado a uma certa aplicação são: [17]

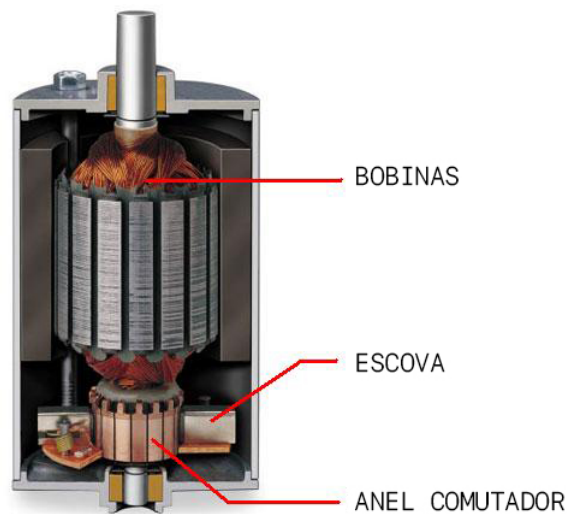


Figura 2.10: Contato da escova com o eixo do motor.

- **Manutenção:** O motor funcionará por muito tempo sem que seja necessária sua manutenção?
- **Vida útil:** Ele durará em seu funcionamento por quanto tempo?
- **Eficiência:** Qual a relação entre o torque (potência mecânica) e a potência elétrica consumida?
- **Potência / Tamanho:** Qual é a relação de potência mecânica e o seu tamanho? Para ele ter um torque alto, seu tamanho tem que ser grande?
- **Ruído elétrico:** Que tipo de ruído esse motor insere na fonte de energia? Isso pode ser importante quando o motor faz parte de um sistema maior.
- **Custo:** Comparativamente, a mesma potência é mais cara ou mais barata que outros tipos de motor?
- **Controle:** É necessário algum tipo de controle externo para que esse motor funcione?

Para as tabelas 2.1 e 2.2, foram selecionados os motores mais comuns do mercado atual.

1. **DC *Brushed*** ou *Motor DC com escova* é o motor mais simples de todos. As bobinas são o rotor e os ímãs permanentes ficam no estator do motor. A comutação é feita internamente por uma escova sem a necessidade de um controle externo.

2. **DC *Brushless*** ou *Motor DC sem escova* é um dos motores com o conceito mais novo. Por não possuir a escova e nem um anel de comutação, o motor *brushless* exige um controle externo para fazer a comutação de fase entre as bobinas. Ao contrário do motor *DC brushed*, o estator deste motor é formado pelas bobinas e o rotor contém os ímãs permanentes.
3. **AC Indução** é o motor AC mais comum usado hoje. Ele necessita tensões AC igualmente defasadas para que opere adequadamente. Sua estrutura física é semelhante a de um motor *DC brushless*
4. **Servo** é um motor comum *DC brushed* com um controle externo acoplado. É normalmente usado em sistemas que exijam uma maior precisão no seu posicionamento.
5. **Motor de Passo** é um motor *DC brushless* em que seus ímãs e bobinas estão divididos em passos. Por isso, ele consegue ter um maior controle de sua posição. Muito usado em sistemas que precisem de um controle de posição extremamente preciso.

Tabela 2.1: Comparação de motores elétricos parte 1.

Característica \ Motor	DC Brushed	DC Brushless	AC Indução
<b>Manutenção</b>	Periódica	Nenhuma	Nenhuma
<b>Vida Útil</b>	Curta	Alta	Alta
<b>Eficiência</b>	Moderada	Alta	Alta
<b>Potência / Tamanho</b>	Moderada	Alta	Baixa
<b>Ruído Elétrico</b>	Alto	Baixo	Baixo
<b>Custo</b>	Moderado	Alto	Baixo
<b>Controle</b>	Simples	Complexo	Simples ou Complexo

Nos próximos tópicos do projeto, cada uma dessas características será melhor desenvolvida.

Tabela 2.2: Comparação de motores elétricos parte 2.

Característica \ Motor	Servo	Motor de Passo
<b>Manutenção</b>	Periódica	Periódica
<b>Vida Útil</b>	Curta	Alta
<b>Eficiência</b>	Moderada	Baixa
<b>Potência / Tamanho</b>	Moderada	Baixa
<b>Ruído Elétrico</b>	Alto	Baixo
<b>Custo</b>	Alto	Alto
<b>Controle</b>	Simples	Complexo

### 2.2.3 Motores *Brushless DC* vs. *Brushed DC*

O motor com escova, mostrado na Figura 2.11, possui o mesmo comportamento do motor exemplificado na seção 2.2.1.

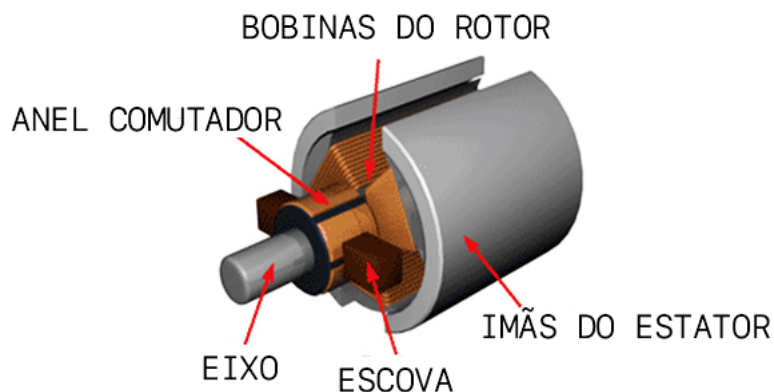


Figura 2.11: Parte interna de um Motor com Escova (Fonte: [18]).

A principal diferença é o posicionamento da escova nos terminais do motor. Essa escova fica em contato elétrico com o rotor por meio do anel de comutação, estando estacionária no estator, trocando a polaridade da alimentação da bobina com base na posição interna do rotor.

Os motores *Brushless DC Motor* (BLDC) possuem diversas vantagens sobre os motores com escova. A mais importante, e óbvia, de todas é não possuir escovas. Com isso, o motor possui menos partes que irão se desgastar com o tempo e que precisem de manutenção. A sua confiabilidade é muito maior. Além disso, motores *brushless* podem funcionar com velocidades acima de 10.000 r.p.m.[19], tanto com carga como sem carga. Sua velocidade máxima é dada pelo atrito com o rolamento e pelas forças que atuam no rotor.

A comutação dos motores *brushless* gera menor ruído porque suas partes internas são completamente encapsuladas e o tamanho e peso são muito menores. A relação de potência e tamanho é muito melhor para os motores *brushless*.

A maior vantagem do motor DC *brushed* é a fácil aplicação em sistemas. Como o motor *brushless* precisa de um controle externo, seu preço e complexidade aumentam bastante. Mas ainda assim, qualquer aplicação que usa um motor DC *brushed* pode ser adaptada com um motor *brushless*.



## 2.2.4 *Brushless DC vs. Indução AC*

A estrutura de um motor por Indução AC é semelhante a de um motor *brushless*. O estator e o rotor possuem enrolamentos trifásicos. Sendo que no rotor os enrolamentos são curto-circuitados.

Quando a corrente trifásica passa pelo enrolamento do estator, um campo eletromagnético rotatório é gerado. Esse campo rotatório induz uma tensão alternada no enrolamento do rotor que fará com que circule uma corrente por seu enrolamento. Por consequência disso, um fluxo magnético fará com que o rotor tente alinhar com o campo eletromagnético do estator.



Figura 2.12: Corte de um motor por indução (Fonte: [20]).

O custo de um motor AC por indução é menor que um motor *brushless* devido aos seus ímãs de alta potência que são bastante caros. Mas a eficiência de um motor *brushless* é maior que a de um motor AC por indução, apesar de que isso não se mantém constante com o aumento de seu tamanho: Com o aumento do tamanho do motor, as perdas magnéticas em um motor *brushless* aumentam, ao contrário do que ocorre no motor AC.

Também podemos observar que a relação de tamanho e potência do motor *brushless* é bem menor que a de um motor por indução. Motores *brushless* pequenos e muito fortes podem ser construídos, ao contrário de motores AC por indução que normalmente são grandes e pesados. Por esses motivos, são mais indicados em aplicações em alta potência.

Durante toda a história de carros elétricos e híbridos, os motores *brushless* sempre foram os escolhidos. Mas, com o desejo de ser cada vez mais eficiente, algumas empresas como a Tesla e a GM estão adotando o motor AC por indução justamente por sua característica de aumentar a potência e o tamanho sem diminuir sua eficiência energética [21]. Seu rendimento no topo não é maior que o de um motor *brushless*, mas em média, o motor AC por indução fica na vantagem.

### 2.2.5 *Brushless DC vs. Motor de Passo vs. Servo*

Esses são os motores mais comuns para que o usuário tenha algum tipo de controle na sua posição. Sendo eles:

#### Motor Servo

O Servo é um motor DC com escova e um controle externo para determinar seu posicionamento e movimentar de acordo com um sinal digital Pulse Width Modulation (PWM). Sua estrutura interna está descrita na Figura 2.13.

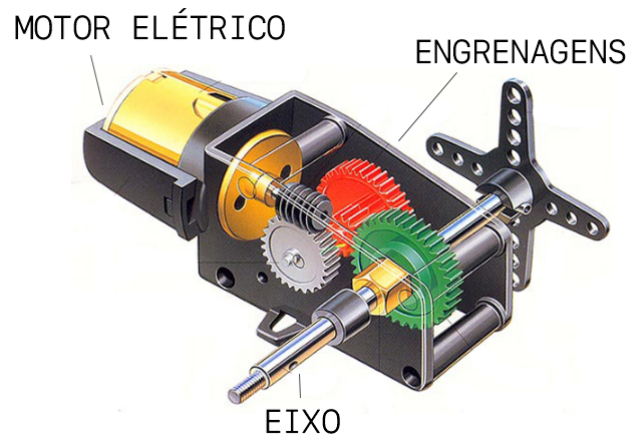


Figura 2.13: Estrutura interna de um motor Servo (Fonte: [22]).

O sinal de controle de um Servo é um pulso de 20ms, assim como a Figura 2.14, onde o tempo que ele estará ligado significará a posição que o motor deverá ficar.

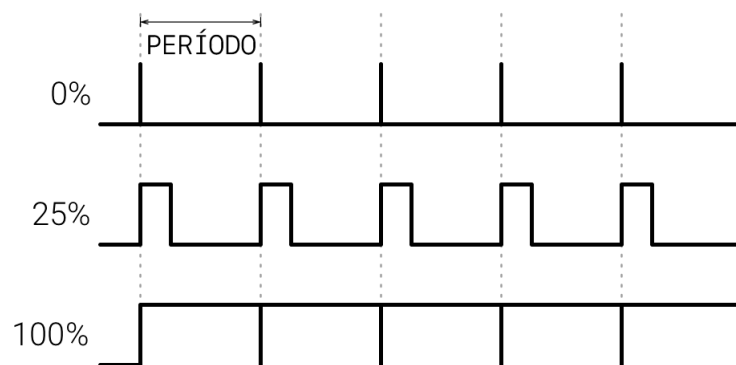


Figura 2.14: Controle de Duty Cycle de um sinal PWM (Fonte: [23]).

Com base nessa diferenciação de tempo ligado, o posicionamento do motor é feito em seu controle interno.

## Motor de Passo

O motor de passo, ilustrado na Figura 2.15, tem uma estrutura parecida com a de um motor *brushless*. Sua maior diferença é que ele não precisa de um *loop* de alimentação fechado (*Open Loop Control*). Isso é, para o controlador funcionar, ele não precisa saber o estado atual do motor.

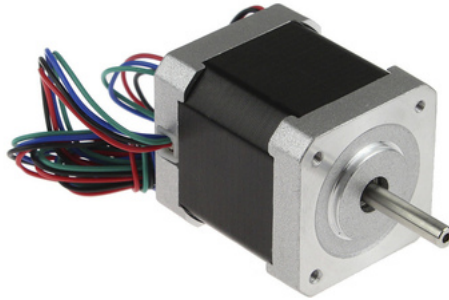


Figura 2.15: Um motor de Passo (Fonte: [24]).

O estator contém as bobinas que, excitadas por uma tensão DC em diferentes momentos, movimentará o rotor dentro do campo eletromagnético. O rotor é composto por pilha de laminações de ferro. O esquema básico de sua estrutura pode ser visto na Figura 2.16.

O rotor possui um número de dentes diferente do estator de modo que apenas um par de dentes do rotor esteja alinhado com um par de dentes do estator em um determinado momento.

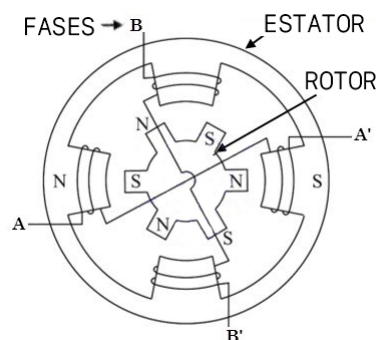


Figura 2.16: Esquema de funcionamento de um motor de passo simplificado (Fonte: [25]).

Forçando o posicionamento do rotor em passos com a movimentação exata do campo eletromagnético, o motor consegue definir exatamente a sua posição. Para uma maior precisão mais "dentes" podem ser adicionados ao rotor e ao estator.

## Diferenças

Um motor de passo tem por objetivo trabalhar em passos constantes e perfeitos. O motor *brushless* pretende suavidade no torque e nas transições.

## 2.3 Motor *Brushless*

A teoria por trás do motor *brushless* foi desenvolvida em 1880 por Nikola Tesla. Mas esses motores não tinham nenhum controle de velocidade e torque. Apenas conceitual, não efetivamente útil para alguma aplicação.<sup>1</sup>

Com o avanço da eletrônica ocorrido na segunda metade do século XX e o desenvolvimento de melhores ímãs permanentes, os motores *brushless* são capazes de um funcionamento confiável e altamente eficiente.

A estrutura de um motor *brushless* pode ser observada na Figura 2.17. O estator contém as bobinas ligadas em um controlador e o rotor gera o campo magnético permanente com o uso de ímãs de alta potência. Na imagem, podemos ver o estator interno e o rotor externo. Esse é um motor *brushless* DC *Outrunner* pois o seu rotor fica do lado de fora.

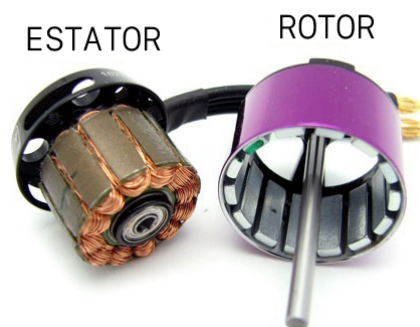


Figura 2.17: Estrutura interna de um motor *brushless*. (Fonte: [26]).

Seu custo é um pouco mais elevado que os outros motores por precisar de ímãs bem específicos e na sua parte de controle *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* (MOSFET) de alta potência. Sua variedade é muito grande. Podendo ter motores pequenos para simples funcionamentos ou motores grandes para aplicações que exigem um torque maior, como visto na Figura 2.18.

Assim como relatado na seção 2.2.3, o motor *brushless* possui diversas vantagens sobre os motores DC com escova. Entre elas, a não existência de escovas em constante atrito

---

<sup>1</sup>O motor *brushless* DC pode ser conhecido por diversos outros nomes: Motor de Corrente Contínua sem escovas e *Brushless DC Motor* (BLDC)



Figura 2.18: Um motor brushless pequeno e um grande (Fonte: [27]).

dentro do motor. Fazendo com que praticamente não exista a necessidade de manutenção, maior vida útil e redução do ruído eletromagnético no sistema.

### 2.3.1 Aplicação

Por ser versátil, o motor *brushless* DC se encaixa em qualquer aplicação que hoje exista um motor DC com escova. Hoje eles estão sendo grandemente usados em brinquedos, carros elétricos, ferramentas, tocadores de DVD e até mesmo em ventoinhas de computadores.

Há também uma grande demanda no setor de aeromodelismo por ser muito rápido e forte para um motor pequeno e leve.

### 2.3.2 Funcionamento

Com o surgimento e popularização dos transistores de potência, o circuito de comutação externo de um motor se tornou uma realidade economicamente viável. Assim, deu início à criação de motores que não precisavam de um anel comutador em constante atrito com o rotor. Para tanto, as bobinas que são ligadas às fontes agora eram fixas no estator e os ímãs permanentes se localizavam no rotor.

Durante todo o processo de controle, as bobinas dos motores são excitadas conforme o posicionamento dos ímãs permanentes no rotor com o objetivo de atrair o ímã de um lado e repelir o ímã pelo outro. Assim que chegar o momento da troca, o controlador irá reconhecer com base em algum tipo de realimentação e irá alterar a direção do campo magnético das bobinas.

## AC ou DC?

Apesar do motor *brushless* ter uma alimentação DC, a conexão com um controlador inversor é necessária para o seu funcionamento, gerando sinais AC para o motor. Nesse contexto, sinais AC não se comparam aos sinais sinusoidais comumente vistos no estudo da corrente AC, mas sim ao fato de que a polaridade nas fases do motor estão em constante troca [19].

## Frequência do PWM

Para o controle da potência enviada para o motor, um sinal PWM limita a proporção de tempo que a bateria ficará ligada no motor.

Tanto no controle com sensores ou sem sensores, a proporção do PWM e potência enviada para o motor tem uma relação direta com a sua velocidade de rotação.

Como o seu controle de velocidade depende de um PWM, é sempre necessário analisar qual a melhor frequência para esse sinal. Essa preocupação não tem muita importância levando em conta o máximo torque do motor, porque no momento de máximo torque, o PWM será de 100% e não haverá trocas no sinal. Mas, como o PWM irá variar a velocidade do motor, essa preocupação é necessária.

Em frequências mais baixas, há um aumento no valor RMS da corrente e tensão no motor porque o indutor vai assumir uma tensão DC quase constante [19]. Mas isso também causa uma diminuição na sua eficiência pois há perdas em picos de corrente, aumento na temperatura e vibrações no motor [28].

Conforme a frequência vai aumentando, o *ripple* na corrente e tensão médias do motor diminui e há menos perdas durante o processo devido aos indutores do motor. Se essa frequência aumentar muito, começará uma perda de eficiência no controlador devido às altas frequências.

Mais frequentemente, são usadas em controles de motores *brushless* as frequências de 8KHz, 16KHz e 32KHz.

## Características $K_v$ e Back-EMF

Em um motor elétrico, sempre que há a movimentação dos ímãs permanentes em um campo eletromagnético, uma tensão é induzida nas bobinas. Essa tensão é chamada Back-EMF (Força eletromotriz inversa) e é proporcional à velocidade de rotação do motor,

$$V_{\text{Back-EMF}} = K_e \omega, \quad (2.1)$$

onde  $K_e$  é a constante do Back-EMF dada em *Volts/rpm* e  $\omega$  é a velocidade angular do motor em r.p.m..

Uma das características mais importantes dos motores *brushless* DC é a constante  $Kv$ , que representa a tensão Back-EMF do motor, sendo calculada como

$$Kv = \frac{1}{K_e}. \quad (2.2)$$

Por exemplo, em um motor com  $Kv = 170$  indica que irá gerar 1V de tensão Back-EMF quando estiver rodando a 170 r.p.m.

Dado o modelo simplificado do motor DC, isto é, desconsiderando as indutâncias, podemos observar o circuito esquemático da figura Figura 2.19.

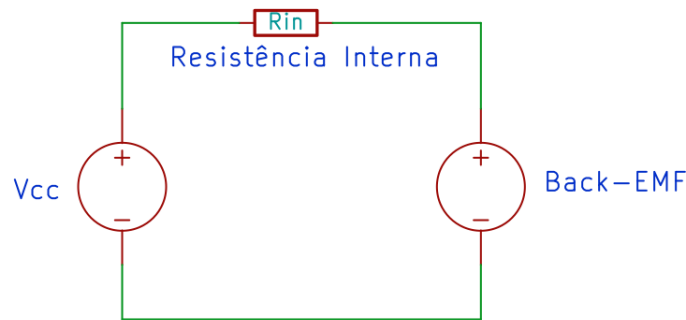


Figura 2.19: Modelo simplificado do Motor DC.

A corrente do motor pode então ser calculada por

$$i = \frac{V_{CC} - V_{\text{Back-EMF}}}{R_{in}}, \quad (2.3)$$

sendo  $V_{CC}$  a tensão da alimentação e  $R_{in}$  a resistência interna do enrolamento do motor. Note que a corrente  $i$  será máxima quando o motor estiver parado ( $V_{\text{Back-EMF}} = 0$ ) e caso a tensão Back-EMF seja maior que  $V_{CC}$  a bateria estará sendo carregada.

Com isso, podemos notar a proporcionalidade entre torque e corrente do motor. Com uma carga maior, seu Back-EMF não será tão alto e a queda de tensão sobre a resistência interna será maior, fazendo com que o motor exerça uma força maior, e com base na equação (2.1), a velocidade do motor será menor.

Essa diferença de  $Kv$  entre diferentes motores ocorre com base no número de voltas e na espessura do fio das bobinas do motor. Motores com um  $Kv$  maior possuem mais voltas com um fio mais fino. Motores com um  $Kv$  menor possuem menos voltas com um fio mais grosso.

Apesar da diferença na velocidade máxima, motores com as mesmas especificações e diferentes valores de  $Kv$  possuem equivalências de potência e torque para diferentes

valores de tensão e corrente. Isso se deve ao fato de que a resistência do fio é proporcional à área e ao comprimento do fio, de acordo com

$$R = \frac{\rho C}{A} \quad (2.4)$$

onde  $R$  é a resistência do fio,  $\rho$  sua resistividade,  $C$  o comprimento e  $A$  a área da seção.

Considerando um motor M1 com um enrolamento com comprimento do fio  $L$  e área da seção  $A$ , sua resistência interna é

$$R_{M1} = \frac{\rho L}{A}. \quad (2.5)$$

Se compararmos com um motor M2 com a metade do número de voltas e o mesmo peso de cobre, mantendo assim as mesmas propriedades de torque e potência do motor, seu comprimento do fio será  $L/2$  e a sua área  $2 \times A$ . A resistência interna deste motor será

$$R_{M2} = \frac{\rho \frac{L}{2}}{2A} = \frac{\rho L}{4A} \quad (2.6)$$

e comparando com o motor M1 temos

$$R_{M1} = 4R_{M2}. \quad (2.7)$$

Deste modo, com a metade do número de voltas, a resistência interna  $R_{M2}$  do fio é 4 vezes menor. Isso faz com que a metade do número de voltas dobre o valor do  $Kv$  do motor.

Em outras palavras, o motor com o dobro do  $Kv$  e a metade do número de voltas é equivalente em relação ao torque e velocidade, mas com a metade da tensão e o dobro da corrente.

## 2.4 Hardware para o controle de Motores *brushless*

Uma das desvantagens do uso de motores *brushless* é a necessidade de um circuito de controle externo ao motor. Este tópico abordará a estrutura de um controlador para motor *brushless* e seu algoritmo.

### 2.4.1 Estrutura básica do controlador

O controlador é composto por duas partes principais:



1. **Controlador Central** que é responsável por analisar as entradas do controle e decidir qual fase deve ser excitada com base na velocidade desejada.
2. **Ponte H** que é encarregada de transferir a potência da alimentação para a fase do motor que está sendo excitada no momento.

O controlador contém o algoritmo de comutação do motor e decide, com base nos seus sensores, qual parte da ponte H irá acionar para definir as polaridades do motor em determinado momento.

A Ponte H (*Triple Half H-Bridge*, ou Três Meias Ponte-H) é composta por 6 chaves digitais que, com base no sinal do controlador, liga uma fase do motor ao terra ou ao polo positivo da fonte de energia.

Essas chaves são normalmente implementadas por transistores MOSFETs ou TBJ.

## TBJ

Transistores *Transistor Bipolar de Junção* (TBJ) são dispositivos eletrônicos muito usados como amplificadores de sinais. Na configuração emissor comum, mostrado na Figura 2.20, uma corrente  $i_B$  aplicada na base é amplificada por um fator de amplificação  $h_{FE}$  fornecendo uma corrente de coletor  $i_C$  de acordo com

$$i_C = h_{FE} \cdot i_B \quad (2.8)$$

e

$$i_E = i_C + i_B, \quad (2.9)$$

onde  $i_E$  é a corrente no emissor,  $i_B$  a corrente na base,  $i_C$  a corrente no coletor e  $h_{FE}$  o ganho de corrente DC do transistor.

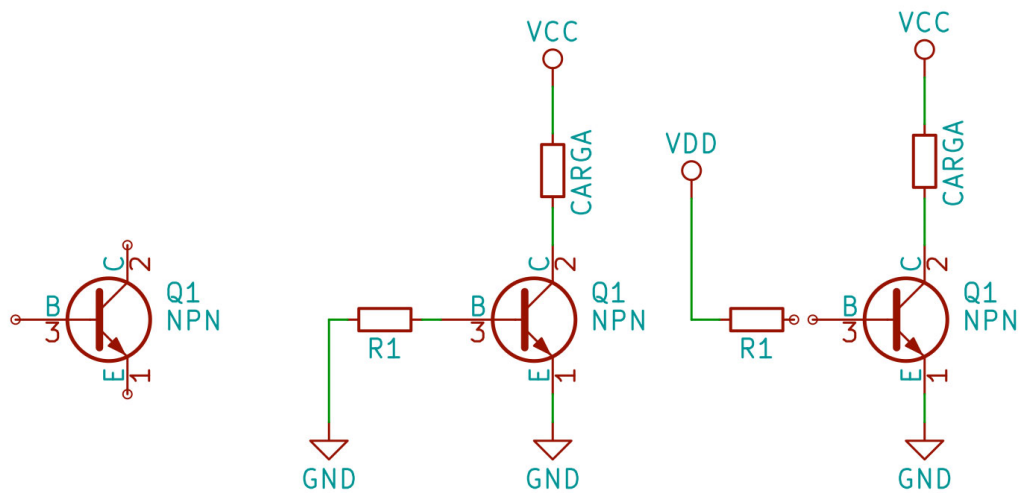
Nas figuras 2.20 podemos observar o símbolo de um transistor NPN 2.20(a), uma aplicação de um transistor desligado 2.20(b) e a aplicação de um transistor ligado 2.20(c).

De acordo com sua fabricação, o transistor TBJ pode ser do tipo **NPN** ou **PNP**. Para a configuração emissor comum, mostrada na Figura 2.21 o cálculo das correntes no transistor PNP é

$$i_C = h_{FE} \cdot i_B \quad (2.10)$$

e

$$i_C = i_E - i_B, \quad (2.11)$$



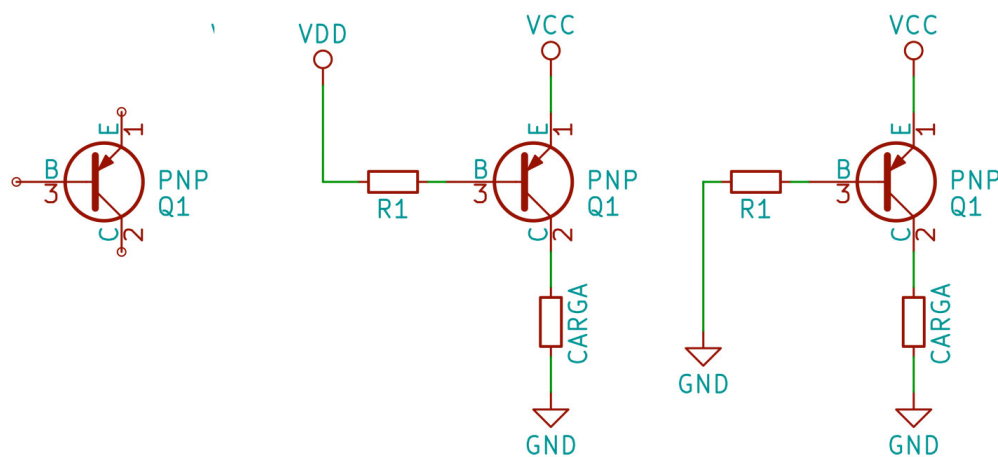
(a) Transistor NPN

(b) Desligado

(c) Ligado

Figura 2.20: Transistores NPN

onde  $i_E$  é a corrente no emissor,  $i_B$  a corrente na base,  $i_C$  a corrente no coletor e  $h_{FE}$  o ganho de corrente DC do transistor.



(a) Transistor PNP

(b) Desligado

(c) Ligado

Figura 2.21: Transistores PNP

Os transistores PNP também podem ser aplicados da mesma forma, as únicas diferenças são a posição em relação à carga, como mostra a figura 2.21, e as polaridades das

portas que são invertidas, tendo um sinal negativo na base para controlá-lo.

## MOSFETs

O *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* (MOSFET) é um tipo de transistor muito utilizado hoje em dia tanto em circuitos digitais quanto em analógicos.

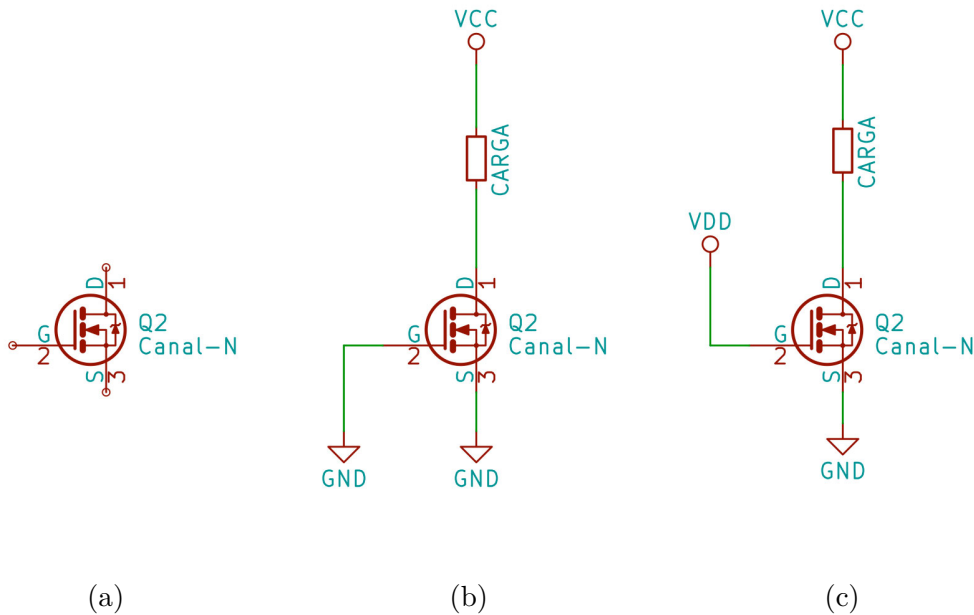


Figura 2.22: MOSFETs Canal-N

Assim como os transistores TBJ, o MOSFET também se diferencia com base na organização dos substratos, podendo ser de Canal N, como mostrado na figura 2.22, ou Canal P, representado na figura 2.23.

Dependendo das tensões em seus terminais e das características do modelo, o MOSFET pode operar em uma das seguintes regiões.

**Região de Corte** ( $V_{GS} < V_{th}$ ): Neste modo, o MOSFET fica desligado. Não há corrente entre o dreno e a fonte.

**Região de Triodo** ( $V_{GS} > V_{th}$  e  $V_{DS} < V_{GS} - V_{th}$ ): Neste modo, o MOSFET opera como um resistor controlado pela tensão  $V_{GS}$ . A corrente do dreno é dada por

$$i_D = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L} (2(V_{GS} - V_{th})V_{DS} - V_{DS}^2), \quad (2.12)$$

onde apesar desse modo possuir uma região com o comportamento linear, não é essa região que é usada para a amplificação de sinais.

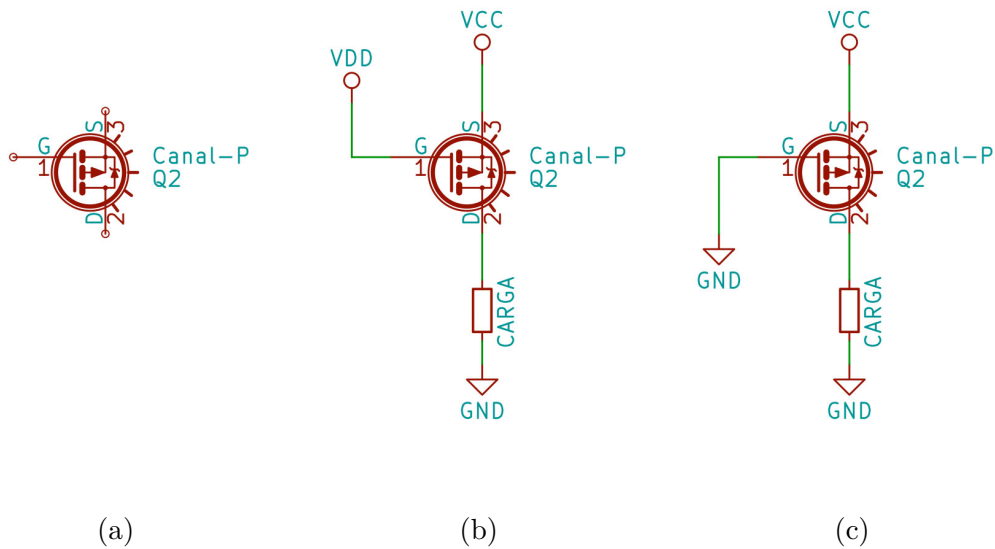


Figura 2.23: MOSFETs Canal-P

**Região de Saturação** ( $V_{GS} > V_{th}$  e  $V_{DS} > V_{GS} - V_{th}$ ) O MOSFET fica completamente ligado. Como a tensão do dreno é maior que a tensão na porta (*gate*), uma parte do canal é desligado. A corrente do dreno não depende da tensão  $V_{DS}$  sendo dada por

$$i_D = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2L} (V_{GS} - V_{th})^2, \quad (2.13)$$

onde  $V_{GS}$  é a diferença de tensão entre a porta (*Gate*) e a fonte,  $V_{DS}$  a diferença de tensão entre o dreno e a fonte,  $V_{th}$  a tensão limiar do MOSFET,  $i_D$  a corrente no dreno,  $\mu_n$  a mobilidade efetiva dos portadores de carga,  $C_{ox}$  a capacitância do óxido da porta por unidade de área,  $W$  a largura do canal que proporciona a passagem de corrente no MOSFET e  $L$  o comprimento desse canal.

Neste modo, podemos observar um aumento de  $V_{DS}$  mas uma resposta  $I_D$  constante. Para que isso ocorra, a resistência interna do MOSFET aumenta para manter esse comportamento.

Em circuitos digitais os MOSFETS funcionam na região Triodo e na região de Corte, e em circuitos analógicos funcionam na região de Saturação.

### Transistores vs. MOSFETs

Dependendo da potência dos motores, MOSFETs são mais aconselhados pois são mais facilmente encontrados com uma maior potência e têm uma impedância de entrada de controle muito alta.

Outras vantagens dos MOSFETs são [29]:

- Alta velocidade de comutação. Ideal para o controle com PWM;
- Podem ser ligados em paralelo para uma maior segurança;
- Circuito de excitação mais simples;
- Quando em alta potência, os MOSFET são mais baratos que os transistores TBJ.

## Ponte H

A Ponte H é um circuito eletrônico capaz de inverter a tensão aplicada nos terminais de uma carga.

Um exemplo simples é o controle do sentido de rotação de um motor de escovas comum, como observado na figura 2.24

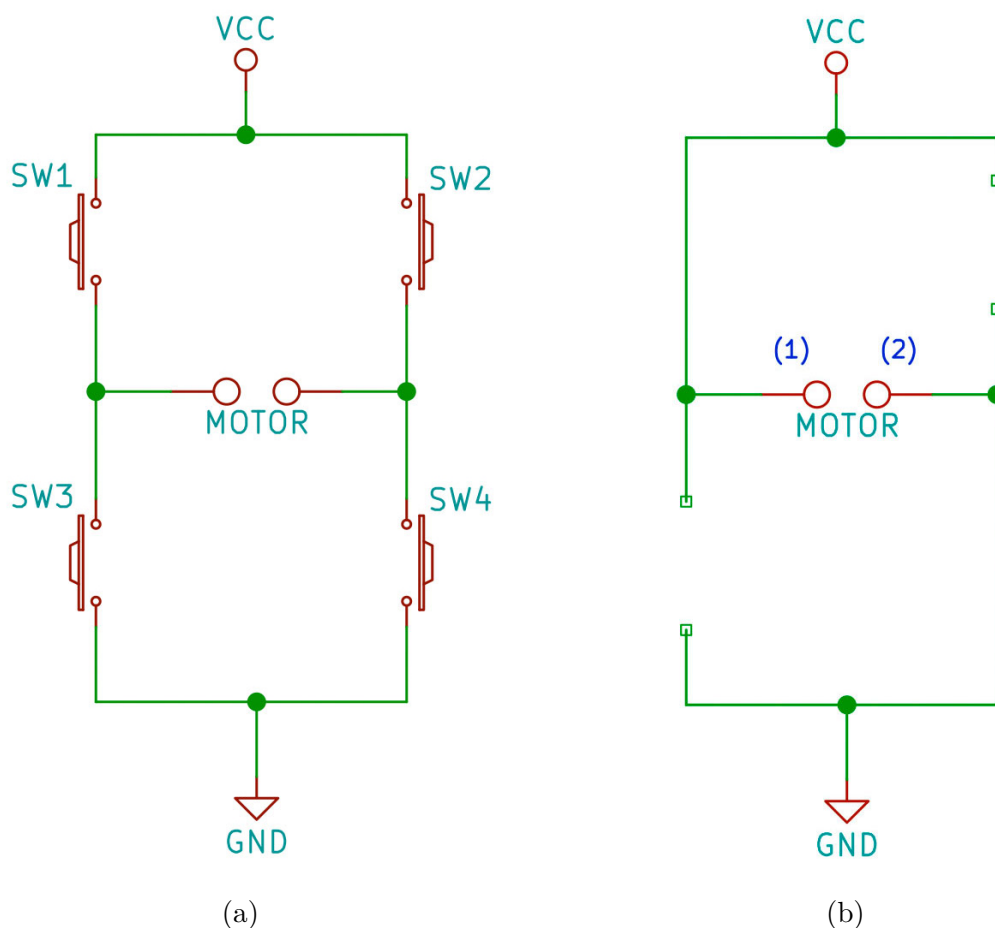


Figura 2.24: Circuito de uma Ponte H com interruptores

No circuito da figura 2.24, se as chaves SW1 e SW4 forem ligadas, deixando as chaves SW2 e SW3 desligadas, podemos observar que a corrente vai passar da esquerda para a

direita no motor. Quando as chaves SW2 e SW3 estiverem ligadas e as chaves SW1 e SW4 estiverem desligadas, observamos uma alteração no sentido da corrente, fazendo com que o motor gire no sentido contrário.

No circuito de controle de motores *brushless*, três meias ponte-H são necessárias para alterar a direção da corrente nas 3 fases diferentes, representado na figura 2.25.

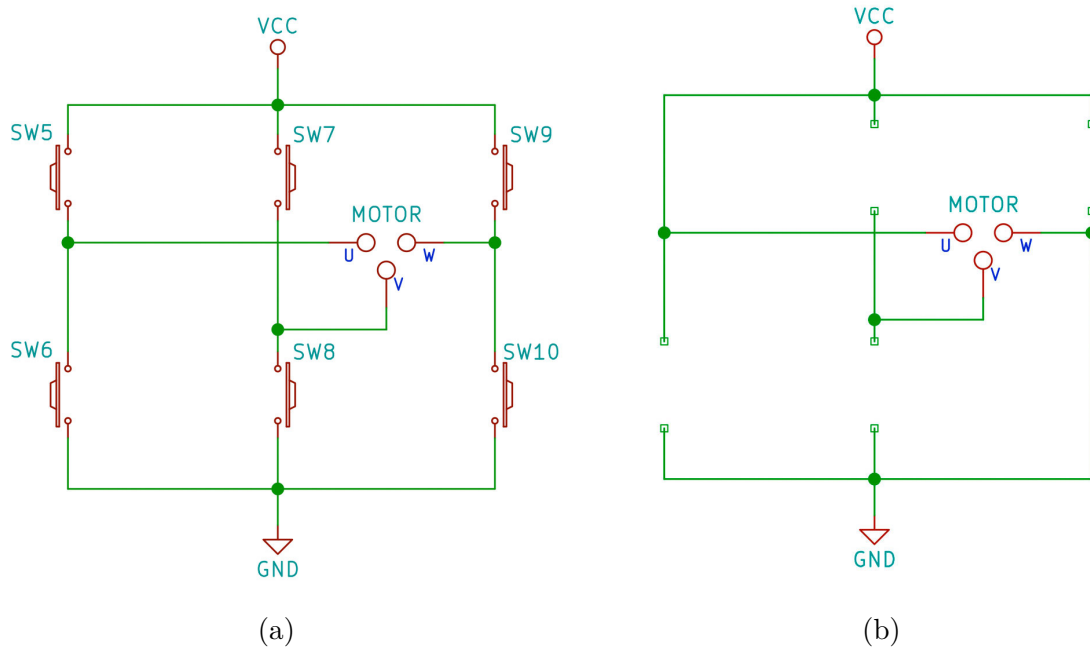


Figura 2.25: Circuito de uma Meia Ponte H Tripla com interruptores

Ao trocar a chave superior ligada e a chave inferior ligada, podemos definir a direção da corrente nas fases do motor, definindo assim o campo eletromagnético de suas bobinas.

Para as chaves do motor, podemos usar transistores BJT ou MOSFETs canal N e P, mostrado na figura 2.26, dependendo da aplicação e da potência do motor.

### Canal N no lado positivo da carga

Para escolher o MOSFET a ser utilizado no projeto, alguns pontos devem ser considerados:

- MOSFETs Canal P de alta potência tendem a ser mais caros. Em um projeto com motores de 80A e 40V, MOSFETs canal P custam por volta de US\$4,00 (R\$ 15,00)[30], não sendo encontrados no Brasil. Enquanto MOSFETs com as mesmas características de canal N são encontrados por US\$1,20 (R\$3,90) e são facilmente encontrados no Brasil[31].
- MOSFETs Canal P tendem a ter uma velocidade de troca de estado mais baixa que MOSFETs de canal N. [32]

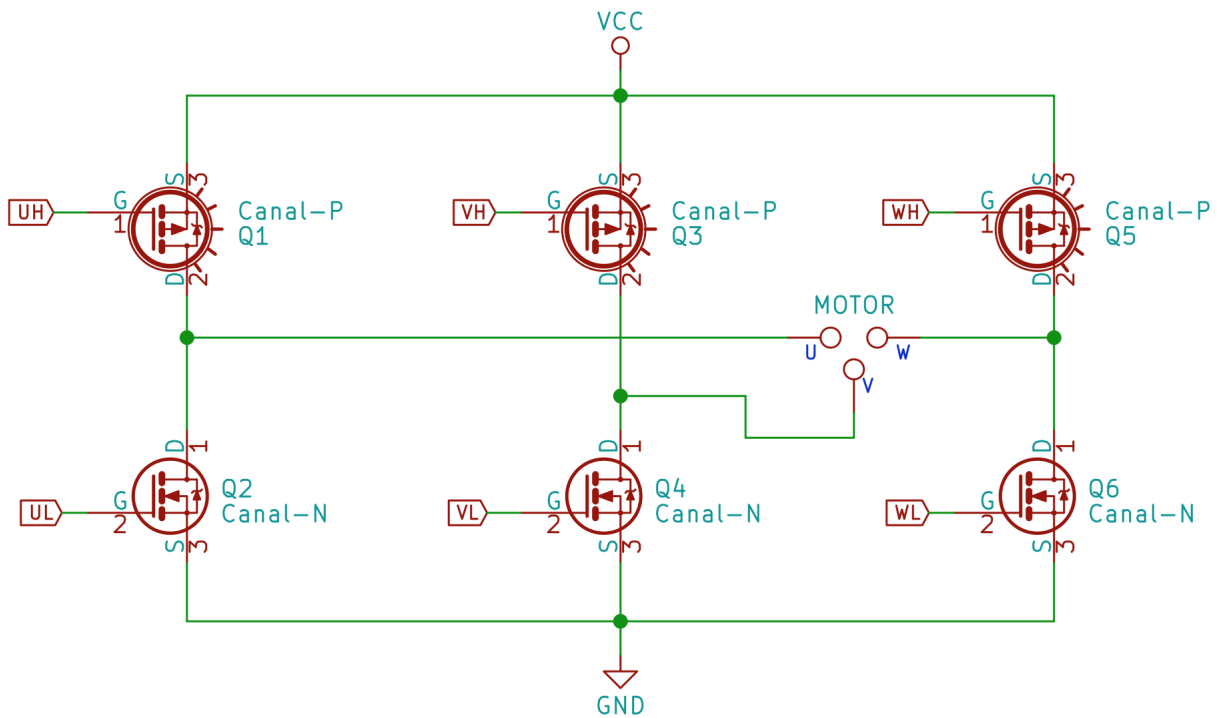


Figura 2.26: Circuito de uma Meia Ponte H Tripla com MOSFETs N e P.

- A resistência interna  $R_{DSON}$  do MOSFET Canal N é menor que a de um Canal P.[32]

Em um circuito com MOSFET Canal N localizado no lado negativo da carga, conforme mostrado na figura 2.22, podemos observar que a tensão  $V_S$  é fixa e igual ao terra do circuito. Logo, controlando a tensão  $V_G$  no gate, podemos facilmente colocar o MOSFET no modo triodo

Porém, em um circuito em que o MOSFET Canal N é colocado no lado positivo da carga, como é necessário em uma ponte H, conforme mostrado na figura 2.27, observamos que a tensão  $V_S$  irá mudar de acordo com o estado do MOSFET.

Como a tensão  $V_S$  flutua,  $V_{GS}$  não mantém o valor de  $V_{DS} + V_{th}$  e como  $V_{GS} > V_{th}$  e  $V_{DS} > V_{GS} - V_{th}$ , o MOSFET entra no estado de Saturação. Com isso, o aumento da queda de tensão no MOSFET fará com que ele dissipe mais potência, aumentando sua temperatura e a tensão  $V_S$  não será a tensão  $V_D$  total.

Para resolver esse problema, uma das soluções encontradas é usar um circuito de Driver de MOSFET, como observado na figura 2.28. Esse circuito tem como objetivo alterar a tensão no  $V_G$  do MOSFET com base no  $V_S$ . Com isso, mantendo a tensão  $V_{GS}$  constante.

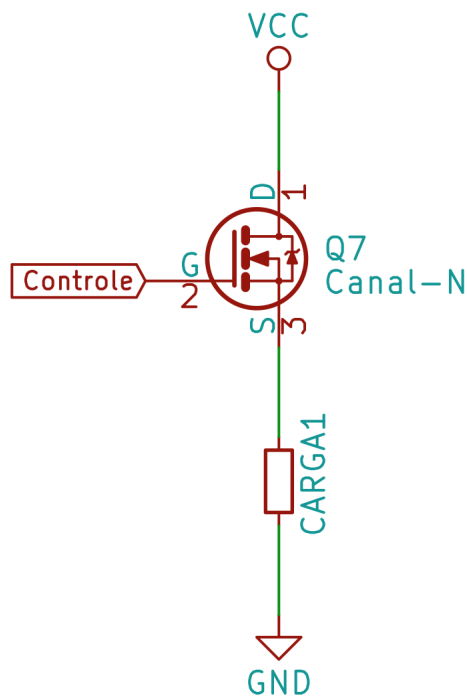


Figura 2.27: Circuito com um MOSFET no lado positivo da carga.

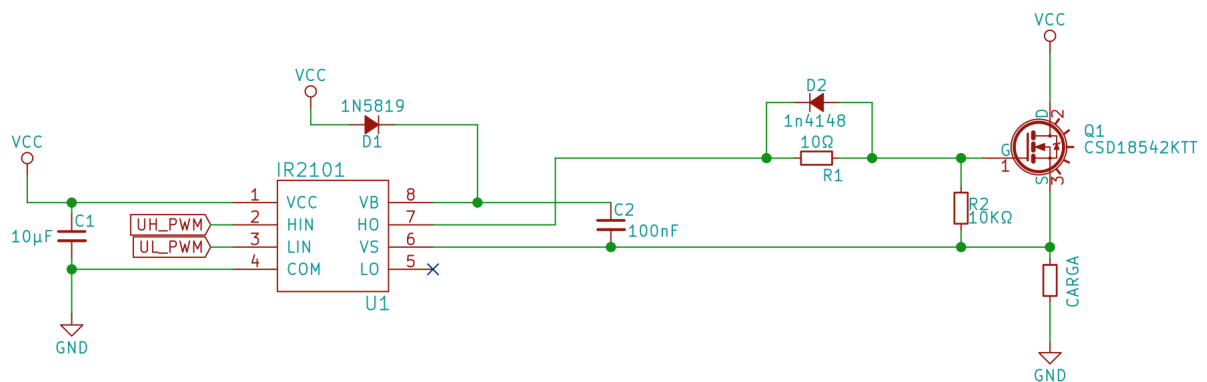


Figura 2.28: Circuito do Driver de MOSFET IR2101.

O circuito funciona com um PWM na sua entrada. Durante o período de PWM baixo, o capacitor C2, chamado de Capacitor de *Bootstrap*, é carregado com a tensão da alimentação. No período de PWM alto, a tensão de  $V_G$  será somada com a tensão da alimentação e  $V_{GS}$  continuará na região de triodo.



## 2.4.2 O Sistema Embarcado

Para a implementação do controle são necessários sistemas embarcados para a leitura de tensões, comunicação com outros sistemas, acionamento de MOSFETs e a comunicação *Bluetooth* com o usuário.

### O Microcontrolador

Trata-se de um System on Chip (SoC), conforme ilustrado na Figura 2.29, contendo a Central Processing Unit (CPU), memória e portas periféricas capazes de gravar ou ler dados.

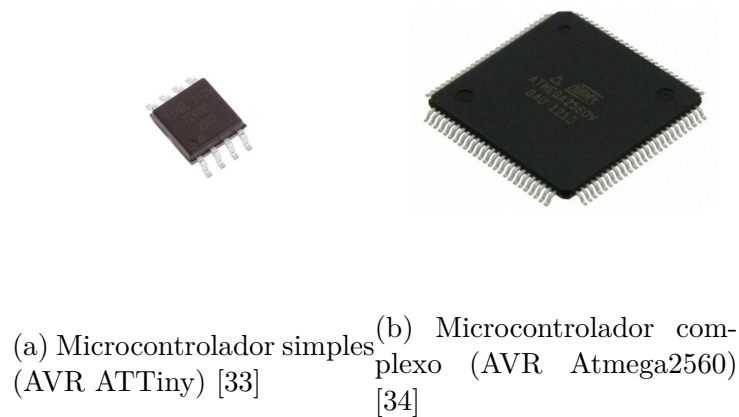


Figura 2.29: Microcontroladores

Um microcontrolador é um processador que, geralmente, possui as seguintes características:

- Baixo custo: Sua construção é simples e com baixo poder de processamento.
- Sistema dedicado: Como é um processador muito simples, geralmente com pouca memória, são adequados a sistemas computacionais simples de funcionalidade bem definida.
- Baixo consumo: São eficientes em quesito de energia pois, normalmente, são usados em sistemas portáteis alimentados com bateria.

As especificações variam para funções bastante simples como apenas ligar um LED com base em uma entrada ou funções mais complexas como o controle de GPS ou de um sensor de câmera. Geralmente suas funcionalidades incluem:

- General Purpose Input/Output (GPIO) são portas digitais de entrada e saída do microcontrolador. Permite a leitura ou escrita de sinais digitais em seus pinos. Com isso, permite a comunicação com outros dispositivos e conexão a outros circuitos digitais;
- **Timers** são temporizadores digitais internos ao controlador com base em seu *Clock*. Com os *timers*, o controlador pode controlar suas funcionalidades de acordo com o tempo. Uma das funcionalidades principais dos *timers* é o controle do PWM;
- Analog to Digital Converter (ADC) permite a conversão de um sinal analógico em um valor digital para ser usado em seu processamento;
- Digital to Analog Converter (DAC) permite a conversão de um valor digital para um sinal analógico para controlar sistemas externos;
- Pulse Width Modulation (PWM) permite o controle de dispositivos externos através de um sinal digital, como explicado na seção 2.4.3;
- **I2C, SPI e UART** são protocolos de comunicação implementados diretamente no microcontrolador. São usados para comunicar com outros sistemas e na gravação do programa interno do microcontrolador; e
- **Outros.** Alguns microcontroladores podem oferecer funcionalidades extras embutidas de fábrica. Como é o exemplo do microcontrolador ESP32 que contém Bluetooth 4.0 e WiFi já padrões em seus dispositivos.

Existem diversas maneiras no mercado para programar um microcontrolador. Alguns microcontroladores possuem o protocolo USB já no seus dispositivos, podendo assim ligar diretamente na USB do computador e usar o software específico para programá-los.

Outros, com o objetivo de ser mais simples, precisam de um circuito externo para programar. É o caso dos microcontroladores ATmega que precisam de um módulo *FTDI* para converter informações dadas pelo protocolo UART em USB. Os microcontroladores STM32 precisam de uma ferramenta chamada ST-LINK que converte os dados do protocolo SPI para o USB. Para facilitar a programação, alguns fabricantes trabalham com uma placa de desenvolvimento, como a apresentada na Figura 2.30. Nela, todos os componentes necessários para o funcionamento do microcontrolador já estão prontos e o usuário pode apenas programá-la. Esse é o caso do Arduino, que engloba todas as necessidades de um microcontrolador ATmega em uma placa simples para o usuário final.

A linguagem de programação varia de microcontrolador para microcontrolador. Os mais simples utilizam C++ em suas bibliotecas. Os mais complexos podem ter um sistema operacional (*RtOS*) próprio e interpretar qualquer linguagem escolhida.

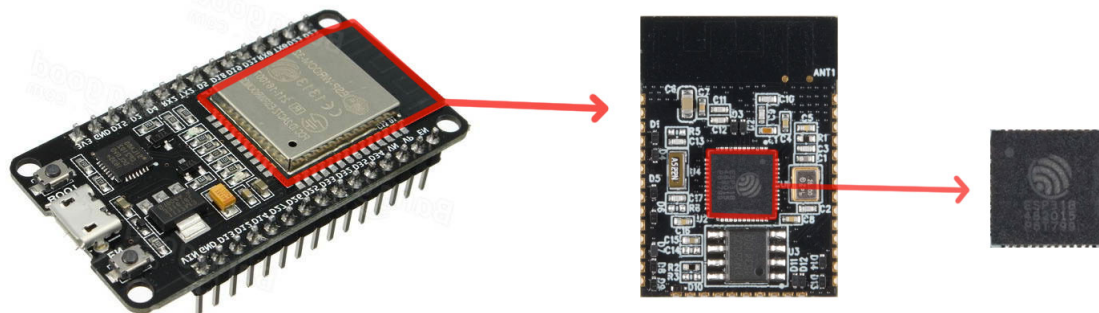


Figura 2.30: Placa de desenvolvimento do microcontrolador ESP32. Progressão de complexidade da placa de desenvolvimento (Fonte: [35]).

O tamanho físico do microcontrolador, geralmente, tem uma correlação grande com seu preço e funcionalidades. Microcontroladores pequenos com especificações complexas tendem a ser mais caros, enquanto microcontroladores baratos e simples tendem a ser maiores.

Hoje no mercado existe uma grande variedade de microcontroladores facilmente acessível ao público, dentre eles podemos citar:

- **Intel 8051** Um dos microcontroladores mais usados no mundo, o Intel 8051 é um controlador 8bits que surgiu por volta de 1980;
- **PIC e ATmega** são microcontroladores amplamente usados por hobistas por seu baixo custo e ampla comunidade de suporte. Hoje, os chips ATmega são comumente encontrado na plataforma Arduino;
- **Arduino** Plataforma *Open Source* de prototipagem de Hardware. O Arduino implementa diferentes microcontroladores para diferentes tipos de projeto. Com seu software de desenvolvimento, é possível criar protótipos avançados usando bibliotecas criadas pela comunidade;
- **STM32** Microcontrolador 32Bits com arquitetura ARM da STMicroelectronics; e
- **ESP32** O ESP32 também é um microcontrolador 32bits que opera a 240MHz e possui Bluetooth Low Energy e Wifi integrados no chip.

Dependendo da aplicação, cada microcontrolador tem sua vantagens e desvantagens. Nesse projeto, dois diferentes microcontroladores foram usados pelas diferentes necessida-

des de velocidade de leitura ADC para os dois tipos de controle do motor. A seção 3.2.2 desenvolverá essa diferença.

## Leitura da Corrente

Para todos os tipos de controladores de motores *brushless*, a leitura da corrente instantânea do motor é necessária para tomar as suas decisões.

Algumas das técnicas que podem ser usadas para a leitura da corrente são:

- **Resistor Shunt** Ao colocar um resistor de resistência muito baixa (por volta de  $1\text{m}\Omega$ ) em série com a carga (Resistor Shunt), podemos analisar a queda da tensão sobre essa resistência conhecida e analisar a corrente que passa pelo circuito com base na lei de Ohm.

$$V = R \times I \quad (2.14)$$

Este método de medida da corrente apresenta alguns problemas.

- Como a resistência está em série com a carga, seu valor de resistividade deve ser muito pequeno para não influenciar no circuito. Como as bobinas do motor *brushless* tem uma resistência muito pequena ( $\approx 1\Omega$ ), o resistor shunt, mostrado na Figura 2.31, deve ser muito pequeno para que não influencie na eficiência do motor.
- Como a corrente que passa pelo circuito do motor é normalmente muito grande e a resistência shunt deve ser muito pequena, a potência desse resistor deve ser muito grande.

Resistores de alta potência, baixa resistividade e alta precisão são bastante caros, impactando consideravelmente no custo do projeto.

Considerando um resistor shunt de  $1\text{m}\Omega$  e um motor de  $80\text{A}$ , a queda de tensão sobre o resistor será de  $V = 0,001 \times 80 = 0,08\text{V}$  em sua carga máxima. Esse valor de  $80\text{mV}$  para a leitura ADC de um microcontrolador é muito pequena, necessitando de um conversor de alta precisão e resolução. Para isso, além do resistor shunt, é indicado que exista um circuito de amplificação do sinal para o valor máximo de fundo de escala do ADC do microcontrolador, aumentando ainda mais o custo do projeto.

- **ACS712 e ACS758** São circuitos integrados da empresa *Allegro MicroSystems* que fazem a leitura da corrente do circuito por meio do efeito Hall, ilustrados na Figura 2.32. É uma solução simples, eficiente e econômica para a leitura da corrente.

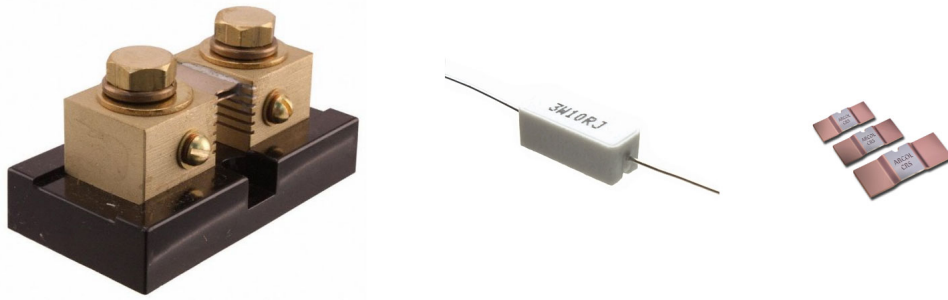


Figura 2.31: Resistores Shunt de diferentes tipos (Fonte: [36]).

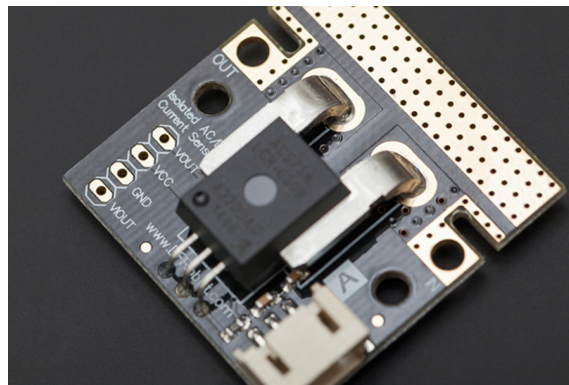


Figura 2.32: CI ACS758 em uma placa (Fonte: [37]).

Existe uma variedade muito grande de sensores, desde sensores com máximo de 5A unidirecional a sensores que suportam 500A bidirecionalmente.

Para implementar no sistema, o CI fica em série com a carga e um sinal analógico de 0 a 5 Volts indica a corrente que está sendo utilizada.

## 2.5 Controle do Motor Brushless

Para uma demonstração básica do funcionamento do motor, a versão simplificada do modelo *Brushless DC Motor* (BLDC) consiste de três bobinas e um ímã permanente no centro representando o rotor, como demonstrado na Figura 2.33.

Para a movimentação do motor, 6 passos na comutação serão implementados com o objetivo de mover o eixo do motor em 60 graus elétricos. Os 6 passos totalizam 360 graus, ou seja, uma revolução elétrica. A Figura 2.34 apresenta o gráfico do PWM de excitação das bobinas com base nos passos.

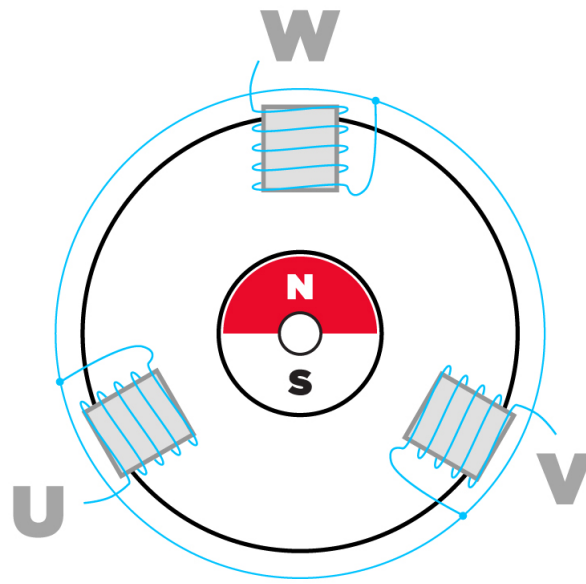


Figura 2.33: Esquema do modelo simplificado de um motor BLDC.

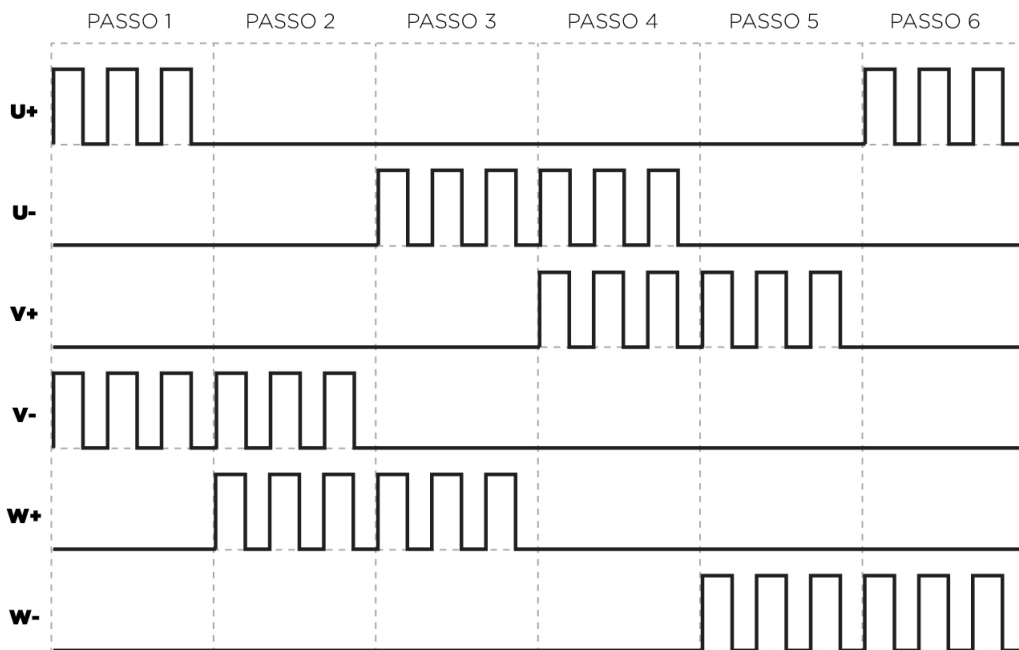


Figura 2.34: Gráfico do PWM de excitação das bobinas com base nos passos.

Diz-se revolução elétrica pois dependendo da quantidade de bobinas e da quantidade de ímãs permanentes no motor, uma revolução mecânica pode conter várias revoluções elétricas. Em um motor com 7 pares de ímãs (14 polos), 1 rotação mecânica representa 7 rotações elétricas:

$$R_{\text{elétricas}} = \frac{P}{2} \cdot R_{\text{mecânicas}}, \quad (2.15)$$

onde  $R_{\text{elétricas}}$  é o número de rotações elétricas por minuto,  $P$  o número de polos do motor e  $R_{\text{mecânicas}}$  o número de rotações mecânicas.

O número de comutações necessárias para cada volta mecânica do motor, pode ser dado por:

$$N_{\text{comutações}} = R_{\text{elétricas}} \cdot 6. \quad (2.16)$$

Como o nosso modelo de motor simplificado possui apenas um par de ímãs (2 polos), cada revolução elétrica representa uma revolução mecânica. Apenas 6 passos são necessários para dar uma volta no eixo do motor. A Figura 2.35 demonstra dois dos 6 passos do rotor com base no gráfico anterior e o vídeo dessa animação pode ser visto no link <https://youtu.be/tfh0CKG3s2k>.

O objetivo do controlador é sempre manter as bobinas ativas de modo que uma atraia e outra repele o rotor constantemente. Para alterar a velocidade e a posição do motor, diferentes tipos de controle são implementados.

### 2.5.1 Controle básico do motor

Para um controle simples, nenhuma outra informação além da velocidade desejada é necessária ao controlador (*Open Loop Control*).

Sendo assim, o controlador irá forçadamente colocar a fase nas configurações da ordem de comutação com base em um tempo  $t$ . Deste modo, o motor opera de maneira similar a um motor de passo, permanecendo um tempo  $t$  em cada passo. Quanto menor é o tempo  $t$ , maior é a velocidade de rotação do motor.

Esse método é extremamente simples e barato, pois não depende de nenhuma leitura externa. No entanto, não funciona adequadamente na prática, sendo apenas um método teórico, pois não considera, principalmente, a variação da carga do motor ao longo do tempo e a corrente de saturação das bobinas que pode danificar o motor e os circuitos de acionamento (ponte H).

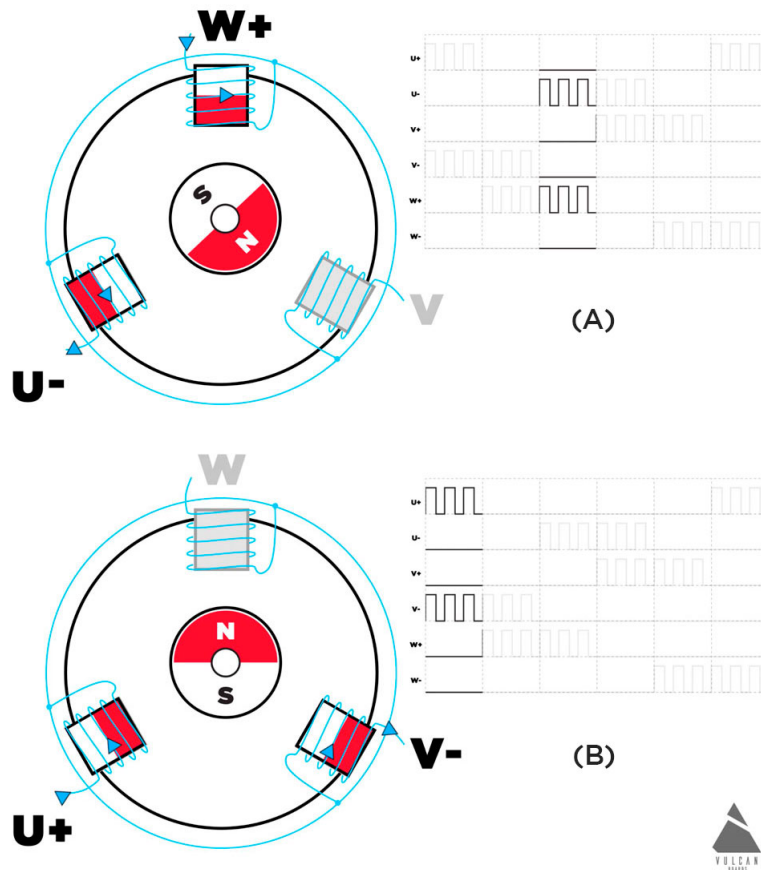


Figura 2.35: Movimentação do rotor com base nos passos da comutação. O vídeo dessa animação pode ser visto no link <https://youtu.be/tfh0CKG3s2k> .

## 2.5.2 Controle com sensores

Para um melhor controle do motor é ideal que o controlador saiba a posição atual do rotor do motor (*Closed Loop Control*). Uma das maneiras mais simples é usando um sensor de posição.

Sabendo a posição atual e o próximo estado de comutação, o controlador consegue excitar as fases corretas para a sua movimentação. Quando a carga do motor for maior, o controlador reconhecerá que o motor não rodou e continuará naquele estado, ou reconhecerá que o motor travou. Deste modo, o controlador sabe exatamente o que fazer nos sinais para que o motor execute o movimento desejado.

O sensor de posição angular do eixo mais popularmente usado é o sensor de efeito Hall, aproveitando o efeito do campo magnético gerado pelos ímãs permanentes.



## Sensores de Efeito Hall

O sensor de efeito hall, mostrado na Figura 2.36, é um transdutor que varia a tensão de saída de acordo com a variação de um campo magnético. Esse efeito acontece quando um campo magnético perpendicular ao fluxo da corrente é aplicado ao sensor, gerando assim uma tensão perpendicular a este campo.



Figura 2.36: Sensor de efeito Hall (Fonte: [38]).

A leitura do sensor é feita digitalmente. Quando não há nenhuma força agindo sob o sensor ou um polo negativo está presente, ele não irá conduzir corrente. Quando há um polo positivo aplicado, o sensor irá conduzir uma corrente. Os sensores podem estar instalados dentro ou fora do motor. Fazendo a leitura dos ímãs permanentes do motor, com base na combinação de 3 sensores o controlador decidirá quais as fases devem ser excitadas para a correta movimentação do motor.

## Outros sensores

Existem também outros tipos de sensores que podem ser utilizados para determinar a posição do eixo do motor.

- **Encoder** O *encoder* determina em passos a movimentação do eixo do motor, posicionado conforme ilustrado na Figura 2.37. Com isso, a leitura da rotação pode ser feita na resolução dos passos do *encoder*. Permite a utilização do motor *brushless* de forma semelhante a um motor de passo.  
O maior problema desse sensor é o seu tamanho e a mecânica de implementação junto com a carga.
- **Optical Encoder** Os sensores ópticos, apresentados na Figura 2.38, fornecem uma informação de leitura com base em uma roda de padrões. Com base na leitura digital de sensores de luminosidade, o controlador sabe a posição do eixo do motor.

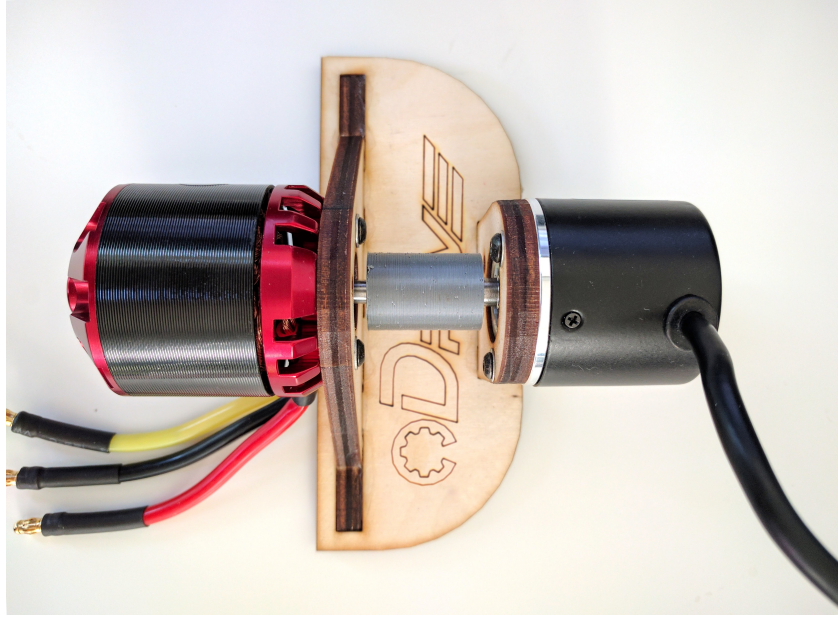


Figura 2.37: Sensor *encoder* em um motor *brushless* (vermelho) (Fonte: [39]).

Este tipo de sensor tem o mesmo problema do encoder de tamanho e mecânica para colocá-lo junto à carga.

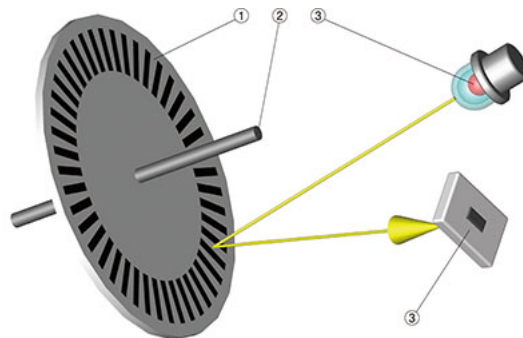


Figura 2.38: Sensor *encoder* óptico. (1) disco com os traços, (2) centro de rotação do disco, (3) sensor de luminosidade (Fonte: [40]).

Além da aplicação dos sensores, é necessária um sinal PWM para controlar a velocidade de rotação do motor.

### **Pulse Width Modulation (PWM)**

Como o controlador irá trocar o estado de comutação com base na posição do eixo do motor, a velocidade de rotação é controlada alterando a força com que o motor irá para o próximo estado.

Para controlar essa força, o controlador utiliza a técnica de Pulse Width Modulation (PWM) para limitar a tensão que está sendo aplicada no motor.

O PWM é um sinal digital DC que varia sua proporção de ligado e desligado dentro de um mesmo período de tempo. O valor médio do sinal é o mesmo valor de proporção com a fonte.

Com base na proporção do sinal, demonstrado na Figura 2.14, os MOSFETs da Ponte H irão ficar mais tempo ligados ou desligados. Limitando assim a tensão média nos polos do motor.

## O Controle com sensores

Com uma proporção maior ligada, o motor fará mais força entre os estados e sua movimentação será mais rápida. Com uma movimentação mais rápida, a velocidade de comutação será mais rápida e sua velocidade de rotação total aumentará.

Esse tipo de controle é um dos mais confiáveis no mercado.

Além disso, o arranque do motor tem a melhor performance entre todas as técnicas pois a posição inicial do motor é conhecida. Ele não precisa fazer suposições da posição do rotor, como é o caso do controle sem sensores, explicado na seção 2.5.3.

A maior desvantagem desta forma de controle é a total dependência dos sensores. Caso os sensores apresentem alguma falha o controle estará comprometido. O preço dos sensores Hall também é um ponto que pode pesar no custo do projeto.

### 2.5.3 Controle sem sensores

Esse método funciona como o método de controle com sensor, onde algum tipo de informação do motor é retroalimentada para o controlador.

Nesse método, a presença de sensores no motor é substituída pela leitura da Força Eletromotriz Inversa (Back-EMF) que é gerada pela bobina do motor quando há um distúrbio no campo eletromagnético causado pelos ímãs permanentes.

São apresentadas a seguir duas técnicas desse controle.

#### *Zero Crossing*

Durante o período de comutação, sempre teremos uma fase do enrolamento do motor ligada à fonte, uma fase ligada ao terra e uma fase não ligada a nenhum dos polos da bateria. Essa fase é chamada de Fase Flutuante [41].

Com base no seu estado anterior e posterior, o sinal do *Back-EMF* dessa fase flutuante irá descer de **V+** para **GND** ou subir de **GND** para **V+** com relação à bateria.

Para determinar o momento correto da comutação, esse movimento é observado até o momento que ele ultrapassa o zero virtual da alimentação do motor, normalmente 50% da tensão da bateria [41]. Ao alcançar o zero, o tempo da comutação anterior até a metade é duplicado e assim o motor manterá a velocidade constante.

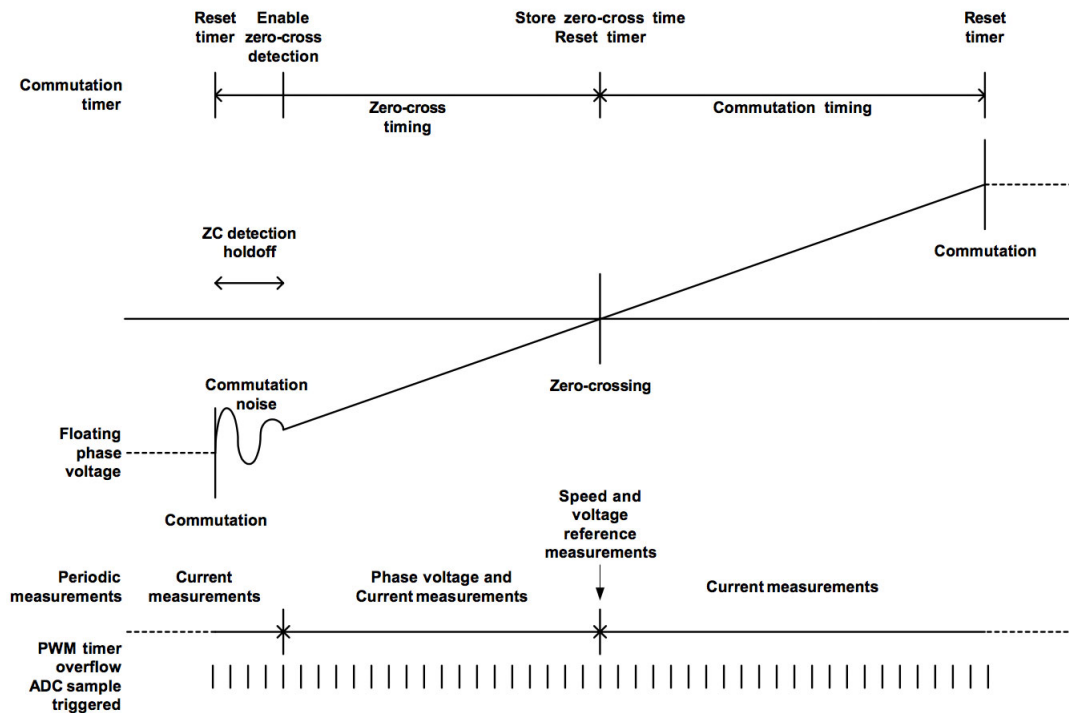


Figura 2.39: Fase flutuante e Zero Crossing (Fonte: [41]).

Para mudar a velocidade, a mesma técnica de controle com o PWM é aplicada. Com um PWM de proporção maior ligada, a velocidade com que o motor irá passar pelo *Zero Crossing*, sinal demonstrado na Figura 2.39 é maior e o tempo entre as comutações diminuirá, ocasionando uma maior velocidade de rotação.

Na Figura 2.39 podemos observar o sinal Back-EMF flutuante passando pelo *Zero Crossing* no meio. Os *Timers* de aguardar o ruído de comutação e o de contagem de tempo de comutação. Além disso, podemos observar o PWM que além controlar a velocidade do motor, também controlará a leitura ADC do Back-EMF.

O ponto zero real do motor é encontrado no centro das espiras, como observado na Figura 2.40. Mas, como nem todo motor é possível ter acesso a esse ponto, um ponto zero virtual pode ser criado externamente ao motor com um conjunto de resistores em paralelo de cada uma de suas fases. Nesse ponto, podemos observar perfeitamente o zero do motor.

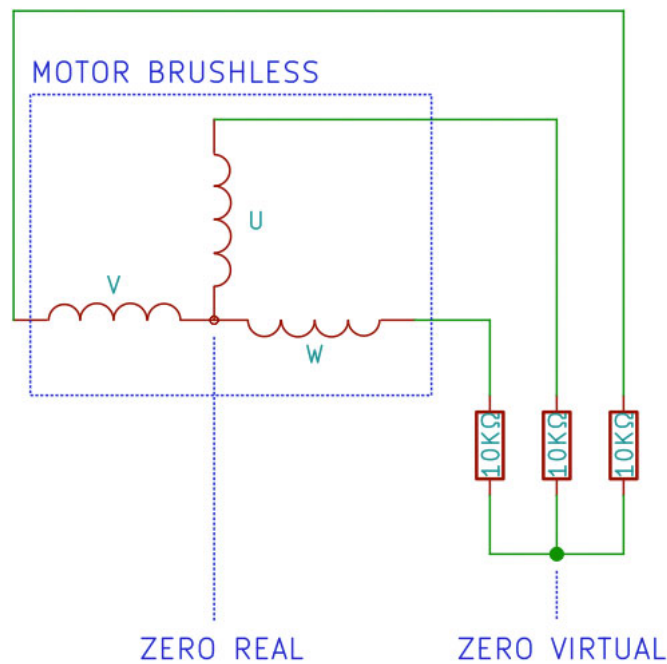


Figura 2.40: Zero Virtual e o Zero Real (Fonte: [41]).

### PWM Phase Correct

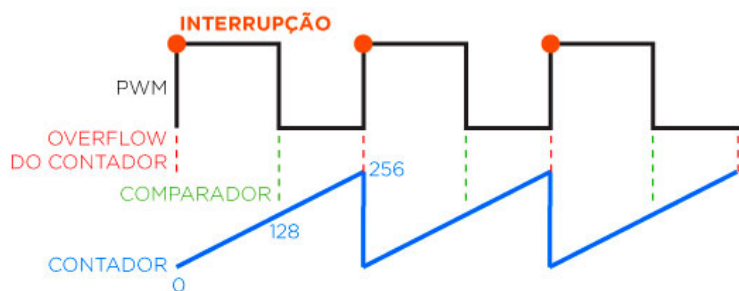
Para uma leitura mais precisa do ADC da tensão de Back-EMF, a técnica de *PWM Phase Correct*, mostrado na Figura 2.41(b), onde uma interrupção no momento em que o PWM está estabilizado, é aplicada.

Nessa interrupção, os picos de transição do motor já estarão estabilizados e a leitura vai ser a mais real o possível. Por isso que o circuito passa baixas não precisa ter tanta influência no sinal.

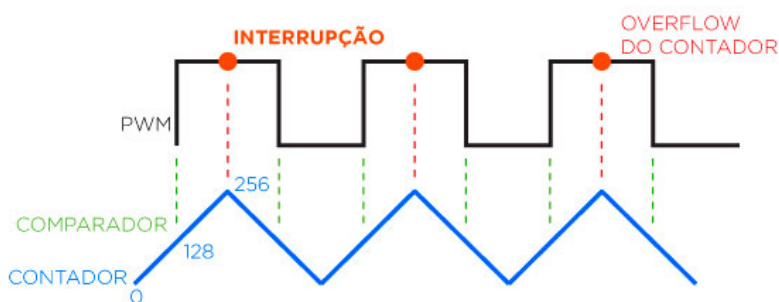
Na Figura 2.41(b) podemos observar nas linhas crescendo e diminuindo o valor atual do contador. Nesse modo, o contador irá crescer até atingir o seu máximo valor e logo em seguida diminuir até o seu menor valor. Desse modo, o valor do PWM será comparado na subida e na descida, tendo o ponto máximo e o ponto mínimo como o meio do valor PWM em baixo ou em alto. Por isso, podemos dizer que o PWM é simétrico.

### Leitura da corrente

A leitura da corrente do motor é necessária nesse tipo de controle pois, além de alguns algoritmos necessitarem dessa informação, a maior proteção de travamento do motor é feita com base na corrente. Limitar a corrente máxima nas bobinas evita danos aos MOSFETs e ao motor.



(a) PWM Comum



(b) PWM Phase-Correct

Figura 2.41: Comparação do PWM Phase-Correct com um PWM comum

## O Controle sem Sensores

Por não precisar de sensores, o projeto fica mais simples e barato. Motores com sensores embutidos normalmente são 30% a 40% mais caros. Não existe também a dependência de sensores externos, que poderia causar problemas graves em caso de defeito ou falha nas leituras.

No entanto, esta técnica de leitura da corrente torna o algoritmo da arrancada do motor mais complexo, técnicas demonstradas na seção 2.5.5, pois o controlador não tem informação sobre a posição inicial do motor.

A leitura e conversão de sinais analógicos em uma frequência de amostragem de 32KHz pode ser bastante ruidosa, e nem todos os microcontroladores conseguem suportar essa taxa de amostragem.

Outro problema é que, em baixas velocidades de rotação, a tensão de Back-EMF é baixa, gerando uma leitura pouco confiável da corrente.

## 2.5.4 FOC

Além do controle padrão que está sendo usado a bastante tempo, um novo tipo de controle de motores *brushless* chamado *Field Oriented Control* (FOC) foi proposto, visando

melhorar a eficiência do motor [42].

Esse controle tem dois objetivos [43]:

1. Diminuir o consumo de energia diminuindo as perdas no controle.
2. Prover um controle mais suave e preciso que o controle padrão por ondas trapezoidais e sensores Hall.

Para obter um funcionamento eficiente do motor, o ângulo entre o campo magnético do rotor e do estator deve estar a  $90^\circ$ , como observado na imagem da direita da Figura 2.42.

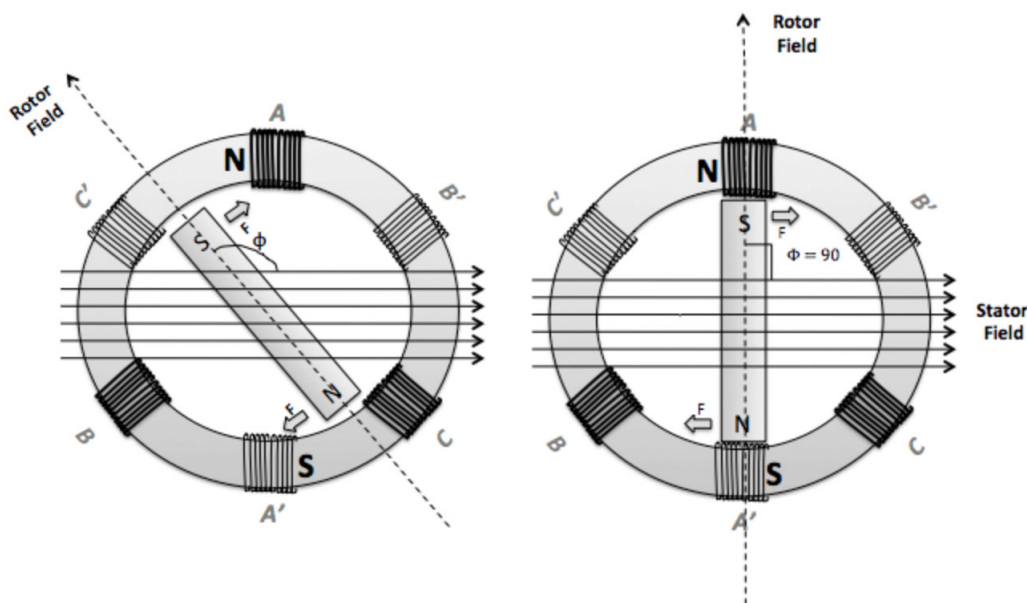


Figura 2.42: Ângulo entre o campo eletromagnético do estator e do rotor (Fonte: [44]).

Em um controle convencional, o microcontrolador liga ou desliga as fases de acordo com uma sequência pré-determinada. Isso gera ondulações no torque do motor quando o campo eletromagnético do rotor estiver praticamente paralelo ao campo do estator, como podemos ver na Figura 2.43.

Com o objetivo de eliminar essas ondulações no torque e fornecer uma comutação mais suave, o modo FOC utiliza de uma comutação por meio de ondas trapezoidais ou senoidais, como dito na Figura 2.44.

Para a modulação dessas fases, o microcontrolador pode usar a técnica de variação gradual do *Duty Cycle* do PWM, como mostra a Figura 2.45 ou alterar a saída do sinal de controle do MOSFET para um sinal analógico usando um Digital to Analog Converter (DAC)

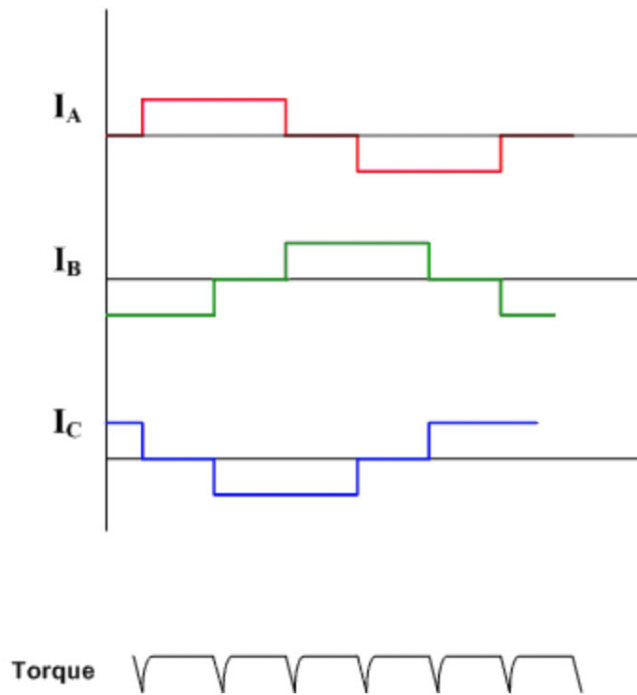


Figura 2.43: Ondulações no torque do motor (Fonte: [2]).

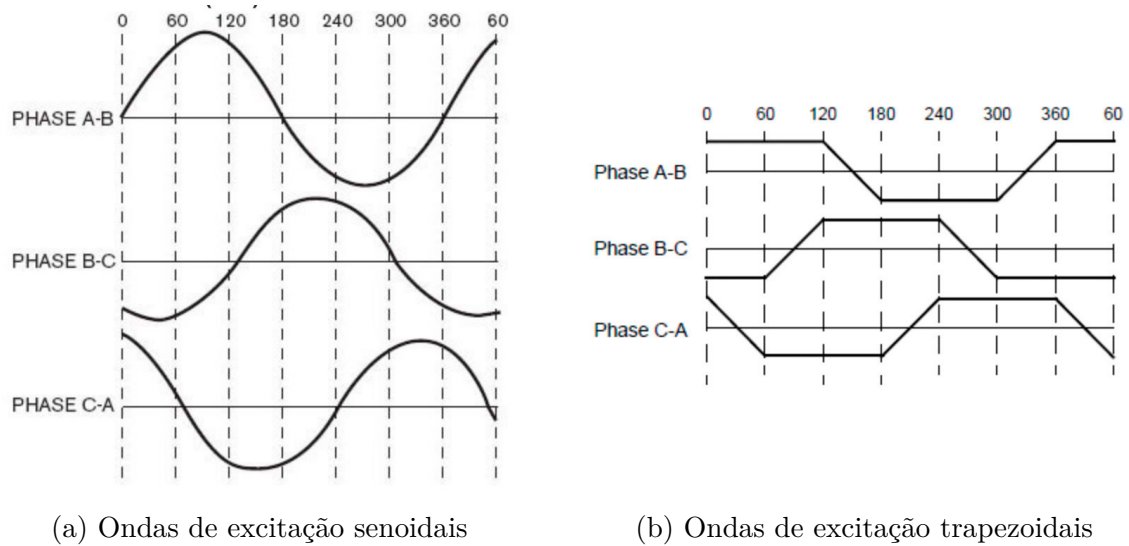


Figura 2.44: Diferentes tipos de ondas de excitação (Fonte: [2])

Esse método é mais eficiente que os anteriores pois procura sempre deixar o ângulo entre o campo eletromagnético do rotor  $90^\circ$  de diferença do ângulo do campo do estator.

Essa técnica não é exclusiva e pode ser implementada tanto no modo com sensores como no modo sem sensores



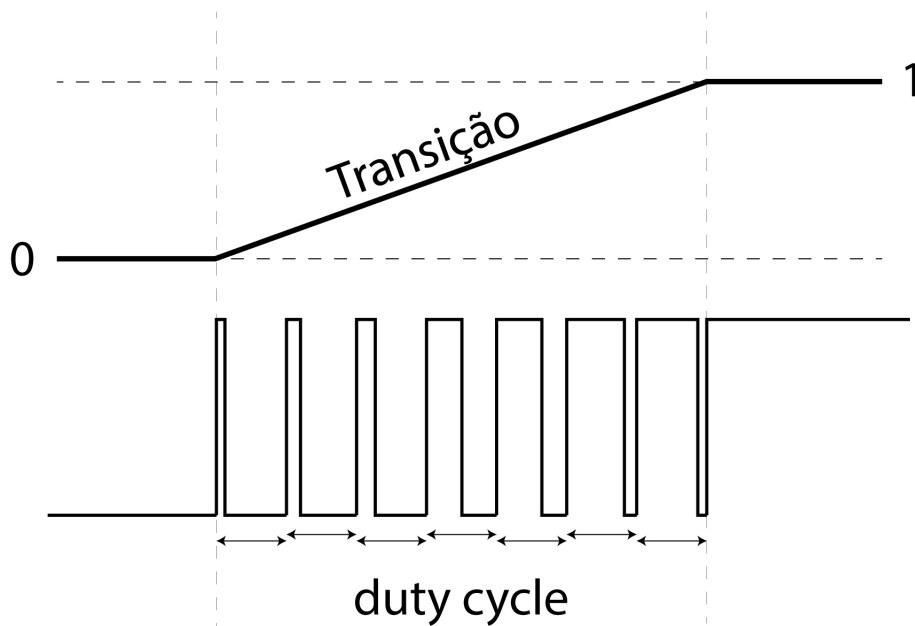


Figura 2.45: Geração de um sinal trapezoidal com um sinal PWM.

Porém, assim como o modo sem sensores, esse método depende fortemente de um hardware que seja capaz de fazer uma leitura ADC do Back-EMF com velocidade e determinar sua posição com a maior precisão possível.

### 2.5.5 Arrancada

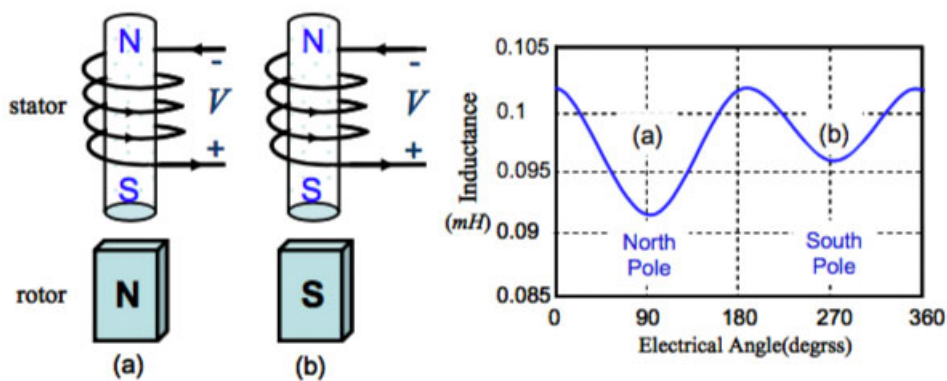
Em um controle com sensores, a arrancada é um processo simples pois a posição dos motores é inicialmente conhecida. Apenas é necessária a definição do próximo passo da tabela de estados.

Em um controle sem sensores, existem diferentes técnicas de arrancada.

- **Start Manual** é a não necessidade de um *start*. O motor vai sofrer uma força externa que fará com que o seu movimento se inicie e, conseqüentemente, a geração de *Back-EMF*.
- **Controle de *Stall*** é feito usando a leitura da corrente. Um estado é aleatoriamente aplicado ao motor e sua corrente é monitorada. O surgimento de *Back-EMF* indica que a arrancada foi corretamente realizada. Caso a corrente suba constantemente e nenhum sinal *Back-EMF* foi encontrado, o estado aplicado no motor foi exatamente o estado em que ele se encontra atualmente. Após um tempo  $t$  dessa forma, limitando a corrente desligando o sinal do PWM caso ela passe do limite estabelecido, o próximo estado da tabela é aplicado. Este método apenas funciona com motores

maiores pois necessita de um sinal *Back-EMF* já no início do seu funcionamento, mesmo em baixa velocidade.

- **Forçar uma posição conhecida** pode ser uma das técnicas utilizadas. O controlador escolhe aleatoriamente um estado e o aplica ao motor por um tempo  $t$ . Após esse período, a posição do motor é conhecida e ele pode continuar seu algoritmo normal de comutação. Esta técnica pode gerar alguns saltos no motor assim que ele inicia. Forçando uma posição que nem sempre é a desejada pelo usuário.
- **Picos de corrente.** Essa técnica envolve enviar um conjunto de pulsos para o motor com o objetivo de analisar a resposta de corrente e determinar a posição do motor [45].



**Stator inductance as a function of rotor flux and stator current.**

Figura 2.46: Variação da indutância do estator com base na posição do rotor (Fonte: [45]).

Com base no princípio de que a indutância do estator irá mudar conforme a posição do rotor, como indicado na Figura 2.46, os pulsos, listados na Figura 2.47, serão analisados posteriormente e o maior pulso, conforme mostrado na Figura 2.48 será a posição do motor.

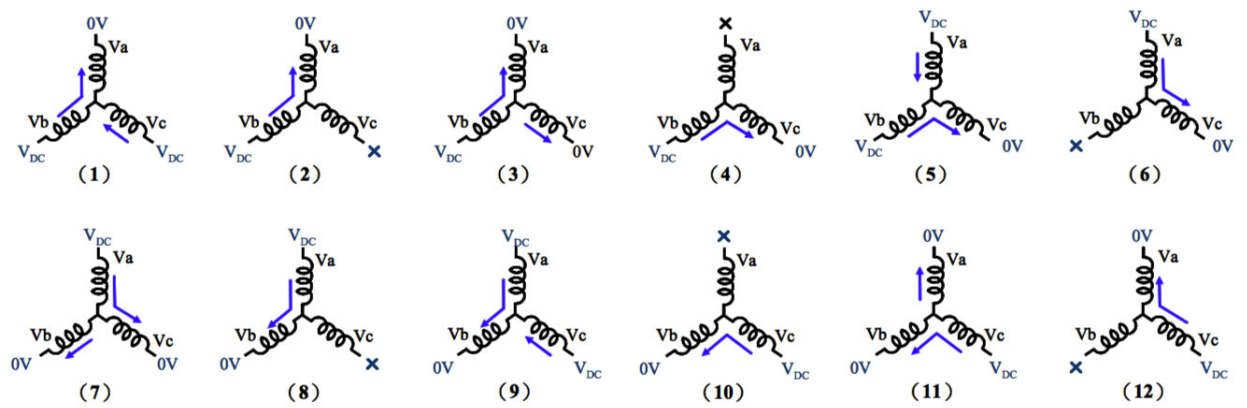


Figura 2.47: Lista de pulsos que serão enviados para o motor (Fonte: [45]).

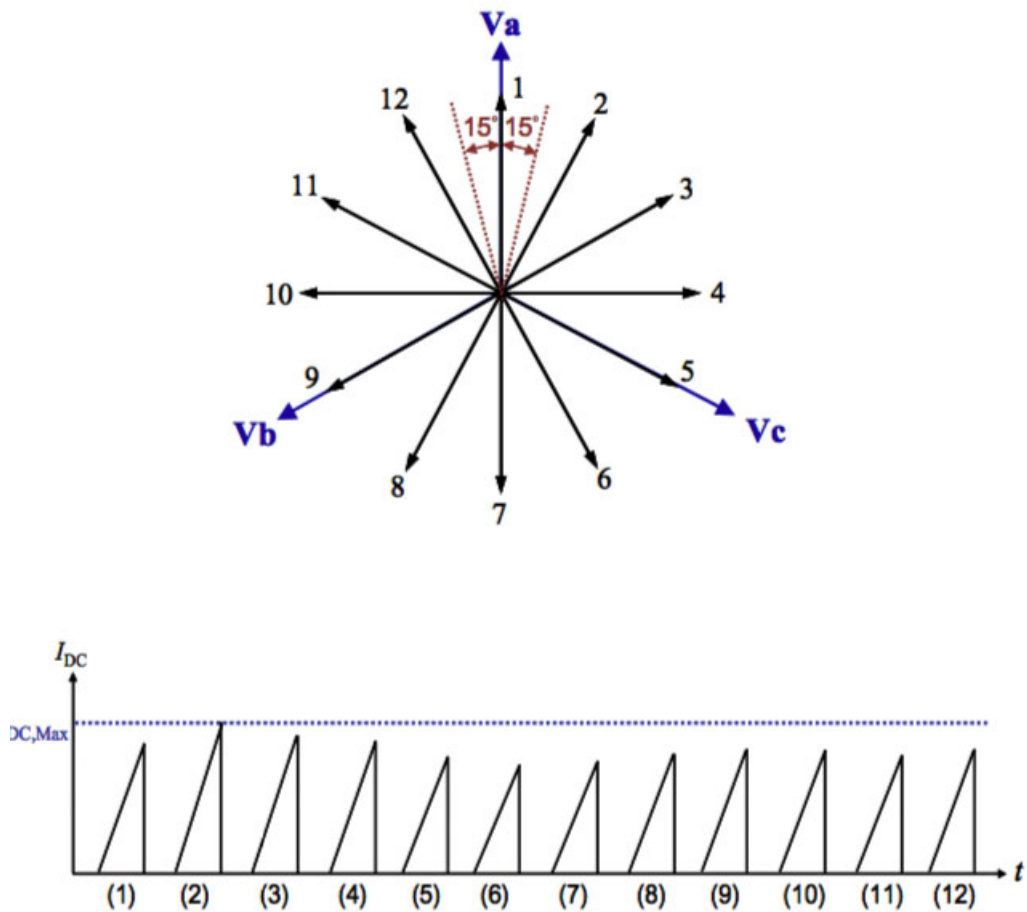


Figura 2.48: Análise dos pulsos de corrente. Nessa imagem, o pulso 2 encontrou a posição 2 do motor (Fonte: [45]).

## 2.6 Baterias

Desde a criação da primeira bateria funcional em 1836 por *Daniell cell*, a tecnologia das baterias vem evoluindo cada vez mais.

O funcionamento básico da bateria depende do acúmulo de elétrons no elemento mais negativo (ânodo), criando uma diferença de potencial com o elemento mais positivo (cátodo) [46].

Esse processo eletroquímico altera os elementos do ânodo e do cátodo e, por isso, é um processo limitado. Para baterias recarregáveis, a alteração da direção do fluxo de elétrons usando uma diferente fonte de potência restaura o estado inicial do cátodo e do ânodo, provendo novamente a potência máxima.

### 2.6.1 Tipos de Bateria

Diferentes tipos de baterias são dedicados para diferentes tipos de projetos. Cada uma tem suas diferentes propriedades: químicos no ânodo e cátodo, formato, tamanho, potência, peso e preço.

Tabela 2.3: Comparação entre tipos de baterias.

Características	NiCd	Li-ion	LiPo	Alcalina
Densidade Energética(Wh/kg)	45-80	110-160	100-130	80
Vida Útil (Ciclos)	1500	500 a 1000	300 a 500	50
Tensão da Célula	1,25V	3,6V	3,6V	1,5V
Pico de Corrente	20C	>2C	>2C	0.5C
Custo por 7,2V	\$50	\$100	\$100	\$5
Manutenção	30 a 60 dias	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma

Os tipos de bateria mais comuns [47] são listados na tabela 2.3 onde também podemos observar as características a serem consideradas ao adotar certo tipo de bateria no projeto. Essas características são:

1. **Densidade Energética (Wh/kg)** Quantidade de energia armazenável por unidade de massa.
2. **Vida Útil (Ciclos)** Cada ciclo de vida de uma bateria envolve o tempo de carga e descarga completa da energia. Com isso, podemos analisar quantas vezes uma bateria pode ser usada até que pare de funcionar ou sua eficiência decaia.
3. **Tensão da Célula (V)** Com base nos requisitos do projeto, deve-se analisar se as células deverão ser usadas em série ou em paralelo para obter o nível de tensão desejado.

4. **Pico de Corrente (A)** Valor máximo de corrente que a bateria pode fornecer em um pequeno período de tempo. O valor C se refere a uma constante de corrente com base na capacidade da bateria. Bateria de 5000mAh, o C é de 5000mA. Para essa bateria, uma corrente de 5C é igual a  $5 \times 5000mA = 25A$
5. **Custo por 7,2V** Fixando um valor de tensão, podemos comparar o preço das baterias, em dólares (US\$).
6. **Manutenção** Necessidade de manutenção periódica da bateria.

No mercado atual, podemos observar diferentes utilizações para diferentes tipos de baterias. Baterias de celular variam na utilização de Li-Ion e Lipo dependendo da empresa. A Apple utiliza Li-ion em todas as suas plataformas (iPhone, iPad, Apple Watch e Macbook). A Tesla utiliza baterias Li-ion em seus carros. Mais especificamente, 7104 baterias 18650 de Li-ion, pois o resfriamento de várias células independentes é muito mais fácil.

### 2.6.2 Perigos do controle da bateria

Com uma potência muito alta concentrada em um volume muito pequeno, baterias com base em Lítio apresentam riscos de explosão se forem controladas ou manuseadas incorretamente.



Figura 2.49: Bateria Lipo sendo perfurada. Imagem do vídeo <https://www.youtube.com/watch?v=gisdMQbtJqk> (Fonte: [48]).

Perfurar a bateria, como visto na Figura 2.49, pode acontecer de diversas maneiras. Tanto efetivamente furando-a com alguma coisa, deixando-a cair ou sobrecarregando o seu funcionamento e expandindo seu volume até que sua proteção rasgue. Isso acontece porque ao quebrar a fina barreira que divide o ânodo do cátodo, todo o sistema começa a aquecer rapidamente [49]. E seu interior contém um eletrólito inflamável [50].

Para aumentar a segurança, além da proteção mecânica (o invólucro da bateria), algumas proteções de controle extras devem ser implementadas:

- **Sobrecarga:** Ao carregar a bateria, a tensão individual de cada uma das células deve ser observada e não ultrapassar o valor máximo de 4,2V. Isso pode parecer básico, mas alguns carregadores consideram apenas o valor total da tensão e não o valor individual de cada célula em um arranjo maior. Se uma das células não estiver balanceada em relação as outras, o valor da tensão total dessa célula pode ultrapassar os valores seguros e a expansão da bateria pode acontecer, conforme observado na Figura 2.50.
- **Subcarga:** Assim como os valores máximos, os valores mínimos de cada célula de 3,2V devem ser observados. Para manter uma vida útil maior e um nível de tensão mais seguro, é aconselhado parar o funcionamento do sistema caso a célula da bateria atinja uma tensão menor que 3,6V.
- **Sobrecorrente:** Apesar da potência dessas baterias ser bem alta, o máximo de corrente que ela pode suportar é conhecido e indicado em seu *datasheet*. Sobrecarregar essa corrente é bem possível e deve ser observado, assim como curtos-circuitos devem ser constantemente monitorados.
- **Sobretensão:** Durante o seu funcionamento também é adequado observar a temperatura da bateria. Em funcionamento normal, uma bateria LiPo/Li-ion deve estar entre 0°C a 60°C.

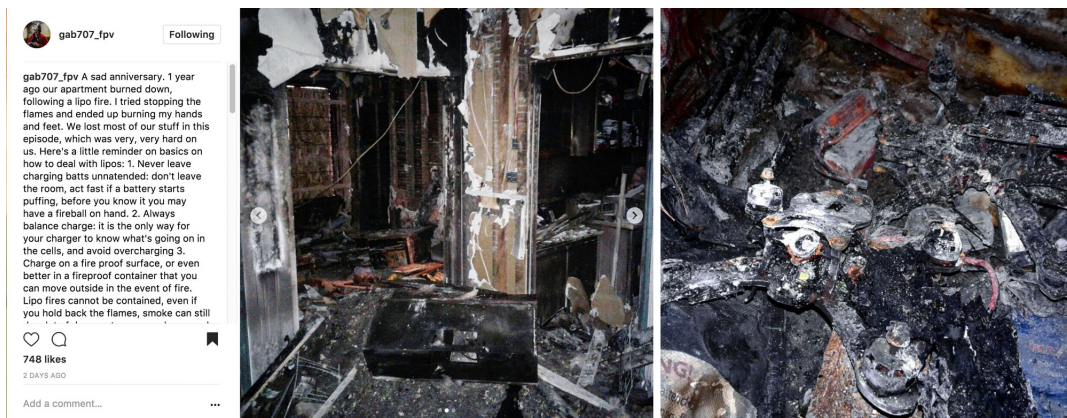


Figura 2.50: Usuário relatando acontecimento em que suas baterias explodiram por não utilizar um carregador com balanceador. Uma das células ultrapassou o seu limite de tensão, aumentou o volume e estourou a camada protetora. Na última imagem podemos ver o seu drone com a bateria. (Fonte: [51]).

### 2.6.3 Monitoramento de Temperatura e Tensão

A temperatura da bateria pode ser medida posicionando o termistor próximo à bateria e realizando a leitura da queda de tensão sobre ele por meio de um divisor de tensão, conforme mostrado na Figura 2.51.

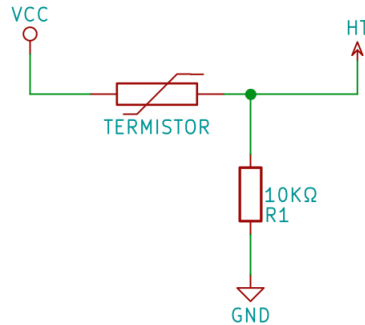


Figura 2.51: Divisor de tensão para a leitura do termistor.

O controle da tensão é observado analisando cada célula separadamente por meio do ADC ou fazendo um divisor de tensão no valor total de tensão da bateria antes da leitura ADC. Para a leitura desse balanceador, a bateria fornece um conjunto de cabos extras, para a leitura da tensão de cada célula individualmente, conforme visto na Figura 2.52.

### 2.6.4 Recarregamento da bateria por frenagem

Antes de entendermos o recarregamento da bateria por frenagem, vamos apresentar um circuito que utiliza o mesmo princípio de funcionamento, o *Boost Converter*.

#### Boost Converter

O *Boost Converter* é um circuito conversor elevador de tensão [53], mostrado na Figura 2.53, utilizado para converter uma tensão contínua de entrada em uma tensão de saída maior que a entrada.

Seu funcionamento basea-se no PWM aplicado na chave S. Quando o estado da chave é ligado, o caminho é fechado e a corrente no indutor aumenta, conforme mostrado na Figura 2.54 (a). Quando a chave S é desligada, a energia acumulada no indutor é transferida para o capacitor, conforme o circuito da Figura 2.54 (b).

O aumento da tensão ocorrerá proporcionalmente ao *duty cycle* do PWM de controle da chave S e dos valores L e C.



Figura 2.52: Bateria Lipo 5Ah 5S. Podemos ver os fios positivo e negativo (vermelho e preto) e fios coloridos que permitem o acesso a cada célula individualmente da bateria (Fonte: [52]).

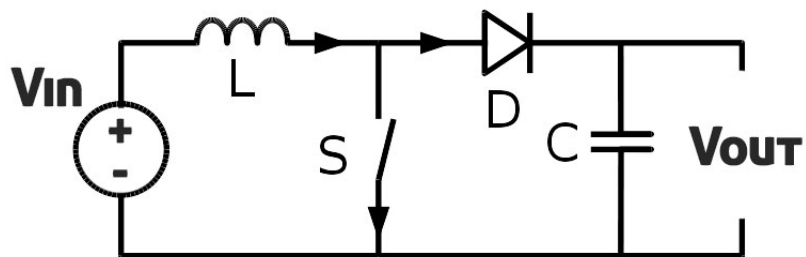
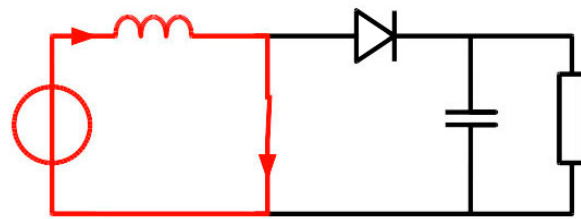


Figura 2.53: Circuito elevador de tensão.

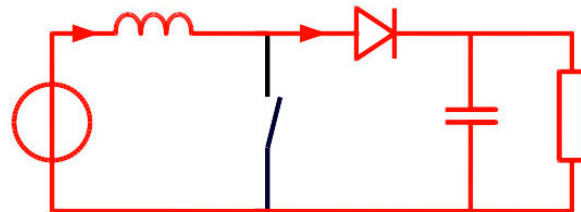
### Motor Brushless

O mesmo efeito de transferência de energia indutor-capacitor pode ser encontrado na ponte H do controle do motor *brushless* [54]. Ao aplicar o PWM apenas na parte de baixo da ponte, podemos observar que o Back-EMF gerado pelo motor em movimento irá funcionar como a tensão de entrada do *Boost Converter*, o PWM aplicado na chave S será o mesmo do MOSFET inferior, o Diodo D será o diodo *flyback* encapsulado no MOSFET e o capacitor C serão os capacitores desacopladores da fonte.





(a) Chave fechada



(b) Chave aberta

Figura 2.54: Circuito elevador de tensão

Conforme a Figura 2.55, com o PWM inferior (Transistor T5) ligado, o movimento do motor gerará o Back-EMF que acumulará energia em seu indutor.

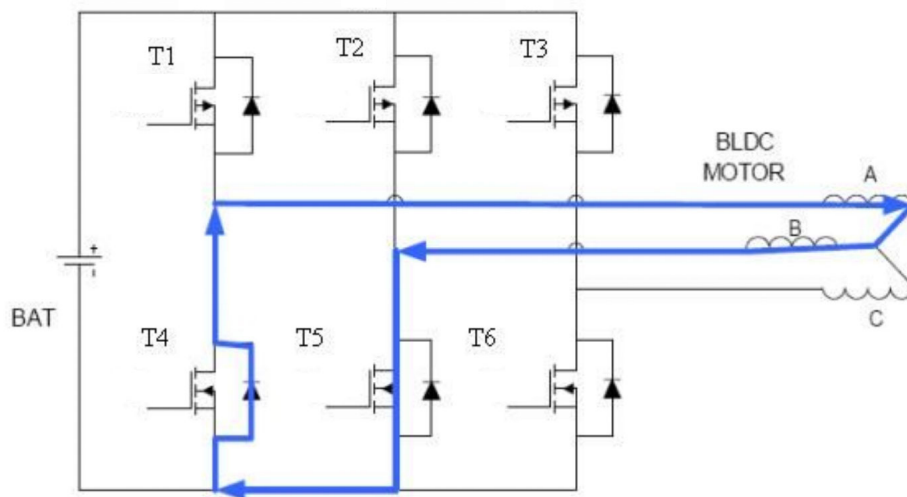


Figura 2.55: Freio Regenerativo com o PWM ligado (Fonte: [54]).

Durante o período desligado do PWM, mostrado na Figura 2.56, a energia acumulada nos indutores será transferida para os capacitores de desacoplamento e para a bateria, pois sua tensão será maior que a tensão da bateria.

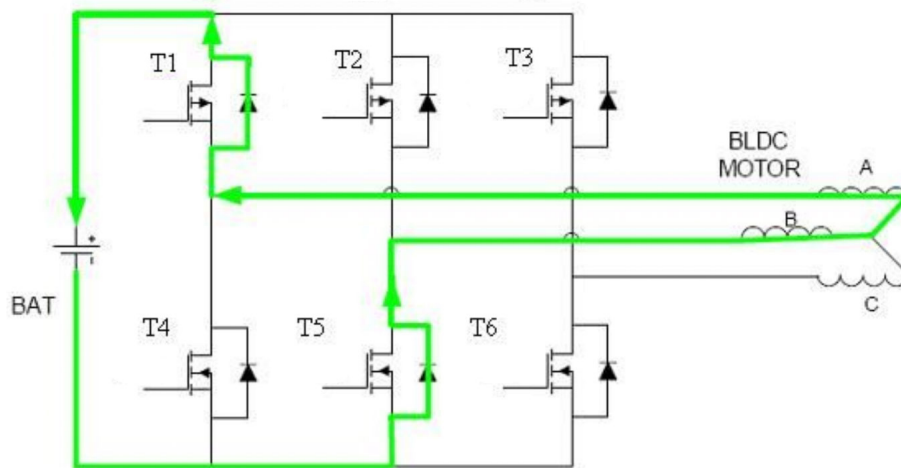


Figura 2.56: Freio Regenerativo com o PWM desligado (Fonte: [54]).

Essa tensão será proporcional à velocidade de rotação do motor e, conseqüentemente, proporcional à quantidade de energia que será enviada para a bateria.

## 2.7 Bluetooth

O sistema de comunicação digital sem fio Bluetooth surgiu em 1989 [55] com a empresa *Ericsson Mobile* na Suécia. Seu objetivo era proporcionar o desenvolvimento de dispositivos de áudio sem fio para seus usuários. Em 1996, empresas líderes em tecnologia (*Intel, Nokia e Ericsson*) se uniram para criar o padrão de comunicação amplamente usado até hoje.

Com o passar do tempo, o padrão Bluetooth evoluiu seu processo permitindo aumentos significativos na taxa de transmissão, confiabilidade, segurança e alcance.

### 2.7.1 Funcionamento

O sistema Bluetooth opera na faixa de rádio conhecida como Industrial, Scientific and Medical Band reservada para diversos objetivos além de telecomunicações, de 2.4 a 2.485GHz [55]. A conectividade pode ser feita via modo *full-duplex*, isto é, os dois dispositivos podem receber e enviar dados, ou *half-duplex*, quando ambos os dispositivos podem receber e enviar dados, porém apenas um de cada vez.

Como este sistema foi desenvolvido primariamente para dispositivos portáteis, alimentados com baterias, seu consumo de energia sempre foi o objetivo principal. A Tabela 2.4 compara a tecnologia Wifi com a tecnologia Bluetooth. Podemos observar que a Wifi tem um Throughput maior mas o Bluetooth tem um menor consumo de energia.

### 2.7.2 Bluetooth Low Energy

Uma das maiores inovações nos últimos anos da tecnologia Bluetooth é a criação do modo *Bluetooth Low Energy* (BLE). Esse modo tem como objetivo a transmissão de pequenas quantidades de dados por pequenas distâncias, porém, de forma muito rápida, confiável e otimizada energeticamente. Usando uma bateria de relógio (*coin cell*), é esperado que o funcionamento do circuito com o BLE seja de mais de 5 meses [55]. Isso proporcionou novas categorias de dispositivos sem fio para a área de saúde, *marketing* e entretenimento. Sua camada de conexão também ficou mais simples e o tempo de pareamento passou de 6s para 3ms [56].

Tabela 2.4: Comparação entre as versões de Bluetooth [3].

Características	Bluetooth V2.1	Bluetooth Low Energy	Wifi
Distância	30m	50m	70-250m
Bit Rate	1-3 Mbit/s	200 kbit/s	600Mbit/s
Tempo de pareamento	6s	0,003s	10s
Consumo de energia	<50 mA	<15mA	<200mA

A Tabela 2.4 compara alguma das características do Bluetooth Low Energy com sua versão anterior. Podemos destacar nos valores da tabela a diferença entre a velocidade de conexão entre os dispositivos e a taxa de transferência.

## 2.8 O mercado atual de controladores de Motores Brushless

Controladores de motores *brushless* podem ser encontrados de diversas formas.

### 2.8.1 Produtos Comerciais

O mercado de controladores de motores *brushless* é muito grande e bem diferenciado. Para qualquer tipo de motor e aplicação existe uma marca de boa qualidade. Na Figura 2.57 podemos observar três tipos de ESCs para três tipos de motores diferentes. Em (a), vemos o ESC Turnigy Multistar 7A [57] projetado para motores pequenos de 7A e 8V, como o motor exemplificado em (d), seu custo é de apenas US\$5 (R\$16,00). Em (b), o ESC Hobbywing Platinum [58] é projetado para motores um pouco maiores, como exemplificado em (e), de até 120A e 25V. Seu preço sobe para US\$150,00 (R\$490,00). Em (c), temos o ESC Alien Evolution 3 [59] desenvolvido para motores *brushless* de bicicletas, como o motor em (f). Sua capacidade é para motores de até 150 A e 42V e seu preço é US\$290,00 (R\$990,00).

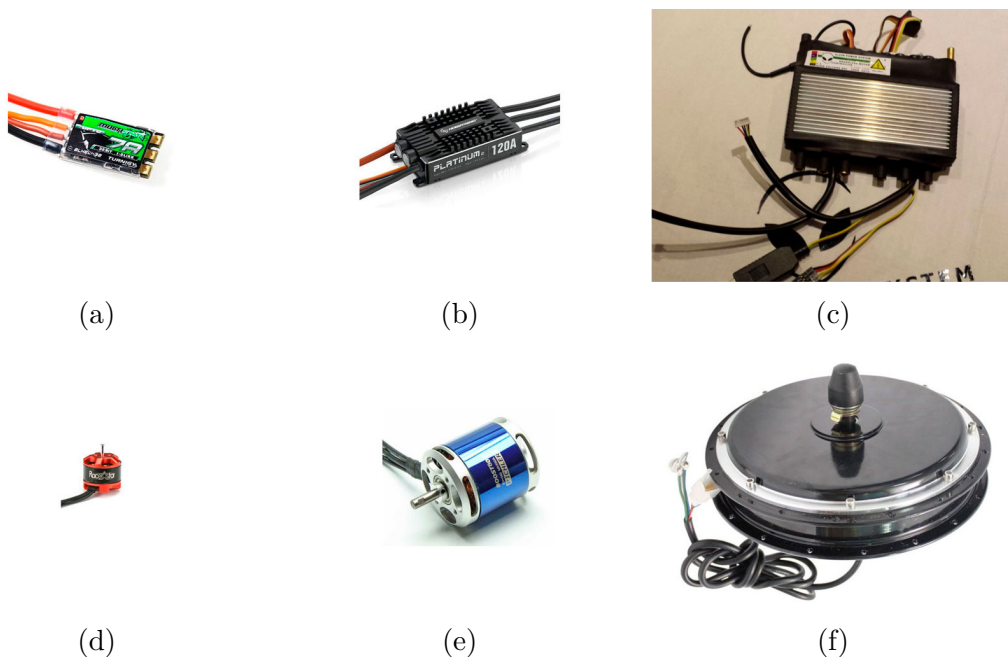


Figura 2.57: ESCs e respectivos motores Comerciais

Conforme podemos ver nessa análise, o preço ainda é um problema para os controladores. Quanto maior a potência do motor, mais caro e mais complexo é o controlador.

## 2.8.2 VESC

Um dos poucos projetos de controladores de motores *brushless OpenSource*, o **VESC**, ilustrado na Figura 2.58, tem uma grande comunidade de seguidores por ter menor custo quando comparado com controladores de motores *brushless* de alta potência comerciais. [28]

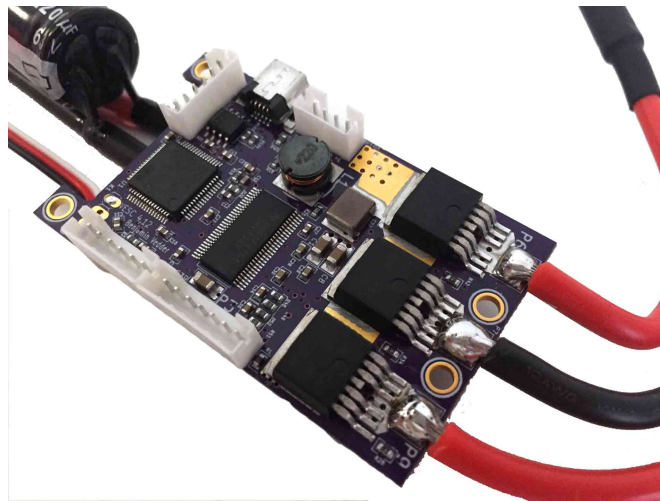


Figura 2.58: ESC Open Source VESC (Fonte: [60]).

Suas características são:

- Utiliza um microcontrolador ARM Cortex-M4 32 bits **STM32F4** com um clock de 180MHz. Um *driver* de MOSFETs da *Texas Instrumentos* DRV8302 e 6 MOSFETs de alta potência da *Internation Rectifier* IRFS7530.
- Capacidade de 3S a 12S (60V) e corrente de até 240A.
- Possui dois modos de controle: com sensor e sem sensor FOC.

Além de possuir seu projeto *OpenSource*, suas versões genéricas podem ser encontradas em lojas pelo preço de US\$100 (R\$330,00). O que representa um custo muito menor que outros controladores de marca da mesma faixa de potência, que podem chegar até US\$300 (R\$990,00).

# Capítulo 3

## Solução Proposta

Esse capítulo abordará as questões encontradas durante a construção de um controlador de motor *brushless* aplicado em um *longboard* elétrico. Serão apresentadas as técnicas utilizadas e todos o procedimento de criação do projeto.

Para o objetivo final do projeto, é esperado o controle de motor *brushless* utilizado em um motor de alta potência, com uma rápida resposta do torque, baixo custo, confiabilidade, robustez e alta eficiência para a aplicação em um veículo de transporte simples[61].

Durante o desenvolvimento do projeto, o software KiCad EDA [62] foi utilizado para o desenvolvimento dos circuitos e para a construção das PCBs. Para a parte mecânica, o software de CAD/CAM design Autodesk Fusion 360 [63] foi utilizado para o desenvolvimento das partes do projeto.

### 3.1 Visão geral

O projeto foi dividido em 5 partes, como visto na Figura 3.1:

- (A) **Electronic Speed Controller (ESC)** é o controlador do motor *brushless*. Trata-se da parte principal deste projeto e será detalhado na seção 3.2.
- (B) **Controle Central e Controlador de Bateria** responsável pela comunicação Bluetooth, análise dos dados dos outros sensores e controle da velocidade do motor enviada para o ESC. É responsável ainda por analisar a temperatura da bateria e a tensão de carga. Seu projeto será visto na seção 3.3.
- (C) **Mecânica** Ligação da parte eletrônica com o motor, posicionamento dos sensores próximo ao motor e esquema de tração das rodas. Seu projeto poderá ser visto na seção 3.5.

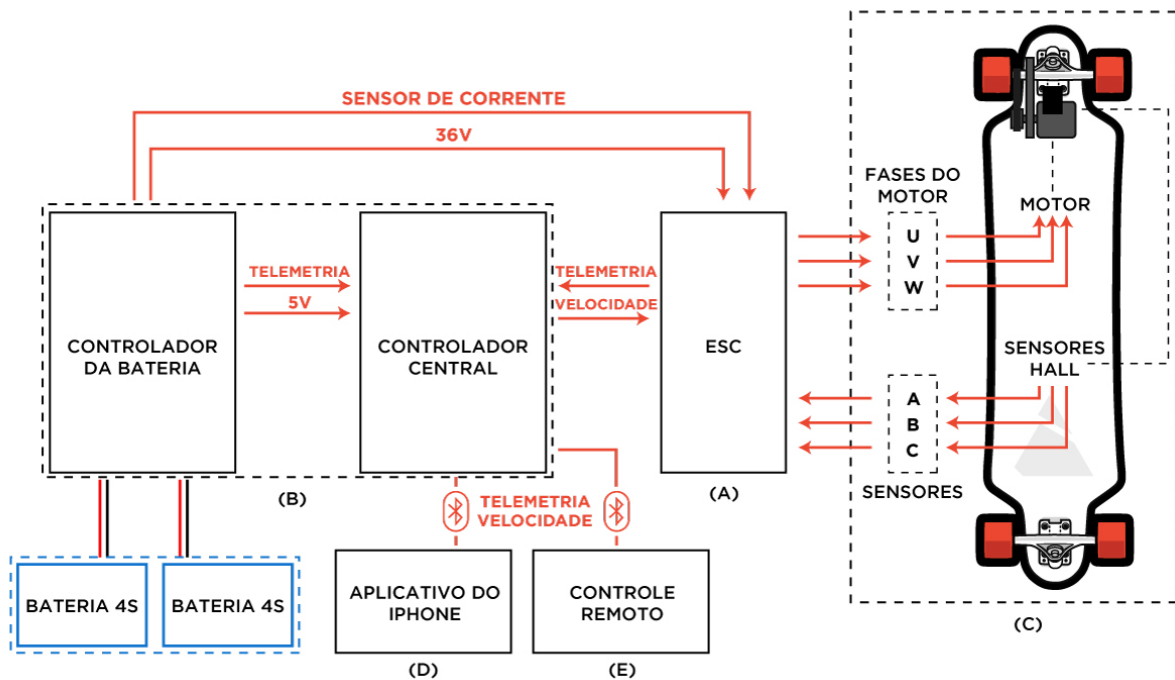


Figura 3.1: Os módulos do projeto

(D) **Aplicativo do iPhone** é responsável pela interação do *longboard* elétrico com o usuário. Mostrando informações e fornecendo o controle de velocidade via Bluetooth. Será descrito na seção 3.6.

(E) **Controle Remoto** trata-se de uma alternativa ao aplicativo do iPhone, para controlar a velocidade via Bluetooth. Seu projeto está detalhado na seção 3.7.

A interação desses módulos é feita ou no mesmo microcontrolador, ou via comunicação de servo ou via Bluetooth, como explicado na seção 3.2.1. Cada módulo tem suas funcionalidades específicas e se comunicam com o controlador central.

## 3.2 ESC

Para esse projeto, os métodos de controle com sensores e controle sem sensores serão implementados no Electronic Speed Controller (ESC). Cada um deles tem diferentes necessidades de hardware e software.

### 3.2.1 Controle de Motores com sensores

Para o controle de motor com sensor, o principal objetivo é analisar a movimentação do campo eletromagnético ao redor do sensor Hall e aplicar a excitação de fase correta na Ponte-H.

#### Hardware

O hardware do controle foi projetado para ser o mais eficiente com o menor custo possível. Tamanho não foi considerado um requisito, pois o *longboard* é fisicamente grande e possui espaço suficiente para instalar o sistema embarcado. Outro requisito que não foi levado em consideração foi a eficiência energética do sistema embarcado, pois o motor consome muito mais energia que qualquer tipo de controle.

#### O Microcontrolador

Para o funcionamento do ESC com sensores, o Microcontrolador Atmega328P-AU, mostrado na Figura 3.2, da empresa Atmel foi escolhido por ser um microcontrolador simples e barato. Além disso, esse microcontrolador oferece suporte à plataforma Arduino, e a fase de prototipagem pode ser feita usando uma placa de desenvolvimento Arduino, simplificando o processo.

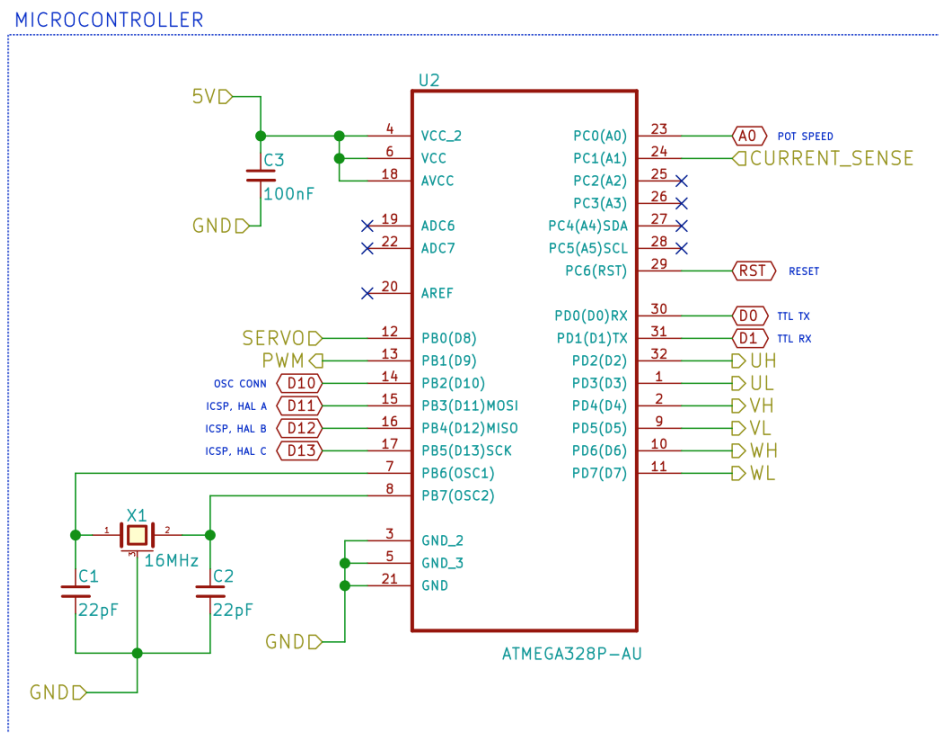


Figura 3.2: Desenho esquemático do microcontrolador ATMEGA328



Na Figura 3.2 podemos observar o microcontrolador do controle central do ESC, responsável por realizar a leitura dos sensores Hall, como mostrado na Figura 3.3, e assim, determinar a posição atual do motor, fazer a leitura do potenciômetro de velocidade ou do sinal SERVO e aplicar os sinais de controle da Ponte-H.

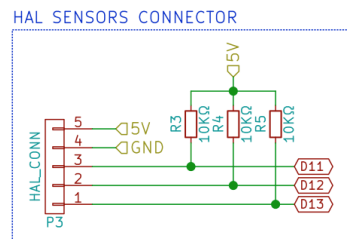


Figura 3.3: Portas de conexão com o sensor Hal

O PWM, na porta 13(*PB1*) é baseado no *timer* de 16 bits do Atmega328p-AU e gera os sinais que controlam a velocidade do motor com frequência padrão é de 16kHz.

Na Figura 3.2 podemos ainda ver o capacitor desacoplador C3 na alimentação do microcontrolador. Este capacitor tem por função manter uma tensão de alimentação estável para o microcontrolador, reduzindo possíveis ruídos na alimentação gerados pelo motor durante seu funcionamento.

Para a gravação do *firmware*, duas portas são necessárias, mostradas na Figura 3.4.

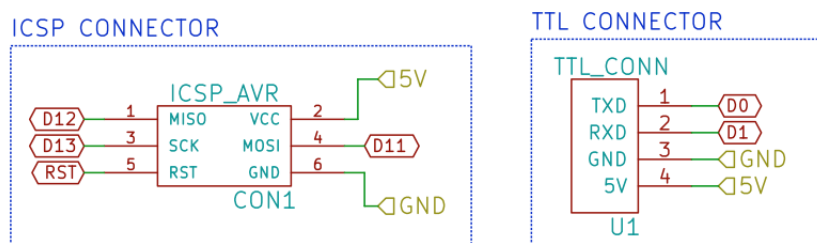


Figura 3.4: Portas de gravação do microcontrolador

In-Circuit Serial Programming (ICSP) é a conexão com microcontrolador para a gravação usando o protocolo Serial Peripheral Interface (SPI). Essa conexão é necessária para gravar o *bootloader* do Arduino. A segunda é a porta Transistor-Transistor Logic (TTL), que é responsável pela conexão serial do *bootloader* Arduino com o seu software de programação. Essa funcionalidade é específica do *bootloader* Arduino e facilita o desenvolvimento pela velocidade de gravação e acesso às portas seriais do dispositivo.

### Drive dos MOSFETs

Para o controle dos MOSFETs, são necessários 3 passos:

1. Limitação de corrente e *Pull Down* nos sinais
2. Lógica dos sinais de controle com o AND da porta PWM
3. Driver dos MOSFETs Canal N

A Figura 3.5 mostra que para cada pino de controle é necessário um resistor de  $1k\Omega$  em série com o sinal, usado para limitar a corrente do CI 74LS08 (4 portas ANDs), e um resistor de  $10k\Omega$  em paralelo ligado ao terra (*Pull Down*).

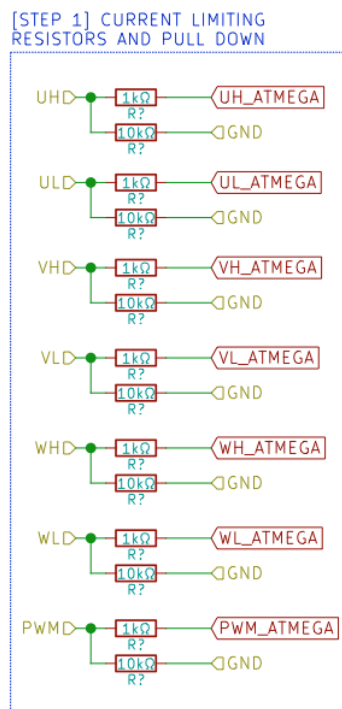


Figura 3.5: Limitador de corrente e resistores Pull Down

Como o microcontrolador não tem muitas portas com *timer* disponíveis, a solução encontrada foi usar apenas uma porta com saída PWM e os sinais de controle serem filtrados por uma lógica AND antes de ir para o sinal de controle, como mostrado na Figura 3.6. O PWM é necessário para controlar a força do motor, limitar a corrente que está passando pelos transistores e por recarregar o capacitor *bootstrap* do *driver* do MOSFET.

Na última parte, mostrada na Figura 3.7, teremos os CIs *U5*, *U6* e *U7* que são *drivers* de MOSFET meia Ponte-H **IR2101**. As suas saídas são os pines *HO* (sinal de controle do MOSFET da parte superior) e *LO* (sinal de controle do MOSFET da parte inferior). Tendo como entradas os sinais *VS* (terminal *source* do MOSFET da parte superior. Necessário para o *bootstrap* de tensão do MOSFET) e *HIN/LIN* (sinais de controle do microcontrolador das partes superior e inferior da meia Ponte-H).

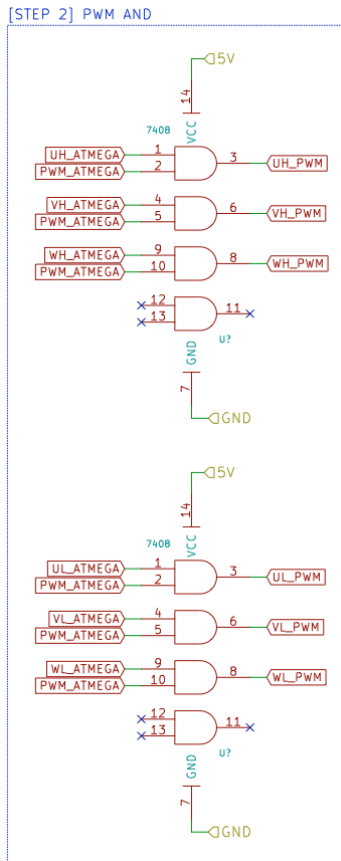


Figura 3.6: Portas AND para o PWM

Os capacitores à esquerda do CI são capacitores desacopladores e à direita podemos ver os capacitores *bootstrap* do circuito de *driver* do MOSFET.

### Meia Ponte-H Tripla

Para o controle das três fases do motor, são necessárias três meia Ponte-H com MOSFETs de alta potência, mostrado na Figura 3.8.

O MOSFET de potência escolhido foi o modelo CSD18542KTT da *Texas Instruments* com  $V_{DS}$  de 60V e corrente  $I_D$  de 170A, aceitando pulsos de até 400A, com resistência interna  $R_{DS(on)}$  de 3.3m $\Omega$ .

O sinal de controle fornecido pelo *driver IR2101*, passa por um resistor limitador de corrente na entrada do MOSFET e ativa a fase que será utilizada. Nesse ponto, o resistor  $R20$  é um resistor *Pull Down* que mantém o MOSFET desligado caso sua entrada esteja flutuante ou o circuito desligado e o diodo 1N4148 é responsável por fornecer uma passagem rápida para a descarga do MOSFET, fazendo com que ele desligue mais rápido do que ele liga. Isso é necessário para uma troca em que o MOSFET da mesma fase deve ser ligado e ele ainda está desligando. Isso causa pequenos curtos circuitos na bateria e

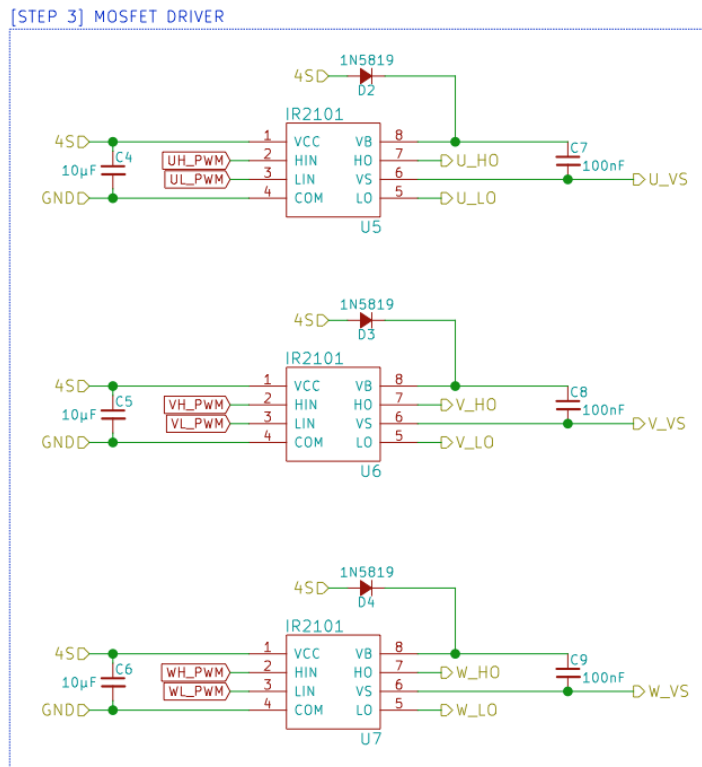


Figura 3.7: Driver dos MOSFETS IR2101

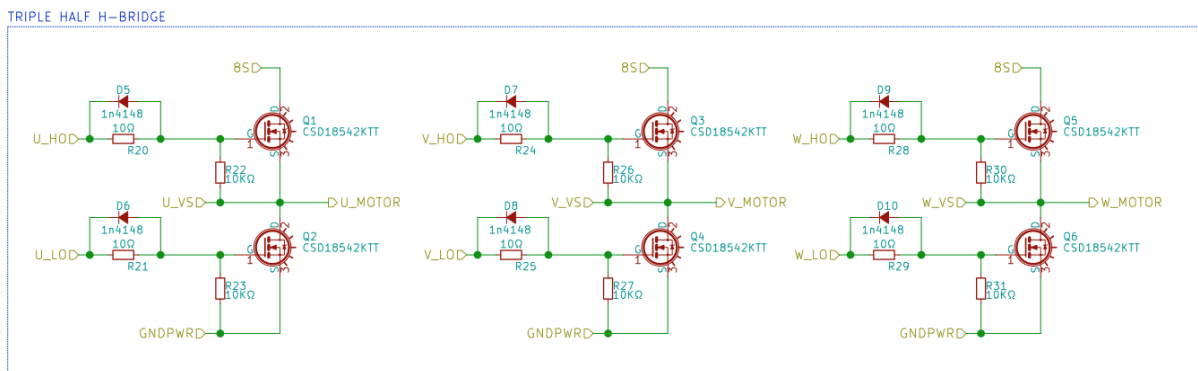


Figura 3.8: Meia Ponte-H Tripla

sobrecarga dos MOSFETs. Colocando o diodo, garantimos que a velocidade de descarga do MOSFET seja maior que a velocidade de carga.

## Entradas e Saídas

A comunicação entre os módulos é feita conforme mostrado na Figura 3.9.

Nas entradas, temos a leitura da corrente total do motor e a comunicação Servo feita pelo Controlador Central. Na saída, podemos observar apenas as conexões com as respectivas fases do motor. Para a aplicação do Bluetooth no projeto, o Controlador Central

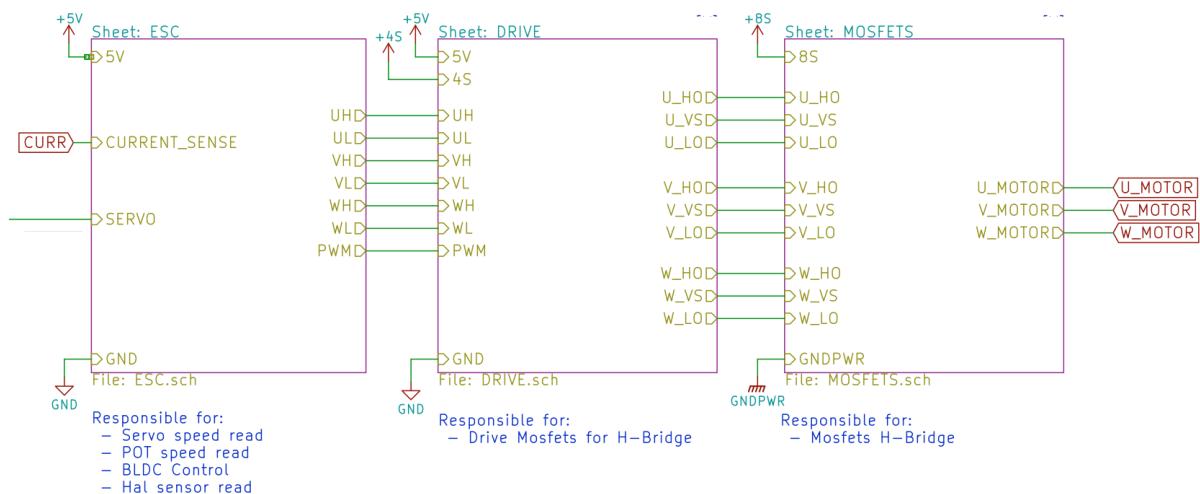


Figura 3.9: Conexões de entrada e saída do sistema

comunicará com o módulo Bluetooth e fará a comunicação Servo com o Controlador do Motor.

A comunicação Servo é feita usando um PWM com uma frequência de 50Hz, assim como demonstrado na seção 2.2.5. Onde o tempo ligado de 1,5 ms significa o acelerador em repouso, 1 ms o acelerador está 100% freiando e 2ms o acelerador está 100% acelerando.

## Firmware

Conforme o fluxo apresentado na Figura 3.10, podemos definir o funcionamento do controlador com sensor em interrupções básicas.

Sempre que houver uma mudança no sensor Hall, haverá uma mudança no posicionamento do motor e, conseqüentemente, uma mudança das fases que serão excitadas em cada estado.

As interrupções são definidas como:

- **Nova leitura do ADC** Uma nova leitura ADC da corrente do motor foi feita. Com o objetivo de monitorar se a corrente não passou do limite ou se está alta por muito tempo.
- **Input Servo Mudou** Entrada de comunicação com o módulo da Central de Controle da aceleração.
- **Input Sensor Hall Mudou** Posição do motor mudou. Alterar as fases excitadas com base na tabela de estados.

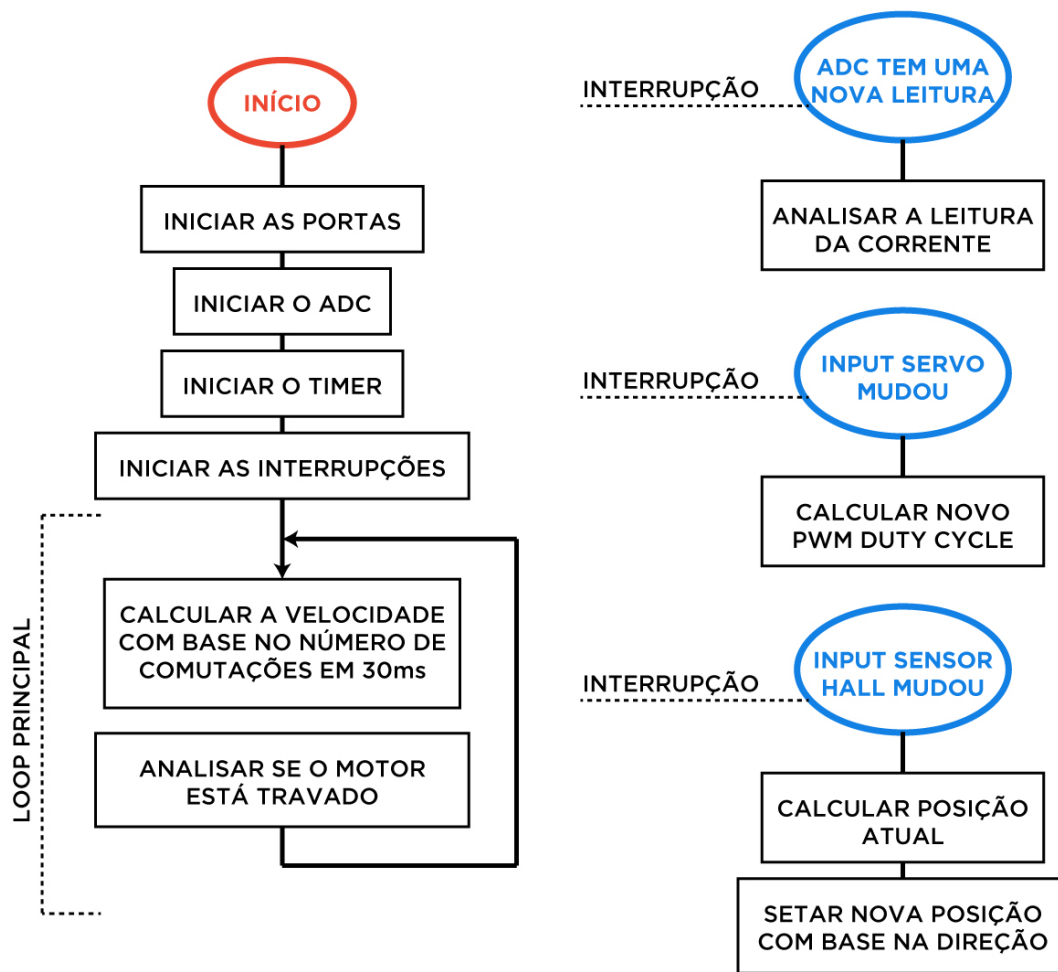


Figura 3.10: Fluxo do *firmware* de controle de motores com sensor

### 3.2.2 Controle de Motores sem Sensores

Para o controle sem sensores, seu funcionamento básico consiste em fazer constantemente a leitura ADC do Back-EMF de cada fase, encontrar o *Zero-Crossing* e aplicar o próximo estado de comutação necessário.

#### Hardware do modo sem sensores

O hardware do modo sem sensores é basicamente o mesmo do modo com sensores. A única diferença é que o microcontrolador do Controlador Central deve ser alterado pois a frequência de amostragem máxima do ADC do Atmega328 não é rápida o suficiente.

O período mínimo da leitura analógica confiável do ATmega328P-AU é de  $T_{\text{atmega}} = 260\mu\text{s}$ .

Considerando o motor de 5700 r.p.m. e 14 polos escolhido e com base no funcionamento de um motor *brushless*, demonstrado na seção 2.5, cada comutação elétrica, usando a Equação 2.15, será de

$$R_{\text{elétricas}} = 5700 \text{ rpm} \cdot \frac{14 \text{ polos}}{2} = 39.900 \text{ revoluções elétricas por minuto} \quad (3.1)$$

e terá

$$N_{\text{comutações}} = 39.900 \cdot 6 = 239.400 \text{ comutações elétricas por minuto.} \quad (3.2)$$

Usando a Equação 2.16, cada comutação terá um tempo de

$$\frac{239.400 \text{ comutações por minuto}}{60s} = 3990 \text{ comutações por segundo,} \quad (3.3)$$

ou seja

$$\frac{1s}{3990 \text{ comutações por segundo}} = 250\mu s \text{ por comutação.} \quad (3.4)$$

Com base no período mínimo necessário de  $T_{\text{atmega}} = 260\mu s$ , o microcontrolador AT-Mega328 fará apenas

$$\frac{250\mu}{260\mu} = 0,96 \text{ leituras por comutação.} \quad (3.5)$$

Este valor não é o suficiente para encontrar o *zero-crossing* com precisão, conforme pode-se notar pela Figura 3.11, onde os tracos vermelhos indicam onde seriam realizadas as leituras do ADC do microcontrolador ATMEGA.

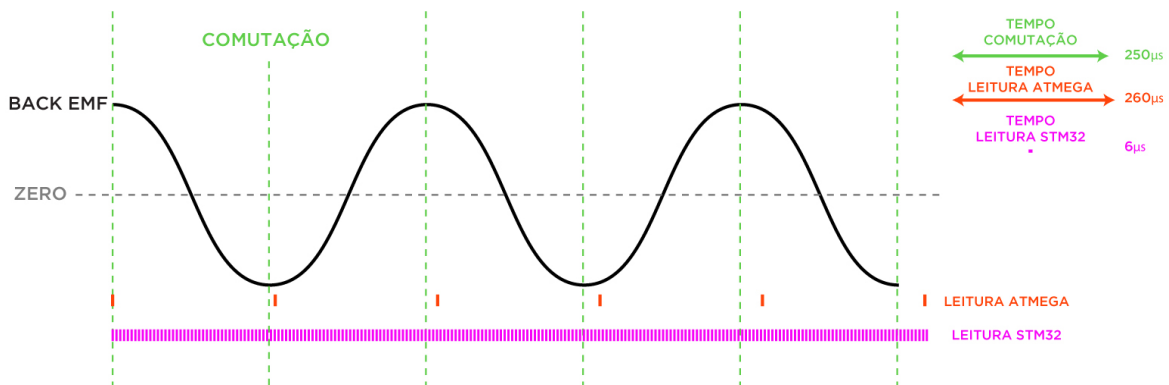


Figura 3.11: Comparação da velocidade de leitura do ATmega com o STM32

Para essa versão do projeto, o microcontrolador STM32F103, mostrado na Figura 3.12, foi escolhido por sua eficiência na leitura ADC, como demonstrado na Figura 3.12, onde os traços violetas indicam os momentos de leitura do ADC deste processador.

O tempo mínimo de uma leitura analógica confiável do STM32F1 é de

$$T_{stm32} = 6\mu s. \quad (3.6)$$

Usando a mesma Equação 3.5 para esse novo valor, o microcontrolador STM32 fará

$$\frac{250}{6} = 41,66 \text{ leituras por comutação.} \quad (3.7)$$

o que é muito melhor para a comutação confiável do motor.

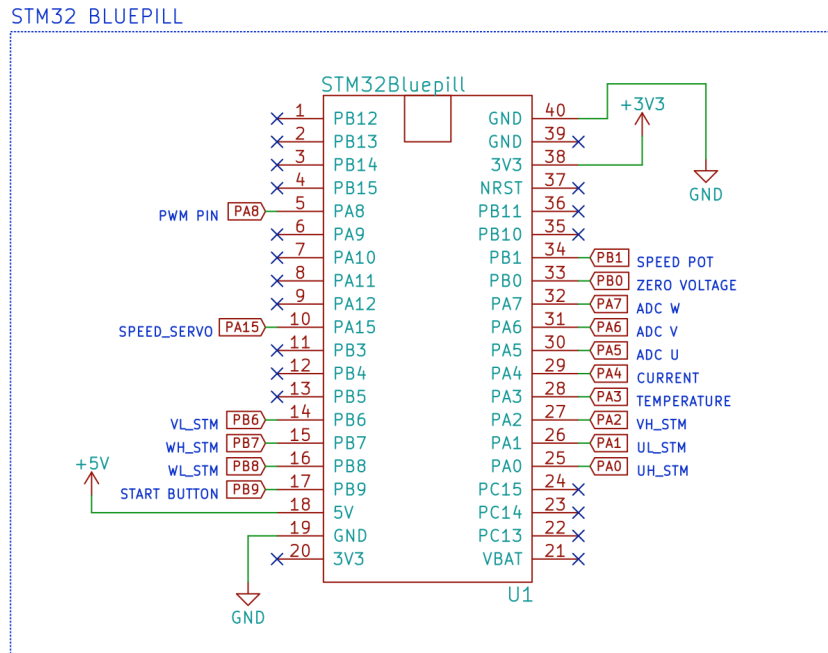


Figura 3.12: Microcontrolador STM32. Central do modo sem sensores

As entradas e saídas GPIO dessa aplicação são também semelhantes a do modo com sensor. Podemos observar a diferença na troca das leituras digitais dos sensores Hall por 4 leituras ADC em 4 pontos diferentes do motor (3 Fases e o Zero Virtual).

Para a leitura do Zero virtual, observada na Figura 3.13, as 3 fases do motor se juntam com 3 resistores de  $10k\omega$  e um divisor de tensão fornece o nível de tensão correto para a leitura ADC de  $3,3V$  do microcontrolador. Sendo o cálculo para o divisor de tensão

$$\text{Tensão do Motor} = 2 \cdot 4S = 2 \cdot 4 \cdot 4,2V = 33,6V \quad (3.8)$$

e para a leitura de  $3,3V$  temos,



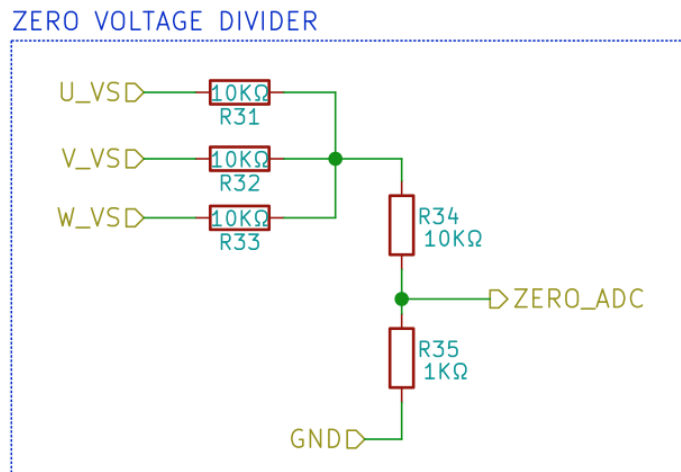


Figura 3.13: Divisor de tensão para o Zero Virtual do motor

$$V_{\text{adc}} = 33,6V \frac{R1}{R2} = 33,6V \frac{1k\Omega}{10k\Omega} = 3,36V. \quad (3.9)$$

Assim como a leitura das três fases ADC, observadas na Figura 3.14, é necessário o mesmo divisor de tensão para a correta leitura do Back-EMF do motor.

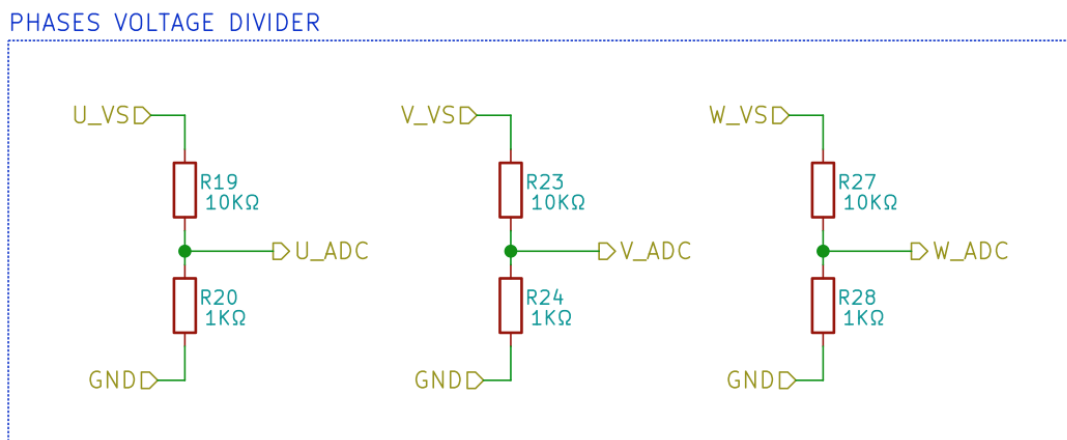


Figura 3.14: Divisão de tensão para a leitura do Back-EMF de cada fase

### Firmware do modo sem sensores

Um pouco mais complexo que o *firmware* do modo com sensores, o modo sem sensores, conforme Figura 3.15, tem basicamente a mesma função de determinar a posição atual do motor, monitorar a corrente e alterar as fases excitadas com base na tabela de estados.

Os *timers* do controle são:

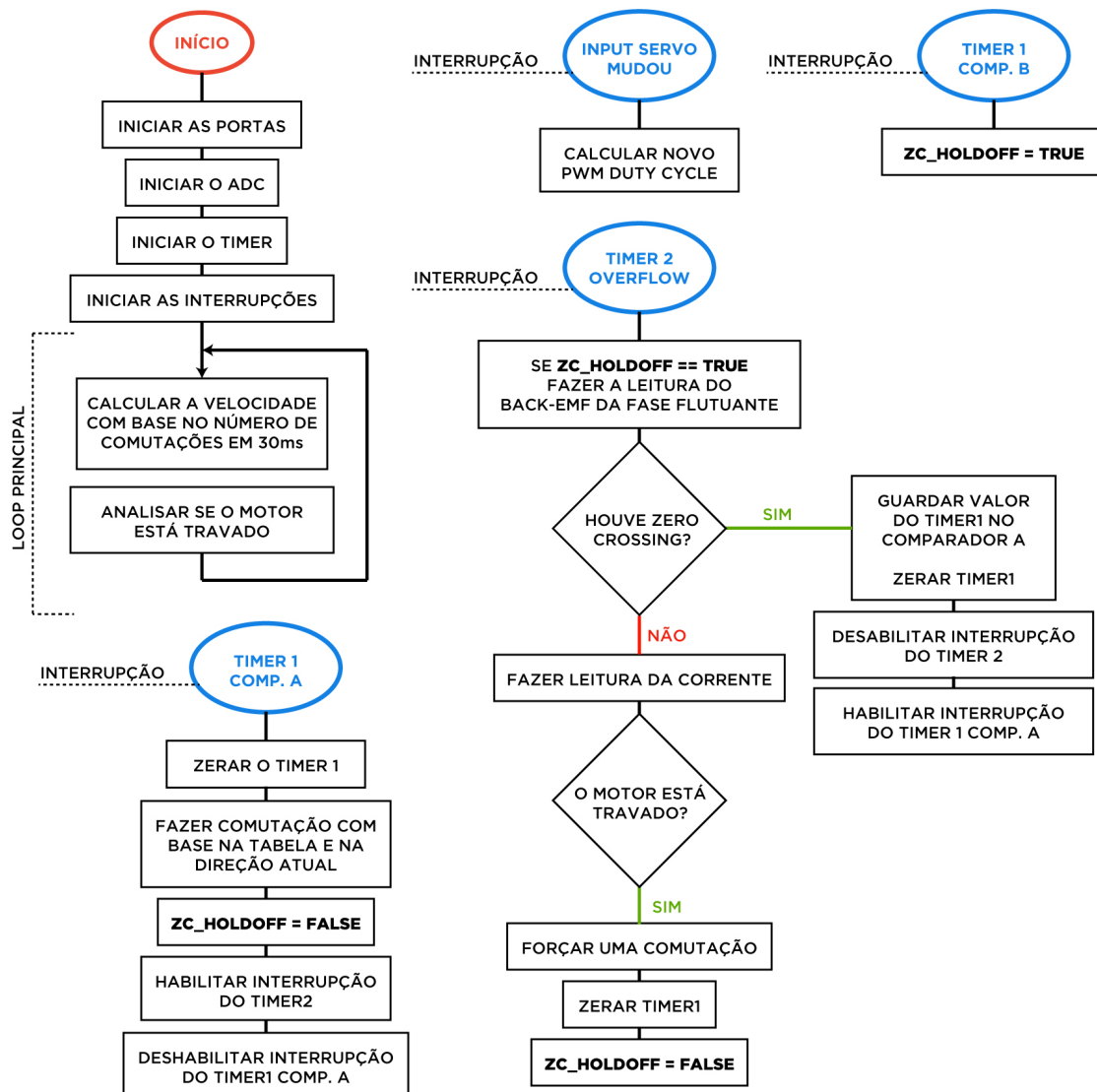


Figura 3.15: Fluxo do Firmware de controle de motores sem sensor

- **Timer 1: Comparador A** Comparador que guarda o tempo entre a comutação e o *Zero-Crossing*.
- **Timer 1: Comparador B** Comparador que guarda o tempo de *Zero-Crossing Hold-off*. Durante esse período, o microcontrolador ignorará toda leitura ADC feita imediatamente após a comutação, ignorando o ruído gerado por essa transição.
- **Timer 2** Timer do PWM principal. Assim como controlar a aceleração, o PWM com *Timer Phase-Correct* fará com que a leitura ADC aconteça sincronizada com as transições dos MOSFETS, gerando menos ruído nas leituras do Back-EMF e da corrente.

Desse modo, o microcontrolador funcionará apenas com base em interrupções e isso trará uma melhor resposta de velocidade ao motor. Para receber o comando de velocidade, o Controlador do Motor depende de um sinal externo. Neste projeto, o Controlador Central irá ser responsável por gerar este sinal.

### 3.3 Controlador da Bateria e Controlador Central

O Controlador da Bateria é responsável por monitorar a tensão e a temperatura das duas baterias, alimentar todo o circuito com as respectivas tensões necessárias e monitorar a corrente total do circuito.

O Controlador Central é responsável por fazer a comunicação Bluetooth com o controle ou com o aplicativo do celular e monitorar todos os sensores da placa, informando seus dados ao módulo de testes ou ao computador conectado.

#### 3.3.1 Hardware

O hardware do Controlador Central é composto por um microcontrolador, observado na Figura 3.16, com conectores periféricos para a leitura de informações ou envio de dados, referenciados nas Figuras 3.17, 3.18, 3.19 e 3.23.

Além disso, o Controlador da Bateria é responsável por converter a tensão da bateria para tensões necessárias no resto do circuito, como observado na Figura 3.20.

O microcontrolador é também um Atmega328P-AU, como demonstrado na Figura 3.16, com o *bootloader* Arduino. Suas entradas e saídas são:

1. *PB0, PD7* Conexão com o Módulo Bluetooth
2. Portas de gravação ICSP e TTL
3. *PC3, PC4, PC5* Sensores de temperatura
4. *PC1, PC2* Sensores de tensão para o controle do nível da bateria
5. *PD2, PD3, PD4* Controle de liga/desliga do *longboard*

Para a comunicação com o controle remoto Bluetooth, o projeto implementa a comunicação serial, mostrado na Figura 3.17, com o módulo de desenvolvimento **HM-10** que contém o CI **CC2540** da *Texas Instruments* com a capacidade de comunicação Bluetooth 4.0 Low Energy.

Com o objetivo de fazer a leitura da tensão das duas baterias, um divisor de tensão, observado na Figura 3.18, é colocado em seus terminais e a leitura constante ADC é feita pelo microcontrolador.

### MICROCONTROLLER

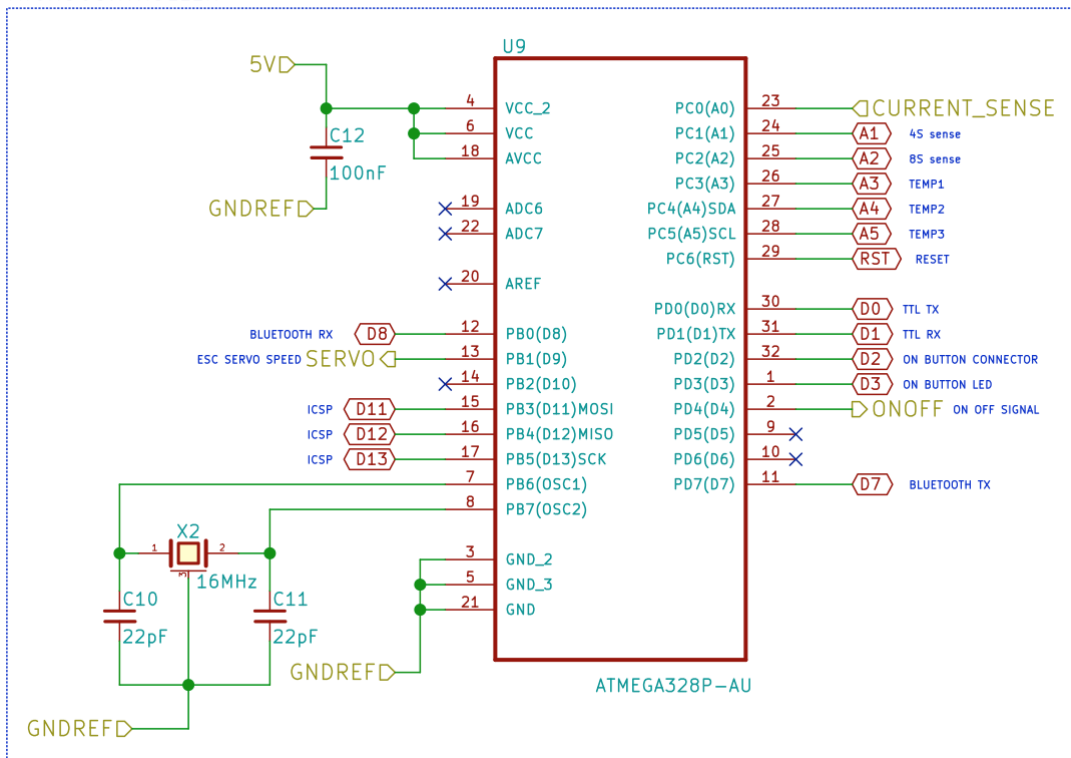


Figura 3.16: Microcontrolador ATMEGA328

### BLUETOOTH CONNECTOR

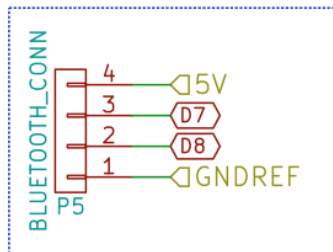


Figura 3.17: Conexão com o módulo Bluetooth HM-10

### VOLTAGE DIVIDER

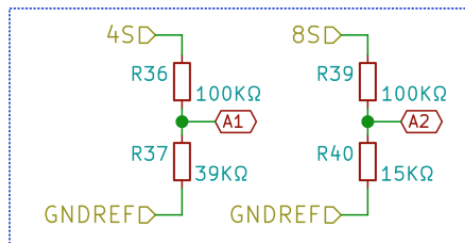


Figura 3.18: Divisor de tensão para a leitura do nível da bateria

Para a leitura da temperatura da bateria e dos MOSFETs, três conectores, observados na Figura 3.19, são disponibilizados para três diferentes sensores de temperatura que serão colocados em lugares diferentes do *longboard*. O sensor de temperatura é um termistor de  $10K\Omega$ . Sua leitura é um divisor de tensão com outro resistor de  $10K\Omega$ .

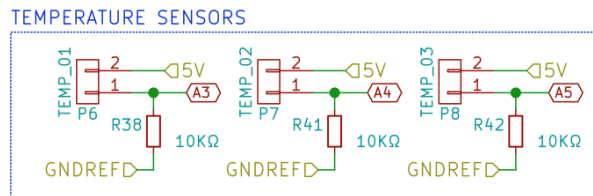


Figura 3.19: Conexão com os sensores de temperatura

A placa de controle de bateria disponibiliza diferentes níveis de tensão e terra específicos para diferentes funcionalidades da placa completa, demonstrados na Figura 3.20. Os terras são separados por causa da necessidade de controle de alimentação de diferentes partes do circuito. Além disso, o controlador central pode desligar o controlador do motor, seja por causa de alta temperatura, alta corrente ou por desejo do usuário (O controle de liga/desliga acionará o circuito da Figura 3.23), o circuito ficará sem a diferença de potencial necessária e desligará.

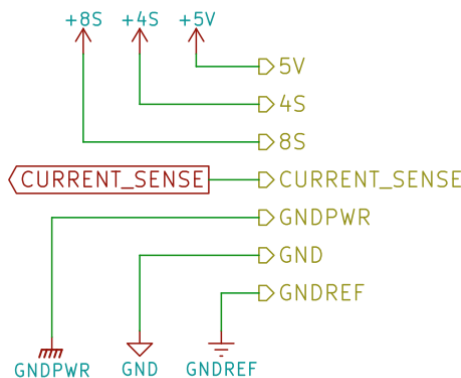


Figura 3.20: Todos os níveis de tensão da placa completa

Com a intenção de reduzir o nível de tensão da bateria de  $33.6V$  (Equação 3.8) para o nível de controle dos microcontroladores de  $5V$ , um módulo **Buck Converter**, mostrado na Figura 3.21, foi utilizado com o objetivo de fornecer  $5V$  estáveis com uma corrente de até  $2A$ .

Uma das partes mais importantes do circuito de controle e alimentação do motor são os grandes capacitores desacopladores, mostrados na Figura 3.22. Eles são extremamente necessários pois a comutação do motor gera um ruído muito grande na fonte de alimentação. Esse ruído influencia todos os sinais de controle do motor.

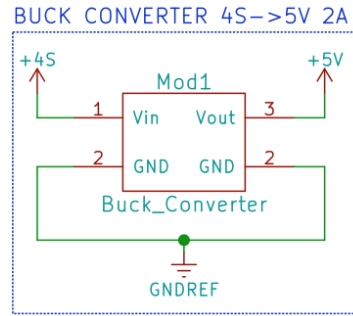


Figura 3.21: *Buck Converter*

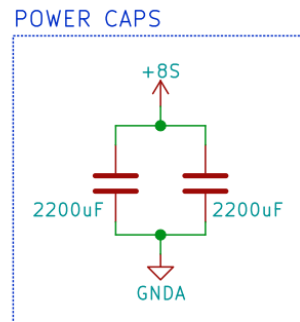


Figura 3.22: Capacitores de potência

Finalmente, temos o circuito de liga/desliga dos terras da fonte. Um MOSFET de alta potência foi escolhido para a chave do circuito e um acoplador óptico transforma o sinal 5V do microcontrolador em um sinal de excitação do MOSFET, conforme mostrado na Figura 3.23.

Nesse mesmo circuito temos a leitura da corrente do circuito completo usando o CI **ACS758** da *Allegro MicroSystems*. Sua leitura analógica é diretamente ligada à uma porta de leitura ADC do microcontrolador.

### 3.3.2 Firmware

O fluxo do programa consiste em fazer a leitura da comunicação Bluetooth, transformar o valor da aceleração em um sinal de servo para o controlador do motor e monitorar os sensores de corrente e temperatura do motor. O fluxograma pode ser observado na Figura 3.24.

Além disso, o módulo central tem também a responsabilidade de enviar os dados que está lendo para o dispositivo Bluetooth ou para o módulo de testes conectado na sua entrada USB.

### CURRENT SENSE AND ON/OFF SWITCH

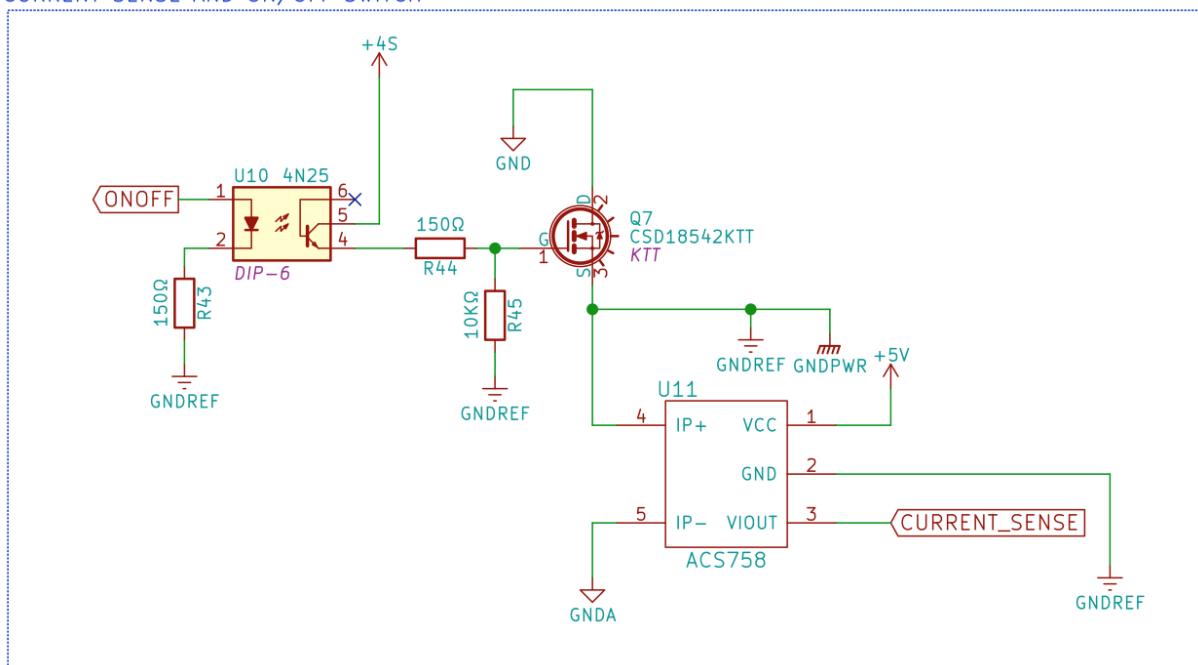


Figura 3.23: Circuito de controle de liga e desliga do ESC

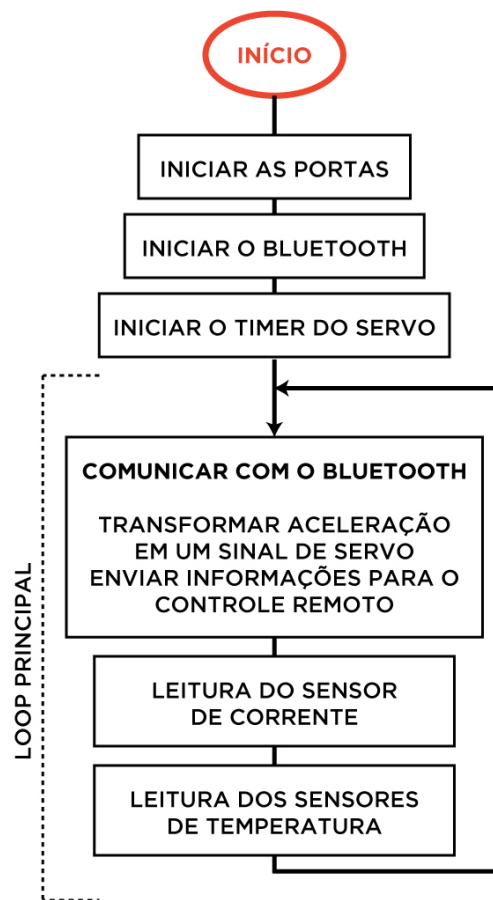


Figura 3.24: Fluxo do Módulo central



## 3.4 Placa de Circuito Impresso

Para o teste dos dois tipos de controle implementados, duas placas de controle foram produzidas.

### 3.4.1 Placa do modo com sensores

O circuito foi projetado para uma placa de duas faces. Existe na placa também uma pequena separação entre o sinal de controle e a parte de potência do controle do motor.

Podemos observar na Figura 3.25(a) a placa no lado 1, que contém a maior parte dos componentes, e na Figura 3.25(C) a placa no lado 2, que contém os *drivers* dos MOSFETS e o CI 74LS08 (Portas AND).

Na Figura 3.25(b) podemos observar a separação entre a parte de potência (amarelo) e a parte lógica (verde) e na Figura 3.25(d) em azul estão os MOSFETS do lado de cima da ponte H, em rosa, os MOSFETS do lado de baixo e em vermelho podemos observar as conexões com as 3 fases do motor. Os microcontroladores da central/bateria e do controle do motor são os ressaltados em verde e amarelo, respectivamente.

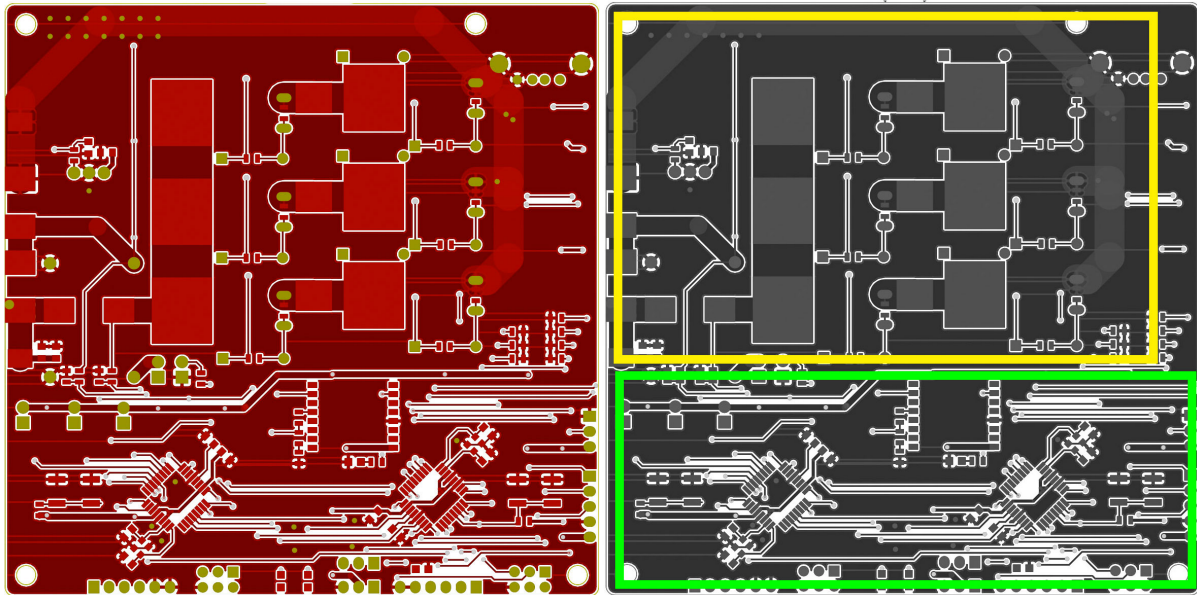
As trilhas de sinal possuem 0,25 mm e as trilhas de potência 5 mm. O tamanho total da placa é de 100 mm x 100 mm.

### 3.4.2 Placa do modo sem sensores

Assim como na placa do modo com sensores, a placa foi projetada para ter duas faces e uma pequena separação entre o sinal de controle e a parte de potência.

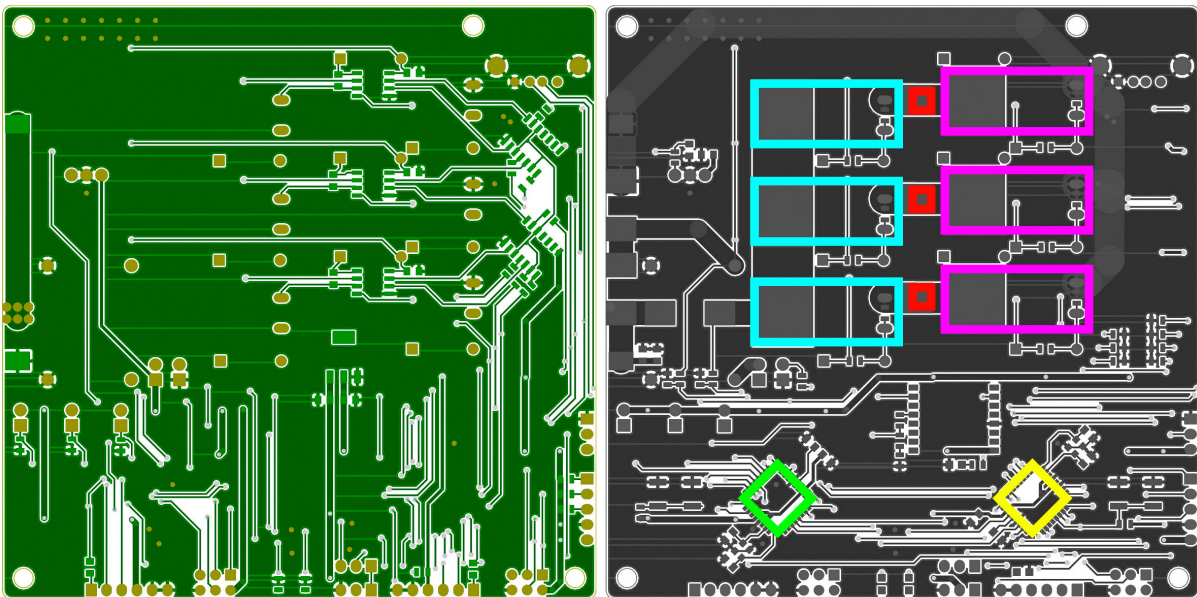
Podemos observar na Figura 3.26(a) o lado 1 que contém a parte de potência da placa, observado em (b) no quadrado verde. E o lado 2 em (c). Como o microcontrolador utilizado nessa placa foi o Microcontrolador STM32F103, uma placa de desenvolvimento foi utilizada para não ter que implementar todos os requisitos necessários do microcontrolador na placa. Essa placa de desenvolvimento pode ser observada na Figura 3.26 em azul na imagem (b) e em verde na imagem (d).

Como o processo de fabricação foi mais simples para o protótipo dessa placa, as trilhas de sinal possuem 0,6 mm e as trilhas de potência 5 mm. O tamanho total da placa é de 150 mm x 100 mm.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figura 3.25: Placa de circuito impresso do modo com sensores

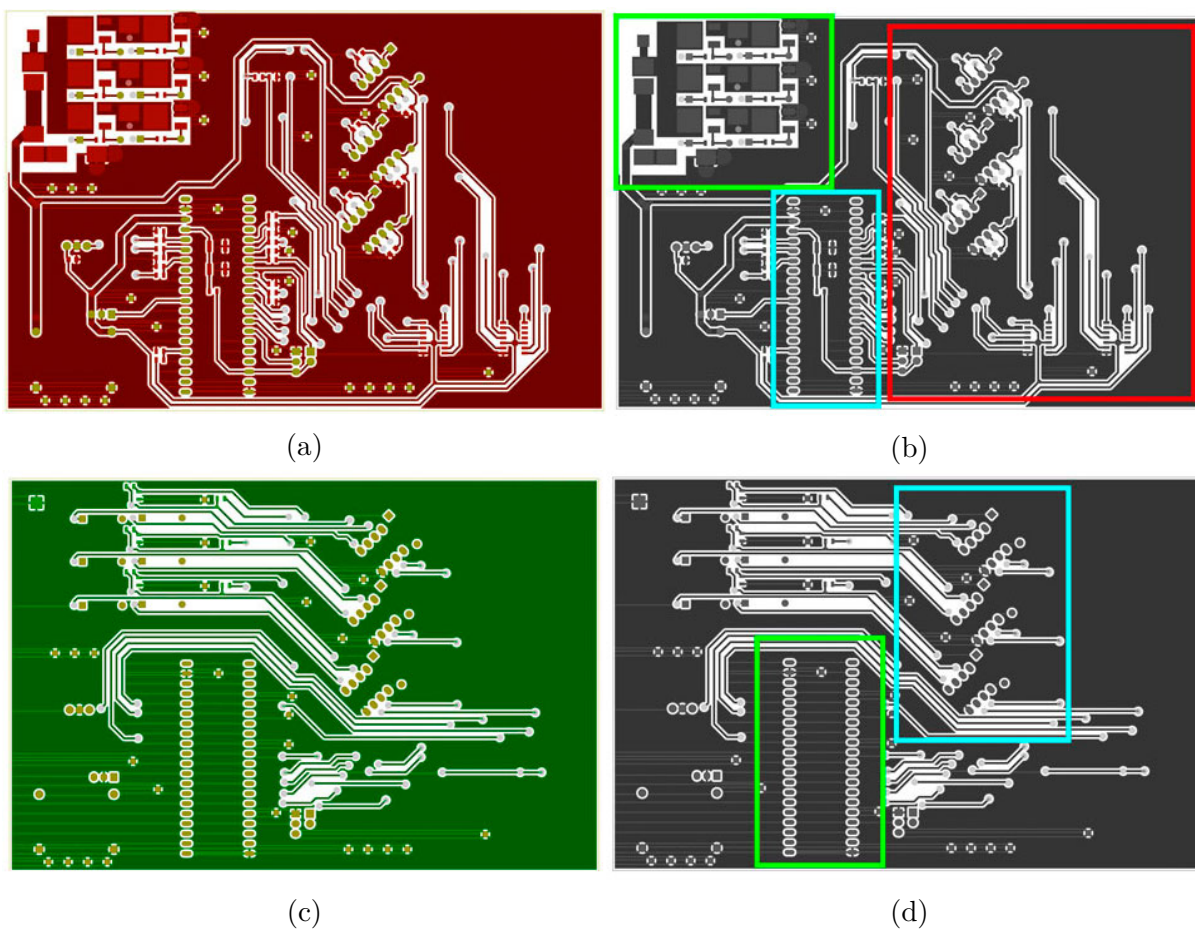


Figura 3.26: Placa de circuito impresso do modo sem sensores

## 3.5 Mecânica

A estrutura mecânica do *longboard* elétrico é composta de 5 partes.

### 3.5.1 O Longboard

O *longboard* original teve todas as suas peças, que podem ser observadas na Figura 3.27, pensadas na implementação da parte elétrica.

- **(a) Roda Orantang Kegel** 80mm de diâmetro e dureza 90A foi escolhida por conter furos centrais, que são originalmente usados para resfriar a roda quando em alta velocidade, mas são úteis para conexão da roda com a polia de tração com parafusos.
- **(b) Eixo Caliber** foi escolhido por ter as laterais quadradas. Isso facilita o posicionamento do suporte do motor.
- **(c) Prancha Cush** combinada com o **Espaçador** de 13mm cria uma altura perfeita para o encapsulamento dos eletrônicos e o posicionamento do motor com uma movimentação sem que nada toque.
- **(d) Rolamento RedBones** é ideal para um *longboard* mais rápido. Sua resistência com o solo não afetará tanto a bateria.
- **(e) Espaçador** para aumentar a altura do *longboard* e evitar que o motor encoste na prancha.

Com isso, a montagem do eixo e o *longboard* completo é demonstrada na Figura 3.28.

### 3.5.2 Tração da Roda

Para a tração da roda, o meio escolhido foi uma correia dentada. Para isso, é necessário um eixo de fixação do motor, demonstrada na Figura 3.29, que ficará ligado no eixo do *longboard* e polias que serão encaixadas nas rodas.

A visão explodida do eixo pode ser observado na Figura 3.30, onde parafusos fixarão o motor no suporte, e a polia na roda.

Na Figura 3.31 podemos observar a montagem completa do suporte do motor.

O posicionamento da montagem da tração da roda pode ser observado na Figura 3.32 sem a visualização da roda para dar uma melhor ideia sobre como ficarão afixados os parafusos.

A correia dentada fica ligada entre o motor e a polia da roda. A relação entre a polia da roda e o motor é explanada a seguir.



Figura 3.27: Os componentes do *longboard*



Figura 3.28: Montagem do eixo e do *longboard*

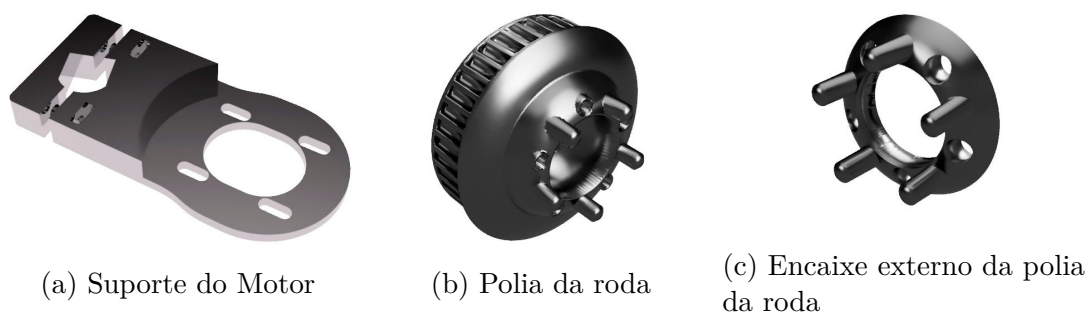


Figura 3.29: Componentes de tração da roda

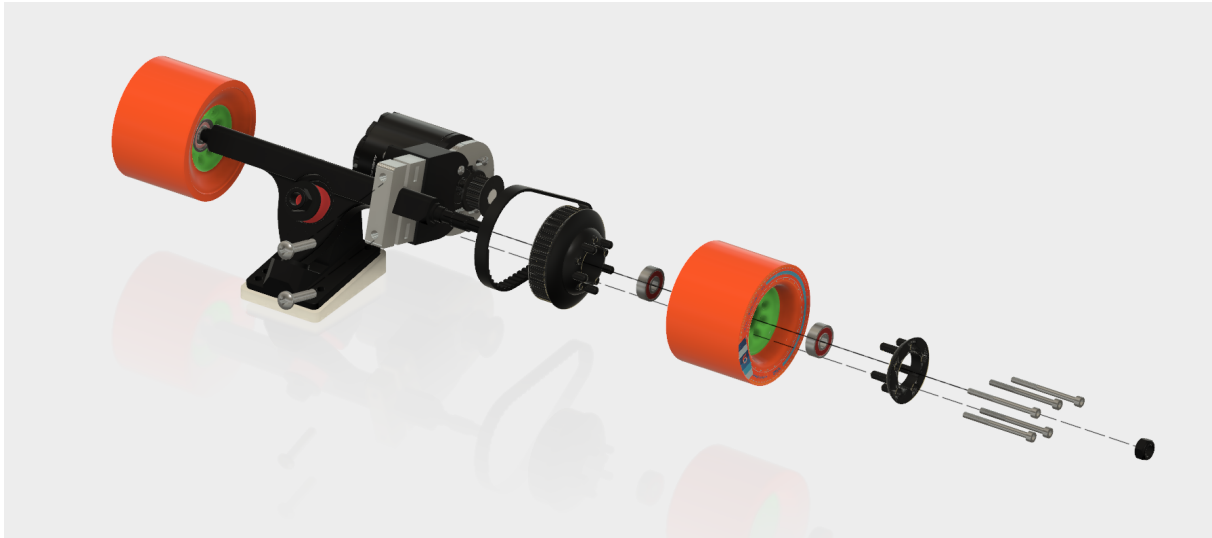


Figura 3.30: Visão explodida da montagem da tração da roda

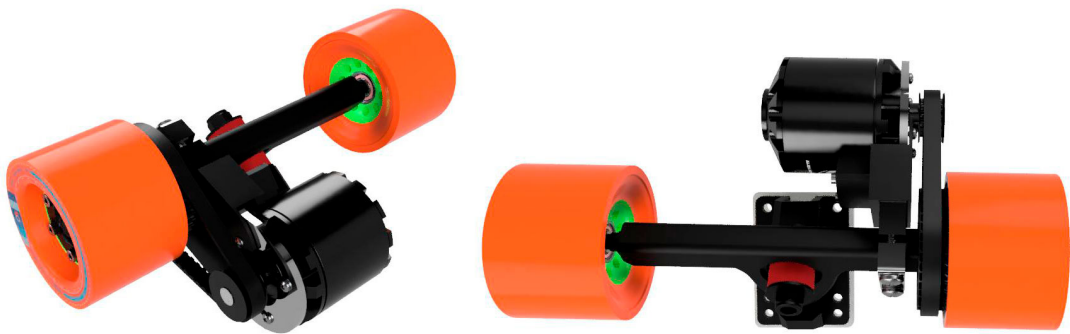


Figura 3.31: Montagem da tração da roda

Sabendo que a **Polia do motor** tem 15 dentes e a **Polia da roda** tem 40 dentes, sua relação é

$$\frac{40}{15} = 2,6 \Rightarrow 2,6 \text{ voltas no motor} = 1 \text{ volta na roda.} \quad (3.10)$$

Essa relação é necessária para diminuir a velocidade total do *longboard* e para aumentar o torque na roda. Com um motor de 170 Kv à uma tensão de  $8S = 33,6V$ , dada pela Equação 3.8, temos que a velocidade total de rotação do motor é calculada por

$$170 \text{ Kv} \cdot 33,6V = 5.712 \text{ rpm} \quad (3.11)$$

e com base na relação dada pela Equação 3.10, a velocidade de rotação da roda é de

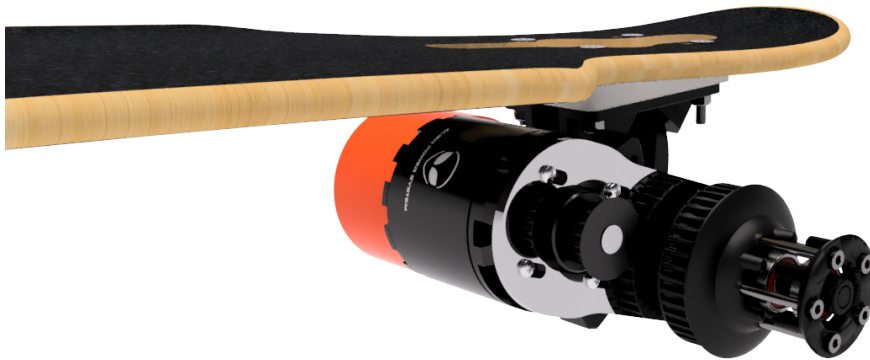


Figura 3.32: Montagem da tração da roda com a roda escondida

$$\frac{5.712 \text{ rpm}}{2,6} = 2.196 \text{ rpm.} \quad (3.12)$$

Considerando o diâmetro da roda de 80mm, o seu perímetro é

$$2\pi R = 3,141592 \cdot 0,080 = 0,25 \text{ m} \quad (3.13)$$

e a velocidade final do *longboard* é

$$0,25 \text{ m} \cdot 2.196 \text{ rpm} = 549 \text{ m/min} = 33 \text{ km/h.} \quad (3.14)$$

Alterando a relação entre a polia da roda e a polia do motor, podemos alterar a velocidade máxima do *longboard* e a força que o motor fará, aumentando ou diminuindo a carga máxima que ele pode carregar ou a capacidade de subida em uma ladeira.

### 3.5.3 Suporte do sensor Hall

Para o modo de controle com sensores, o sensor Hall é necessário e precisa estar bem próximo ao motor. No esquema mecânico apresentado, um case com uma placa de sensores foi encaixada no suporte do motor, conforme visto na Figura 3.33.

### 3.5.4 Encapsulamento dos eletrônicos

O encapsulamento dos eletrônicos existe com o objetivo de proteger o circuito eletrônico de qualquer sujeira do ambiente e proteger as baterias de serem perfuradas ou danificadas.

Na Figura 3.34 podemos observar a construção desse encapsulamento que contém um botão de liga/desliga e a entrada dos fios do motor e do sensor Hall.

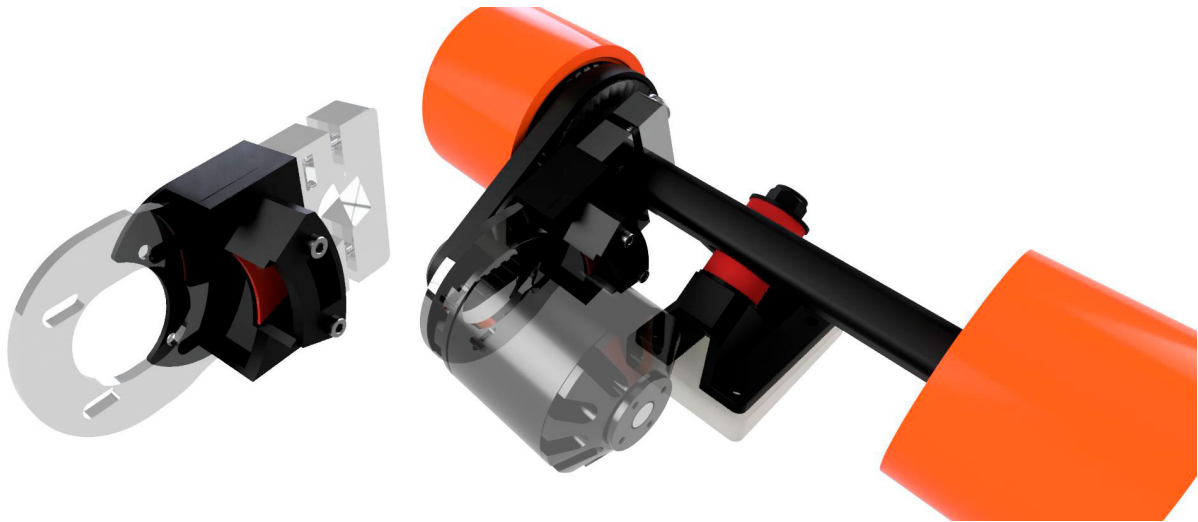


Figura 3.33: Suporte para os sensores Hall



Figura 3.34: Encapsulamento de plástico dos eletrônicos

Na 3.35 podemos ver toda a montagem do *longboard* e a Figura 3.36 apresenta o *longboard* no seu ambiente.

### 3.5.5 Análise da Movimentação do *longboard*

Antes de fabricar o equipamento, é necessário analisar se nenhuma parte interfere na outra durante o funcionamento. Para tanto, a análise de movimentação dos eixos deve ser realizada. Ao fazer uma curva, o *longboard* altera a distância entre o motor e a parte inferior da prancha. Porém, conforme pode ser visto na Figura 3.37, esse movimento não atrapalhará o funcionamento do motor.

A Figura 3.38 demonstra a teste feito durante a análise. Conforme podemos observar nas imagens, a rotação da prancha não influencia no funcionamento do motor.





Figura 3.35: Imagem do encapsulamento

tb



Figura 3.36: Imagem do *longboard* finalizado



Figura 3.37: Análise da movimentação do *longboard*



Figura 3.38: Teste de colisão da estrutura mecânica nas curvas do *longboard*

## 3.6 Aplicativo do iPhone

Usando a tecnologia Bluetooth 4.0 do iPhone, o aplicativo tem o objetivo de funcionar como um controle remoto, alterar configurações do *longboard* remotamente e criar um meio de interação entre os usuários da plataforma.

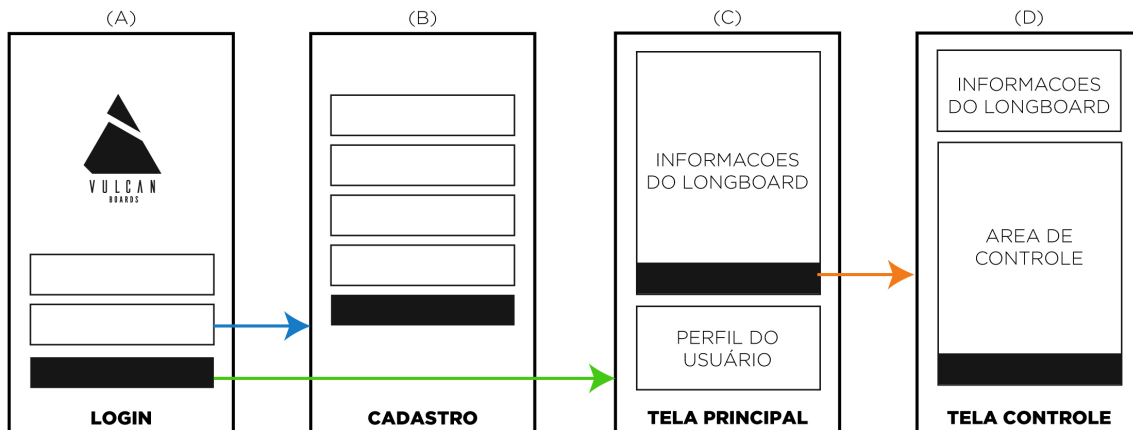


Figura 3.39: Diagrama de Blocos do Aplicativo do iPhone

A tecnologia usada foi a linguagem Swift com o Software Development Kit (SDK) do iOS 11. Para o controle do banco de dados, a plataforma Firebase da empresa Google foi usada.

Na Figura 3.39(a) podemos observar a tela inicial do aplicativo, onde o usuário poderá fazer o login ou se cadastrar (b). Ao fazer o Login, o usuário poderá configurar uma nova conexão com o seu *longboard*, na tela mostrada na Figura 3.39(c). Obtendo assim as suas informações atuais como bateria, quilometragem e modo de controle.

A área de controle, apresentada na Figura 3.39(d), é a parte em que permite ao usuário controlar a velocidade do *longboard*. Nessa parte também é possível ver as informações de bateria, velocidade e quilometragem.

## 3.7 Controle Remoto

Apesar do controle via celular funcionar ser bastante adequado ao projeto, existe uma grande desvantagem em seu uso. Caso o usuário caia do *longboard* ou derrube o celular, o preço de manutenção do aparelho é muito alto. Então, um controle remoto específico foi projetado de forma que sua manutenção não seja tão custosa, tendo ainda sua estrutura desenvolvida com o objetivo de ser mais durável e resistente à quedas. Além disso, podemos desenvolver no controle remoto uma melhor interface com o usuário, criando uma melhor ergonomia e possibilitando mais segurança durante o passeio.

### 3.7.1 Circuito

O circuito do controle remoto é mostrado na Figura 3.40.

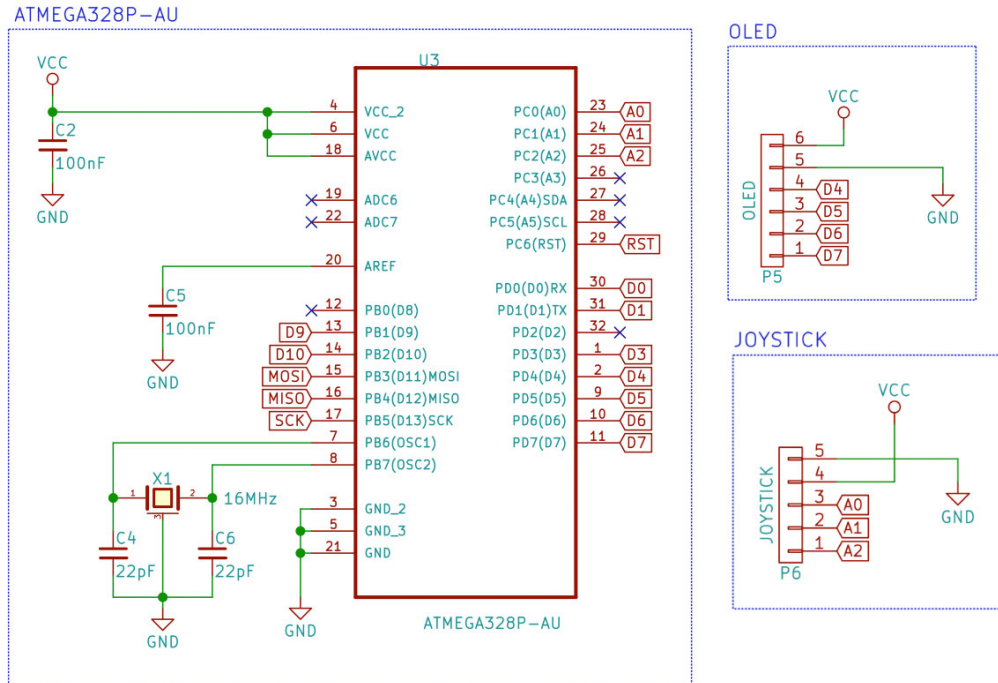


Figura 3.40: Circuito do controle remoto

O circuito consiste em um microcontrolador principal, um *joystick* para dar o controle de velocidade analógico ao usuário, um botão para determinar se o usuário não bateu sem querer no *joystick*. Para movimentar o *longboard*, o usuário deverá segurar o botão *trigger* e mover o *joystick*). O controle é dotado ainda de uma pequena tela OLED para apresentar informações de bateria e velocidade do *longboard* para o usuário.

### 3.7.2 Firmware

A atividade principal do *firmware* do controle remoto é comunicar com o módulo Bluetooth HM-11, fazer a leitura analógica do *joystick* e enviar um valor de aceleração para o *longboard*. Essa informação é enviada 30 vezes por segundo. Dentro desse intervalo, a tela OLED é atualizada com as informações recebidas de velocidade e bateria.

O circuito é alimentado por duas Baterias Li-Po 3,7V em série e um regulador de tensão 78LS05 que diminui a tensão para os 5V necessários à alimentação do processador ATMEGA328P-AU.

## Modos de aceleração

Para uma maior segurança do usuário, quatro modos de aceleração também foram implementados no controle remoto, ilustrados na Figura 3.41. Ao apertar o botão central do *joystick* os 4 modos são apresentados ao usuário.



Figura 3.41: Modos de aceleração do Controle Remoto

- **Falcon Mode** - No modo *Falcon* não há limitação na aceleração nem na velocidade final do *longboard*. Esse modo é feito para usuários mais avançados que desejam aproveitar toda a sua potência.
- **Vulcan Mode** - O modo *Vulcan* é o modo padrão. Sua aceleração é um pouco menor mas também não há limitação da velocidade final. Além de equilibrar melhor o usuário sobre o *longboard*, esse modo ajuda a economizar a bateria, visto que a corrente inicial será limitada.
- **Eco Mode** - O modo *Eco* tem como objetivo economizar a bateria para que o *longboard* alcance uma maior distância de deslocamento. Com esse modo, o usuário terá que dar a primeira "remada" no *longboard* com o pé e a aceleração é extremamente limitada. Assim como o modo *Vulcan*, esse modo não limita a velocidade máxima do *longboard*.
- **Baby Mode** - O modo *Baby* é feito para aqueles que acabaram de começar a andar de *longboard*. Sua velocidade e sua aceleração são limitadas, dando ao usuário uma maior segurança.

Essas limitações de velocidade e aceleração são feitas com base na modificação da leitura analógica do *joystick*. A função modificadora é dada por

$$x_m = a \cdot x^s \quad (3.15)$$

onde  $x$  corresponde à leitura original do valor do *joystick*,  $x_m$  é o valor da leitura do *joystick* modificado pelos parâmetros  $s$ , sensibilidade, e  $a$  aceleração.

A Figura 3.43 apresenta o efeito da variação da sensibilidade  $s$ , mantendo a aceleração constante  $a = 1$ . Nos gráficos a seguir, o eixo horizontal corresponde ao valor lido  $x$  do *joystick* e o eixo vertical ao valor modificado  $x_m$  que controla o motor do *longboard*.

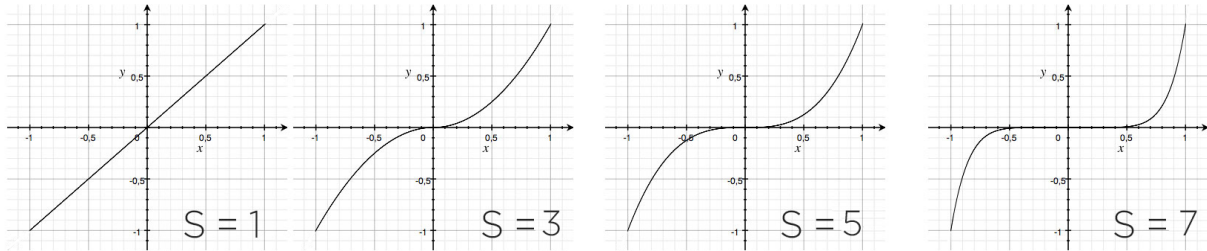


Figura 3.42: Efeito da variação da sensibilidade no controle do *joystick*

A Figura 3.42 apresenta o efeito da variação da aceleração  $a$ , mantendo o parâmetro de sensibilidade constante  $s = 1$ .

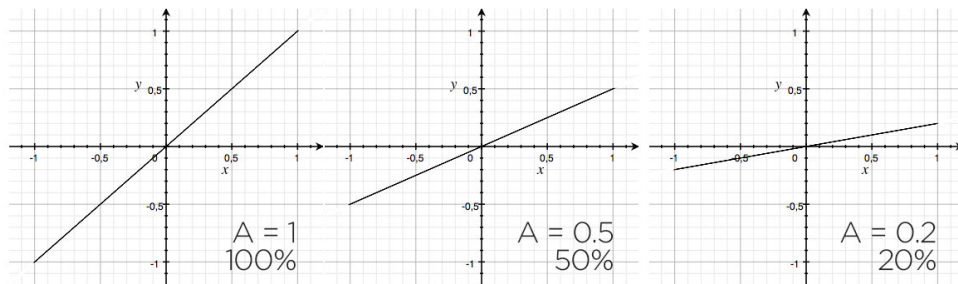


Figura 3.43: Efeito da variação da aceleração no controle do *joystick*

A Figura 3.44 apresenta os valores dos parâmetros  $a$  e  $s$  para cada modo de operação, durante a arrancada e na velocidade máxima.

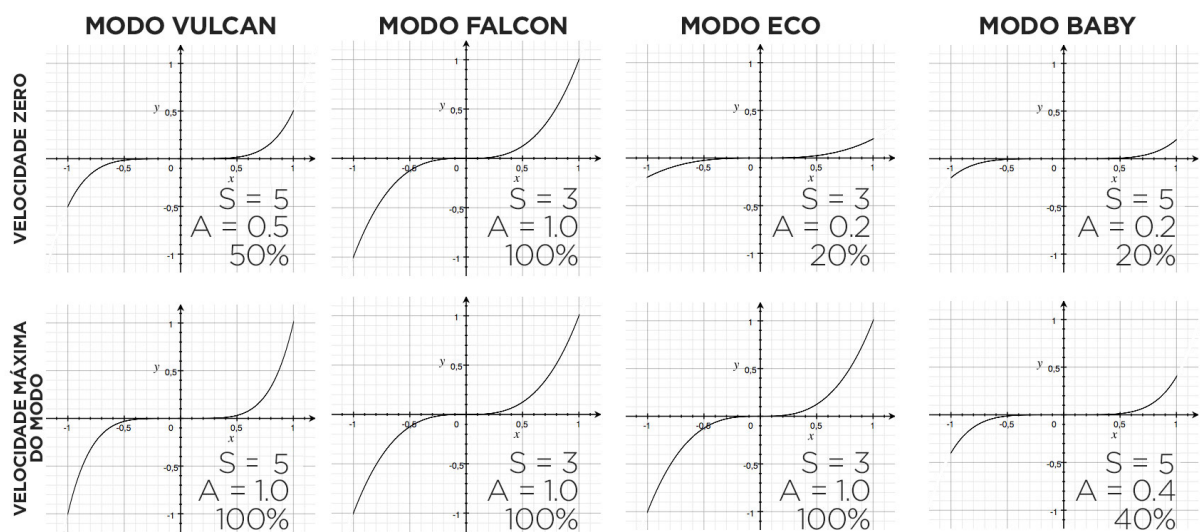


Figura 3.44: Gráficos com os parâmetros escolhidos para cada modo

Observa-se que o modo *Falcon* permite o uso da potência total do motor, tanto na arrancada quanto na velocidade máxima. O modo *Vulcan* limita a potência na arrancada a 50% mas não limita na máxima velocidade. Já o modo *Baby* limita a potência a 20% na arrancada e a 40% na velocidade máxima.

### 3.7.3 Placa de Circuito Impresso

O objetivo principal ao projetar a placa de circuito impresso foi minimizar seu tamanho. Consiste de placa de duas faces, com trilhas de 0,25 mm e tamanho total de 35 mm × 74 mm.

A Figura 3.45(a) apresenta o lado 1 da placa e em (c) seu lado 2. Na Figura 3.45(b) o quadrado amarelo ressalta o módulo Bluetooth e o quadrado azul a tela OLED no lado 1. Na Figura 3.45(d) o quadrado vermelho indica o local do controlador central ATmega328P-AU no lado 2.

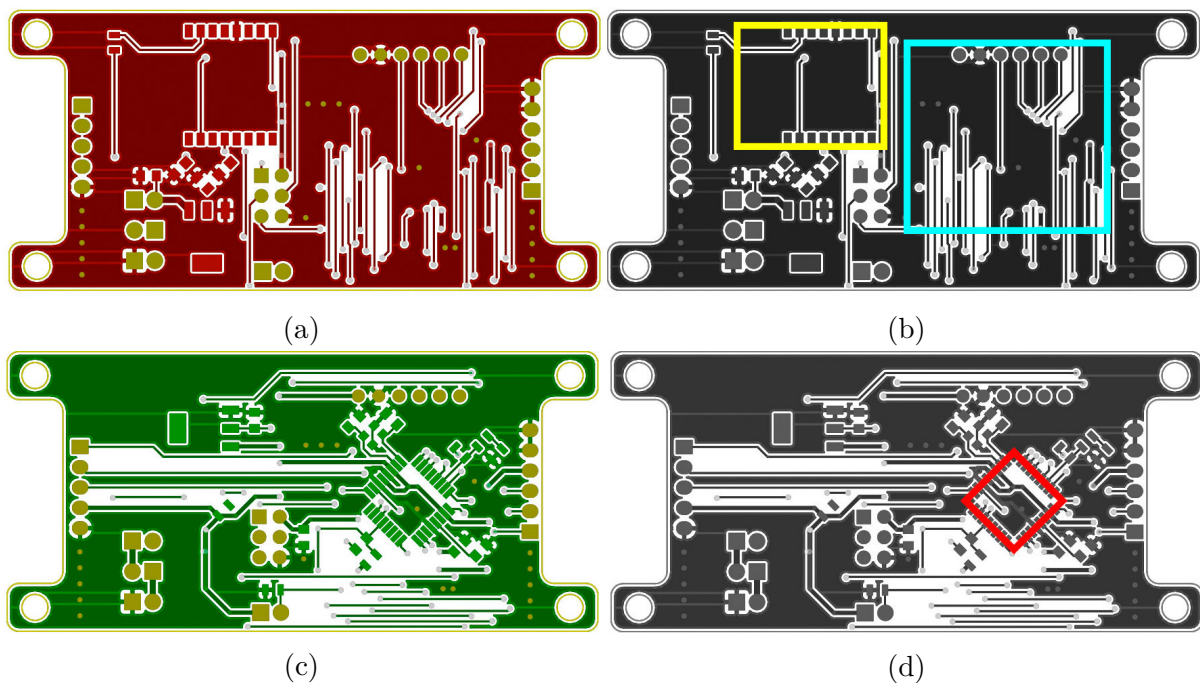


Figura 3.45: Placa de circuito impresso para o controle remoto

### 3.7.4 Mecânica

O projeto do controle remoto, apresentado na Figura 3.46, foi desenvolvido para ser impresso em impressoras 3D no material PLA, por ser mais resistente à queda.



Figura 3.46: O projeto do controle remoto completo

A Figura 3.47 apresenta as partes do controle remoto. Em (a) podemos observar a parte inferior do controle, em (b) os componentes internos encaixados no controle, e em (c) o controle montado.



Figura 3.47: Partes do controle remoto

Esse capítulo apresentou a solução proposta para o projeto. No capítulo seguinte apresentaremos a implementação de cada uma das partes e seus resultados associados.



# Capítulo 4

## Resultados e Testes

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos e as análises de desempenho do protótipo.

### 4.1 Mecânica

A seleção dos materiais para as diferentes partes do acoplamento do motor na roda do *longboard* foi feita com base nos fatores peso, preço e durabilidade.

#### 4.1.1 Construção

Para a parte mecânica, as peças compradas foram o motor *Alien 6374 Outrunner Brushless* de 170Kv e potência de 3200W, a polia do motor de 15 dentes e a correia *StrongBelt 5M* de dimensões 9mm × 280mm.

Para completar o projeto mecânico, as seguintes peças foram fabricadas.

#### Suporte do Motor

O suporte do motor deve resistir ao momento fletor gerado pelo torque inicial no instante da arrancada. Se o material e a geometria do suporte não proporcionarem a rigidez suficiente, o motor se desloca folgando a correia, efeito demonstrado no vídeo <https://youtu.be/txujMbXEJco>. Com o folga na correia, o torque não é efetivamente transferido para a roda, reduzindo a eficiência do sistema.

Para a versão final do projeto, o material escolhido foi o alumínio por ser leve e resistente o suficiente às forças necessárias. Na Figura 4.1 podemos ver a peça de alumínio sendo cortada em uma CNC.

A Figura 4.2 mostra as peças já cortadas.

O corte das peças na CNC é ilustrado no vídeo <https://youtu.be/Vtu1LxuJANg>.



Figura 4.1: Suporte do motor sendo cortado em uma CNC usando o alumínio como material

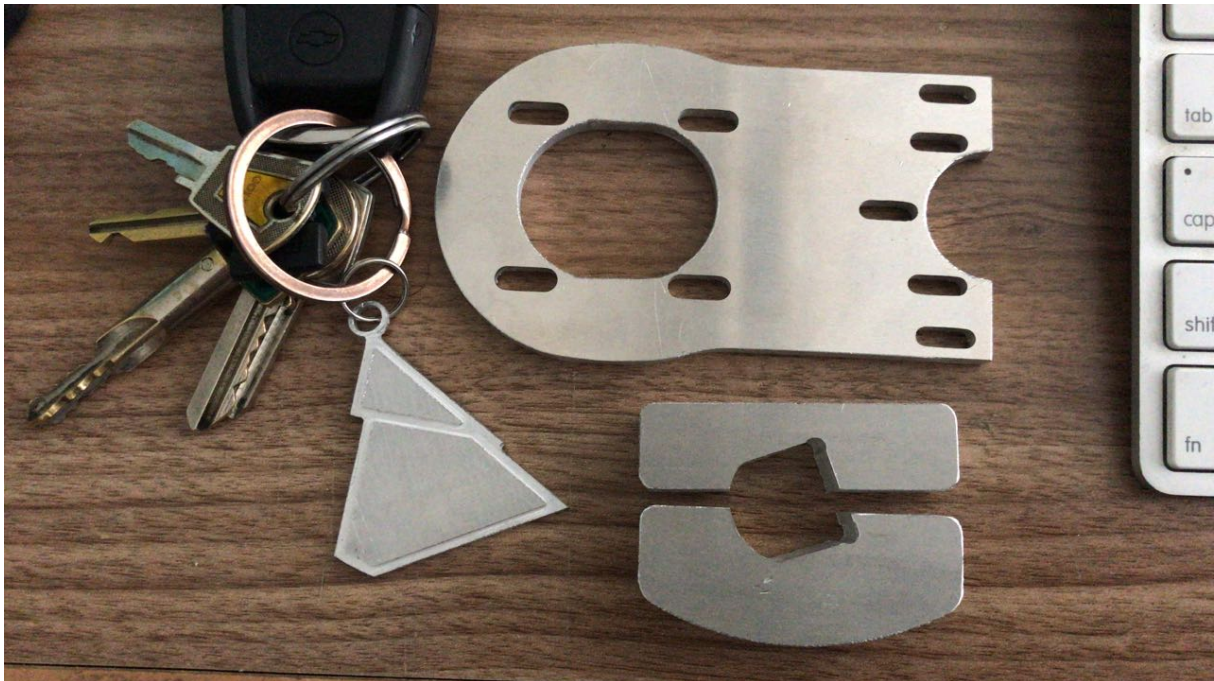


Figura 4.2: Peças do suporte do motor cortadas em alumínio

### **Polia da Roda**

A polia da roda é uma engrenagem de 40 dentes que fica encaixada na roda por meio de parafusos, como observado na Figura 4.3.

Para a fabricação da polia da roda, o método escolhido foi impressão 3D no material PLA devido ao seu baixo preço e alta durabilidade.



Figura 4.3: Polia da roda impressa em 3D no material PLA

### Suporte dos sensores Hall

Para o uso do método com sensores, há a necessidade do correto posicionamento dos sensores Hall perto do motor. Para isso, existem duas opções: A compra de um motor com sensores Hall embutidos ou a fabricação de uma placa externa.

Como o motor escolhido para esse projeto não possui sensores Hall embutidos, uma placa de sensores foi criada. Para a leitura dos campos magnéticos dos ímãs, cada sensor Hall deve estar separados por  $120^\circ$ . Porém, considerando que o motor possui 14 polos (7 pares Norte/Sul), a separação desses sensores podem estar a  $\frac{120^\circ}{7} = 17,14^\circ$  e, com base no diâmetro do motor, a placa construída, ilustrada na Figura 4.4 (a), tem as especificações observadas na Figura 4.4 (b). As abas laterais fornecem ao usuário a possibilidade de mudar o posicionamento do parafuso do suporte para permitir um melhor ajuste do alinhamento dos sensores aos campos magnéticos dos ímãs.

Para a construção do suporte, o método escolhido foi a impressão 3D em material PLA. Esse material é resistente o suficiente para proteger os sensores e rígido o suficiente para não vibrar com a movimentação do *longboard*. Sua montagem pode ser observada na Figura 4.5.

### 4.1.2 Montagem final

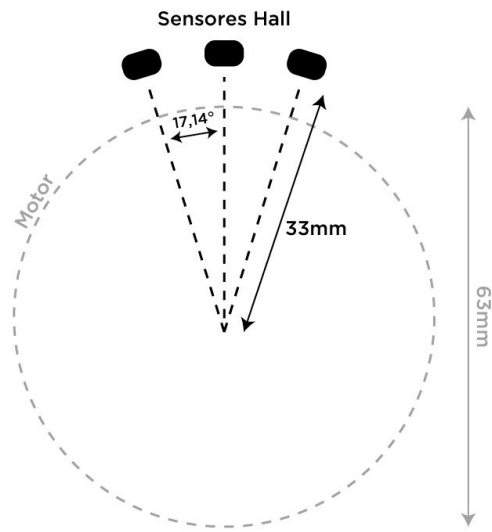
As Figuras 4.6 e 4.7 apresentam a montagem final do sistema de tração da roda.

### 4.1.3 Testes

Durante todos os testes, nenhum desgaste visível ocorreu às peças e o seu funcionamento ocorreu conforme o esperado. A tensão da correia se manteve constante, os sensores Hall não mudaram de posição ou se danificaram no processo.



(a)



(b)

Figura 4.4: Placa com os sensores Hall



Figura 4.5: Suporte dos sensores Hall posicionados no suporte do motor de protótipo

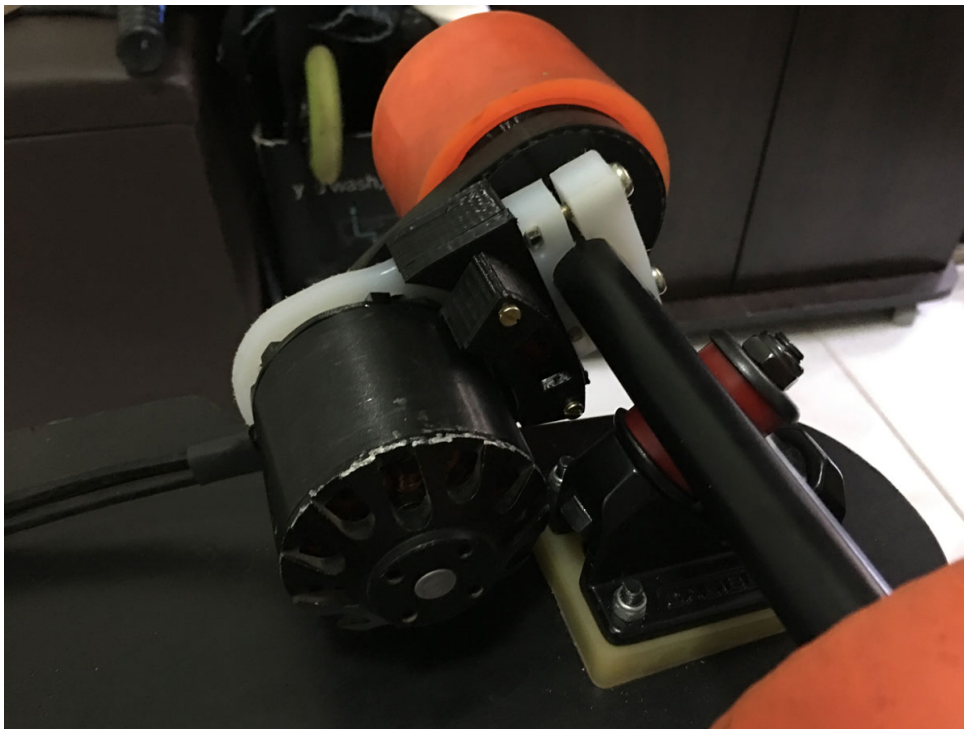


Figura 4.6: Suporte protótipo montado

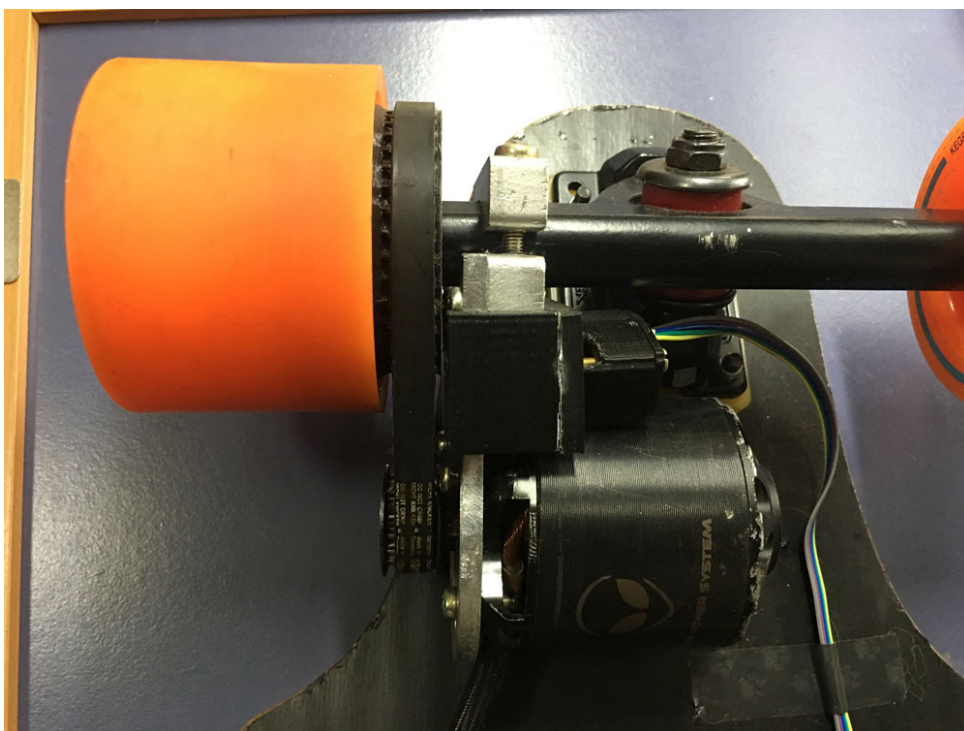


Figura 4.7: Suporte final montado

## 4.2 Controlador sem sensores

A placa do controlador sem sensores foi construída como um protótipo para fins comparativos.

### 4.2.1 Construção

Para a fabricação da placa, o método de corrosão com o perclorato de ferro e definição das trilhas com o filme fotossensível foi utilizado por ser o mais rápido e poder ser feito em laboratório. Seu resultado foi excelente para um primeiro protótipo, como pode ser observado nas Figuras 4.8 e 4.9.

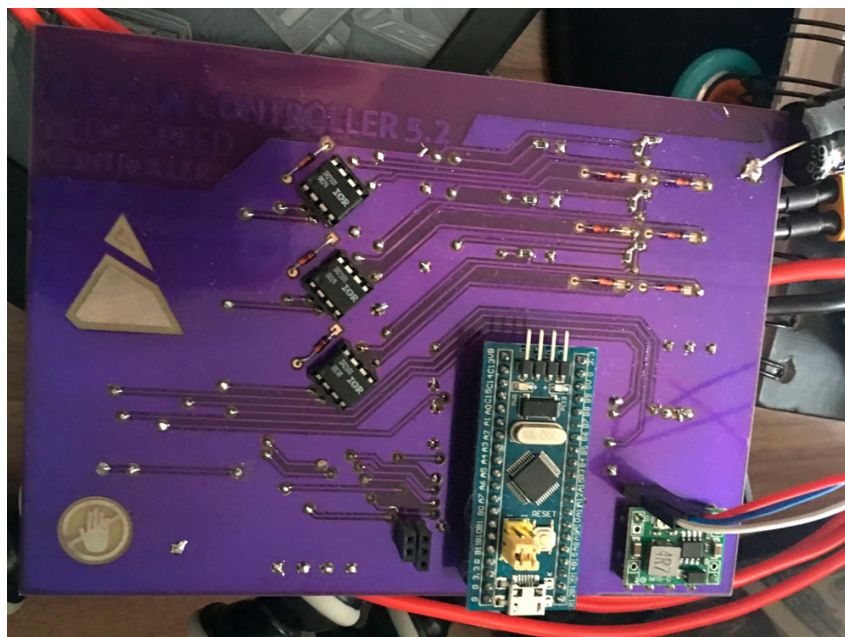


Figura 4.8: Placa do controlador sem sensor

### 4.2.2 Resultados

Apesar de funcionar corretamente, esse método de controle não foi adotado no controlador final devido à sua baixa qualidade de arrancada.

Por não conhecer a posição inicial do motor, o método sem sensores força uma comutação aleatória no motor até que encontre um Back-EMF confiável na sua leitura para as comutações seguintes. Isso faz com que o motor “pule” e seja instável na arrancada até que ele atinja certa velocidade.

Caso o usuário faça a força inicial de arrancada do *longboard*, a aceleração do motor a partir de uma velocidade diferente de zero é tão boa quanto o método com sensores.



Figura 4.9: Placa do controlador sem sensor dentro do encapsulamento com as baterias

Porém, caso seja necessária uma arrancada usando apenas a força do motor, as falhas iniciais produzidas pelo motor tornam o *longboard* instável, o que prejudica sua utilização por um usuário iniciante.

Deste modo, seus resultados não foram satisfatórios e a montagem final utilizando este método não foi realizada. O método com sensores foi usado na versão final do projeto.

### 4.3 Controlador com sensores

Usando o método com sensores o *longboard* apresentou o melhor desempenho no projeto. Esse controlador foi produzido com uma qualidade melhor com o objetivo de não criar nenhuma limitação final para a potência do motor, como trilhas de alta impedância ou fios com mal-contato.

### 4.3.1 Construção

O projeto da PCB foi feito usando o software **Kicad** e a sua confecção foi feita na China, na empresa PCBWay [64]. A placa produzida pode ser observada na Figura 4.10 e a versão obtida após a soldagem de todos os componentes apresentada na Figura 4.11.

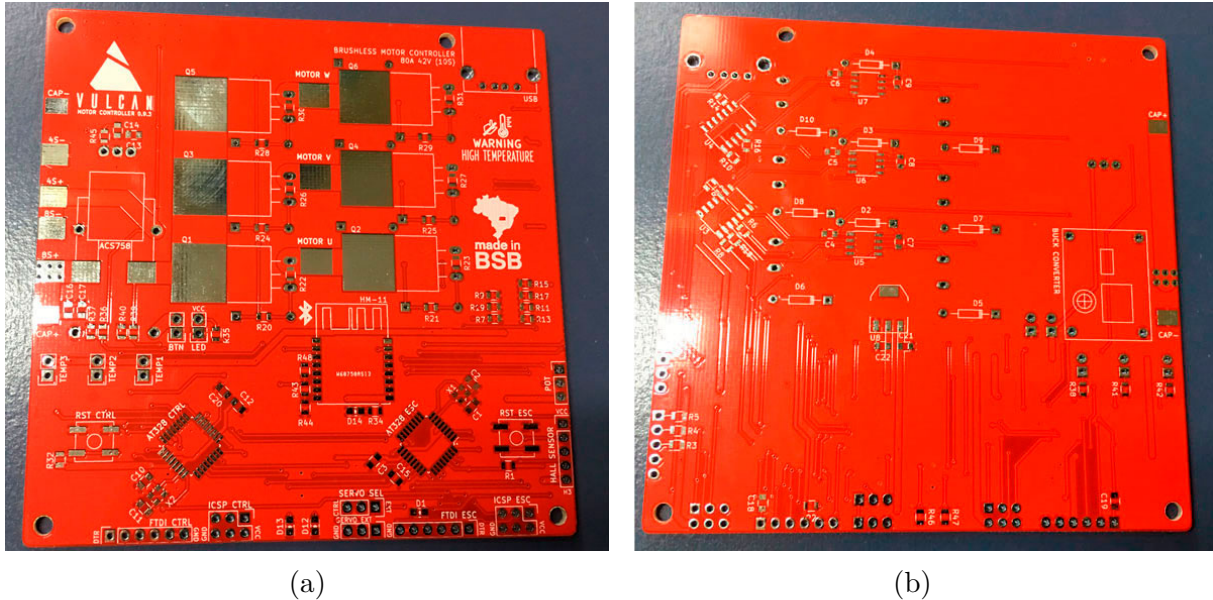


Figura 4.10: Placa do controlador com sensores

### 4.3.2 Resultados

A placa apresentou o funcionamento esperado durante os testes. O único problema observado foi quando a corrente do motor estava muito alta, ou seja quando o motor fazia muita força. Ocorria alguma interferência entre a parte de potência e a tensão de alimentação da parte de controle, fazendo com que um dos microcontroladores fosse reinicializado. Porém, como esse efeito acontecia em correntes por volta de 70A, uma limitação de corrente via software em 60A resolveu o problema neste protótipo.



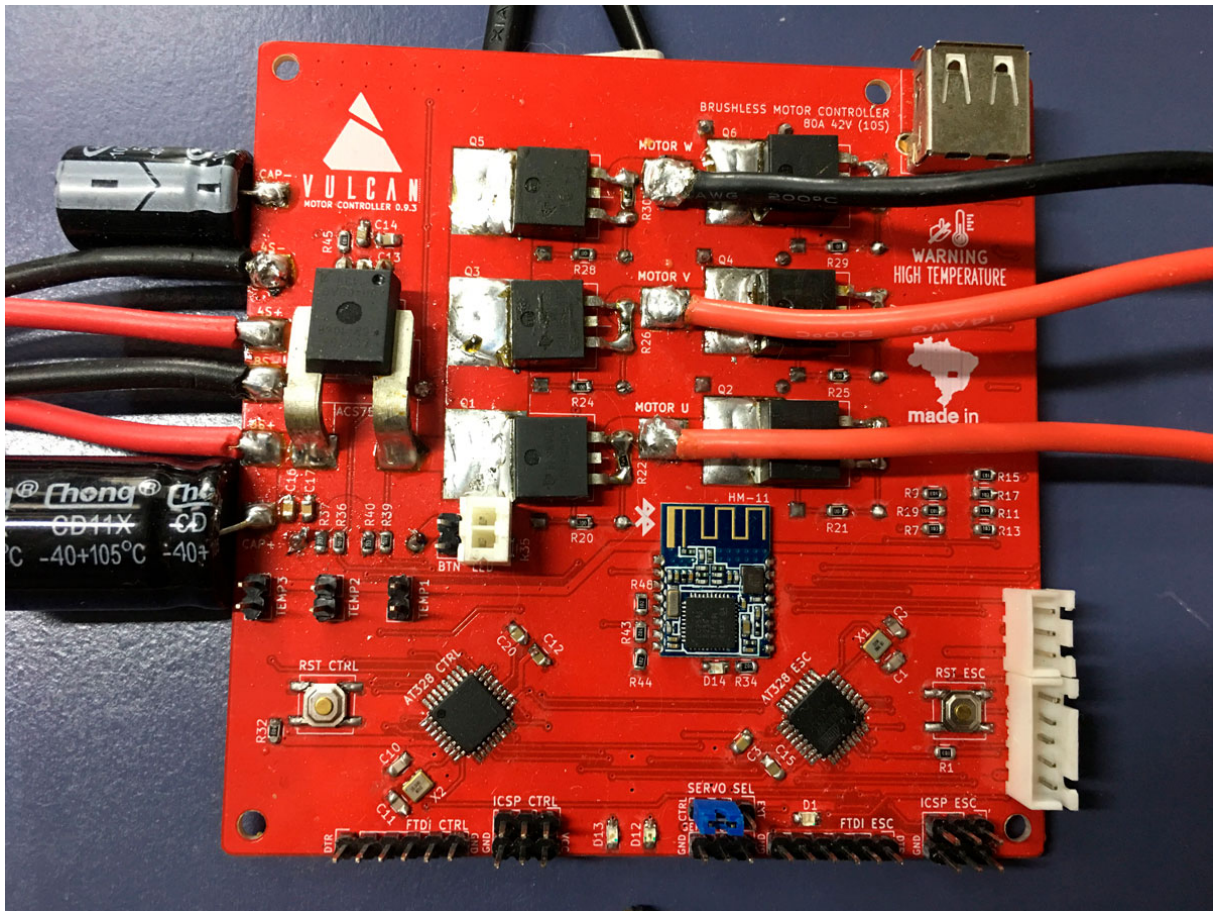


Figura 4.11: Placa do controlador com sensores com os componentes

## 4.4 Controle remoto

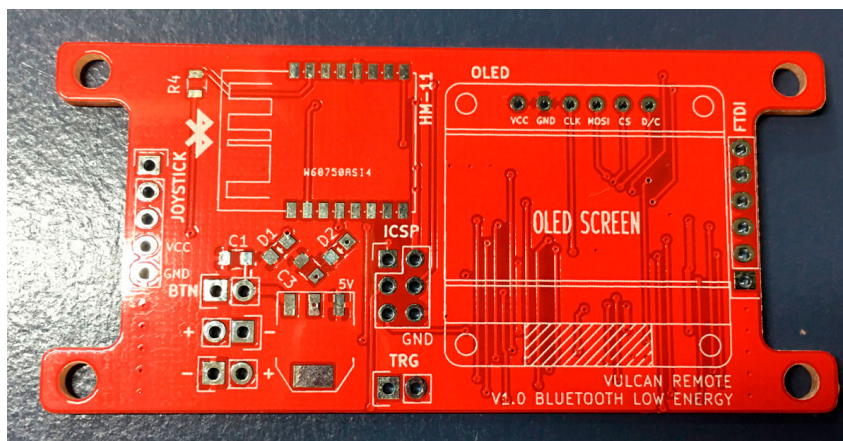
O controle remoto foi desenvolvido com o objetivo de ser resistente à quedas e trazer uma maior ergonomia para o usuário.

### 4.4.1 Construção

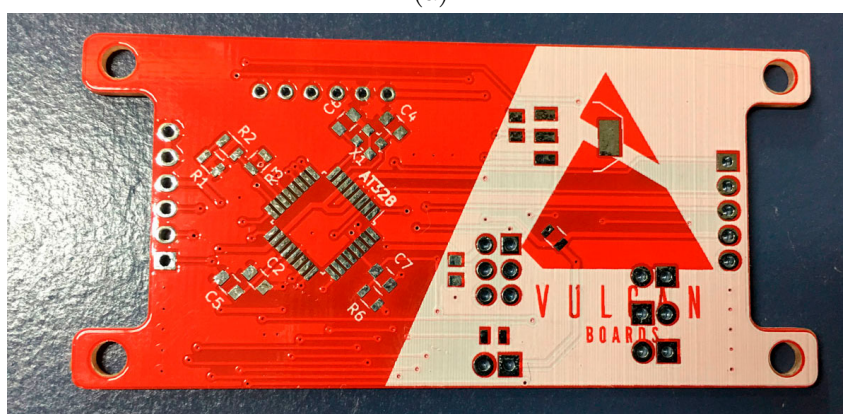
A construção do controle remoto foi dividida em duas partes: Eletrônica e Encapsulamento.

#### Eletrônica

A produção da PCB seguiu o mesmo procedimento da placa controladora com sensores. Produção foi realizada pela empresa PCBWay [64]. Na Figura 4.12 podemos observar os dois lados da placa sem os componentes eletrônicos e na Figura 4.13 a placa com a montagem completa. Em (b) a tela inicial e em (a) a tela principal do controle com as informações do *longboard*.



(a)



(b)

Figura 4.12: Placa do controle remoto sem solda

Além da placa, alguns componentes externos foram necessários para o funcionamento do controle. Componentes como um *joystick* e botões para o controle.

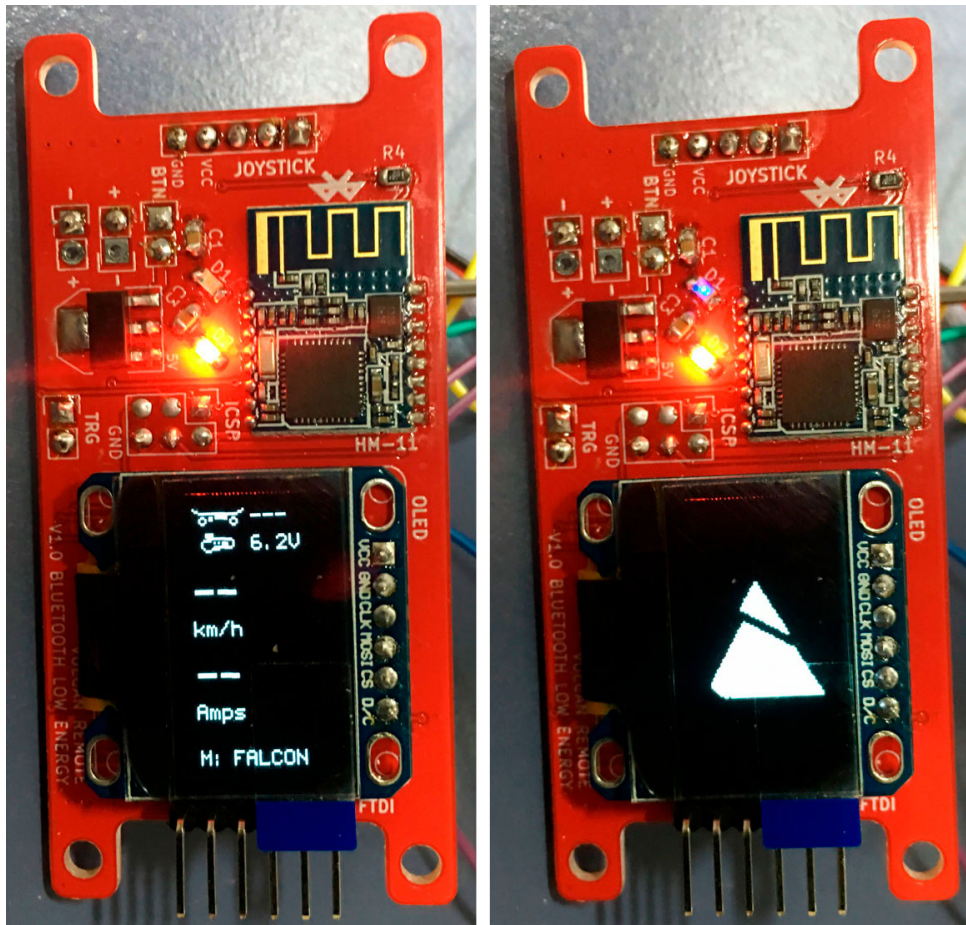
### Encapsulamento

O método escolhido para a construção do encapsulamento foi a impressão 3D por ser a mais barata técnica para o protótipo. No entanto, seu projeto foi também pensado para a produção em larga escala usando injetores de plástico.

A Figura 4.14 mostra os dois lados da parte superior do controle impressa em 3D.

### 4.4.2 Resultados

Durante os testes, os seguintes pontos foram observados no desempenho do controle remoto.



(a)

(b)

Figura 4.13: Placa do controle remoto com os componentes



Figura 4.14: Controle Impresso em 3D

## Encapsulamento

O design reforçado de plástico do projeto do encapsulamento deixa o controle firme e resistente à quedas. Seu formato e tamanho apresentaram uma ótima ergonomia para mãos adultas, mas crianças precisariam de um controle menor.

## Tela

A taxa de atualização da tela de 10 FPS, apesar de ser baixa, é o suficiente para que as informações sejam úteis para o usuário. Sua existência no controle, ainda que complique e deixe o projeto mais caro, foi considerada essencial para que o controle remoto atingisse a funcionalidade desejada.

## Bluetooth

Durante os testes, a distância máxima operacional de comunicação medida entre o *longboard* e o controle remoto foi de apenas 1 metro. Esta distância não é o suficiente para garantir um controle seguro e confiável do *longboard*, prejudicando muito a funcionalidade do controle remoto. Este é um problema grave e deve ainda ser atacado para que o projeto se torne um produto comercial.

No entanto, a taxa de comunicação entre o controle remoto e o controlador central possui um valor que varia de 0,2 a 0,3 Mbit/s. Essa velocidade de transmissão de dados é o suficiente para o envio da aceleração do controle para o *longboard* e o recepção das informações no controle com uma taxa de 30 FPS.

Além disso, o tempo inicial de conexão entre o controle e o *longboard* é de apenas 8ms. Assim que o usuário liga o controle remoto, o *longboard* está imediatamente conectado e pronto a ser utilizado.

## 4.5 Aplicativo do iPhone

Uma alternativa para o controle remoto proposto neste projeto é o uso de um *smartphone* iPhone. Para o desenvolvimento do aplicativo, a plataforma iOS foi utilizada e para a sincronização das contas e captura de estatísticas dos usuários a plataforma Firebase foi implementada no projeto.

### 4.5.1 Funcionalidades

Descreveremos a seguir as partes principais da aplicação.

## Conta

Durante as primeiras telas da aplicação o cadastro do usuário é necessário, conforme podemos observar na Figura 4.15. Durante essas telas, o usuário pode criar uma nova conta, acessar a sua conta já criada ou criar uma nova conta usando as suas informações do Facebook. Essas informações vão para o banco de dados do Firebase e são usadas para sincronizar as configurações e estatísticas do usuário entre dispositivos conectados na mesma conta.

Além disso, com um cadastro individual é possível analisar melhor o comportamento do usuário e implementar o conceito de Gamificação no sistema.

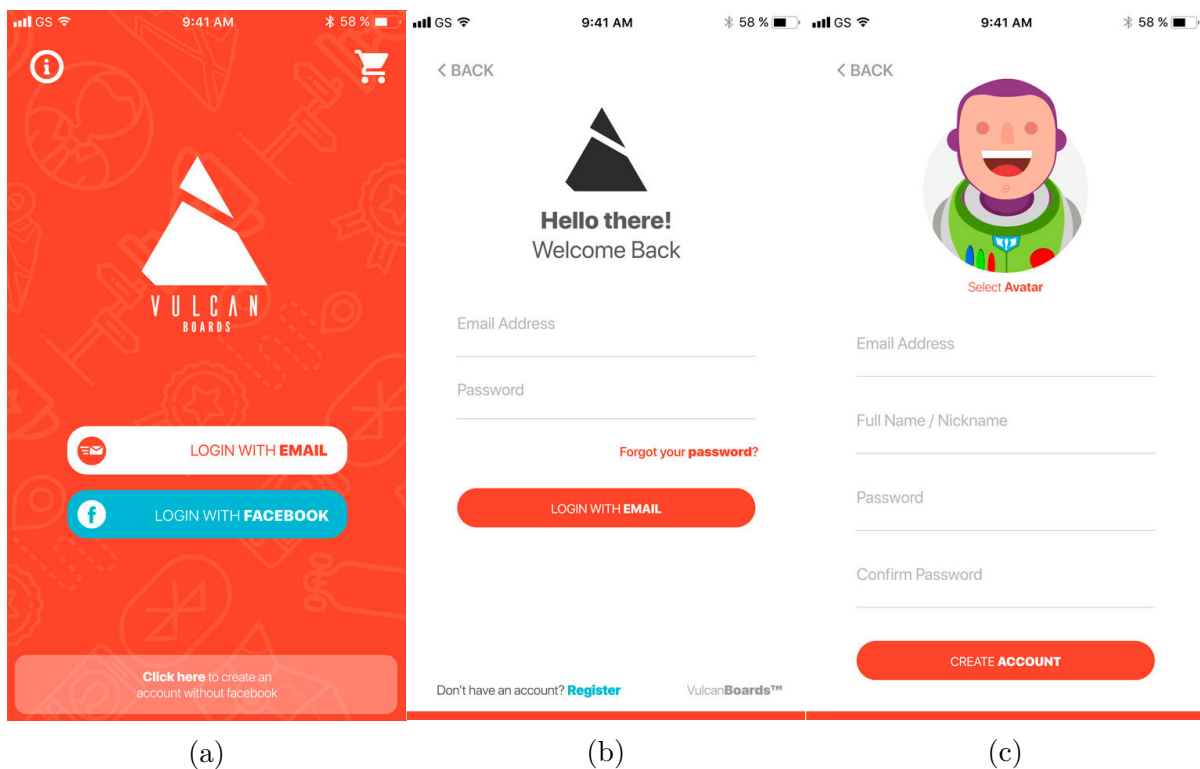


Figura 4.15: Controle da conta do usuário

## Gamificação

Com o objetivo de criar uma maior interação do usuário com a marca e promover uma competição saudável entre os usuários, a aplicação fornece um placar de pontos para cada usuário. Recompensando e motivando usuários a andar mais no *longboard*. Essa pontuação é feita com base na informação já existente de odometria do *longboard*.

Na seção "VulcanBoard Game" da Figura 4.16(a) podemos observar o perfil do usuário com um placar e sua pontuação ao lado.



(a)

(b)

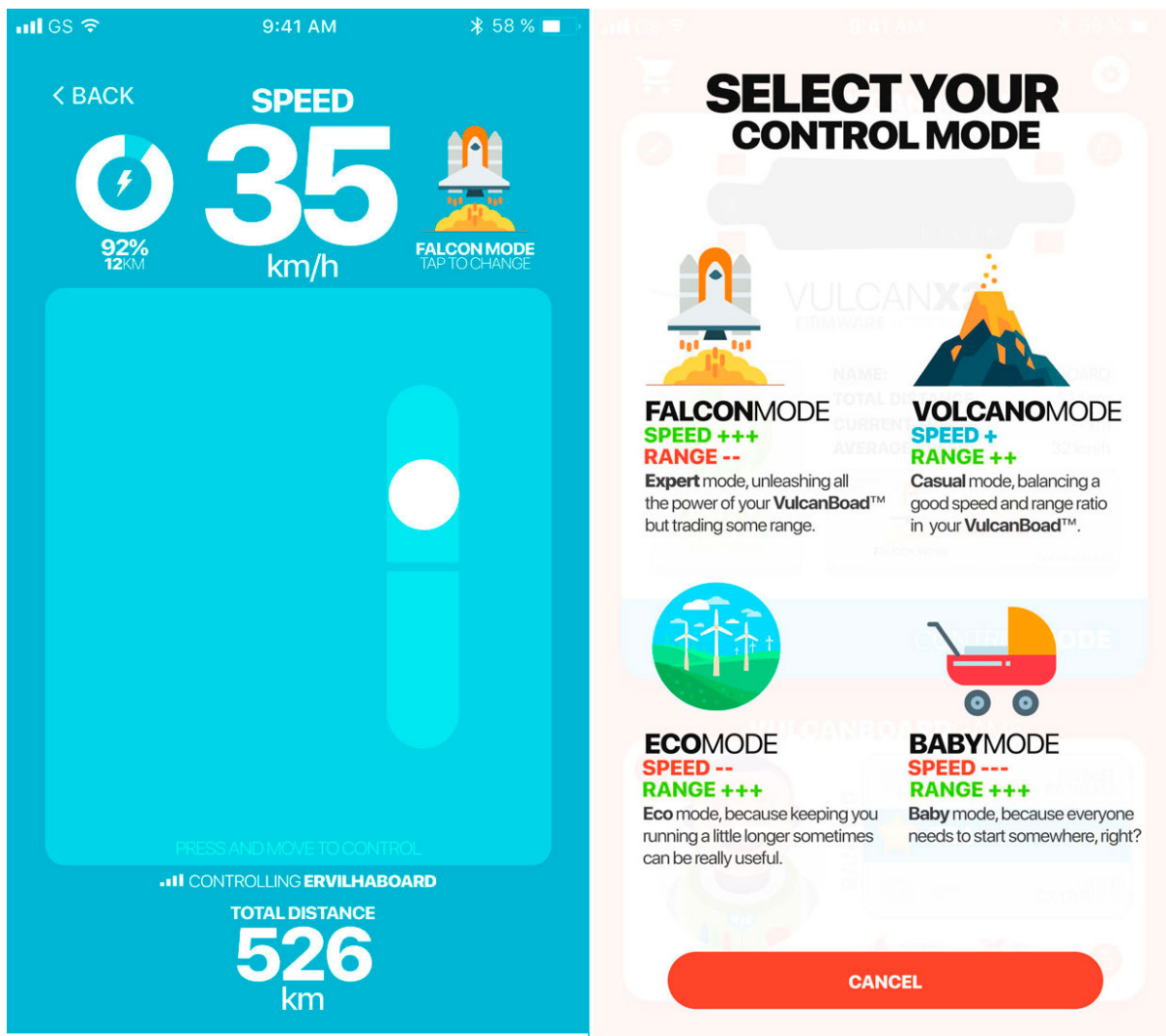
Figura 4.16: Tela principal da aplicação

## Tela principal

A tela principal, observada nas imagens (a) e (b) da Figura 4.16, é apresentada logo após o *login* do usuário ser realizado. Nesta tela, o usuário é capaz de visualizar seu perfil e seu placar de pontuação e, ao conectar com o *longboard* via Bluetooth, analisar informações como bateria e odometria do seu *longboard*.

## Controle Remoto

A principal funcionalidade do aplicativo é oferecer ao usuário uma forma alternativa para o controle do seu *longboard*. A Figura 4.17 (a) mostra a tela de interação com o usuário. Ao clicar e arrastar o dedo para cima, o usuário acelera o *longboard*. Ao arrastar o dedo para baixo, o usuário estará freando-o.



(a)

(b)

Figura 4.17: Tela de Controle Remoto da aplicação

Assim como no controle remoto, o aplicativo também dispõe de diferentes modos de aceleração do *longboard*. A imagem (b) da Figura 4.17 demonstra essa tela de seleção.

## 4.5.2 Resultados

O aplicativo funciona conforme o esperado. Ao contrário do controle remoto, a distância máxima operacional encontrada entre o celular e *longboard* é de até 7,8 metros, o que proporciona um funcionamento seguro. Esse resultado indica que, provavelmente, a pouca distância obtida pelo controle remoto esteja diretamente relacionado à baixa qualidade do seu módulo Bluetooth, e não a problemas com o módulo Bluetooth do controle central do *longboard*.

Assim como o controle remoto, a velocidade de comunicação entre o celular e o controlador central do *longboard* fica entre 0,2 a 0,3 Mbit/s.

## 4.6 Módulo de Testes

Para o desenvolvimento dos testes do projeto, um módulo de aquisição de dados foi desenvolvido com o objetivo de analisar a telemetria do controlador do motor.

Quando utilizado, o módulo de testes é acoplado sobre o *longboard*, como observado na Figura 4.18, e se conecta ao módulo central. Durante seu funcionamento, o módulo de testes é capaz de adquirir e armazenar os dados de corrente, velocidade, posicionamento (GPS), tensão da bateria e imagem da câmera. Durante o período de análise, um programa desenvolvido na linguagem Swift faz a leitura desses dados e mostra graficamente para o usuário.

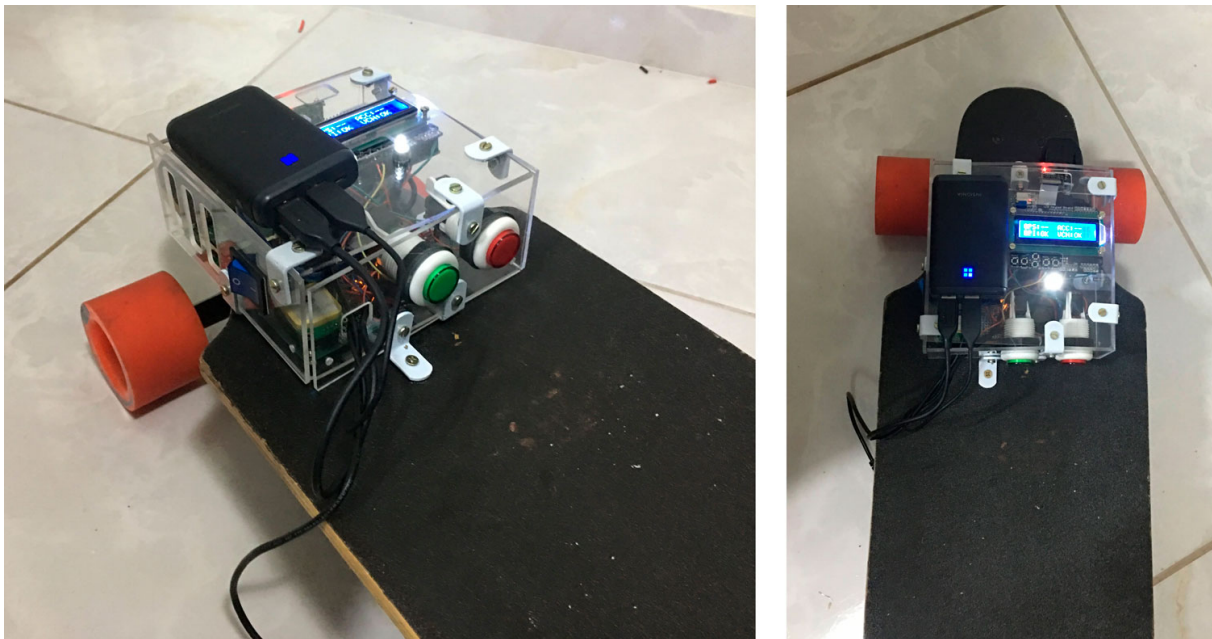


Figura 4.18: Módulo de testes montado no *longboard*

### 4.6.1 Componentes

A Figura 4.19 apresenta um diagrama com os componentes do módulo de testes e suas interligações.

Para a comunicação com os sensores, um Arduino está conectado com o GPS e com o acelerômetro. Essas informações são enviadas para o Raspberry Pi quando a gravação é iniciada.



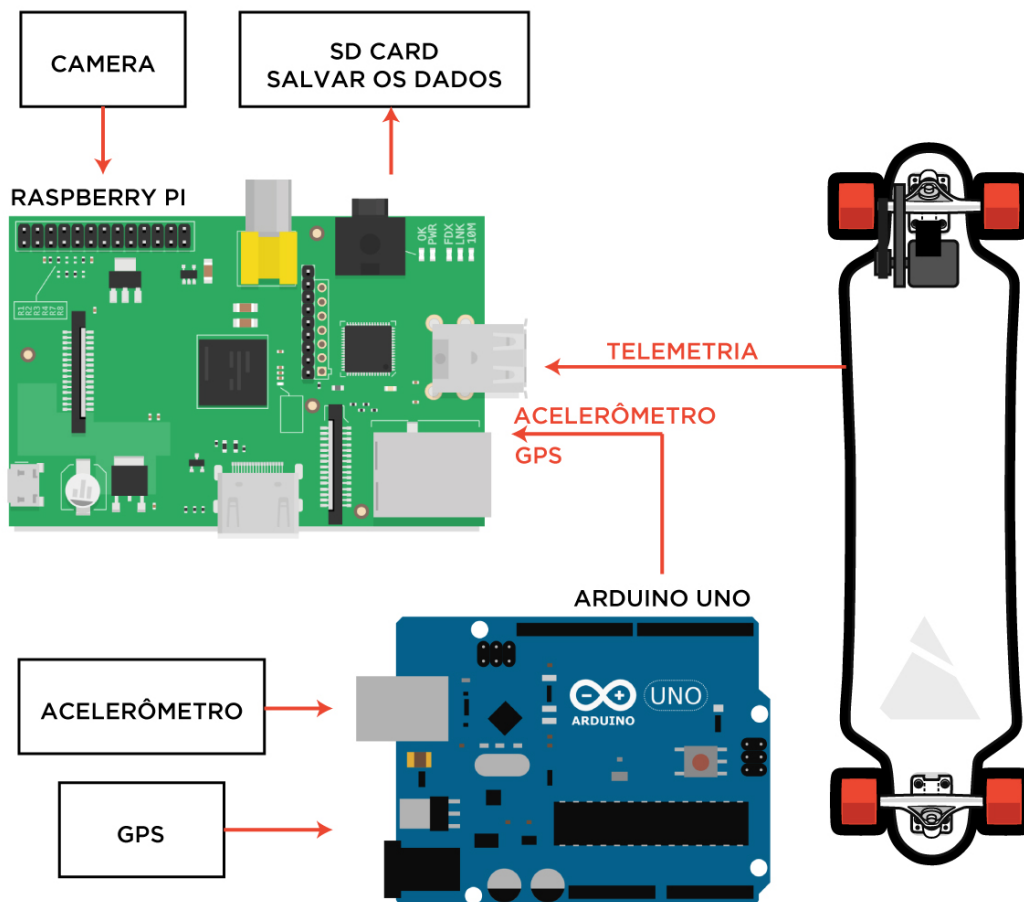


Figura 4.19: Diagrama de blocos do Módulo de testes

O Raspberry Pi, sendo o módulo central do projeto, é responsável por receber as informações do Arduino da caixa de testes e do Controlador Central do *longboard*. Executando o sistema operacional Raspbian e uma aplicação em Python, o Raspberry Pi grava em um arquivo essas informações e um vídeo da câmera.

A construção do módulo de testes foi feita usando uma caixa de acrílico, uma tela LCD para mostrar informações imediatas para o usuário e uma bateria externa USB, para alimentar todo o circuito, como observado na Figura 4.20.

## 4.6.2 Resultados

Os resultados obtidos com o módulo de testes mostraram-se adequados para a análise do funcionamento do controlador. A Figura 4.21 (a) mostra a captura de uma imagem feita pela câmera e a Figura 4.21 (b) mostra o arquivo de texto com os resultados obtidos.

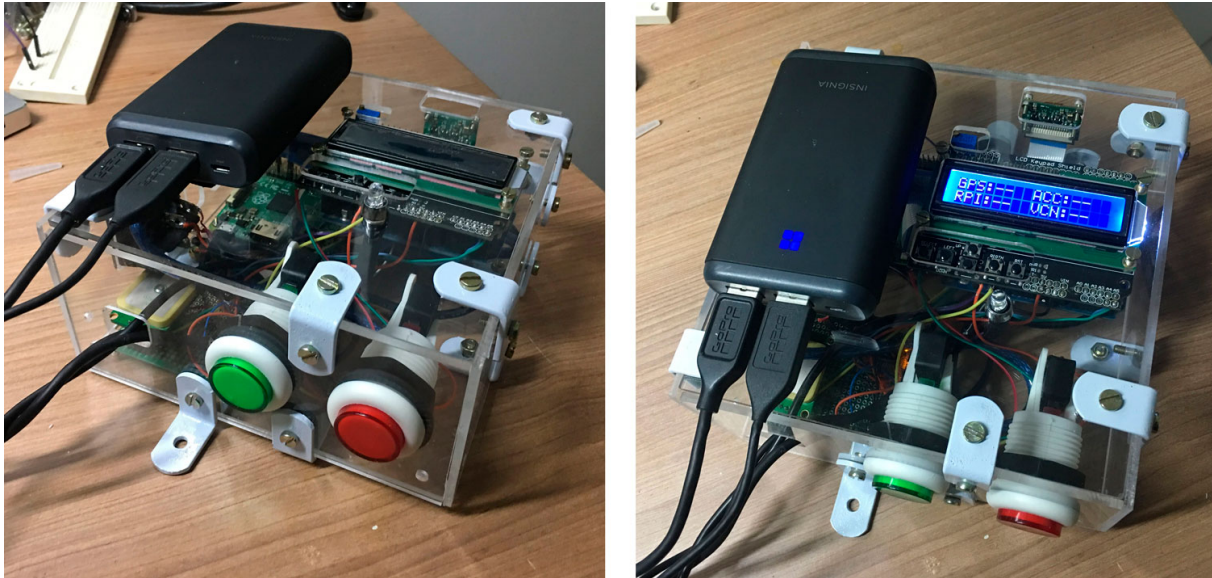
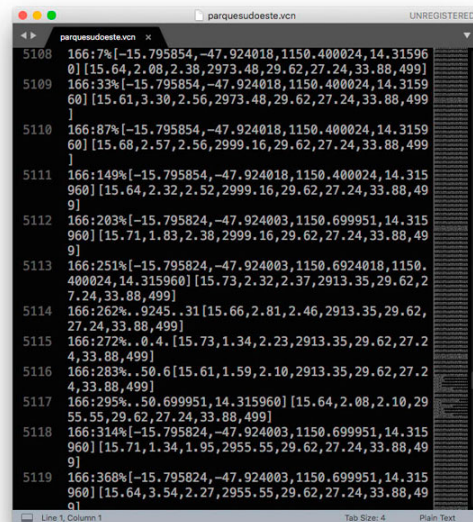


Figura 4.20: Módulo de testes montado



(a)



(b)

Figura 4.21: Tela de Controle Remoto da aplicação

Um problema encontrado durante os testes foi a fixação da caixa do módulo de testes no *longboard*. No decorrer dos testes, a vibração fez alguns componentes ficarem um pouco soltos e o barulho da vibração da caixa enquanto o Longboard andava era muito alto. Apesar disso, nenhum problema no funcionamento foi encontrado.

Esses resultados obtidos não são úteis para o usuário ainda. Na próxima seção veremos um software que foi desenvolvido para auxiliar na visualização desses dados.

## 4.7 Central de Processamento dos testes

Para a leitura dos dados e vídeos gerados pelo módulo de testes, uma ferramenta visual foi desenvolvida com o objetivo de analisar o comportamento do controlador. A Figura 4.22 apresenta a tela desta ferramenta.

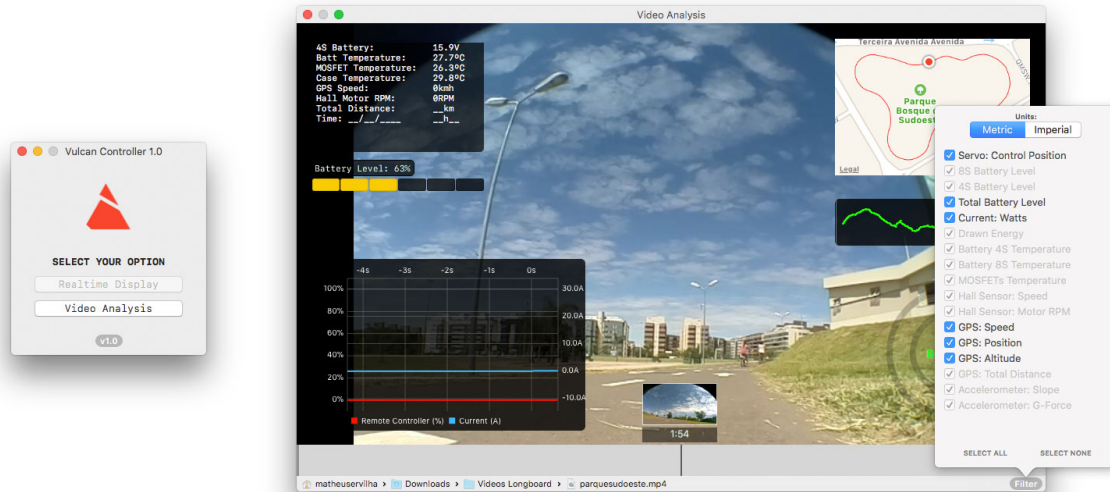


Figura 4.22: Aplicação da central de processamento de testes

Desenvolvida na plataforma OsX, a ferramenta cria gráficos e *displays* sobre o vídeo gravado pelo módulo sincronizados com os dados recebidos. Nessa aplicação, o usuário também pode escolher filtrar certas informações para focar em certos dados recebidos.

As informações geradas pelo aplicativo estão demonstradas na Figura 4.23 e nos vídeos <https://youtu.be/TwXsXZjYSFM> e <https://youtu.be/y3jagE5z68M>



Figura 4.23: Dados gerados pela central de processamento de testes

As principais informações apresentadas são os níveis de cada bateria, temperatura da bateria e dos MOSFETs, distância total, velocidade pelo GPS (em informações gerais), o nível de carga atual das baterias, a geolocalização através de um mapa, um gráfico de relevo em altitude, um odômetro que apresenta velocidade e aceleração, um gráfico com a corrente (em A) e % do controle e uma barra de progressão do vídeo.

## 4.8 O Produto Final

Com o *longboard* completamente funcional uma análise completa do projeto foi realizada no modo de aceleração mais crítico, o **Falcon Mode**, onde não há limites para aceleração nem para velocidade. Os principais valores encontrados são descritos a seguir.

- **Aceleração** 0 a 33 km/h em 1,5 segundos, correspondendo a uma aceleração  $6,8 \text{ m/s}^2$ , com uma carga de 70 kg e força de 479 N;
- **Velocidade Máxima** 33 km/h em uma superfície plana e 37 km/h em uma descida;
- **Corrente máxima** Limitada via software em 60A;
- **Média de corrente** 6A em uma superfície plana e 10A em uma subida;
- **Distância do controle Bluetooth** menor que 1m;
- **Distância do controle do iPhone** 7,8m;
- **Distância máxima da bateria** 14km;
- **Tempo de duração da bateria** 51 minutos;
- **Duração da bateria do controle remoto** 7 horas;
- **Tempo de recarga da bateria** 45 minutos cada bateria;

A Figura 4.24 e o vídeo <https://youtu.be/0gBZtMlp-h8> ilustram um teste com o *longboard* usando o aplicativo do iPhone como controle.

Um teste de frenagem pode ser observado no vídeo <https://youtu.be/78qcYBMpsol>.

### 4.8.1 Arrancada

Usando o método com sensores, a performance da arrancada estando o *longboard* parado ocorreu conforme planejado para uma melhor interação com o usuário. No modo de controle **Falcon Mode** o motor faz muita força para a aceleração inicial e o aumento da velocidade é quase instantâneo. Nenhuma trepidação na arrancada foi observada durante os testes.



Figura 4.24: Teste com o *longboard* completo usando o aplicativo no celular

## 4.8.2 Frenagem regenerativa e velocidades altas

Durante o período de freio ou quando a velocidade do *longboard* ultrapassa a velocidade máxima de rotação do motor, ou seja, o valor da tensão Back-EMF é maior que a tensão da bateria, podemos observar o fenômeno descrito na seção 2.6.4.

Na Figura 4.25, o teste estava sendo feito com o *longboard* em 50% da sua potência. Apenas com uma bateria de 16,8V. Isso limita a velocidade máxima do *longboard* em aproximadamente 16 km/h. Nesse momento capturado apresentado na figura, o *longboard* estava no fim de uma descida e sua velocidade estava 3,3 km/h acima da velocidade máxima de rotação do motor.

Podemos observar que o valor da corrente apresentado no gráfico é de -10A, sendo que a aceleração era de 100%. Isso acontece porque o valor da tensão de Back-EMF do motor era maior que o valor da tensão da bateria. Assim, podemos ver que o motor estava recarregando a bateria e, mesmo com o controle no máximo, o motor estava freando o *longboard*.

Esse comportamento é muito perigoso se o controlador não estiver monitorando a bateria. Considerando a bateria de 5.000 mAh, um carregamento total dessa bateria, a partir de uma bateria totalmente descarregada, é de apenas 30 minutos. Não monitorar a tensão da bateria e sobrecarregá-la pode causar danos às baterias ou até mesmo ao

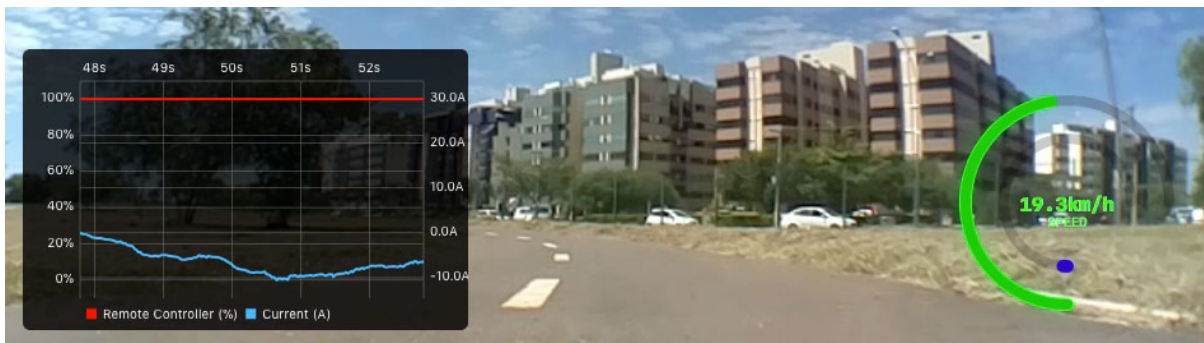


Figura 4.25: Descida com o *longboard* em 50% da potência

usuário.

Por isso, no *firmware* implementado, quando a velocidade do *longboard* está maior que a velocidade máxima de rotação especificada, o motor é totalmente desligado, mesmo quando o usuário está segurando o controle remoto no máximo. Ainda, o freio é desabilitado quando a bateria está acima de 80% de sua capacidade, forçando o usuário a frear com os próprios pés.

### 4.8.3 Modos de aceleração

Os testes para os modos de aceleração do motor foram feitos movendo o acelerador para o máximo, esperando o *longboard* alcançar a sua velocidade máxima e entre movendo o acelerador para o estado neutro.

A explicação de cada um dos modos pode ser vista na seção 3.7.2.

A seguir, todos as figuras foram testes feitos com uma carga de 70 Kg e em uma superfície plana. No primeiro gráfico é representada a velocidade do *longboard* em km/h, no segundo o sinal recebido pelo controle remoto em % e no terceiro a corrente instantânea do motor em Ampère.

Durante os testes, ruídos significativos podem ser observados nos gráficos, isso se deve ao fato de que a faixa dinâmica do sensor ACS758 ser de -100 A a +100 A. Deste modo, a resolução da tensão de saída dada pelo sensor é de  $5 \text{ V}/200 \text{ A} = 25 \text{ mV/A}$ . Nos gráficos apresentados, podemos ver que os valores de correntes medidas são na faixa de 0 a 10 A, o que significa que o ADC do microcontrolador ATmega328 irá trabalhar com uma tensão de entrada na faixa de 0 a 250mV, correspondente a uma resolução efetiva de cerca de 5 bits.

### Falcon Mode

Neste modo, como não existe nenhuma limitação de velocidade ou aceleração, podemos observar na Figura 4.26 que a velocidade máxima é alcançada em apenas 1,5 segundos,

gerando um alto pico de corrente assim que o acelerador muda para 100%.

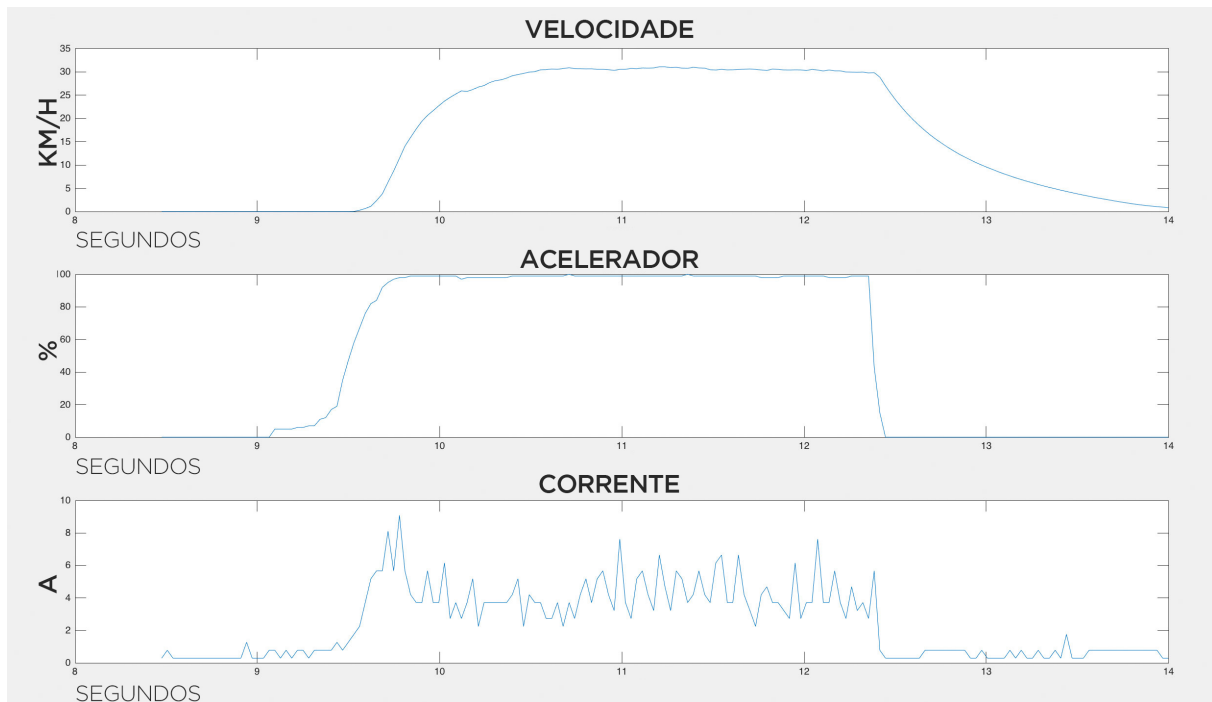


Figura 4.26: Falcon Mode

No entanto, este é o modo onde temos o menor tempo de resposta, com o *longboard* respondendo imediatamente a qualquer mudança no acelerador.

### Vulcan Mode

O **Vulcan Mode** é semelhante ao **Falcon Mode**, porém com uma pequena limitação na aceleração do *longboard*. Na Figura 4.27 podemos ver que a velocidade máxima é alcançada em um pouco mais de 2 segundos, mas não existe um pico de corrente na mudança do acelerador. Isso ajuda na economia de energia e na vida útil do motor.

### Eco Mode

No modo **Eco Mode**, o controlador tenta ao máximo limitar a corrente do motor. Devido a esta limitação, a velocidade máxima é alcançada em cerca de 10 segundos. Além disso, podemos observar que mesmo com o usuário acelerando ao máximo, o *longboard* demora aproximadamente 1 segundo para começar a se mover. Esse limite de corrente foi incorporado para diminuir ainda mais o pico de corrente inicial e influenciar o usuário fazer a força inicial no *longboard*.

Na Figura 4.28 podemos observar que a corrente consumida na velocidade máxima é similar às correntes dos dois modos anteriores, mas a corrente inicial na arrancada do

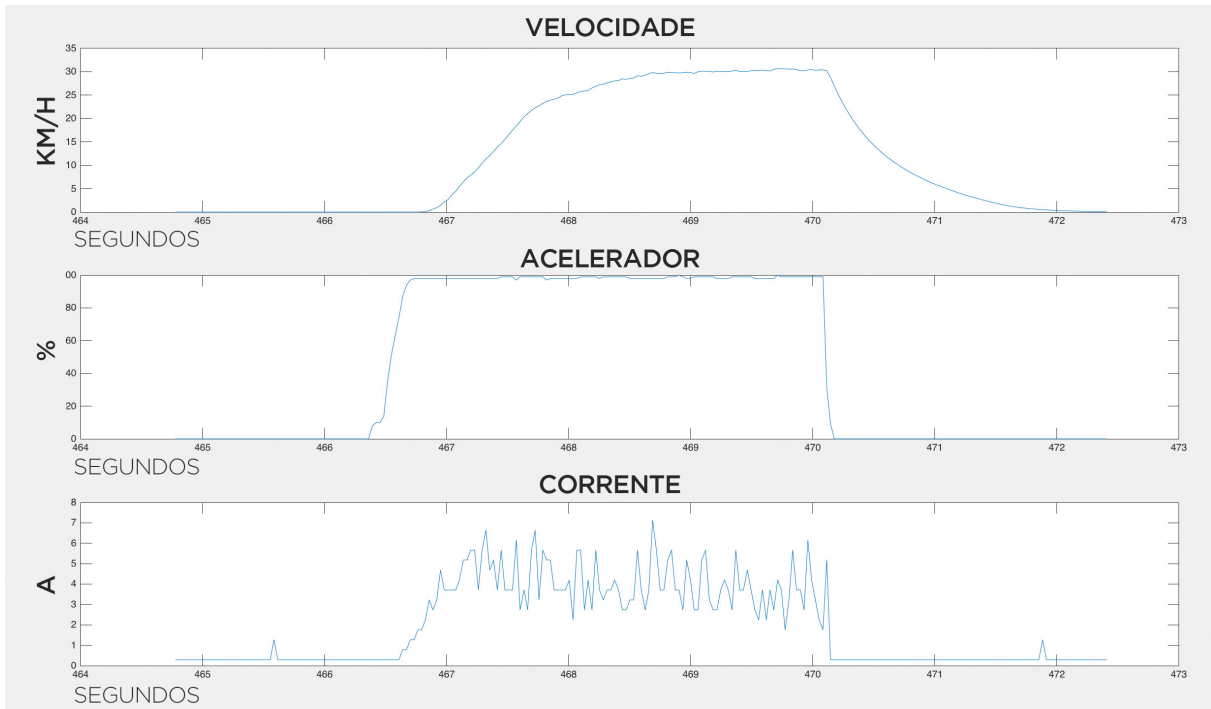


Figura 4.27: Vulcan Mode

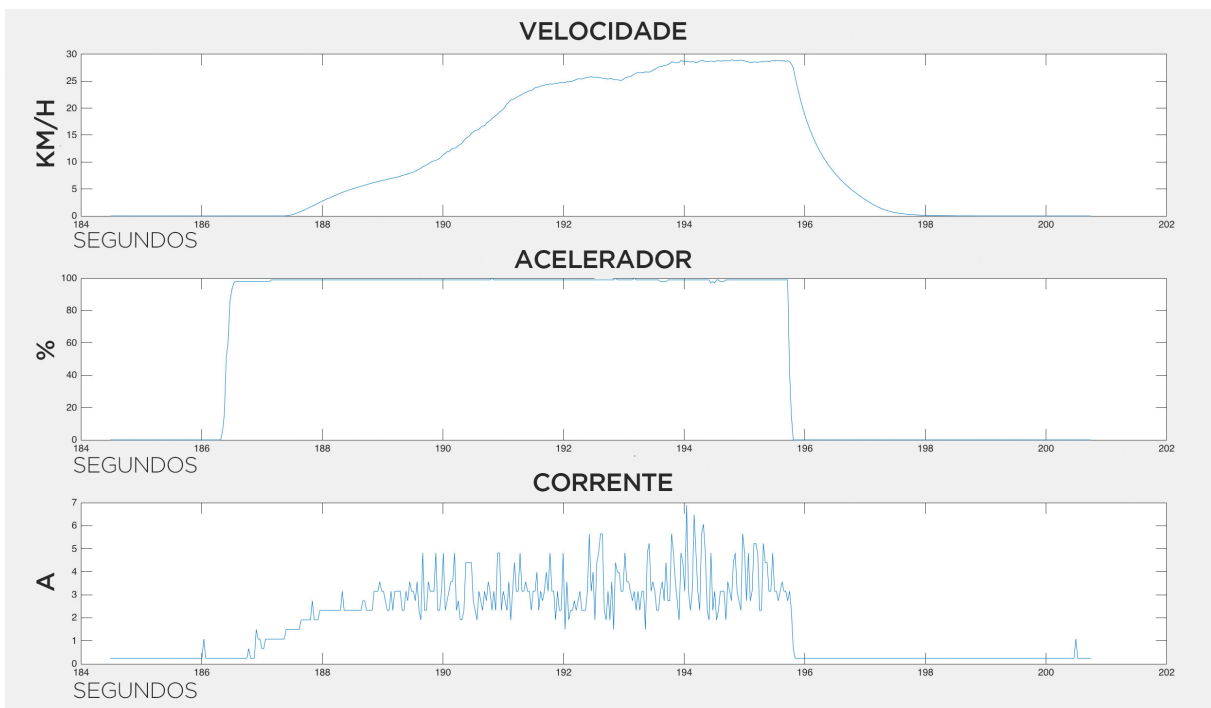


Figura 4.28: Eco Mode

motor é baixa, começando a aumentar suavemente. Este comportamento faz com que a energia da bateria do seja melhor aproveitada.



## Baby Mode

Esse modo limita tanto a velocidade quando a aceleração inicial do *longboard*. Podemos observar pela Figura 4.29, que mesmo o usuário acelerando 100%, sua velocidade final demora quase 3 segundos para ser alcançada e é limitada a 8 km/h, ao contrário dos outros modos que podem chegar a 33 km/h.

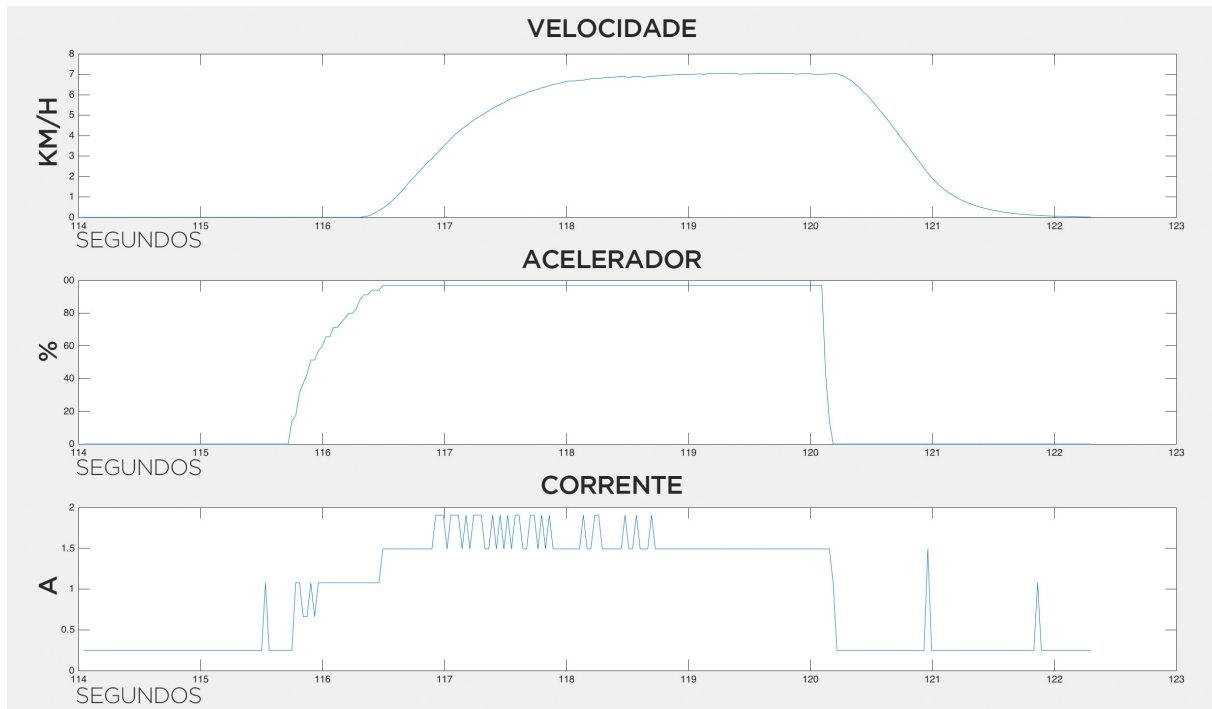


Figura 4.29: Baby Mode

### 4.8.4 Corrente média

A corrente média encontrada quando o *longboard* está em uma velocidade constante em uma superfície plana é de aproximadamente 6 A, como observado na Figura 4.30, e aproximadamente 10 A em uma subida leve, como observado na Figura 4.31.

Apesar de que nos dois casos o Controle estar mandando uma informação de 100% de aceleração para o Longboard, na subida, podemos observar um maior consumo de corrente e uma menor velocidade máxima no Longboard. Isso se deve ao fato de que o motor estava fazendo mais força para movimentar a sua carga.

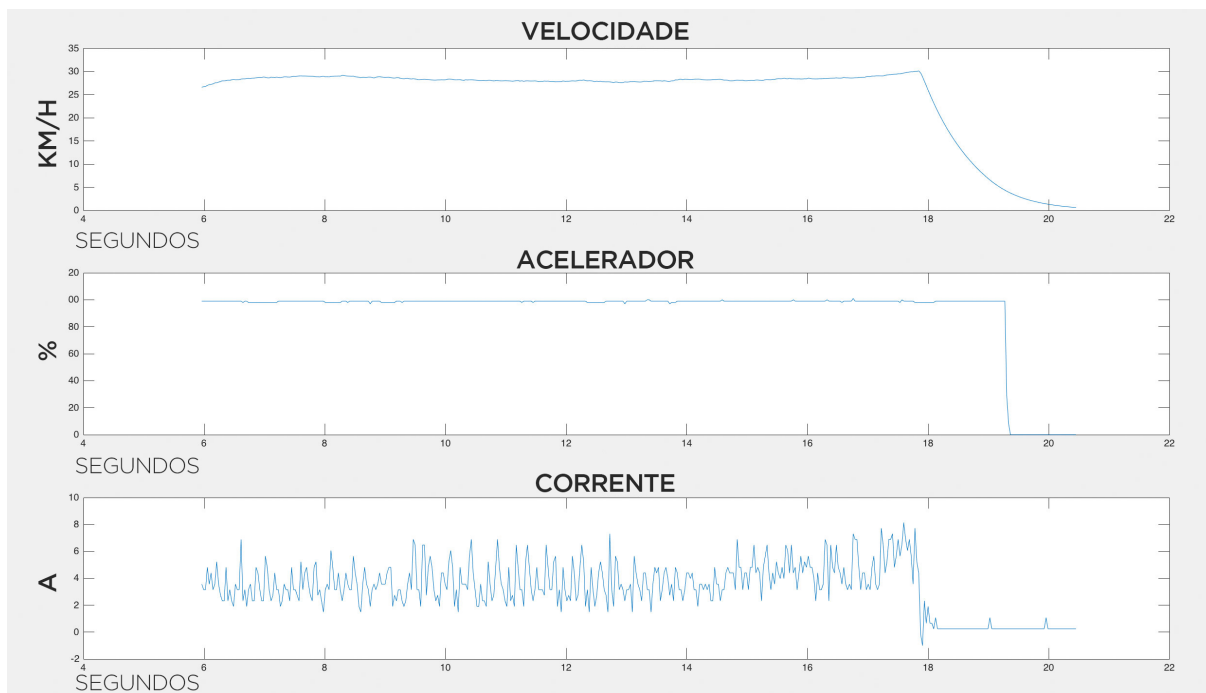


Figura 4.30: Superfície plana no Vulcan Mode

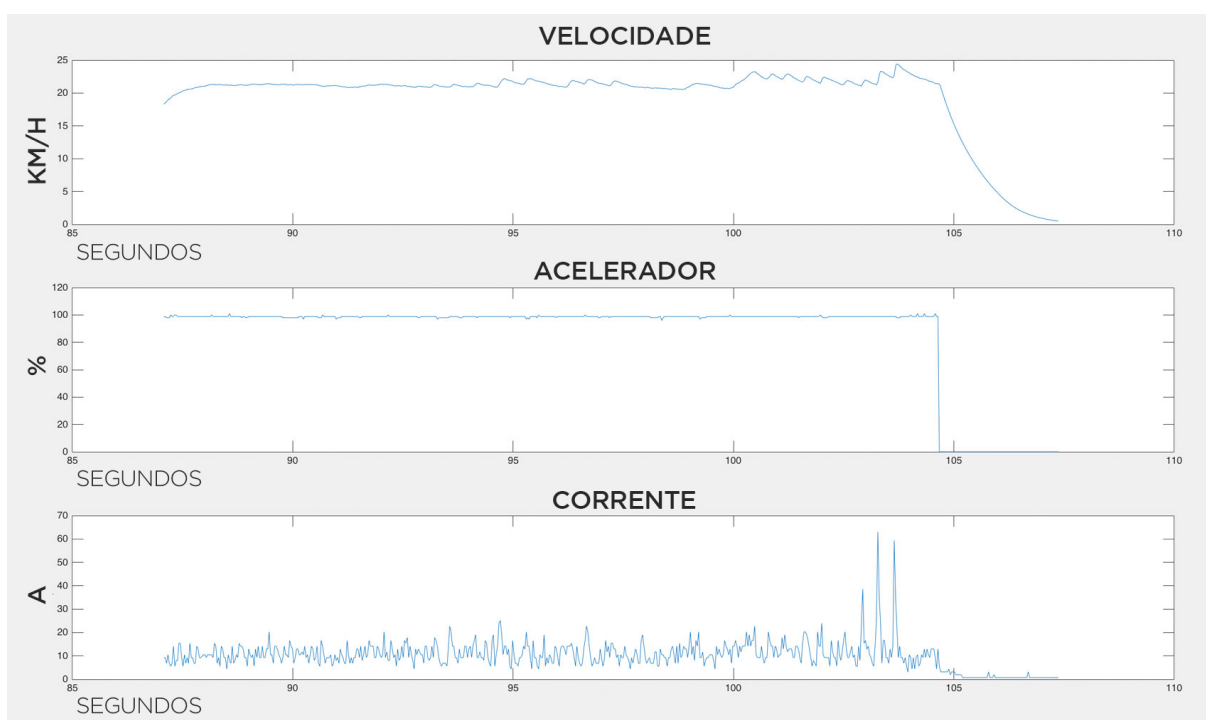


Figura 4.31: Subida no Vulcan Mode

## 4.9 Custos

Para o custo de produção do produto final do projeto, foram analisadas 4 partes separadas. Na tabela 4.1, os custos para um Longboard comum foram descritos, na tabela 4.2 os

custos para a mecânica do motor no Longboard, na tabela 4.3 os custos para o controlador do motor *brushless* e na tabela 4.4 os custos relacionados ao controle remoto.

Nas tabelas a seguir, a coluna **Brasil (R\$)** representa o valor do item no Brasil, a coluna **Exterior (US\$)** representa o valor do item no exterior, como foram observados valores nos estados unidos, na china e no reino unido, e a coluna **Ext. (R\$)** representa a conversão direta dos valor da coluna anterior usando a cotação do dólar atual (1 US\$ = 3,25 R\$). Na linha **Total x Quantidade** temos o valor total da parte com base nas respectivas quantidades de cada item.

Valores de Frete e Imposto foram desconsiderado na conta pois variam muito de produto para produto, quantidade comprada e tempo de entrega. Em muita ocasiões o valor do frete importando do exterior era menor que o valor do frete interno no Brasil.

#### 4.9.1 Custos do Produto Final

Como foram utilizados componentes de alta qualidade no *longboard* comum, não conseguimos ver muita diferença entre os preços do Brasil e dos Estados unidos sem a parte eletrônica e mecânica, como demonstrado na tabela 4.1. No caso do Shape escolhido (id: 1), o valor no Brasil era inferior ao valor no exterior pelo modelo escolhido ser de uma marca nacional.

Tabela 4.1: Custos do *longboard* comum.

id	Item	Qtd	Brasil (R\$)	Exterior (US\$)	Ext. (R\$)
1	Shape Cush	1	R\$115,00	US\$40,00	R\$130,00
2	Pad Riser	2	R\$6,00	US\$5,00	R\$16,25
3	Orangtang Kegel 80mm	4	R\$65,00	US\$15,00	R\$48,75
4	Rolamento Red Bones	8	R\$9,30	US\$2,20	R\$7,15
5	Truck Caliber	2	R\$130,00	US\$20,00	R\$65,00
-	<b>Total x Quantidade</b>	<b>17</b>	<b>R\$721,40</b>	<b>U\$167,60</b>	<b>R\$544,70</b>

Para a parte mecânica, as peças construídas não trouxeram um aumento no custo do projeto. Mas, em compensação, o custo do motor (id: 1) e das baterias (id: 5) é alto e podemos observar uma grande variação de preço no mercado exterior, como demonstrado na tabela 4.2.

A eletrônica do projeto é a parte mais influenciada pela importação. Componentes eletrônicos e produção de placas de circuito impresso no Brasil ainda trazem custos elevados ao projeto. Na tabela 4.3 podemos ressaltar os componentes de maior valor sendo os 2 microcontroladores (id: 5), os 6 MOSFETs (id: 6) e o módulo Bluetooth (id: 13).

Tabela 4.2: Custos da Mecânica do Projeto.

id	Item	Qtd	Brasil (R\$)	Exterior (US\$)	Ext. (R\$)
1	Alien Brushless Motor	1	R\$890,00	US\$120,00	R\$390,00
2	Kit Polia Roda e Motor	1	R\$150,00	US\$33,75	R\$109,69
3	Suporte do Motor	1	R\$100,00	US\$60,00	R\$195,00
4	Case da Eletrônica	1	R\$25,00	US\$10,00	R\$32,50
5	Bateria 4S 25C 5000mAh	2	R\$380,00	US\$37,00	R\$120,25
-	<b>Total x Quantidade</b>	<b>6</b>	<b>R\$1925,00</b>	<b>U\$297,75</b>	<b>R\$967,69</b>

Tabela 4.3: Custos da Eletrônica do Projeto.

id	Item	Qtd	Brasil (R\$)	Exterior (US\$)	Ext. (R\$)
1	PCB	1	R\$290,00	US\$10,00	R\$32,50
2	Cristal 16MHz	2	R\$1,40	US\$0,20	R\$0,65
3	Capacitor 0805	19	R\$0,39	US\$0,01	R\$0,03
4	Resistor 0805	48	R\$0,07	US\$0,01	R\$0,03
5	ATMega328P-AU	2	R\$16,50	US\$2,35	R\$7,64
6	CSD18542KTT	6	R\$7,00	US\$1,06	R\$3,45
7	1n4148	6	R\$0,13	US\$0,01	R\$0,03
8	IR2101	3	R\$12,00	US\$0,22	R\$0,72
9	AMS1117	1	R\$1,30	US\$0,05	R\$0,16
10	Buck Converter 5V 2A	1	R\$6,00	US\$0,34	R\$1,11
11	LED 0805	3	R\$0,25	US\$0,01	R\$0,03
12	1N5819	3	R\$0,15	US\$0,01	R\$0,03
13	HM-11 BLE 4.0	1	R\$42,00	US\$1,83	R\$5,95
14	74LS08	2	R\$3,00	US\$0,16	R\$0,52
15	Conectores JST	12	R\$0,25	US\$0,03	R\$0,10
-	<b>Total x Quantidade</b>	<b>110</b>	<b>R\$474,85</b>	<b>U\$25,81</b>	<b>R\$83,88</b>

Para o controle remoto, o custo de produção é elevado por causa da necessidade de um tela (id: 5) e a impressão 3D do encapsulamento (id: 2) e um módulo Bluetooth (id: 12), como observado na tabela 4.4.

O custo do produto final pode ser observado na tabela 4.5. O valor encontrado, comprando apenas as peças no Brasil é de **R\$3596,83** e comprando apenas peças no Exterior é de **R\$1853,83**, sem considerar taxas de frete e imposto.

Para a construção desse projeto descrito, algumas peças foram compradas no Brasil pela velocidade e algumas peças foram comprados no exterior pela variedade e preço.

## 4.9.2 Comparação com o mercado

Para comparar os preços do projeto com o mercado atual, iremos separar em duas partes. A primeira parte fará uma comparação com os *longboards* elétricos existentes no mercado

Tabela 4.4: Custos do Controle Remoto.

id	Item	Qtd	Brasil (R\$)	Exterior (US\$)	Ext. (R\$)
1	PCB	1	R\$215,00	US\$10,00	R\$32,50
2	Case Impressão 3D	1	R\$80,00	US\$50,00	R\$162,50
3	Joystick	1	R\$9,00	US\$0,60	R\$1,95
4	Switch	2	R\$5,00	US\$0,47	R\$1,53
5	Tela OLED	1	R\$26,00	US\$2,29	R\$7,44
6	Lipo 1S	2	R\$35,00	US\$5,39	R\$17,52
7	ATMega328P-AU	1	R\$16,50	US\$2,35	R\$7,64
8	AMS1117	2	R\$1,30	US\$0,05	R\$0,16
9	Capacitor 0805	5	R\$0,39	US\$0,01	R\$0,03
10	Resistor 0805	9	R\$0,07	US\$0,01	R\$0,03
11	Cristal 16MHz SMD	1	R\$1,40	US\$0,20	R\$0,65
12	HM-11 BLE 4.0	1	R\$42,00	US\$1,83	R\$5,95
13	LED 0805	2	R\$0,25	US\$0,01	R\$0,03
-	<b>Total x Quantidade</b>	<b>29</b>	<b>R\$475,58</b>	<b>U\$79,25</b>	<b>R\$257,56</b>

Tabela 4.5: Custos Totais do Produto Final.

id	Tabela	Itens	Brasil (R\$)	Exterior (US\$)	Ext. (R\$)
1	Longboard	17	R\$721,40	US\$167,60	R\$544,70
2	Mecânica	6	R\$1925,00	US\$297,75	R\$967,69
3	Eletrônica	110	R\$474,85	US\$25,81	R\$83,88
4	Controle Remoto	29	R\$475,58	US\$79,25	R\$257,56
-	<b>Total x Quantidade</b>	<b>162</b>	<b>R\$3596,83</b>	<b>U\$570,41</b>	<b>R\$1853,83</b>

e a segunda parte irá comparar apenas os ESCs disponíveis.

### ***Longboard***

O mercado de LMV tem opções de importações mais baratas e opções mais caras e de melhor qualidade. O seu preço varia de US\$225 (R\$742,00) por um *longboard* genérico sem marca do AliExpress [65] (*longboard* de 250 W e máximo de 20 km/h) à US\$1500 (R\$5000,00) por um *longboard* de alta qualidade da Boosted Boards [66] (*longboard* com dois motores de 1000 W e máximo de 35 km/h).

Nesse projeto, foi proposto um *longboard* com materiais de alta qualidade e um motor de 3200 W com uma velocidade máxima de 32 km/h. Mesmo considerando o preço de produção no Brasil, o valor ainda é menor que importar um Boosted Board.

## Controlador

Como o motor escolhido é um motor de alta potência, o ESC deve ser capaz de suportar correntes de até 80A e uma tensão de 10S (42V). De acordo com os testes, os melhores resultados para a aplicação no *longboard* vieram de um controlador capaz de fazer a comutação usando o método **com** sensores.

Ao buscar um ESC com essas especificações no exterior, os produtos encontrados variam de US\$150,00 (R\$495,00) a US\$300 (R\$990,00). No Brasil, no entanto, esse modelo de controlador é muito difícil de ser encontrado. Quando encontrado, seu valor pode chegar a R\$1500,00 reais.

Uma solução mais em conta no Brasil seria comprar um ESC sem sensor 4S 120A. Usando essa solução, o motor seria usado apenas na metade de sua potência. A maior vantagem disso, é esse produto custar por volta de R\$200,00.

O projeto proposto implementa um controlador com sensores com capacidade de 10S 120A, podendo usar o motor em seu completo potencial. Considerando o preço de desenvolvimento no exterior, o controlador projetado diminui consideravelmente o preço final do *longboard*, mesmo considerando a solução de baixo custo e metade da potência.

# Capítulo 5

## Conclusão

Esse trabalho apresentou a implementação do controle de velocidade e posição de um motor *brushless* usando os modos com e sem sensores, com o objetivo de criar um *longboard* elétrico usando tecnologia nacional com um custo menor que os atualmente encontrados no mercado.

Para a implementação do controlador do motor, duas técnicas de controle de motores brushless foram desenvolvidas: Controle com sensores e controle sem sensores. Para o controle com sensores, o microcontrolador ATmega328 foi implementado com Sensores Hall. Para o método de controle sem sensores, o microcontrolador STM32 foi usado por sua velocidade de leitura ADC.

Para o controle de velocidade, dois métodos de controle foram implementados. Usando a capacidade BLE do iPhone, um aplicativo foi desenvolvido com a capacidade de controlar a velocidade do motor e fazer configurações de modos de velocidade. Também usando a tecnologia BLE, um controle remoto personalizado foi criado para dar mais ergonomia e segurança para o usuário.

Esse trabalho também relata o projeto mecânico de peças na impressora 3D e em cortes de alumínio necessárias para a tração da roda de um *longboard* com motor *brushless*.

Durante o desenvolvimento, diversas versões do controlador foram implementadas para alcançar uma versão confiável e pronta para os testes finais. Diversos microcontroladores foram testados durante o período do projeto e o controlador ATmega328 obteve os melhores resultados pelo menor preço.

Para a execução dos testes, um módulo de testes foi projetado e forneceu ótimos resultados para a análise do funcionamento do controlador. Valores de corrente e velocidade foram essenciais para o estudo da eficiência. A capacidade de sobrepôr os valores obtidos em um vídeo fez com que a análise fosse feita de forma dinâmica em todos os testes.

Durante os testes, foi observado que o funcionamento do *longboard* alcançou os objetivos do projeto e a eficiência do controlador do motor se equipara a controladores

encontrados no mercado profissional.

A comparação entre os dois modos de controle do motor trouxe resultados definitivos para a escolha de um dos modos para a aplicação projetada. O método de controle sem sensores é eficiente mas tem problemas na arrancada e em velocidade baixas. Pontos que são essenciais para o funcionamento do *longboard*. Por isso, o método de controle com sensores foi escolhido para a versão final do protótipo e seu funcionamento foi adequado.

Durante o projeto, houveram os seguintes desafios:

- A **confiabilidade no protótipo** trouxe algumas dificuldades durante o seu funcionamento. Em testes de força com o *longboard*, onde a corrente média de funcionamento subia, ruídos da parte de potência influenciavam a parte de controle e o controlador apresentava resultados instáveis. Algumas dessas dificuldades foram resolvidas durante o projeto. Mas um limitador de corrente máxima teve que ser implementado para fornecer uma confiabilidade maior.
- O **controle de MOSFETs de alta potência** apresentou dificuldades no início do projeto. A maioria dos circuitos encontrados na internet (em fóruns e projetos OpenSource) não fornece um controle correto dos MOSFETs ou apresenta apenas versões com transistores TBJ. Após pesquisar em livros e artigos, o controle correto dos MOSFETs foi implementado e não houve mais nenhum problema nessa parte.
- A **alta potência do motor** teve que ser suportada desde o início. Como a potência é alta, simples atividades como a leitura da corrente apresentaram dificuldades por exigirem componentes mais específicos e não encontrados no mercado brasileiro.
- Como o motor escolhido não possuía sensores Hall internos, a **mecânica para acoplar os sensores Hall** apresentou certas dificuldades, principalmente no momento de sincronizar a posição do Back-EMF com os valores dos sensores Hall.

O projeto apresentou diversos desafios, essenciais para o desenvolvimento de qualidade do projeto, mas uma solução sempre foi encontrada durante a sua elaboração.

## 5.1 Trabalhos Futuros

Buscando melhorar o desempenho do *longboard*, diminuir ainda mais o custo do produto ou deixá-lo mais confiável, propomos os seguintes trabalhos futuros.

Alterar a versão do motor *brushless* escolhido para uma versão com os sensores Hall alocados dentro do motor, facilitando assim o projeto da mecânica e trazendo uma maior confiabilidade aos sensores.



Trocar os microcontroladores ATmega328 por apenas um microcontrolador ESP32 32bits com Bluetooth embutido. Isso diminuirá o preço do projeto e o tamanho da placa do Controle Central.

Substituir as baterias LiPo por Baterias Li-ion para criar uma maior segurança para o usuário e um maior aproveitamento de espaço e do próprio *longboard*.

Aplicar o método de controle com FOC, como descrito na seção 2.5.4, para um controle mais suave do motor.

# Referências

- [1] Imagem de um longboard. <https://www.muirskate.com/longboard/decks/all>. [Online; acessado 19-03-2018]. xi, 5
- [2] Imagem de ondulações no torque do motor. <http://www.electric-skateboard.builders/t/the-difference-between-motors-commutation-blcdc-vs-foc-trapeziodal-sinc3002>. [Online; acessado 21-10-2017]. xii, 46
- [3] Tabela de comparação bluetooth low energy. <http://3.bp.blogspot.com/-orpLzLRP06M/U1d3njNmeII/AAAAAAAAAF70/VgY6qibrSPY/s1600/BTLE.png>. [Online; acessado 27-12-2017]. xvi, 57
- [4] Mineta Transportation Institute. Using bicycles for the first and last mile of a commute. <http://transweb.sjsu.edu/MTIportal/research/publications/documents/BikeCommute.pdf>. [Online; acessado 25-03-2018]. 1
- [5] Imagem de um onewheel. <https://onewheel.com/products/refresh-combo-pack>. [Online; acessado 21-10-2017]. 2
- [6] Imagem de um boosted board. <https://shop.boostedboards.com/products/2nd-gen-boosted-board-refurbished-service-upgrade-only>. [Online; acessado 21-10-2017]. 2
- [7] Imagem de um zboard 2. <https://www.zboardshop.com/blogs/zboard>. [Online; acessado 21-10-2017]. 2
- [8] Imagem ilustrativa de um longboard. <https://unsplash.com/search/photos/longboard>. [Online; acessado 19-03-2018]. 4
- [9] Livestrong - the history of longboarding. <https://www.livestrong.com/article/351382-the-history-of-longboarding/>. [Online; acessado 25-12-2017]. 4
- [10] Sector 9 history. <https://www.sector9.com/history>. [Online; acessado 25-12-2017]. 5
- [11] Warehouse skateboard buying guide. <https://www.warehouseskateboards.com/help/Longboard-Skateboard-Decks-Buying-Guide>. [Online; acessado 21-10-2017]. 5
- [12] Imagem de um longboard e um skate. <https://i2.wp.com/greatlongboards.com/wp-content/uploads/2018/02/longboard-vs-skateboard.jpg?resize=600%2C400ssl=1>. [Online; acessado 19-03-2018]. 6

- [13] Choosing a longboard deck. <https://www.tactics.com/info/choosing-a-longboard-deck>. [Online; acessado 25-10-2017]. 6
- [14] Monster sports - como comprar? <https://www.monstersports.com.br/guia/como-comprar-skate-longboard/>. [Online; acessado 21-10-2017]. 8
- [15] The control techniques drives and control handbook. <https://books.google.com.br/books?id=vDQHzeEmSfUC&lpg=PR14&dq=tesla%20Ferraris%20induction&pg=PP1#v=onepage&q=tesla%20Ferraris%20induction&f=false>. [Online; acessado 27-12-2017]. 10
- [16] The development of the electric motor. <http://www.sparkmuseum.com/MOTORS.HTM>. [Online; acessado 27-12-2017]. 10
- [17] YILDIRIM Merve, POLAT Mehmet, e KÜRÜM Hasan. A survey on comparison of electric motor types and drives used for electric vehicles. *International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition*, 2014. 11
- [18] Imagem motor brushed dc. <http://314sbp4ao2771ln0f54chhvm.wpengine.netdna-cdn.com/wp-content/uploads/2016/11/DC-Motor-Diagram.jpg>. [Online; acessado 21-10-2017]. 14
- [19] Control systems - principles and design. <https://books.google.com.br/books?id=FZak6CkrVLQC&lpg=PA165&dq=brushless%20dc%20motors%20actuators&pg=PP1#v=onepage&q=brushless%20dc%20motors%20actuators&f=false>. [Online; acessado 27-12-2017]. 14, 20
- [20] Imagem de um motor de indução. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rotterdam\\_Ahoy\\_Europort\\_2011\\_\(14\).JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rotterdam_Ahoy_Europort_2011_(14).JPG). [Online; acessado 19-03-2018]. 15
- [21] Tesla - induction versus dc brushless motors. <https://www.tesla.com/blog/induction-versus-dc-brushless-motors>. [Online; acessado 03-01-2018]. 15
- [22] Imagem estrutura motor servo. <https://www.elprocus.com/wp-content/uploads/2017/01/Servo-Motor.png>. [Online; acessado 21-10-2017]. 16
- [23] Imagem pwm. <https://developer.android.com/things/images/pwm-duty.png>. [Online; acessado 21-10-2017]. 16
- [24] Imagem motor de passo nema. [https://dzevsq2emy08i.cloudfront.net/paperclip/technology\\_image\\_uploaded\\_images/23984/default/Nema%2017.jpg?1372864563](https://dzevsq2emy08i.cloudfront.net/paperclip/technology_image_uploaded_images/23984/default/Nema%2017.jpg?1372864563). [Online; acessado 21-10-2017]. 17
- [25] Imagem estrutura do motor de passo. <https://www.electricaltechnology.org/wp-content/uploads/2016/12/Working-of-Hybrid-Stepper-Motor.jpg>. [Online; acessado 21-10-2017]. 17
- [26] Imagem da estrutura de um motor brushless. <http://www.dronetrest.com/uploads/db5290/612/96955714aad437bb.jpg>. [Online; acessado 21-10-2017]. 18

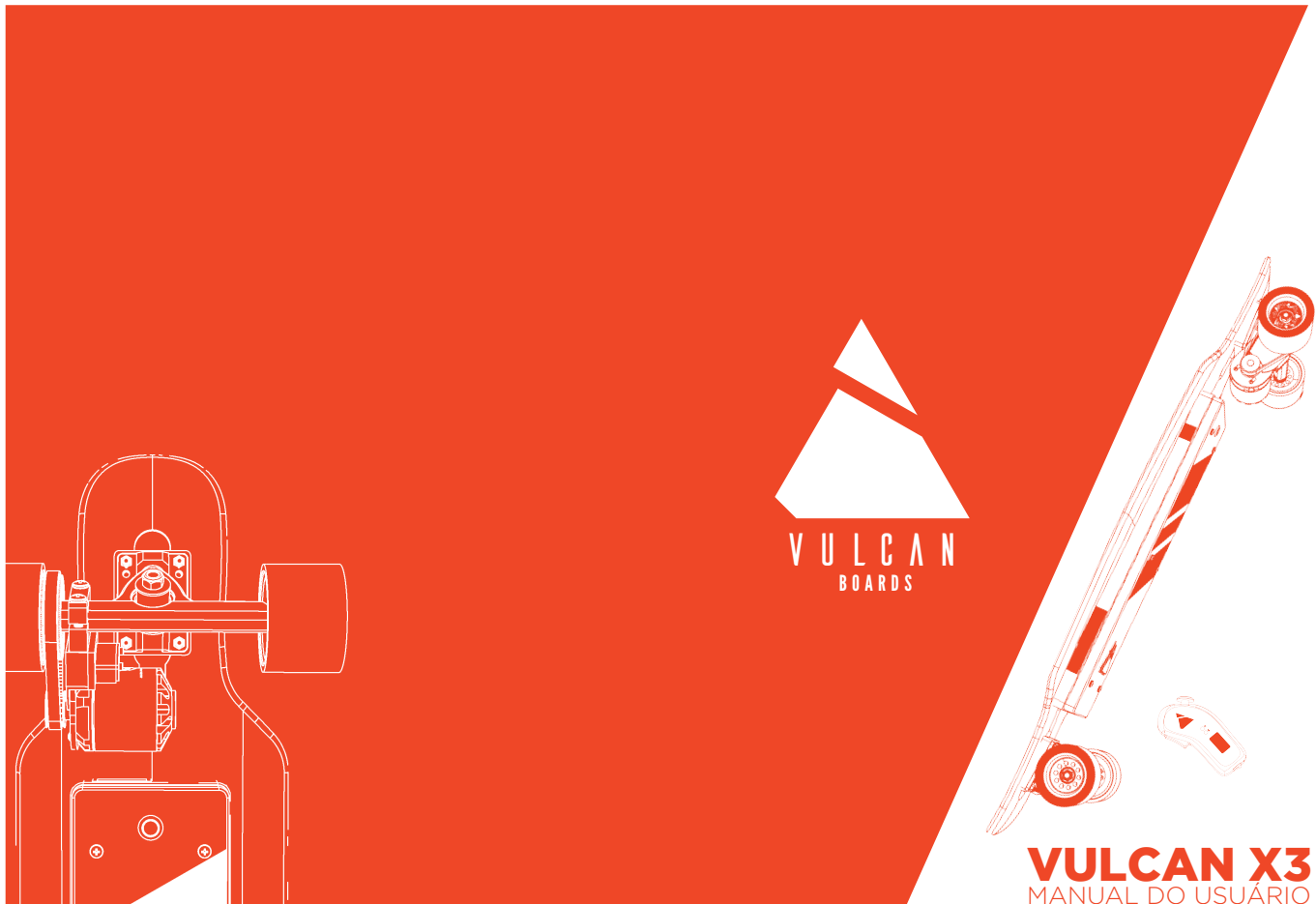
- [27] Imagem motor brushless grande. <https://i.imgur.com/5LgEq.jpg>. [Online; acessado 21-10-2017]. 19
- [28] Benjamin Vedder. Vesc – open source esc. <http://vedder.se/2015/01/vesc-open-source-esc/>. [Online; acessado 31-08-2017]. 20, 59
- [29] Newton c braga - mosfets vs. transistores de potência. <http://newtoncbraga.com.br/index.php/almanaque/193-comparacao-entre-mosfets-de-potencia-e-transistores-bipolares-de-potencia.html>. [Online; acessado 18-11-2017]. 27
- [30] Ixta120p065t mosfet p-channel 120a 65v. <https://br.mouser.com/ProductDetail/IXYS/IXTA120P065T?qs=sGAEpiMZZMshyDBzk1%2fWi2Lis36WbXR%252bSTHzE%252b6XIhM%3d>. [Online; acessado 27-12-2017]. 28
- [31] Irf3205zstrlpbf mosfet n-channel 110a 55v. <https://br.mouser.com/ProductDetail/Infineon-Technologies/IRF3205ZSTRLPBF?qs=sGAEpiMZZMshyDBzk1%2fWi5%252bqVgN3%252bWS89xY%2fZTzqQe8%3d>. [Online; acessado 29-12-2017]. 28
- [32] P-channel power mosfets approach n-channel performance. [http://www.ixys.com/Documents/Articles/Article\\_P\\_Channel\\_Power\\_MOSFETs.pdf](http://www.ixys.com/Documents/Articles/Article_P_Channel_Power_MOSFETs.pdf). [Online; acessado 06-02-2018]. 28, 29
- [33] Imagem de um attiny. <https://potentiallabs.com/cart/attiny-85-online-india-hyderabad>. [Online; acessado 21-10-2017]. 31
- [34] Imagem de um atmega3260. <https://www.ebay.com/itm/100-original-ATMEL-ATMEGA2560-16AU-arduino-mega-2560-IC-TQFP-100-UNO-R3-AVR-/121271777576>. [Online; acessado 21-10-2017]. 31
- [35] Imagem de um esp32. <http://esp32.net/>. [Online; acessado 21-10-2017]. 33
- [36] Imagem de um resistor shunt. <https://i.stack.imgur.com/Tk2I9.png>. [Online; acessado 21-10-2017]. 35
- [37] Imagem de um acs758. <http://www.etchpk.net/wp-content/uploads/2016/08/ANALOG-CURRENT-SENSOR.jpg>. [Online; acessado 21-10-2017]. 35
- [38] Imagem de um sensor hall. <https://cdn3.volusion.com/btfzd.umflq/v/vspfiles/photos/AD316-2.jpg?1479925660>. [Online; acessado 21-10-2017]. 39
- [39] Imagem de um encoder ligado à um motor brushless. <https://cdn.hackaday.io/images/5663151496722491628.jpg>. [Online; acessado 21-10-2017]. 40
- [40] Imagem de um sensor encoder. <http://www.citizen-micro.com/tec/items/images/en2.jpg>. [Online; acessado 21-10-2017]. 40
- [41] Atmel Corporation. Avr444: Sensorless control of 3-phase brushless dc motors. <http://www.atmel.com/images/doc8012.pdf>. [Online; acessado 31-08-2017]. 41, 42, 43

- [42] Atmel Corporation. Avr32723: Sensor field oriented control for brushless dc motors with at32uc3b0256. <http://www.atmel.com/Images/doc32126.pdf>. [Online; acessado 31-08-2017]. 45
- [43] Field oriented control. <https://www.roboteq.com/index.php/applications/100-how-to/359-field-oriented-control-foc-made-ultra-simple>. [Online; acessado 18-11-2017]. 45
- [44] Imagem do Ângulo entre o campo eletromagnético do estator e do rotor. [https://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1279321](https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1279321). [Online; acessado 26-02-2017]. 45
- [45] Yen-Chuan Chang e Ying-Yu Tzou. A new sensorless starting method for brushless dc motors without reversing rotation. <https://ir.nctu.edu.tw/bitstream/11536/7534/1/000252375201015.pdf>. [Online; acessado 26-02-2018]. 48, 49
- [46] Rc battery guide: The basics of lithium-polymer batteries. <http://www.tested.com/tech/502351-rc-battery-guide-basics-lithium-polymer-batteries/>. [Online; acessado 08-02-2018]. 50
- [47] Tipos de baterias batteryuniversity. [http://batteryuniversity.com/learn/archive/whats\\_the\\_best\\_battery](http://batteryuniversity.com/learn/archive/whats_the_best_battery). [Online; acessado 14-11-2017]. 50
- [48] Christian Moeller. Video de uma bateria lipo sendo perfurada. <https://www.youtube.com/watch?v=gisdMQbtJqk>. [Online; acessado 08-03-2018]. 51
- [49] How lipo batteries explode. <https://www.propwashed.com/how-lipo-batteries-explode/>. [Online; acessado 18-11-2017]. 51
- [50] Lithium ion batteries turn skin searing firebombs. <https://www.wired.com/2017/03/lithium-ion-batteries-turn-skin-searing-firebombs/>. [Online; acessado 18-11-2017]. 51
- [51] Imagem de um acidente com baterias lipo. [https://www.instagram.com/p/BbNLAQk131U/?taken-by=gab707\\_fpv](https://www.instagram.com/p/BbNLAQk131U/?taken-by=gab707_fpv). [Online; acessado 21-10-2017]. 52
- [52] Imagem de uma bateria lipo. <https://hobbyking.com/media/catalog/product/legacy/catalog/t5000-5-25.jpg>. [Online; acessado 21-10-2017]. 54
- [53] Linear Technology. Application note 19 - lt1070 design manual. <http://cds.linear.com/docs/en/application-note/an19fc.pdf>. [Online; acessado 26-02-2018]. 53
- [54] Zorica Nedic Andrew Nafalski Aaron Mohtar Jarrad Cody, Özdemir Göl. Regenerative braking in an electric vehicle. [http://www.komel.katowice.pl/ZRODLA/FULL/81/ref\\_20.pdf](http://www.komel.katowice.pl/ZRODLA/FULL/81/ref_20.pdf). [Online; acessado 26-02-2018]. 54, 55, 56
- [55] Bluetooth.com. <https://www.bluetooth.com>. [Online; acessado 18-11-2017]. 57
- [56] Bluetooth low energy. <https://www.quora.com/Is-there-a-difference-between-Bluetooth-4-0-and-Bluetooth-Low-Energy-If-so-why>. [Online; acessado 18-11-2017]. 57

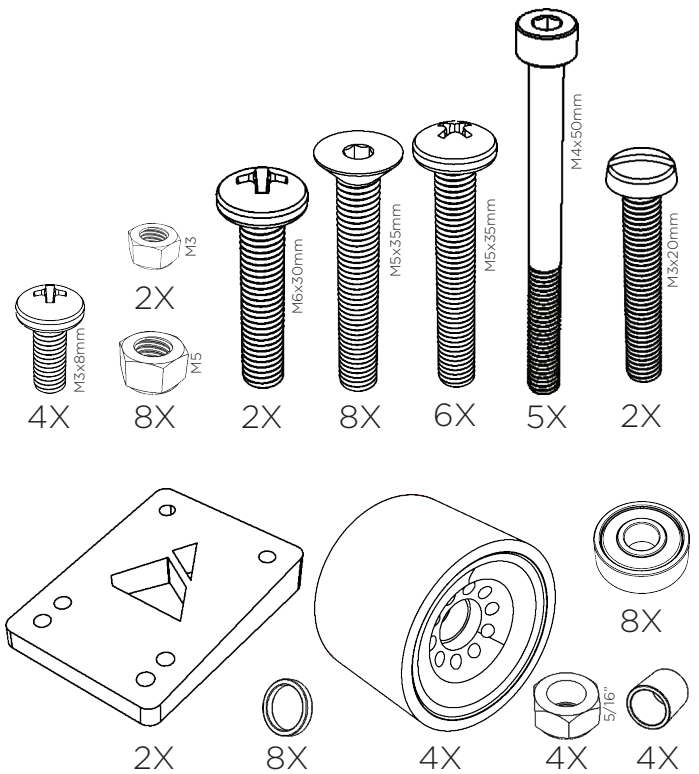
- [57] HobbyKing Turnigy. Turnigy multistar. <http://bit.ly/2tRJz01>. [Online; acessado 01-03-2018]. 58
- [58] HobbyKing Hobbywing. Hobbywing platinum 120a v4 brushless esc w/10a bec. <http://bit.ly/2FETmNp>. [Online; acessado 01-03-2018]. 58
- [59] Alien Power System. Alien 150a 2-12s evolution 3 car esc hv twin sensored. <http://alienpowersystem.com/shop/esc/alien-150a-2-12s-evolution-3-car-esc-hv-twin-sensored/>. [Online; acessado 01-03-2018]. 58
- [60] Imagem de um vesc. <https://www.unikboards.com/wp-content/uploads/V-vesc2.jpg>. [Online; acessado 21-10-2017]. 59
- [61] M. Zeraoulia, M.E.H. Benbouzid, e D. Diallo. Electric motor drive selection issues for hev propulsion systems: a comparative study. *Vehicle Power and Propulsion, 2005 IEEE Conference*, 2005. 60
- [62] KiCad. Kicad eda. <http://kicad-pcb.org/>. [Online; acessado 15-03-2018]. 60
- [63] Autodesk. Autodesk fusion 360. <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>. [Online; acessado 15-03-2018]. 60
- [64] PCBWay. Pcbway. [www.pcbway.com](http://www.pcbway.com). [Online; acessado 08-03-2018]. 102, 103
- [65] AliExpress. Ali express longboard skate elétrico com controle remoto de quatro rodas. <http://bit.ly/2HTdGrE>. [Online; acessado 01-03-2018]. 123
- [66] Boosted Boards. Boosted boards dual+. <https://shop.boostedboards.com/products/board?track=tech-specs-page>. [Online; acessado 01-03-2018]. 123

# Anexo I

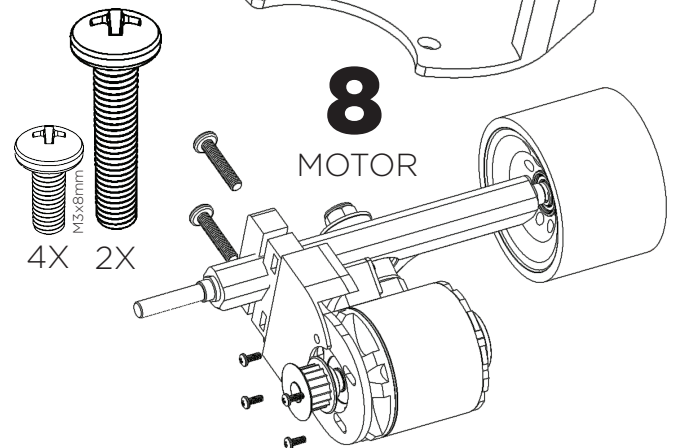
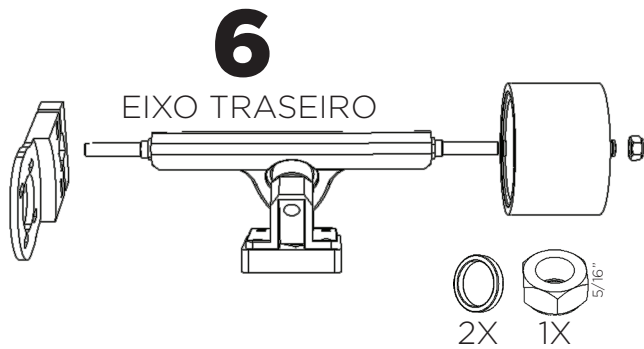
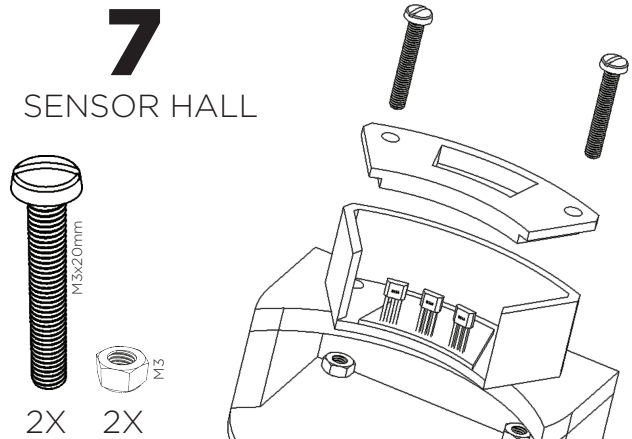
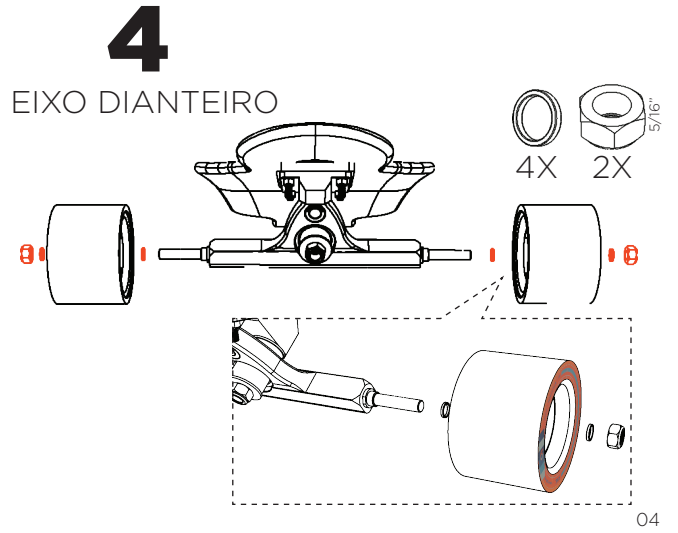
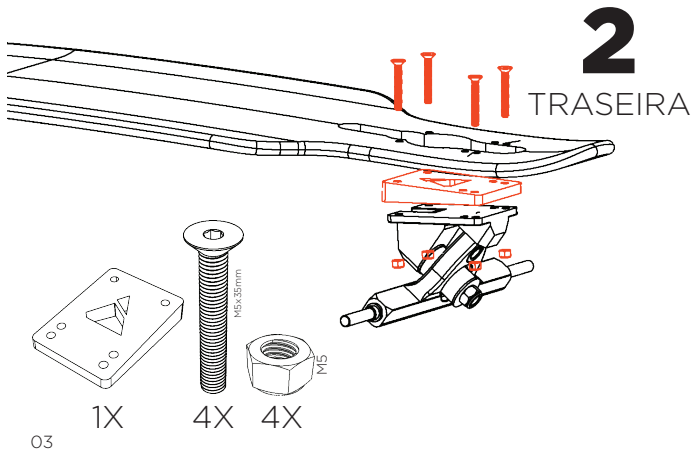
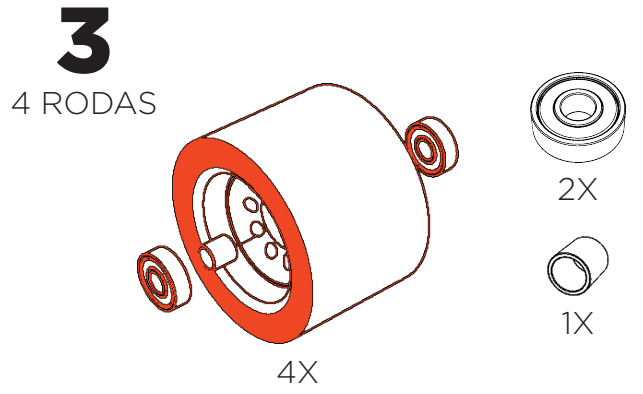
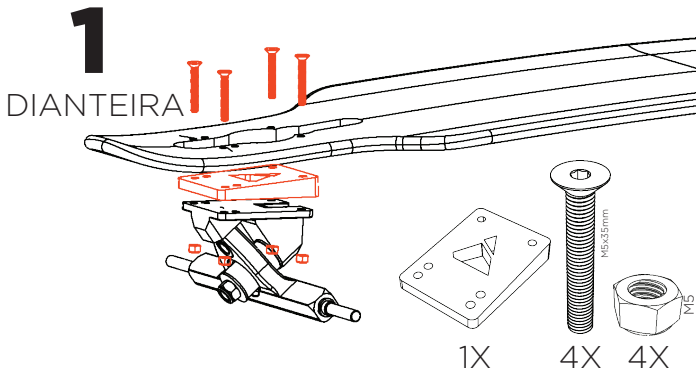
## Manual do Usuário



VULCAN X3 2018  
Manual do Usuário versão 1.0

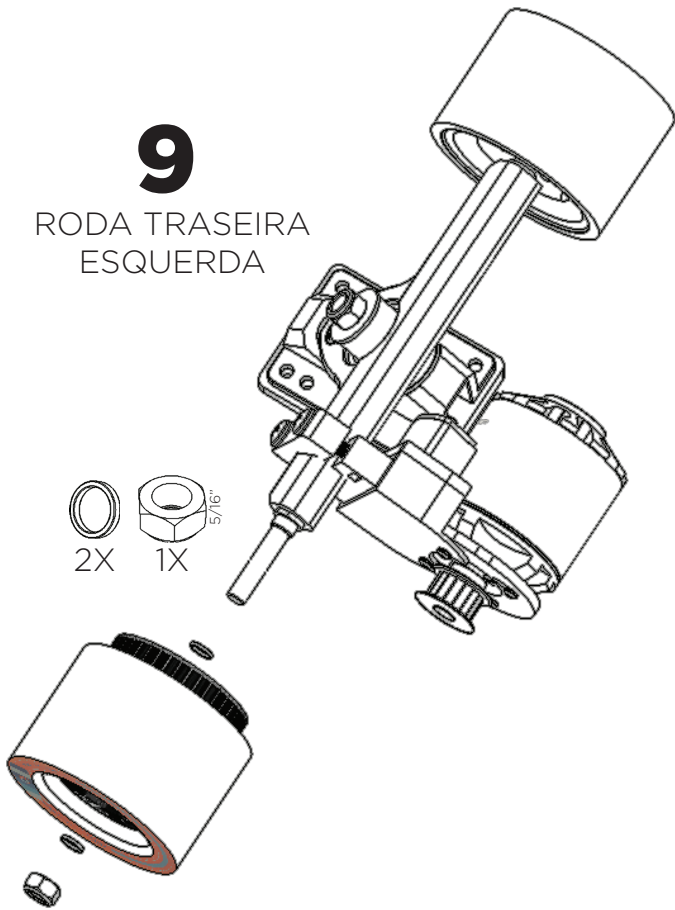






# 9

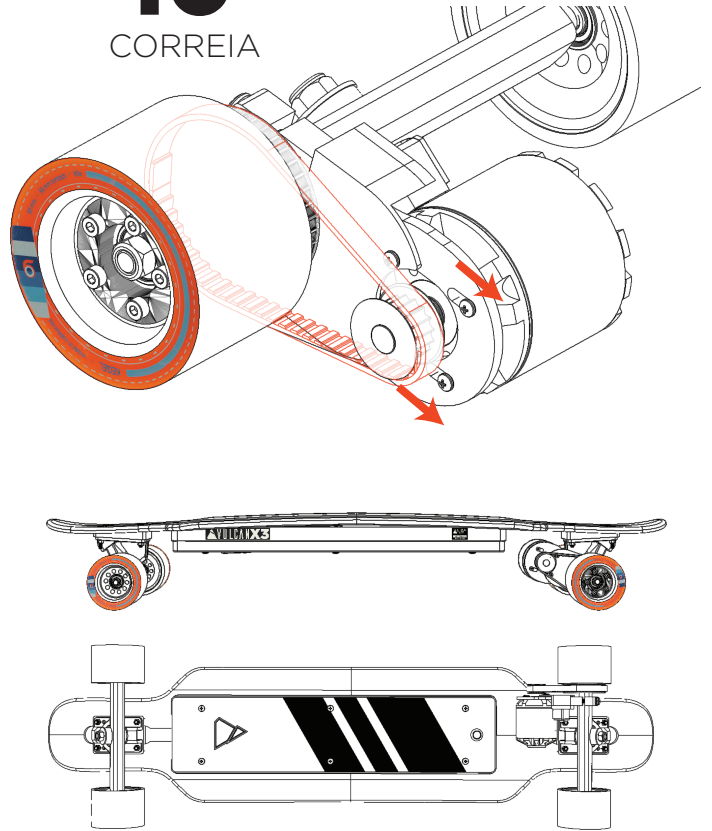
RODA TRASEIRA ESQUERDA



08

# 10

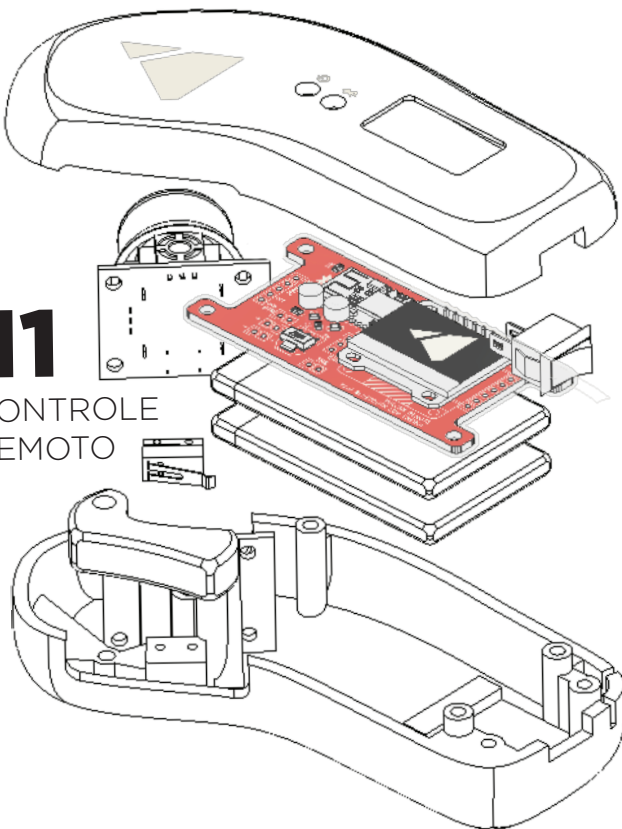
CORREIA



09

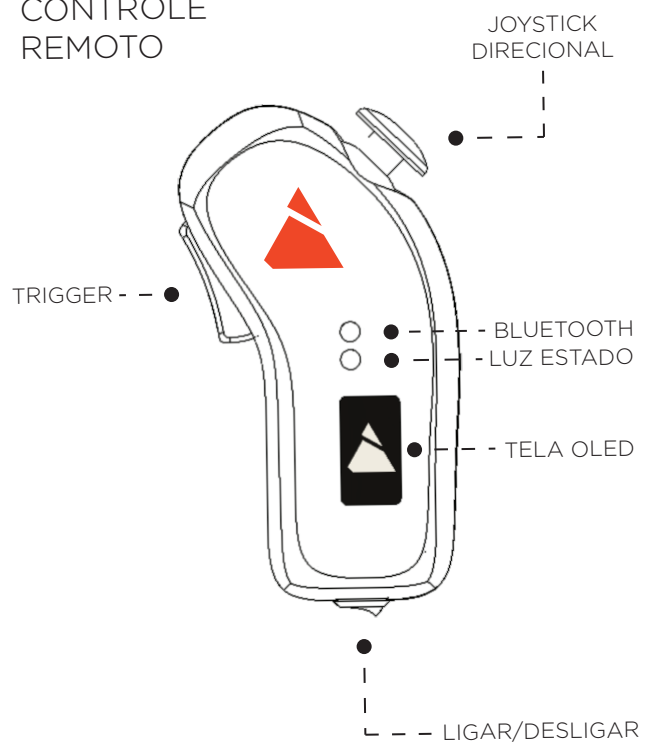
# 11

CONTROLE REMOTO



# 12

CONTROLE REMOTO



10

11

# 13

## PLACA CONTROLADORA

