

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

Gustavo Renã Fiedler

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE TRAÇÃO
DE UMA BICICLETA ELÉTRICA

Passo Fundo

2018

Gustavo Renã Fiedler

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE TRACÇÃO DE UMA BICICLETA ELÉTRICA

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, da Universidade de Passo Fundo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista, sob orientação do professor Me. Edson Acco.

Passo Fundo

2018

Gustavo Renã Fiedler

Desenvolvimento de um sistema de tração de uma bicicleta elétrica

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, da Universidade de Passo Fundo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista, sob orientação do professor Me. Edson Acco.

Aprovado em ____ de _____ de _____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Edson Acco - UPF

Prof. Dr Adriano Toazza - UPF

Prof. Me. Joan Michel Levandoski - UPF

Este trabalho é dedicado aos meus pais, Décio José Fiedler e Ivanete Fátima Fiedler, pelo esforço e incentivo dedicados a mim em todo o período do curso.

“Apesar dos nossos defeitos, precisamos enxergar que somos pérolas únicas no teatro da vida e entender que não existem pessoas de sucesso ou pessoas fracassadas. O que existe são pessoas que lutam pelos seus sonhos ou desistem deles”.

Augusto Cury

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a meus pais Decio José Fiedler e Ivanete Fatima Fiedler, por todo o apoio, dedicação e amor prestados nesse período.

Agradeço a todos os professores, colegas e funcionários da Universidade de Passo Fundo que contribuíram para minha formação, em especial ao professor Mestre Edson Acco pelo apoio prestado durante este período.

Agradeço pelas amizades construídas durante o período do curso, principalmente nesta etapa final do curso, onde todos, diante de tamanha dificuldade auxiliaram seus colegas da melhor maneira possível.

Agradeço a Deus por ter me dado a oportunidade de construir minha história na UPF e além disso por ter me dado tremenda motivação e força nos melhores e piores momentos.

Agradeço por fim a todos que de alguma forma me auxiliaram seja com palavras de apoio ou conhecimento.

RESUMO

Ao longo da existência humana o homem vem contribuindo para a degradação do meio ambiente por meio de ações inadequadas, e com isso, muitos recursos naturais foram praticamente esgotados, como o corte excessivo desmatamento das florestas, crescimento desordenado das cidades e queima de combustíveis fósseis. Tais atitudes aceleram veemente o aquecimento global e deteriora a qualidade do ar, fato que é prejudicial à saúde da população. Visando reduzir a poluição do planeta e reduzir custos através de um meio sustentável, o presente trabalho de conclusão de curso tem como proposta o desenvolvimento de um sistema de tração e controle de velocidade de uma bicicleta elétrica. O protótipo conta com um motor BLDC específico para bicicletas elétricas com potência nominal de 350W acoplado na roda traseira da mesma. O sistema de controle tem como cerne o microcontrolador CórteX ARM TM4C123GH6PM que é responsável pela geração dos sinais de acionamento dos conversores de potência, interpretação do sensor hall provindo do motor BLDC para mensurar a velocidade instantânea e distância percorrida pela bicicleta. Os conversores de potência se tratam de um conversor boost e um inversor trifásico que são responsáveis pelo acionamento e controle de velocidade do motor BLDC, sendo que as variáveis de controle do firmware são definidas pelo usuário através da variação da posição do acelerador de punho eletrônico acoplado a bicicleta. Além disso, o usuário pode visualizar em seu aparelho celular de plataforma android através do aplicativo desenvolvido e nomeado como *Eletrical Bike App* os valores mensurados de velocidade e distância percorrida, sendo possível atingir velocidades de até 25 Km/h. O aplicativo ainda tem a função de permitir que o usuário habilite e desabilite o sistema, seja como forma de segurança ou para evitar o consumo das baterias de 12V /7Ah que são responsáveis pela alimentação do sistema. Desenvolveu-se também no presente projeto a confecção de um carregador de baterias de chumbo ácido com tensão de 12V.

Palavras-Chave: conversores de potência; meio ambiente; motor BLDC;

ABSTRACT

Throughout human existence man has contributed to the degradation of the environment through inadequate actions, and with this, many natural resources have been practically depleted, such as the excessive cutting of forest deforestation, disorderly growth of cities and burning of fossil fuels. Such attitudes accelerate global warming and deteriorate air quality, a fact that is detrimental to the health of the population. Such attitudes accelerate global warming and deteriorate air quality, a fact that is detrimental to the health of the population. Aiming to reduce pollution of the planet and reduce costs through a sustainable environment, the present work of course completion proposes the development of a system of traction and speed control of an electric bicycle. The prototype features a specific BLDC motor for electric bikes with a nominal power of 350W coupled to the rear wheel. The control system has as its core the Cortex ARM microcontroller TM4C123GH6PM which is responsible for generating the drive signals of the power converters, interpretation of the hall sensor coming from the BLDC motor to measure the instantaneous speed and distance traveled by the bicycle. The power converters are a boost converter and a three-phase inverter that are responsible for the drive and speed control of the BLDC motor, and the firmware control variables are defined by the user by varying the position of the coupled electronic throttle the bicycle. In addition, the user can view the measured values of speed and distance traveled, and can reach speeds of up to 25 Km / h on your android platform mobile device through the application developed and named Eletrical Bike App. The application still has a function of allowing the user to enable and disable the system either as a form of security or the consumption of 12V / 7Ah batteries that are responsible for powering the system. Also developed in the present project is the manufacture of an acid lead battery charger with 12V voltage.

Keywords: power converter; environment; BLDC motor;

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1: EVOLUÇÃO DE DESIGN DA BICICLETA.	19
FIGURA 2- COMPONENTES DE UMA BICICLETA.	20
FIGURA 3- ALTERNATIVAS DE ACOPLAMENTO DO MOTOR.	21
FIGURA 4- ALTERNATIVAS DE ALOJAMENTO DA BATERIA.	21
FIGURA 5- ALTERNATIVA DE ALOJAMENTO MÓDULO DE CONTROLE.	22
FIGURA 6- ALTERNATIVA DE ALOJAMENTO DO ACELERADOR.	22
FIGURA 7- BICICLETA ELÉTRICA CALOI VIBE ELITE.	23
FIGURA 8- REGRA DA MÃO ESQUERDA.	24
FIGURA 9- CLASSIFICAÇÃO DOS MOTORES ELÉTRICOS.	25
FIGURA 10- CORTE EM MÁQUINA CC ESCOVADA.	27
FIGURA 11- CONFIGURAÇÃO ESTRELA MOTOR BLDC.	28
FIGURA 12- COMPONENTES DE UM MOTOR BLDC.	28
FIGURA 13- ILUSTRAÇÃO ROTOR E BOBINAS ESTATÓRIAS MOTOR BLDC.	29
FIGURA 14- CONFIGURAÇÕES ROTÓRICAS MOTOR BLDC.	30
FIGURA 15- GRÁFICO DE TORQUE POR VELOCIDADE MOTOR BLDC.	30
FIGURA 16- MOTOR BLDC UTILIZADO EM BICICLETAS ELÉTRICAS.	31
FIGURA 17- ESTRUTURA DE UM INVERSOR TRIFÁSICO.	33
FIGURA 18- SEQUÊNCIA DE ACIONAMENTO INVERSOR TRIFÁSICO PARA CONDUÇÃO EM 120°.	34
FIGURA 19- CIRCUITO CONVERSOR BOOST.	35
FIGURA 20- CORTE TRANSVERSAL EM MOTOR BLDC COM SENSORES HALL ACOPLADOS.	36
FIGURA 21- ANÁLISE DE SINAIS DA FCEM NO CONTROLE SENSORLESS.	38
FIGURA 22- ESQUEMÁTICO DE IDENTIFICAÇÃO POSIÇÃO DO ROTOR MÉTODO SENSORLESS.	39
FIGURA 23- SENSOR DE EFEITO HALL EM SEMICONDUTORES TIPO N E TIPO P.	40
FIGURA 24- PRINCIPAIS BATERIAS PRIMÁRIAS E SECUNDÁRIAS.	42
FIGURA 25- COMPONENTES DE UMA BATERIA DE CHUMBO ÁCIDO.	43
FIGURA 26- GRÁFICO DE CARGA DE UMA SLA.	44
FIGURA 27- GRÁFICO DE DESCARGA DE UMA SLA.	45
FIGURA 28- GRÁFICO DE VARIAÇÃO DE CAPACIDADE DA BATERIA EM RELAÇÃO AO TEMPO.	45
FIGURA 29- DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM CARREGADOR DE BATERIA.	47
FIGURA 30- VISÃO EM ÂMBITO GERAL DO PROJETO.	48
FIGURA 31- DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROJETO.	50
FIGURA 32-TIVA™ EK-TM4C123GXL LAUNCHPAD.	51
FIGURA 33- ACELERADOR ELETRÔNICO DE PUNHO KASINSKI.	52
FIGURA 34- CIRCUITO CONVERSOR BOOST PROJETADO.	54
FIGURA 35- CIRCUITO DE ACIONAMENTO MOSFET CONVERSOR BOOST.	55
FIGURA 36- ESC HW40.	56
FIGURA 37- DIAGRAMA DE BLOCOS ESC.	57

FIGURA 38- MOTOR BLDC UTILIZADO NO PROJETO.	58
FIGURA 39- CIRCUITO DE INTERPRETAÇÃO SINAL SENSOR HALL.	59
FIGURA 40- LAYOUT ELETRICAL BIKE APP.	60
FIGURA 41- CIRCUITO DE MONITORAMENTO ESTADO DA BATERIA DE CHUMBO ÁCIDO.	61
FIGURA 42- MÓDULO BLUETOOTH HC-05.	62
FIGURA 43- BATERIA DE CHUMBO ÁCIDO 12V/7AH.	63
FIGURA 44- CIRCUITO CARREGADOR DE BATERIAS DE CHUMBO ÁCIDO.	64
FIGURA 45- PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO CARREGADOR DE BATERIA DE CHUMBO ÁCIDO.	65
FIGURA 46- FLUXOGRAMA DE FIRMWARE DO PROJETO.	67
FIGURA 47- ACOPLAMENTO MOTOR BLDC.	68
FIGURA 48- SUPORTE DE CHÃO PARA BICICLETA.	69
FIGURA 49- SUPORTE PARA CELULAR.	69
FIGURA 50- ALOCAÇÃO DE BATERIAS E PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO NA BICICLETA.	70
FIGURA 51- CIRCUITO CONVERSOR BOOST SIMULADO NO SOFTWARE PSIM.	71
FIGURA 52- GRÁFICO DE TENSÃO DE SAÍDA OBTIDO COM CICLO DE TRABALHO DE 66%.	72
FIGURA 53- CIRCUITO INVERSOR TRIFÁSICO SIMULADO NO SOFTWARE PSIM.	73
FIGURA 54- SINAIS DE ACIONAMENTO INVERSOR TRIFÁSICO PARA ACIONAMENTO EM 120°.	73
FIGURA 55- GRÁFICO DE TENSÃO DE LINHA DO INVERSOR TRIFÁSICO OBTIDO NO SOFTWARE PSIM.	74
FIGURA 56- PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO CONVERSOR BOOST.	75
FIGURA 57- PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO DO CONTROLADOR.	76
FIGURA 58- VISOR DE LED'S PARA MONITORAMENTO DE ESTADO DA BATERIA DO SISTEMA.	76
FIGURA 59- CHAVES PARA DESCONECTAR BATERIAS DO SISTEMA.	77
FIGURA 60- CIRCUITO DE ENSAIO COM PONTE RLC MINIPA MC155.	78
FIGURA 61 - GRÁFICO CICLO DE TRABALHO VERSUS TENSÃO DE SAÍDA CONVERSOR BOOST.	80
FIGURA 62- FORMA DE ONDA DE SINAL DE ACIONAMENTO E TENSÃO DE SAÍDA DO CONVERSOR BOOST.	81
FIGURA 63- TACOGERADOR TAKO HT12000.	82

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1- VANTAGENS E DESVANTAGENS DE MOTORES CC ESCOVADOS.	26
QUADRO 2- QUADRO COMPARATIVO MOTOR BLDC VERSUS MOTOR CC ESCOVADO.	32
QUADRO 3 - SEQUÊNCIA DE ACIONAMENTO MOTOR BLDC.	37
QUADRO 4- ENSAIO DO MOTOR COM PONTE RLC.	78
QUADRO 5- ENSAIO DO MOTOR COM PONTE RLC SEM CABO EXTENSOR.	79
QUADRO 6- VERIFICAÇÃO DE GANHO DE TENSÃO CONVERSOR BOOST.	80
QUADRO 7- ERRO DE MEDIÇÃO DE VELOCIDADE DO SISTEMA.	83
QUADRO 8- AFERIÇÕES DE CONSUMO DO SISTEMA E AUTONOMIA ESTIMADA.	84

LISTA DE SIGLAS

BLDC: Motor de corrente continua sem escovas

CA: Corrente alternada

CC: Corrente continua

e-bike: Bicicleta elétrica

EM: Força eletromagnética

FCEM: Força contra eletromotriz

I/O: *Input/Output*

PMSM: Motor síncrono de ímãs permanentes

PWM: Modulação por largura de pulso

RPM: Rotações por minuto.

SLA: Bateria selada de chumbo ácido

VRLA: Bateria de chumbo ácido regulada a válvula

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 CONTEXTO.....	15
1.2 OBJETIVO GERAL.....	16
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.4 JUSTIFICATIVA	16
2 REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1 BICICLETA	18
2.1.1 Contexto Histórico	18
2.1.2 Bicicleta elétrica.....	19
2.1.3 Componentes.....	20
2.1.4 Estudo de mercado	22
2.2 MOTORES ELÉTRICOS	24
2.2.1 Motor CC Escovado	25
2.2.2 Motor BLDC	27
2.3 CONTROLE DE MOTORES BLDC.....	32
2.3.1 ESTRUTURA DE ACIONAMENTO.....	32
2.3.2 CONTROLE DE VELOCIDADE.....	34
2.3.3 CONTROLE UTILIZANDO SENSORES DE POSIÇÃO.....	36
2.3.4 CONTROLE SENSORLESS	37
2.4 SENSOR DE EFEITO HALL	39
2.5 BATERIA.....	41
2.5.1 Bateria de chumbo ácido.....	42
2.5.2 BATERIA DE ÍON LÍTIO	46
2.6 CARREGADOR DE BATERIA DE CHUMBO ÁCIDO	46
3 ESPECIFICAÇÃO DO PROJETO	48

4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.....	50
4.1 HARDWARE	50
4.1.1 MICROCONTROLADOR.....	51
4.1.2 ACELERADOR ELETRÔNICO DE PUNHO.....	52
4.1.3 CONVERSOR BOOST.....	53
4.1.4 CONTROLE ELETRÔNICO DE VELOCIDADE - ESC	56
4.1.5 MOTOR BLDC	57
4.1.6 INTERFACE COM O USUÁRIO	60
4.1.7 MÓDULO BLUETOOTH HC-05.....	61
4.1.8 BANCO DE BATERIAS.....	62
4.1.9 CARREGADOR DE BATERIA DE CHUMBO ÁCIDO.....	63
4.2 FIRMWARE.....	66
4.3 ESTRUTURA MECÂNICA	68
4.4 SIMULAÇÕES DE HARDWARE	70
4.4.1 CONVERSOR BOOST.....	71
4.4.2 INVERSOR TRIFÁSICO.....	72
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
5.1 PCI'S DO SISTEMA DESENVOLVIDO	75
5.2 ENSAIO COM PONTE RLC.....	77
5.3 VERIFICAÇÃO DE GANHO DE TENSÃO CONVERSOR BOOST	79
5.4 ERRO RELATIVO DE MEDIÇÃO DE VELOCIDADE DO SISTEMA	81
5.5 CONSUMO DO SISTEMA E AUTONOMIA ESTIMADA	84
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	85
REFERÊNCIAS	86
APÊNDICE A – HARDWARE COMPLETO	89
APÊNDICE B – PROTÓTIPO CONSTRUÍDO	92

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo introdutório serão apresentadas informações históricas sobre a evolução da bicicleta elétrica, bem como a inserção da mesma no contexto atual. Também será justificado o desenvolvimento do projeto e citados os objetivos a serem alcançados com o mesmo.

1.1 CONTEXTO

A utilização de bicicletas como forma de lazer, prática de esporte ou meio de transporte, tem aumentado no Brasil. As cidades brasileiras são testemunhas deste crescimento. Muitas prefeituras municipais já realizaram investimentos para a criação ou ampliação das ciclovias situadas em cidades de pequeno, médio ou grande porte, incentivando a presença de novos ciclistas e trazendo maior segurança aos mesmos.

A história da bicicleta teve início no ano de 1790, época em que o conde francês J. H. Sivrac concebeu o “celerífero”, veículo arcaico de duas rodas, ligadas por uma trave de madeira, em forma de cavalo impulsionado por movimentos alternados dos pés sobre o chão e só andava em linha reta já que não tinha direção (INFOBIKE, 2007). Com o aprimoramento no design das bicicletas e a evolução da tecnologia novas formas de meio de transporte foram desenvolvidas, agora, com um propósito ecológico, financeiro e saudável. As bicicletas elétricas vieram para facilitar a vida da população, permitindo realizar trajetos costumeiramente percorridos de uma forma mais rápida e economicamente viável.

Uma bicicleta elétrica é estruturada da mesma forma que uma bicicleta comum, exceto por um motor elétrico acoplado na roda traseira ou dianteira, um módulo de controle de potência e uma bateria. O ciclista pode optar tanto por se locomover utilizando apenas o motor elétrico ou pode pedalar auxiliando a tração elétrica, fato que eleva a autonomia da bateria. Existem dois métodos do usuário solicitar o acionamento do motor elétrico em uma bicicleta elétrica. No método de pedalada assistida o ciclista fornece o impulso inicial no pedal e o sistema de controle identificará o movimento dos pedais através de sensores e auxiliará no movimento acionando o motor elétrico tornando as pedaladas mais leves. Outra forma é a utilização de um acelerador eletrônico, funcionando como uma scooter elétrica, onde o motor elétrico só será acionando quando o usuário solicitar através da variação da posição do acelerador eletrônico.

1.2 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho de conclusão de curso almeja o desenvolvimento de um sistema de tração para uma bicicleta elétrica capaz de controlar a velocidade do motor elétrico e monitorar grandezas como a velocidade e a distância percorrida pela mesma. Além disso, a mesma deve ser capaz de suprir necessidades de locomoção com autonomia suficiente para locomover-se para diversas atividades do dia a dia.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Estudo sobre o funcionamento de motores de correntes contínua sem escovas (BLDC) e métodos de acionamento dos mesmos;
- b) Desenvolver um sistema eletrônico capaz de realizar o controle de velocidade do motor elétrico;
- c) Desenvolver um aplicativo para smartphone que apresente os valores mensurados de velocidade e distância percorrida pela bicicleta.
- d) Projetar um circuito carregador de bateria de chumbo ácido;

1.4 JUSTIFICATIVA

O Brasil enfrenta uma de suas maiores crises políticas e econômicas já registradas, acarretando a alta dos produtos em geral, afetando inclusive o preço da gasolina, principal combustível para veículos a combustão. O uso de uma bicicleta elétrica como meio de transporte ocasionaria em significativos cortes de gastos no orçamento mensal, já que a energia elétrica em épocas de cheia das barragens é muito mais barata que combustíveis fósseis.

Os principais países desenvolvidos vêm a anos buscando maneiras para diminuir a poluição e emissão de gases poluentes, desacelerando o aquecimento global. Apesar da iniciativa, não foram tomadas grandes medidas já que as mesmas acarretariam em uma grande redução da produção nas indústrias, tornando a economia dos países mais vulneráveis. A inserção de veículos elétricos movimentaria a economia mundial e diminuiria a emissão de CO₂ proveniente de veículos a combustão. É fato também que a utilização da bicicleta proporciona benefícios à saúde, já que estimula a prática de exercícios físicos e

consequentemente reduz o risco de morte por doenças crônico-degenerativas, aumentando a capacidade cardíaca e pulmonar, eficiência do sistema musculoesquelético e diminuindo os níveis de ansiedade e tensão (ALMEIDA *et al.*, 2004).

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo será apresentado o embasamento teórico do presente trabalho, visando a maior facilidade de compreensão aos leitores. O conteúdo abordado será dividido em seis subcapítulos apresentando os componentes que serão utilizados no projeto, bem como o contexto histórico, aspectos construtivos e aplicações.

2.1 BICICLETA

A bicicleta é um meio de transporte de duas rodas movido a tração humana que pode ser utilizado como meio transporte, na prática de exercícios físicos ou como forma de lazer. Neste subcapítulo serão abordados aspectos construtivos e histórico referente a bicicletas e bicicletas elétricas, por fim será realizado um estudo de mercado das bicicletas elétricas produzidas atualmente.

2.1.1 Contexto Histórico

A bicicleta passou por constantes evoluções no decorrer dos anos até atingir sua forma moderna. Cronologicamente, ela antecedeu aos motores a vapor e a explosão, além de ser considerado o “primeiro veículo mecânico” para o transporte individual (REVISTA BICICLETA, 2012).

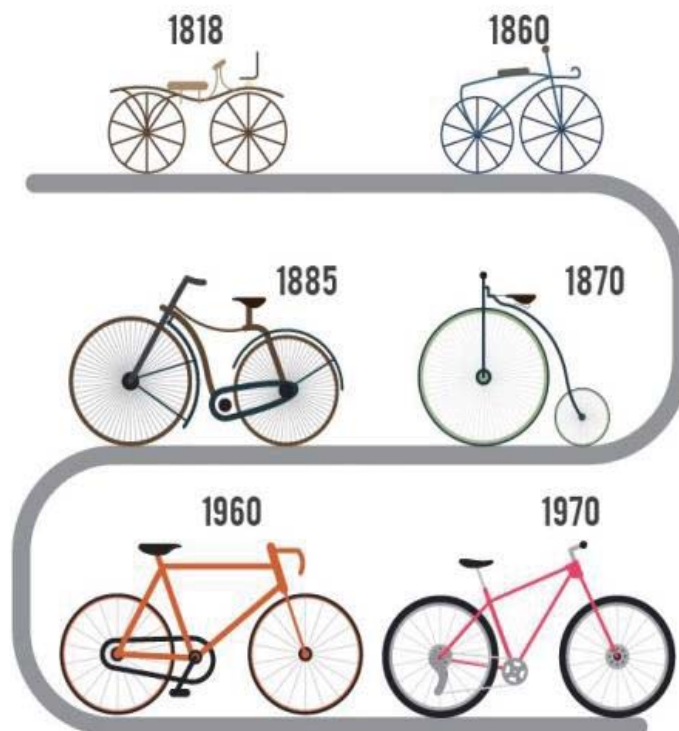
A história da bicicleta começa de fato com a criação de um brinquedo, o "celerífero", realizado pelo Conde de Sivrac. Construído todo em madeira, constituído por duas rodas alinhadas, uma atrás da outra, unidas por uma viga onde se podia sentar. A máquina não tinha um sistema de direção, só uma barra transversal fixa à viga que servia para apoiar as mãos. A brincadeira consistia em empurrar ou deixar correr numa descida para pegar velocidade e assim tentar manter-se equilibrado de maneira muito precária por alguns metros. (ESCOLA DE BICICLETA, 2012).

No Brasil desde os primórdios a bicicleta tornou-se um dos principais meios de transporte para trabalhadores industriais e fabris, geralmente menos afortunados. Essa situação passou por alterações no final da década de 1950, com a chegada da indústria automobilística brasileira que consolidou a produção de automóveis de passeio e a instalação

de algumas empresas fabricantes de ônibus para transporte coletivo e urbano (SOARES, 2015).

Observa-se na Figura 1 a evolução do design e aspectos construtivos de bicicletas durante o passar dos anos. O último modelo, apesar de ser relacionado ao ano de 1970 já se assemelha bastante aos modelos atuais.

Figura 1: Evolução de design da bicicleta.



Fonte: FREEPIK (2015).

2.1.2 Bicicleta elétrica

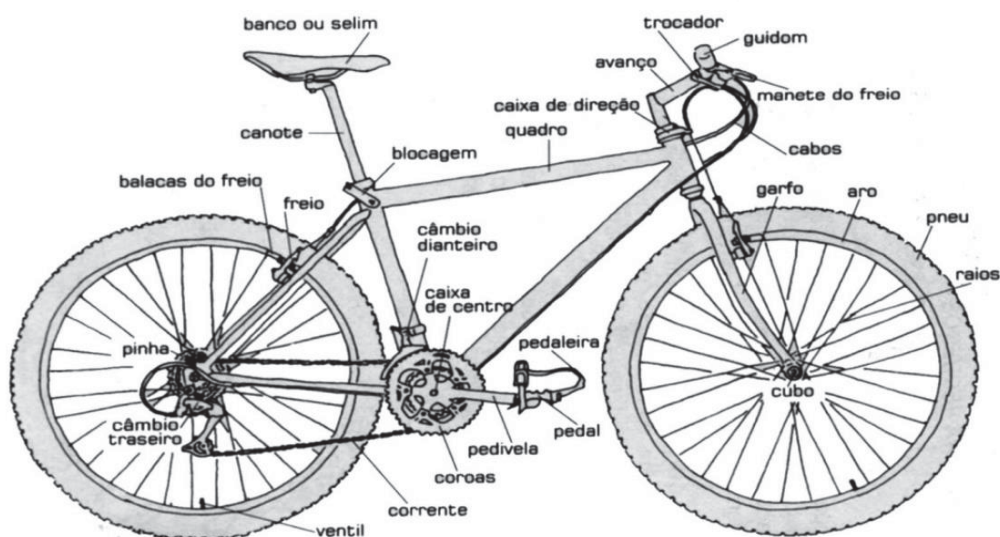
A bicicleta elétrica é um meio de transporte de tração elétrica que tem a opção de ser auxiliada por propulsão humana através de pedais. Possui uma relação de transformação de velocidade através de um pinhão e uma coroa que são movimentados por pedais e motor, quando este é acionado. É considerada um dos principais meios de transporte alternativo e também uma forma de mobilidade urbana ecológica, pois não produz emissão de gases poluentes.

Atualmente, as bicicletas elétricas já estão inseridas nas cidades brasileiras, mesmo que em números tímidos, atendem com excelência as necessidades dos usuários durante a locomoção. A inserção das ciclovias nos planos de mobilidade urbana, incentiva o crescimento da frota de bicicletas comuns e elétricas. Estima-se que na cidade do Rio de Janeiro a frota de bicicletas elétricas seja de cinco mil unidades (VEJA, 2016). Apesar da frota de bicicletas elétricas, bicicletas comuns e transportes coletivos diminuir em algumas casas a concentração de veículos nas vias públicas, os engarrafamentos ainda fazem parte da rotina de grandes cidades brasileiras.

2.1.3 Componentes

A estrutura mecânica de uma bicicleta elétrica é praticamente a mesma de uma bicicleta comum, exceto pela adição de alguns itens elétricos e eletrônicos. Os componentes principais de uma bicicleta são quadro, rodas, desviadores e guidão. Observa-se na Figura 2 a estrutura básica de uma bicicleta, bem como o nome de cada componente constituinte.

Figura 2- Componentes de uma bicicleta.



Fonte: Ciclismo Zona Leste (2016).

Os itens adicionais presentes em uma bicicleta que a tornam uma bicicleta elétrica são um motor elétrico, bateria ou banco de baterias e módulo de controle. Em modelos que não possuem acionamento com sensores nos pedais também se faz necessário à utilização de um acelerador.

As bicicletas elétricas presentes no mercado comumente seguem um padrão para alojamento do motor, bateria e módulo de controle. Motivado por variações construtivas destes componentes o ponto de alojamento pode ser alterado.

O motor elétrico pode ser acoplado no eixo traseiro,dianteiro, quadro ou no prato pedaleiro da bicicleta conforme Figura 3.

Figura 3- Alternativas de acoplamento do motor.



Fonte: Revista Bicicleta (2013).

A bateria pode ser fixa em suporte sobre a roda traseira ou no quadro conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4- Alternativas de alojamento da bateria.



Fonte: Revista Bicicleta (2013).

O módulo de controle comumente aloja-se no quadro da bicicleta conforme Figura 5.

Figura 5- Alternativa de alojamento módulo de controle.



Fonte: Bicimoto (2013).

O acelerador é fixado junto lado direito do guidão da bicicleta conforme apresentado Figura 6.

Figura 6- Alternativa de alojamento do acelerador.



Fonte: Revista Bicicleta (2013).

2.1.4 Estudo de mercado

A evolução e extensão do sistema cicloviário nas cidades deve movimentar ainda mais o mercado de bicicletas elétricas, consequentemente causando reduções de custos em futuras compras. Realizado estudo de mercado definiu-se que o preço de uma e-bike (bicicleta elétrica) pode variar de R\$3.000,00 a R\$17.000,00 com autonomia média de 30 quilômetros. Existe também a possibilidade da compra de um kit contendo todos os componentes

necessários para adaptação de uma bicicleta comum em uma bicicleta elétrica, neste caso é indicado à contratação de um profissional autorizado para realizar o serviço.

Existem duas opções de e-bike no mercado referente ao acionamento do motor elétrico. O primeiro método necessita de um acelerador com saída de resistência variável, assim o sistema de controle identificará a velocidade desejada pelo usuário através de um conversor A/D, sem a necessidade da utilização dos pedais. O segundo método necessita de um sensoramento no eixo traseiro da bicicleta, quando o ciclista inicia a movimentação, o motor é acionado para auxiliar as pedaladas. As e-bikes com acelerador manual são mais aconselhadas para terrenos planos ou descidas, pois ao se deparar com um terreno íngreme o ciclista tende a utilizar apenas o motor como fonte de torque, diminuindo a autonomia da mesma (REVISTA BICICLETA, 2013).

Observa-se na Figura 7 uma bicicleta elétrica Caloi Vibe Elite que possui valor de venda no mercado de aproximadamente R\$ 13000,00. A bicicleta é equipada com um motor elétrico de 250W, conjunto de células de bateria de ion lito e segundo o fabricante possui autonomia de até 125 Km dependendo do tipo de plano em que o usuário a submeter.

Figura 7- Bicicleta elétrica Caloi Vibe Elite.



Fonte: Caloi (2018).

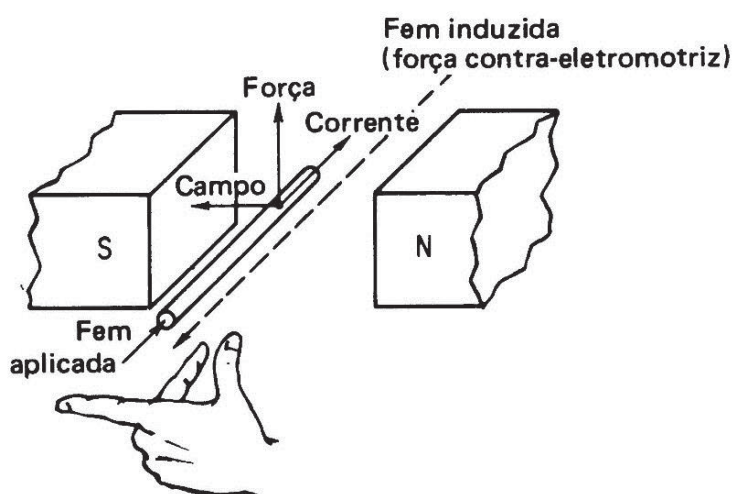
2.2 MOTORES ELÉTRICOS

O motor elétrico pode ser definido como um transdutor capaz de converter energia elétrica em energia mecânica (FLARYS, 2013). Os motores elétricos estão presentes em uma infinidade de equipamentos automobilísticos, domésticos, médico-hospitalares entre outros.

O princípio de funcionamento de um motor elétrico é baseado no princípio de Força de Lorentz, quando um condutor carregado percorre um campo magnético será desenvolvida uma força, e o condutor tenderá a mover-se em relação ao campo ou vice-versa, este princípio é algumas vezes chamado de “ação motora”. A definição acima contém três requisitos que são capazes de afetar a intensidade da força eletromagnética (EM): o campo magnético, o comprimento do condutor ativo e o valor da corrente, se qualquer um dos fatores variarem a força EM varia na mesma proporção (KOSOW, 2005).

O sentido vetorial da corrente, campo magnético e força eletromagnética podem ser predeterminados a partir da regra da mão esquerda. O dedo médio fornece a direção da corrente que percorre o condutor, o dedo indicador indica a direção do campo magnético e o polegar indica a direção da força eletromagnética. A Figura 8 ilustra a aplicação da regra da mão esquerda.

Figura 8- Regra da mão esquerda.

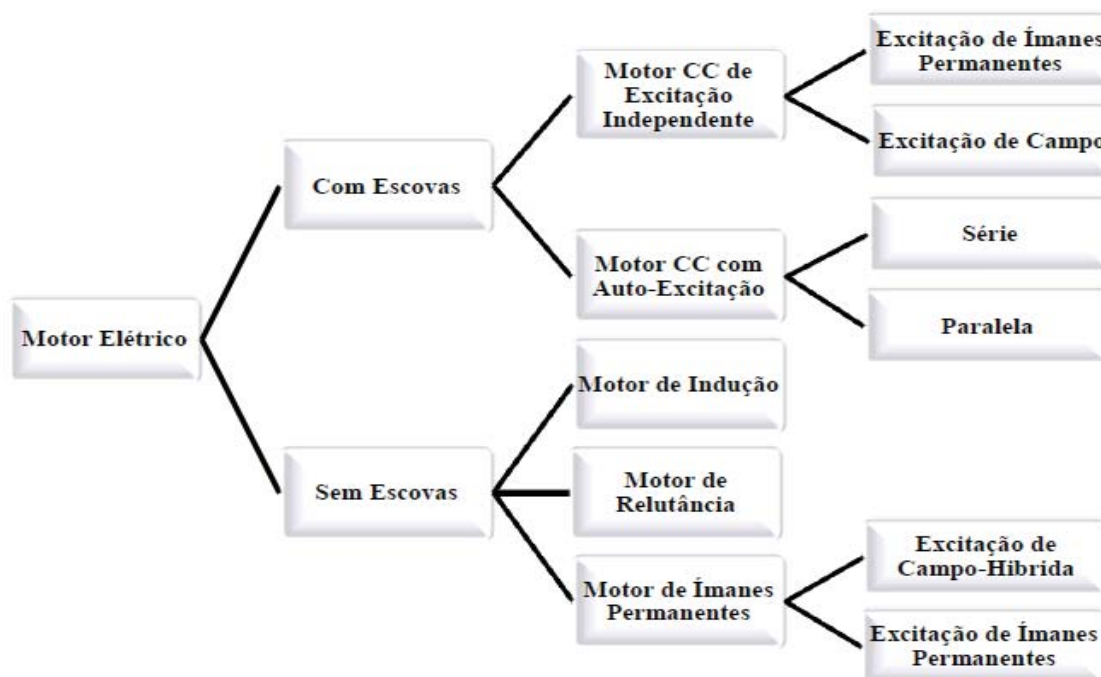


Fonte: Kosow (2005).

Existem vários tipos de motores elétricos, porém podem ser classificados especificamente em dois grandes grupos: motores elétricos de corrente contínua (CC) e motores elétricos de corrente alternada (CA). A principal diferença entre um motor CC e um

motor CA além da alimentação é o método para controle de velocidade de ambos. Os motores elétricos ainda podem ser classificados em escovados ou brushless (sem escovas). A classificação dos motores elétricos é ilustrada na Figura 9.

Figura 9- Classificação dos motores elétricos.



Fonte: Araújo (2012).

Um mesmo tipo de motor elétrico pode ser utilizado em distintas aplicações, tornando a definição um assunto complexo, que envolve a análise de diversos parâmetros. Os parâmetros mais comuns a serem compreendidos quanto à seleção de um motor são o tipo de ligação do motor, o custo do acionamento, custo do motor e a necessidade de o mesmo satisfazer as necessidades físicas da carga. Os motores mais usados em bicicletas elétricas são os motores CC, Excitação de Imãs Permanentes e de Relutância (ARAÚJO, 2012).

2.2.1 Motor CC Escovado

O motor CC possui alimentação em corrente contínua, as fontes primárias de alimentação podem ser baterias, placas solares ou fontes DC. Atualmente, o desenvolvimento das técnicas de acionamentos de corrente alternada (CA) e a viabilidade econômica têm favorecido a substituição dos motores de corrente contínua (CC) pelos motores de indução

acionados por inversores de frequência (SIEMENS, 2006). As principais vantagens e desvantagens do motor CC são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1- Vantagens e desvantagens de motores CC escovados.

Vantagens	Desvantagens
Elevado torque de partida	Alto custo (comparado a motores de indução)
Ampla variação de velocidade	Possuem maior volume para atingir mesma potência que um motor de indução
Facilidade de controle de velocidade (controle de tensão)	Necessidade de manutenção periódica (desgaste das escovas)
Conversores CA/CC acessíveis e de baixo custo	Arcos e faíscas devido à comutação (não devem ser aplicados em ambientes potencialmente explosivos)

Fonte: Com adaptação de Araújo (2012).

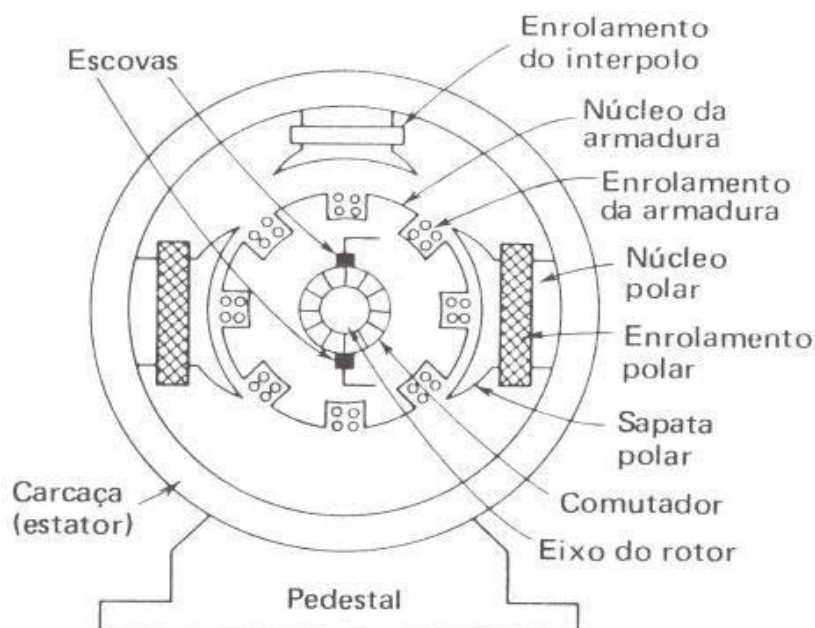
Pressupondo uma visão macro quanto às características construtivas dos motores CC é possível separá-lo em duas partes principais: o estator e o rotor.

Rotor é o nome que se dá a parte móvel do motor CC, onde este ainda pode ser dividido em armadura e comutador, em motores escovados. Segundo Kosow (2005) o rotor possui quatro funções principais: (1) permite rotação para ação motora; (2) em virtude da rotação, produz a ação de chaveamento necessária para a comutação; (3) contém os condutores que induzem a tensão ou providenciam um torque eletromagnético; (4) providenciam uma faixa de baixa relutância para o fluxo magnético.

O estator é o nome que se dá a parte fixa do motor CC. Intrínseco ao estator fazem parte o enrolamento de campo, escovas, interpolos, sapatas polares e carcaça. O estator é responsável pelo suporte da estrutura do motor e faixa de retorno do fluxo de baixa relutância (carcaça), fonte de fluxo magnético para geração dos polos norte e sul do motor (enrolamento de campo), que são fixados de forma equidistante pelas sapatas polares, que possuem forma curva e mais larga na extremidade próxima a armadura, esta forma é necessária para reduzir os efeitos de armadura e distribuir uniformemente as linhas de fluxo magnético (KOSOW, 2005).

A Figura 10 apresenta os principais componentes de um motor CC escovado.

Figura 10- Corte em máquina CC escovada.



Fonte: Kosow (2005).

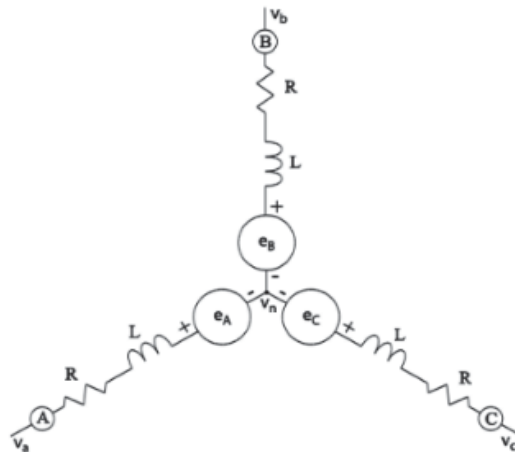
2.2.2 Motor BLDC

O motor BLDC é um tipo de motor síncrono, cujos campos magnéticos gerados pelo estator e o rotor oscilam em mesma frequência, não ocasionando escorregamento como nos motores de indução. Comumente possuem alimentação trifásica e as bobinas estatórias dispostas em configuração estrela, apesar de sua fonte primária ser em CC. (MICROSHIP, 2003). O princípio de funcionamento pode ser explicado através das forças de atração e repulsão magnética entre os ímãs permanentes do rotor e eletroímãs do estator. Tratando-se de enrolamentos reais, toda e qualquer bobina apresentará uma parcela resistiva referente a resistência do fio utilizada para confecção da indutância L , dito isso, o modelo e configuração do motor BLDC pode ser observado na Figura 11.

O nome próprio do motor induz-nos a algumas afirmações referentes a aspectos construtivos e características do mesmo. O motor BLDC não possui escovas ou anéis comutadores, tornando inevitável a necessidade de um acionamento eletrônico externo para ativar a sequência correta de bobinas para geração de torque. A definição da sequência correta de acionamento das bobinas depende da posição atual do rotor, sendo necessário um sinal de realimentação de sensores ao sistema de controle. Os principais artifícios utilizados para detectar a posição do rotor são através do monitoramento da FCEM ou através de sensores de

sensores de efeito hall. São necessários três sensores hall para fazer o mapeamento total do rotor, onde cada sensor é responsável por 120 graus de verificação. O acionamento do motor BLDC será aprofundado nos próximos tópicos do presente trabalho.

Figura 11- Configuração estrela motor BLDC.



Fonte: Com adaptação de Automoveis Elétricos Blogspot (2002).

O motor BLDC pode ser dividido em duas partes quanto a questões construtivas: o rotor e o estator. Os demais componentes estão inseridos intrinsecamente às duas partes constituintes. Os componentes construtivos de um motor BLDC podem ser observados na Figura 12.

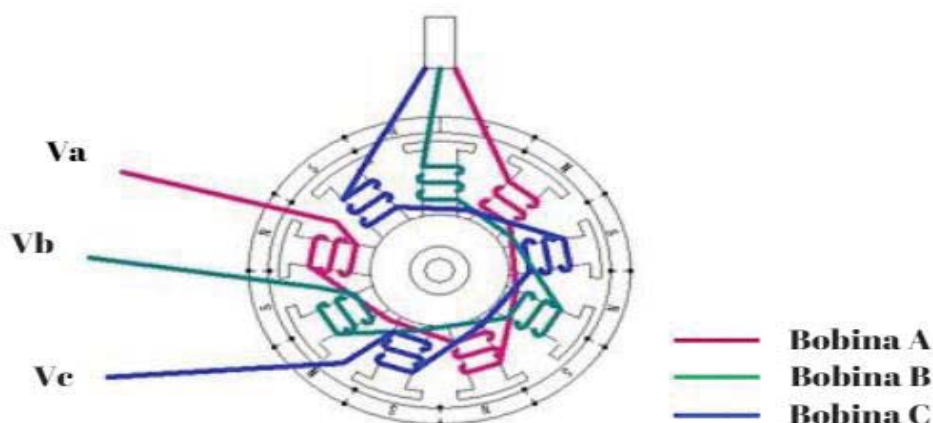
Figura 12- Componentes de um motor BLDC.



Fonte: Com adaptação de Nidec (2018).

O estator de um motor BLDC consiste em lâminas de aço empilhadas e bobinas dispostas em ranhuras axialmente cortadas ao longo da periferia interna. Possuem estator projetado para formar uma FCEM em formato trapezoidal, característica que distingue dos motores síncronos de ímãs permanentes (PMSM) que possuem FCEM senoidal (MICROSHIP, 2012). A alimentação do motor é realizada através dos terminais dos enrolamentos estáticos disponibilizados ao usuário. Comumente apenas três terminais são disponibilizados já que o rotor possui estrutura trifásica conectada em estrela. Caso haja mais de um enrolamento por fase estes são ligados em série, conforme Figura 13.

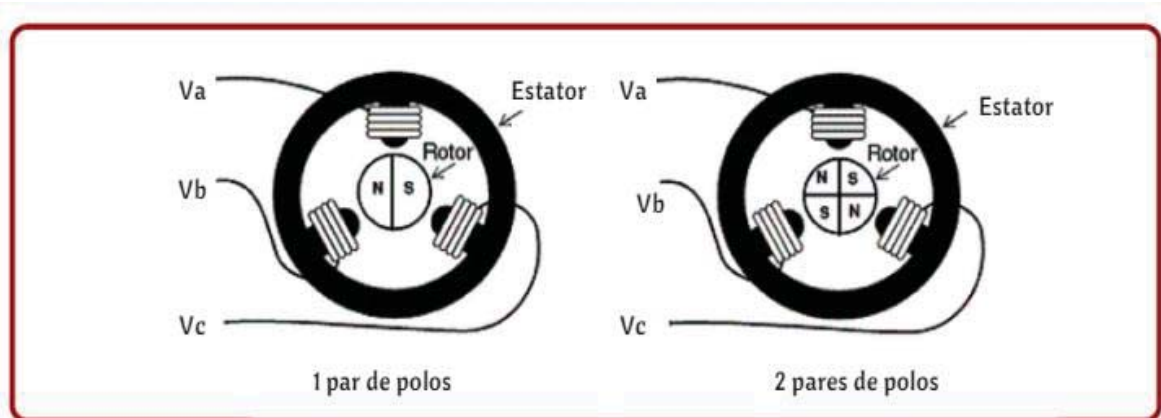
Figura 13- Ilustração rotor e bobinas estatórias motor BLDC.



Fonte: Com adaptação de Merwe (2013)

O rotor é composto por ímãs permanentes e pode apresentar de 2 a 8 polos. Ímãs de ferrite são tradicionalmente usados para confecção de ímãs permanentes, apesar de possuírem baixa densidade de fluxo para um determinado volume em contraste o material possui alta densidade magnética por volume, fato que pode diminuir as dimensões do rotor e mantém sua capacidade de proporcionar um mesmo conjugado (MICROSHIP, 2012). A Figura 14 apresenta duas configurações de rotor constituídos por ímãs permanentes, sendo a primeira com 1 par de polos de ímãs permanentes e a segunda com 2 pares de polos de ímãs permanentes.

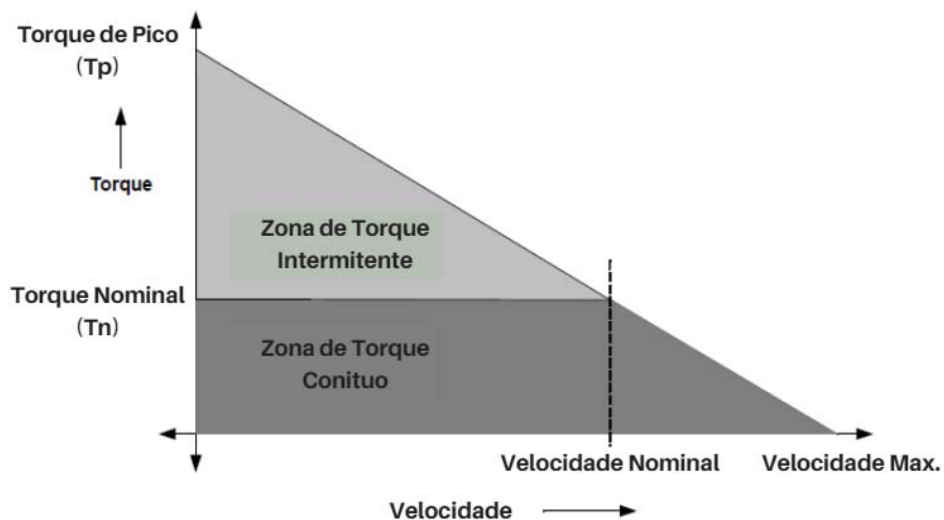
Figura 14- Configurações rotóricas motor BLDC.



Fonte: Com adaptação Braga (2018).

A Figura 15 apresenta algumas características de torque e velocidade do motor BLDC, no qual dois parâmetros de torque serão analisados, o T_p (Torque de pico) e o T_n (Torque nominal). O motor apresenta características de torque constante até a velocidade nominal e em operações contínuas. Em casos de partidas em sequência, reversões de rotação com carga no eixo, há uma maior demanda de torque durante a partida, necessário para vencer a inércia da carga e do próprio rotor, ocasionando um deslocamento da curva e a criação de duas regiões distintas de avaliação: zona de torque contínuo e zona de torque intermitente (MICROSHIP, 2012).

Figura 15- Gráfico de torque por velocidade motor BLDC.



Fonte: Com adaptação Microship (2012).

O motor BLDC é o motor mais utilizado em bicicletas elétricas, apesar de ser um motor mais caro para fornecer a mesma potência que um motor de indução, possui carcaça reduzida e menor consumo, fato motivado pela geração de campo magnético por ímãs permanentes no rotor. Alguns modelos de motores BLDC para bicicletas elétricas, alocam o cassete presente em bicicletas normais no eixo do motor, desta forma o ciclista pode efetuar a troca de marcha da bicicleta, fato que auxilia o ciclista durante as pedaladas.

A Figura 16 apresenta o conjunto motor BLDC e roda o comumente utilizado em bicicletas elétricas.

Figura 16- Motor BLDC utilizado em bicicletas elétricas.



Fonte: Yescom (2015).

Os principais fatores para escolha do motor BLDC para o projeto de uma bicicleta elétrica pode ser observado no quadro comparativo entre os motores BLDC e Motor CC escovado, conforme Quadro 2.

Quadro 2- Quadro comparativo motor BLDC versus motor CC escovado.

Características	Motor BLDC	Motor CC Escovado
Custo Inicial	Elevado	Elevado
Comutações	Necessidade de circuito eletrônico, identificação da posição do rotor através de sensor Hall ou FCEM (sensorless)	Comutação de escovas ou anéis coletores.
Manutenção Periódica	Baixa ou nenhuma manutenção.	Manutenção periódica necessária, desgaste das escovas.
Durabilidade	Alta	Baixa
Rendimento	Alto (75%)	Baixo (30%)
Potência de Saída /Tamanho do Motor	Alta. Os motores BLDC apresentam grande relação de potência versus tamanho, pois o rotor é constituído de ímãs permanentes, diminuindo perdas no caminho.	Moderada. Os motores escovados apresentam perdas significativas, já que o rotor e estator são constituídos por bobinas, ainda se acrescenta as perdas nas escovas.
FCEM	Trapezoidal	Retangular

Fonte: Com adaptação de Araújo (2012).

2.3 CONTROLE DE MOTORES BLDC

A principal dificuldade imposta na implementação de um motor BLDC se deve a complexidade de seu acionamento em comparação a motores de indução e motor CC escovados, pois necessita de um circuito eletrônico de acionamento. Algumas variáveis de entrada devem ser obrigatoriamente analisadas para o correto funcionamento do motor.

Existem dois métodos de controle de motores BLDC, o controle utilizando sensores de posição e controle *sensorless*, ambas as opções remetem aos meios utilizados para detectar a posição do rotor. Nesta seção serão apresentadas as formas de detecção da posição do rotor, a estrutura do circuito de acionamento do motor e métodos de controle de velocidade do motor BLDC utilizando um conversor boost.

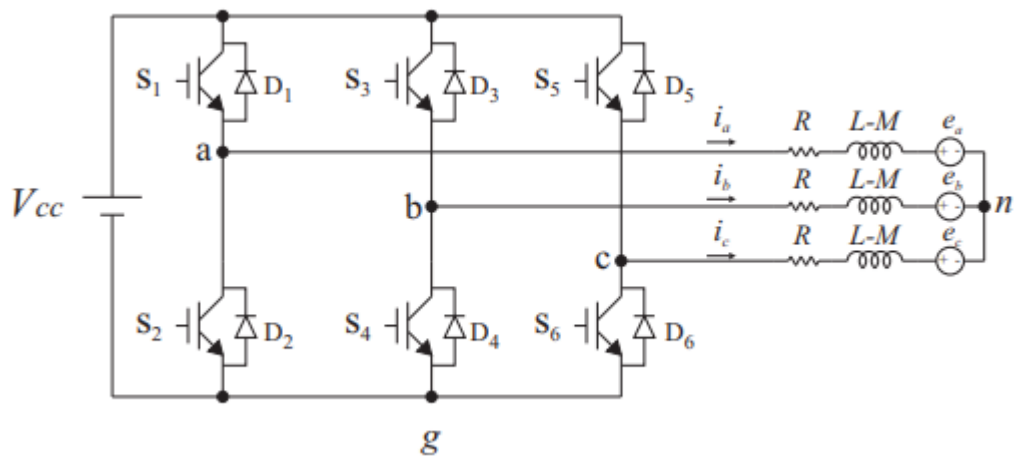
2.3.1 ESTRUTURA DE ACIONAMENTO

O acionamento do motor é realizado a partir de um conversor CC/CA conhecido como inversor de tensão. A função de um inversor consiste em converter uma tensão de entrada CC em uma tensão de saída CA simétrica de amplitude e frequência desejada. A tensão de saída

pode ser variada alterando a tensão CC de entrada ou caso a tensão de entrada seja fixa e não controlável, uma tensão variável pode ser obtida pela variação do ganho do inversor, utilizando modulação por largura de pulso (RASHID, 2014).

No caso de motores BLDC o conversor CC/CA deve possuir estrutura trifásica, constituída por seis transistores de potência que podem ser MOSFET's ou IGBT's. A definição sobre qual chave utilizar deve ser justificada pela potência necessária a ser fornecida ao motor. A estrutura do inversor trifásico é apresentada na Figura 17.

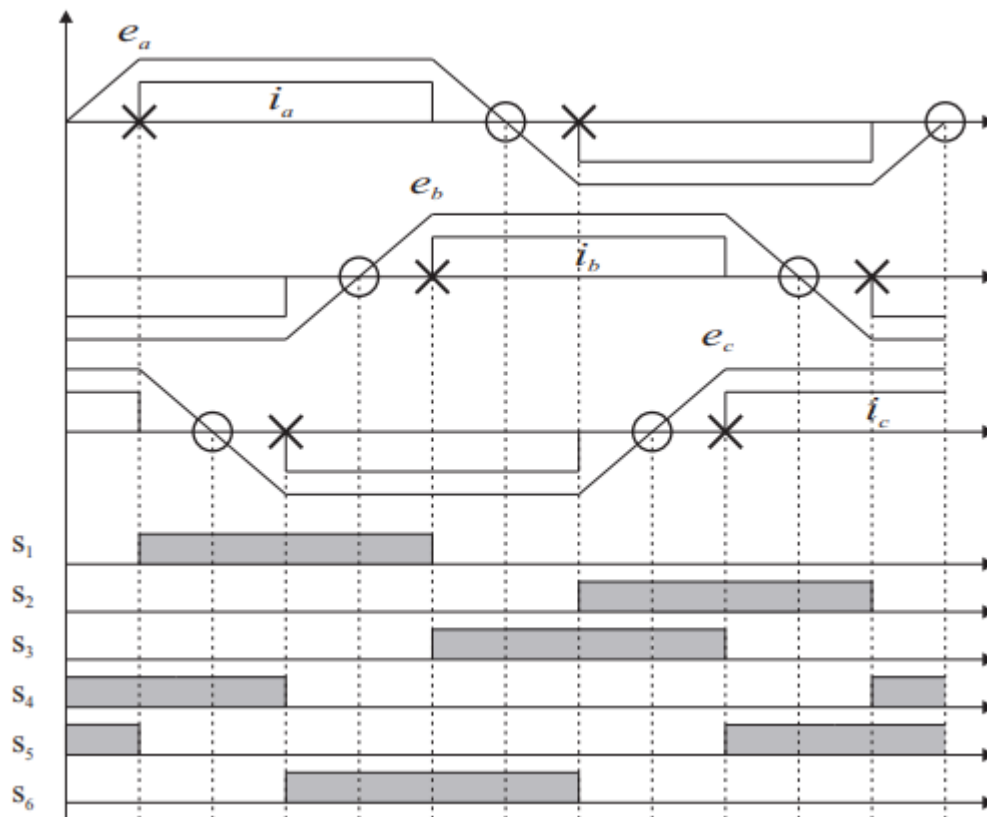
Figura 17- Estrutura de um inversor trifásico.



Fonte: Baratieri (2011).

Para motores BLDC apenas duas bobinas devem ser energizadas ao mesmo tempo, dessa forma o acionamento do inversor trifásico será baseado no acionamento em 120° . Observa-se na Figura 18 os sinais de acionamento das chaves do inversor trifásico em condução de 120° . Os sinais de acionamento S1, S2, S3, S4, S5 e S6 apresentados na Figura 18 referem-se as chaves da Figura 17.

Figura 18- Sequência de acionamento inversor trifásico para condução em 120°.



Fonte: Baratieri (2011).

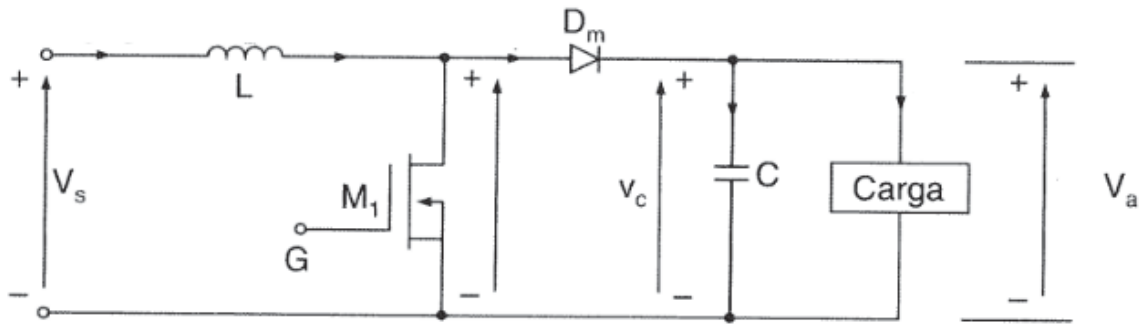
2.3.2 CONTROLE DE VELOCIDADE

O controle de velocidade em motores BLDC sob tensão de barramento CC é geralmente implementado sob duas estratégias de controle: controle de velocidade através da síntese direta da tensão de fase do motor através da modulação PWM e a outra estratégia baseada em um sistema de multimalhas. (BARATIERI, 2011). No presente projeto a técnica de controle será baseada na manutenção da tensão do barramento CC utilizando conversores choppers elevador de tensão. Variando a tensão média aplicada aos terminais do motor BLDC pode-se variar a velocidade do mesmo.

Os conversores choppers são utilizados em aplicações onde há a necessidade de converter uma fonte de tensão CC fixa em uma fonte de tensão CC variável. Um chopper pode ser considerado o equivalente CC de um transformador CA com relação de espiras continuamente variável (RASHID, 2014). O chopper que possui características de elevação de tensão é conhecido como regulador boost, onde a tensão de saída do conversor é maior que a

tensão de entrada. O circuito básico de um conversor boost aplicado a uma carga resistiva R, pode ser observado na Figura 19.

Figura 19- Circuito conversor boost.



Fonte: Rashid (2014).

A operação do circuito pode ser dividida em dois modos. O modo 1 inicia-se quando o transistor M1 entra em condução. A corrente de entrada flui através do indutor L carregando-o. O modo 2 inicia quando o transistor M1 é desligado. A corrente que antes percorria apenas o indutor L e o transistor Q1 fluirá também por L, C, carga e diodo Dm. A corrente armazenada no indutor durante modo 1 é entregue a carga somada a corrente que flui no modo 2. A corrente do indutor cai até que o transistor M1 entre novamente em condução no próximo ciclo (RASHID, 2014).

A tensão média de saída do conversor boost pode ser elevada com o aumento do ciclo de trabalho da modulação PWM aplicado ao transistor M1. O ciclo de trabalho é a relação entre o tempo em alta do sinal e período do sinal aplicado. Segundo Rashid (2014) a tensão média de um sinal periódico e pode ser encontrada a partir da equação (1).

$$VMED = \frac{1}{T} \int_0^{t1} Vi dt \quad (1)$$

Onde:

T é o período do sinal.

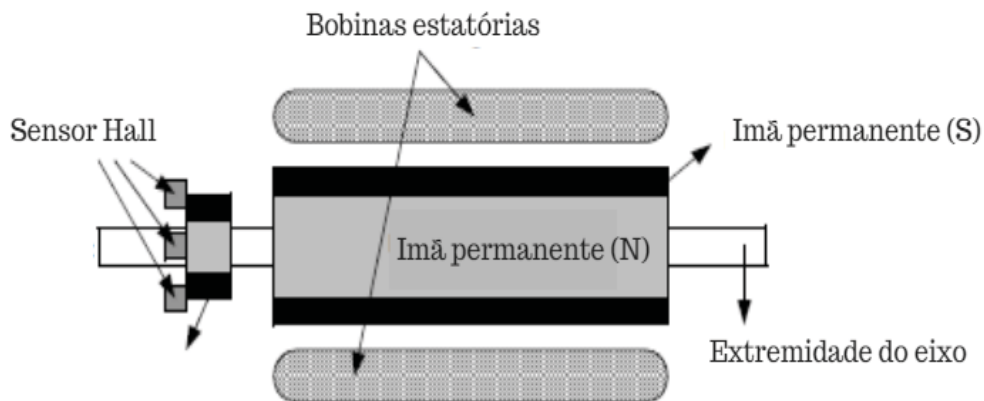
t1 é tempo em alta do sinal.

e Vi é a tensão de entrada aplicada ao conversor boost.

2.3.3 CONTROLE UTILIZANDO SENSORES DE POSIÇÃO

O controle de motor BLDC utilizando sensores de posição baseia-se na maneira de detectar a posição do rotor em relação as bobinas estatóricas do mesmo. Segundo KENJO e NAGAMORI, (1985) os principais meios utilizados para detectar a posição do rotor em motores BLDC remetem a utilização de sensores de efeito hall, fototransistores ou sensores indutivos. Comumente três sensores hall são alojados na periferia interna do motor, identificando a posição do rotor a partir da interação com o campo magnético dos ímãs que formam o rotor. O processo de integração dos sensores hall no motor é uma atividade complexa, pois qualquer desalinhamento dos mesmos com os ímãs constituintes do rotor pode ocasionar em um erro na determinação da posição do rotor (MICROCHIP, 2003). A Figura 20 apresenta um corte transversal em um motor BLDC que utiliza sensores hall.

Figura 20- Corte transversal em motor BLDC com sensores hall acoplados.



Fonte: Com adaptação de Microchip (2003).

O par de bobinas a ser comutado varia de acordo com a resposta apresentada pelos sensores hall. O Quadro 3 apresenta a sequência de acionamento de motores BLDC, informando a resposta dos sensores hall e o par de bobinas que deve ser comutado. É de extrema importância a correta sincronização da comutação das bobinas com as respostas obtidas dos sensores hall para a correta produção de conjugado eletromagnético. As colunas de nome Chave 1 e Chave 2 do quadro em questão se referem ao par de chaves que deve ser acionado para cada resposta obtida dos sensores hall. A polaridade de cada fase +V, -V E NC refere-se a comutação de uma das fases, para o terminal positivo da fonte, negativo da fonte e não conectado a nenhum terminal, respectivamente.

Quadro 3 - Sequência de acionamento motor BLDC.

Passo	Estado lógico sensores hall			Polaridade			Chaves a serem acionadas	
	Hall A	Hall B	Hall C	Fase A	Fase B	Fase C	Chave 1	Chave 2
1	1	0	1	+V	-V	NC	S1	S4
2	1	0	0	NC	-V	+V	S4	S5
3	1	1	0	-V	NC	+V	S2	S5
4	0	1	0	-V	+V	NC	S2	S3
5	0	1	1	NC	+V	-V	S3	S6
6	0	0	1	+V	NC	-V	S1	S6

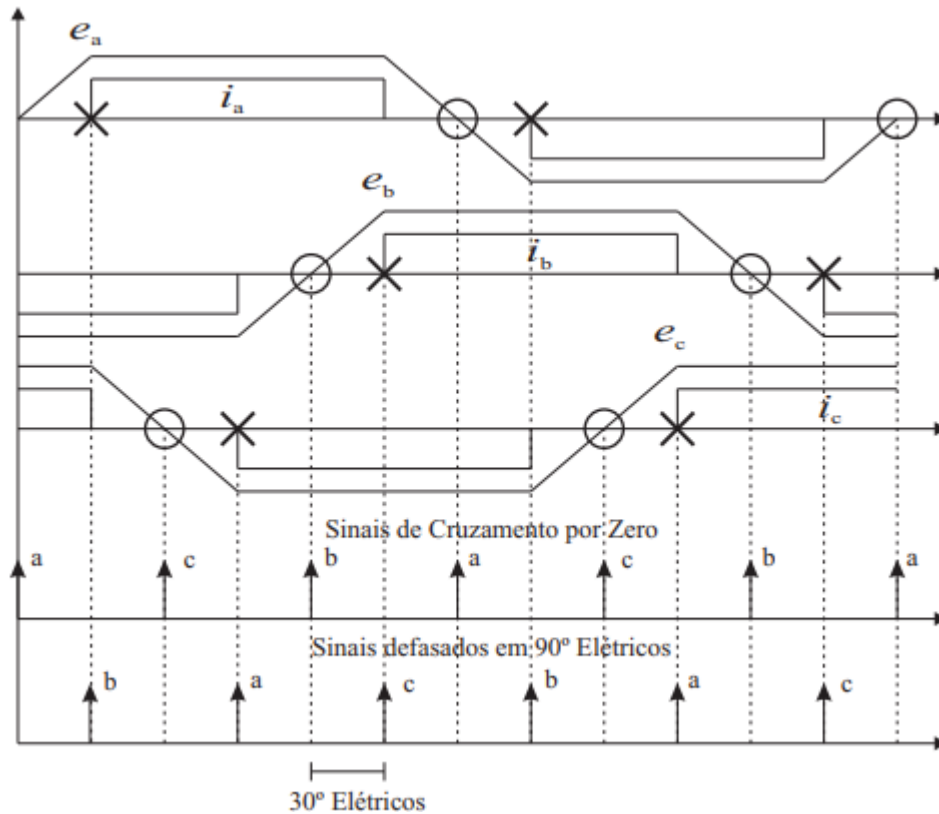
Fonte: Com alteração de Microship (2002).

Os sinais de acionamento S1, S2, S3, S4, S5 e S6 referem-se apresentados no Quadro 3 referem-se as chaves da Figura 17.

2.3.4 CONTROLE SENSORLESS

O controle sensorless em motores BLDC baseia-se na análise da FCEM, que possui formato trapezoidal. Através da FCEM pode-se identificar a passagem por zero da corrente de fase, exato momento que deve haver a troca do par de bobinas o ser comutado (AKIN *et al.*, 2011). Observa-se na Figura 21 um esboço dos sinais da FCEM sobrepostas aos sinais de correntes de fase do motor com indicações dos momentos de passagem por zero de cada fase.

Figura 21- Análise de sinais da FCEM no controle sensorless.



Fonte: Baratieri (2011).

Analisando a Figura 21, observa-se que a passagem por zero de cada fase ocorre a cada 60° elétricos e que apenas duas bobinas são energizadas por vez, dessa forma a análise do sinal da FCEM ocorre na bobina que está em estado não conectada. O valor da FCEM também pode ser obtido inserindo uma carga resistiva em Y nos terminais do motor BLDC, restaurando o terminal central neutro da ligação que no motor é inacessível. O valor da FCEM de cada fase pode ser obtido pelas Equações (2), (3) e (4).

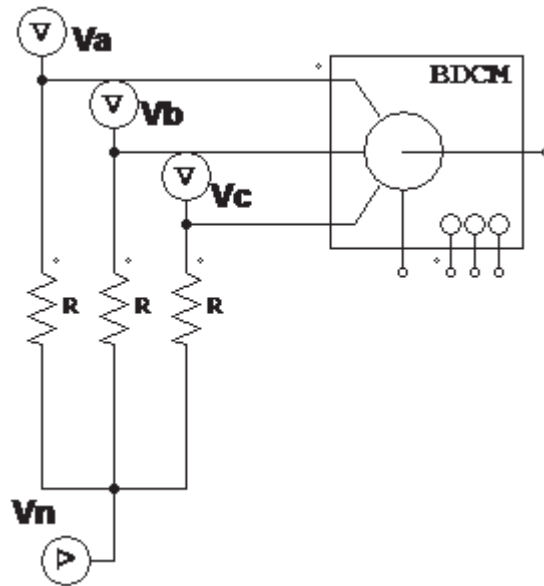
$$FCEM_A = V_a - V_n \quad (2)$$

$$FCEM_B = V_b - V_n \quad (3)$$

$$FCEM_C = V_c - V_n \quad (4)$$

A Figura 22 identifica os pontos de tensão mencionados nas equações acima, além de demonstrar a carga resistiva inserida aos terminais do motor BLDC.

Figura 22- Esquemático de identificação posição do rotor método sensorless.



Fonte: O Autor (2018).

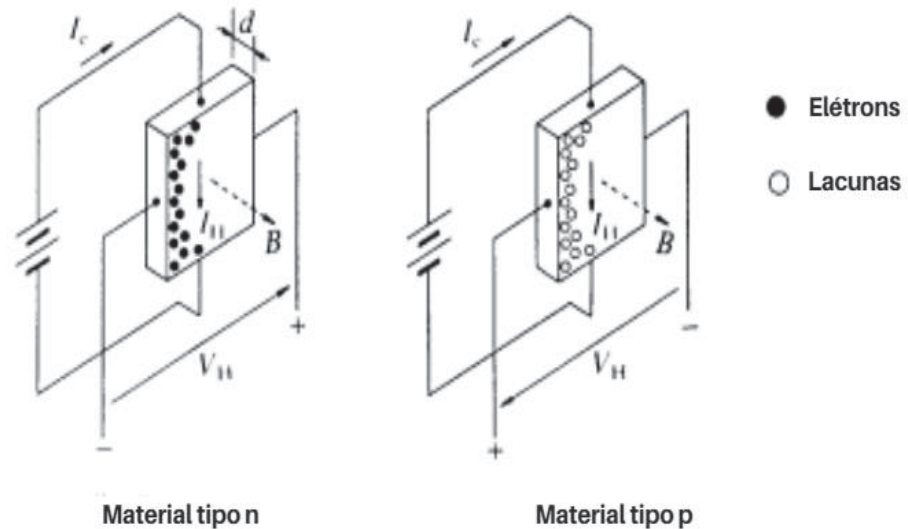
O controle *sensorless* pode ser muito atrativo na indústria por seu baixo custo de implementação, já que não há utilização de sensores no processo. O grande problema encontra-se nas baixas velocidades e na partida do motor, pois a FCEM possui magnitude proporcional à velocidade angular do rotor. Dessa forma, um procedimento inicial de partida deve ser realizado até o motor atingir uma velocidade que apresente um FCEM confiável para análise (BARATIERI, 2011). No método de controle sensorless a partida ocorre em malha aberta até o momento em que o mesmo consiga atingir uma velocidade significativa para tornar a análise da FCEM possível.

2.4 SENSOR DE EFEITO HALL

O sensor de efeito hall tem funcionamento baseado na força de Lorentz e efeito hall. Quando um material semicondutor carregado sofre a ação de um campo magnético surge uma força (Força de Lorentz) perpendicular às cargas positivas e negativas que tendem a se deslocar para faces distintas do material, ocasionando a formação de um campo elétrico de direção distinta a força de Lorentz. A diferença de potencial entre as duas forças é conhecida como tensão hall (VH), que varia proporcionalmente a intensidade do campo magnético aplicado ao material semicondutor (AGUIRRE, 2013).

A direção de VH pode variar de acordo se a construção do semiconductor for de tipo n ou tipo p, conforme Figura 23.

Figura 23- Sensor de efeito hall em semicondutores tipo n e tipo p.



Fonte: Com adaptação de Aguirre (2013).

Kenjo e Nakamori (1985) afirmam que a tensão hall (Vh) pode ser obtida a partir da Equação (5).

$$VH = \frac{1}{d} \cdot B \cdot Ic \cdot Rh \quad (5)$$

Onde:

Rh é a constante hall (m^3C^{-1}),

Ic é a corrente elétrica circulante no material (A),

B é a densidade de fluxo magnético (T)

d é espessura do semiconductor (m)

Em motores BLDC comumente três sensores halls são instalados no estator do motor, quando o sensor detecta a presença de um campo magnético atuante sobre ele, sua saída sofrerá uma variação de nível lógico baixo para nível lógico alto. O sensor hall pode ser utilizado em ambientes severos como acúmulo de poeira ou com presença de gases, já que o sensor está encapsulado sem contato com o ar ou possíveis resíduos.

2.5 BATERIA

As baterias podem ser encontradas em uma infinidade de aparelhos eletrônicos seja de aplicações em áreas hospitalares, automotivas ou industriais. Pode ser considerada a principal fonte de alimentação para aparelhos que não possuem ligação intermitente com a rede elétrica.

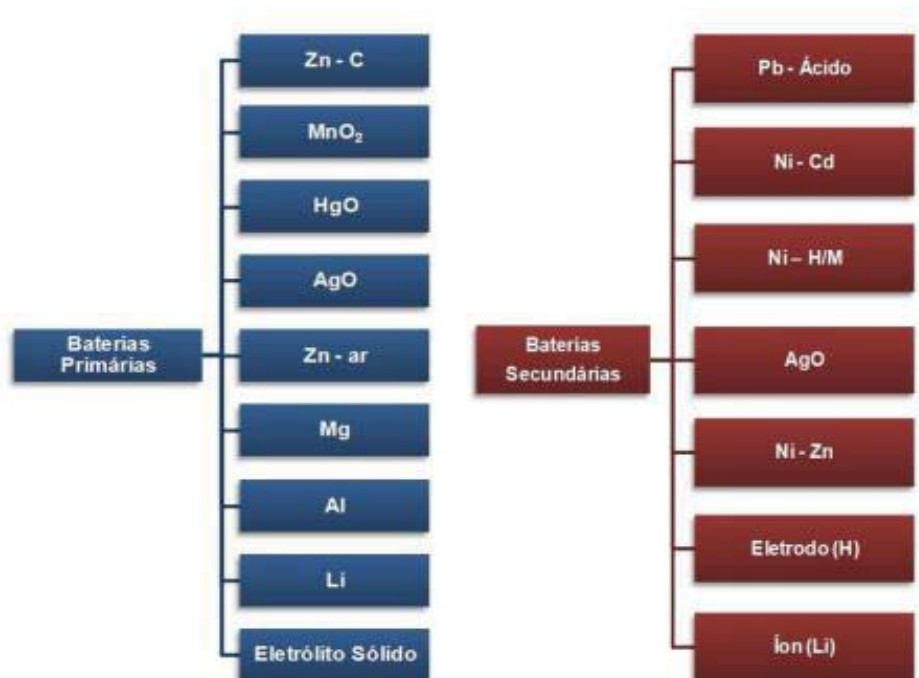
O termo bateria foi introduzido em 1748 por Benjamin Franklin, antes mesmo da invenção da pilha de Alessandro Volta criada em 1800. O termo referia-se a uma associação de capacitores, que eram utilizados para armazenamento de energia gerada por máquinas eletrostáticas e posteriormente funcionavam como fonte de alimentação, apesar de possuírem baixa autonomia. Atualmente o termo bateria é utilizado para identificar células voltaicas interconectadas (CARNEIRO *et al.*, 2017). De fato, a bateria pode ser visualizada como uma associação de pilhas, já que as mesmas possuem apenas uma célula, tal associação proporciona maior capacidade de armazenamento.

A pilha de Alessandro Volta consiste em metais de dois tipos separados por panos umedecidos em sal ou ácido fraco. Os discos de metal ficavam empilhados, por isso o nome pilha. Os primeiros metais usados por Volta foram a prata e o zinco (CARNEIRO *et al.*, 2017).

As baterias primárias são definidas como um conjunto de células que não podem ser sujeitas a inversões eletrolíticas, seus reagentes não podem ser recolocados em suas posições e capacidades iniciais com a passagem de uma corrente elétrica no seu interior, ou seja, não são recarregáveis. As baterias secundárias diferentemente das baterias primárias realizam inversões eletrolíticas quando em ação de uma corrente elétrica interna, sendo possível então, realizar a recarga da mesma (CARNEIRO *et al.*, 2017). Observam-se na figura 23 as principais baterias primárias e secundárias.

As baterias podem ser classificadas em primárias e secundárias, sendo que as baterias de chumbo ácido e íon lítio são as mais utilizadas. Na Figura 24 observam-se as principais baterias primárias e secundárias.

Figura 24- Principais baterias primárias e secundárias.



Fonte: Carneiro *et al.* (2017).

2.5.1 Bateria de chumbo ácido

Inventadas em 1859 pelo físico francês Gaston Planté, as baterias de chumbo-ácido foram as primeiras baterias de uso comercial. Durante os anos 70, pesquisadores desenvolveram uma bateria de chumbo ácido capaz de operar em qualquer posição sem qualquer vazamento de líquido. O eletrólito líquido foi substituído por separadores umedecidos e invólucro selado (MICHELINI, 2017). Alguns modelos de baterias podem ter em sua construção a presença de uma válvula reguladoras da pressão interna, que é responsável pela expurgação dos gases gerados pelas reações químicas durante os processos de carga e descarga da bateria. Os componentes básicos constituintes de uma bateria podem ser observados na figura 129.

Segundo Michelini (2017), a capacidade nominal de uma bateria é uma medida de capacidade de armazenamento energético, ou seja, o quanto de energia a bateria pode fornecer em um processo de descarga. A capacidade nominal de uma bateria é definida a partir da corrente fornecida pela mesma em um período de tempo, conforme Equação (6).

$$C = I \cdot t \text{ (Ah)} \quad (6)$$

Onde:

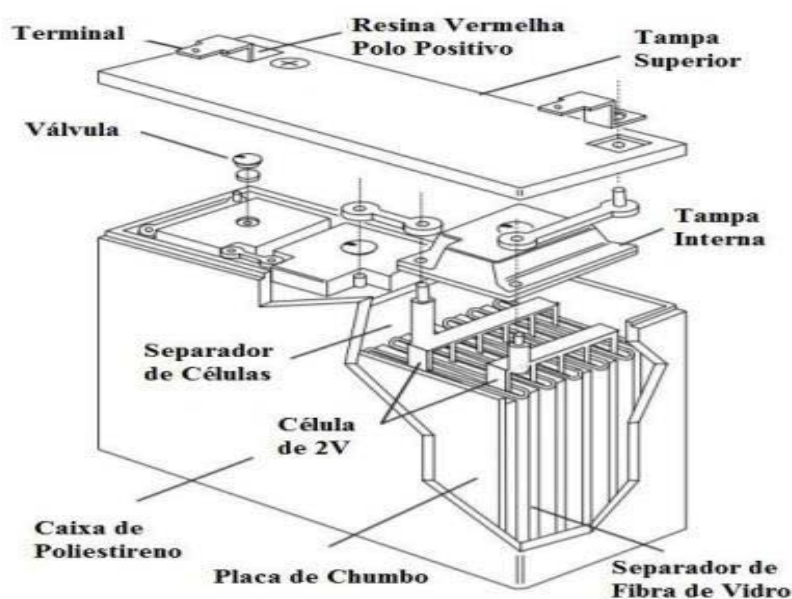
C é a capacidade da bateria (Ah).

I é a corrente de descarga da bateria (A).

t é o tempo de descarga (h).

São observados na Figura 25 os principais componentes constituintes de uma bateria de chumbo ácido.

Figura 25- Componentes de uma bateria de chumbo ácido.



Fonte: Michelini (2017).

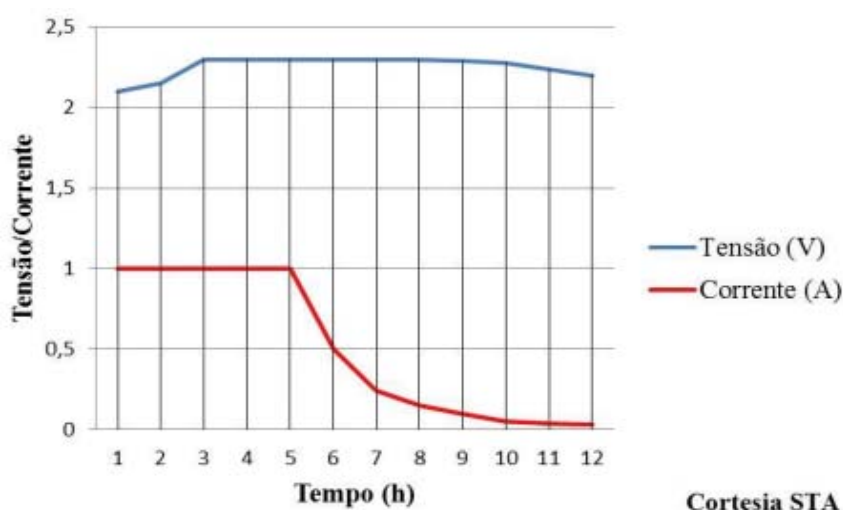
As baterias de chumbo ácido dividem-se em duas designações: SLA (*sealed lead acid* – bateria selada de chumbo-ácido) e VRLA (*valve regulated lead acid* – bateria de chumbo ácido regulada por válvula).

As SLA comumente são aplicadas a situações que há necessidade de mobilidade do aparelho a ser alimentado e necessite menor potência de acionamento, já que possuem uma capacidade de armazenamento que vai de 0,2 Ah até 30 Ah. As VRLA são mais utilizadas em

aplicações estacionárias e possuem capacidade de armazenamento de 30 Ah até milhares de Ah (MICHELINI, 2017).

A carga de uma bateria de chumbo ácido pode variar entre 12 a 16 horas, entretanto elevando a corrente de carga e realizando um método de carga em multiestágios pode diminuir-se o tempo de carga para até 10 horas. Durante as primeiras 5 horas de carga em corrente constante a bateria atinge 70% de sua capacidade de carga, os 30% restantes são realizados a partir de carga lenta em módulos menores de correntes, esse estágio é essencial para o bem-estar da bateria. Outra forma de aumentar a vida útil da bateria é respeitando o limite de tensão por célula durante o processo de carga da bateria, sendo que os valores máximos devem ser de 2,30V a 2,45 V por célula. (MICHELINI, 2017). O gráfico da Figura 26 demonstra o processo descrito acima.

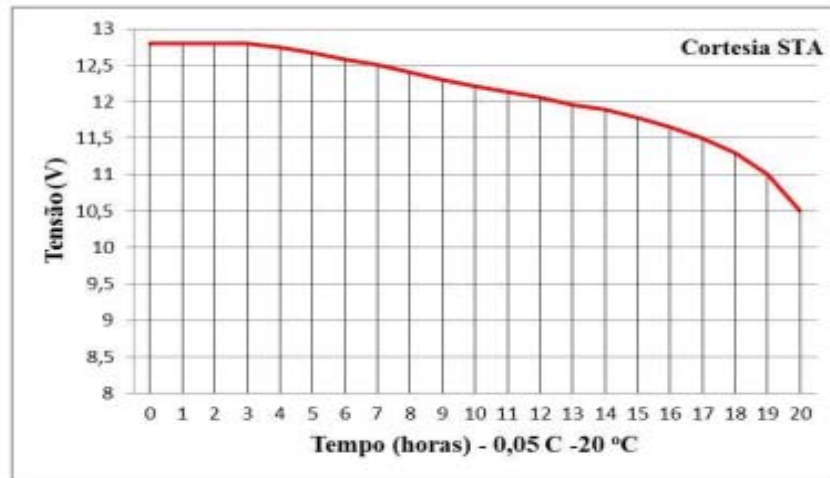
Figura 26- Gráfico de carga de uma SLA.



Fonte: Michelini (2017).

A descarga de uma bateria de chumbo ácido comumente é taxada pelo fabricante em 0,005% da capacidade nominal da mesma equivalente a uma descarga de 20 horas. O ciclo de vida de uma bateria selada está diretamente relacionado à profundidade de descarga. Deve-se levar em conta a temperatura de trabalho da mesma, a 25 °C e descarregando-a completamente, a bateria suporta de 150 a 100 ciclos de carga e descarga. É essencial que no processo de descarga cada célula não reduza sua tensão a valores menores que 1,75V e que a mesma não seja armazenada descarregada. (MICHELINI, 2017). Observa-se na figura 27 o gráfico de descarga de uma bateria de chumbo ácido, quando a mesma fornece a carga uma corrente de 0,05 vezes menor que a capacidade nominal da bateria.

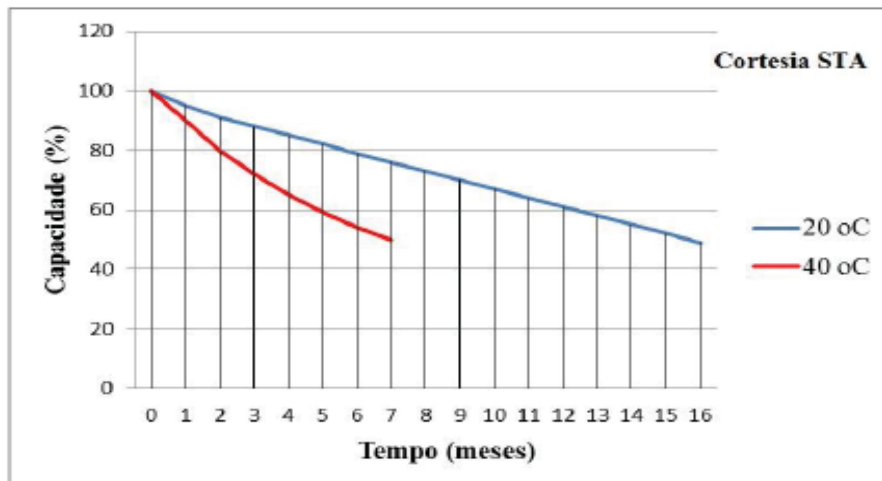
Figura 27- Gráfico de descarga de uma SLA.



Fonte: Michelini (2017).

Uma bateria de chumbo ácido é uma opção confiável e de baixo custo capaz de atender as necessidades de projeto em diversas aplicações. Quando realizado um controle adequado nos processos de carga e descarga e uma armazenagem em temperatura correta, eleva-se a vida útil da mesma, podendo atingir até 400 ciclos. Na Figura 28 observa-se a variação da capacidade da bateria em relação ao tempo em duas temperaturas de armazenagem diferentes.

Figura 28- Gráfico de variação de capacidade da bateria em relação ao tempo.



Fonte: Michelini (2017).

2.5.2 BATERIA DE ÍON LÍTIO

As baterias de íon lítio são utilizadas principalmente em aplicações que se necessita alta densidade de energia e peso baixo, já que o lítio é mais leve de todos os metais usados em baterias e possuem o maior potencial eletroquímico além de fornecer maior densidade de energia por peso (MICHELINI, 2017).

Durante processo de carga de uma bateria de íon lítio não há necessidade de se realizar carga completa da mesma além de não ser necessário que a bateria esteja totalmente descarregada para efetuar recarga. Esses fatores fazem com que a mesma não possua o efeito memória, popularmente conhecido como “vício” da bateria.

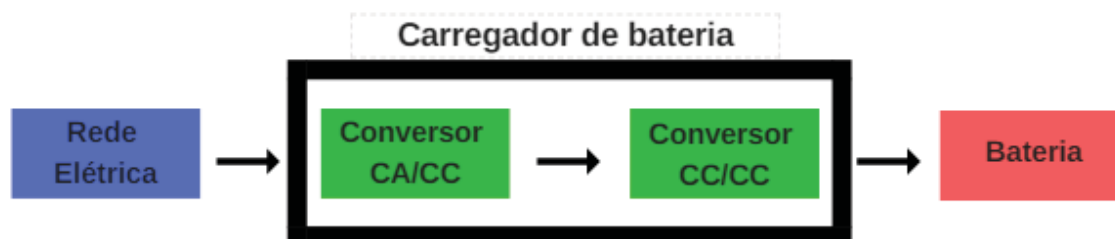
Apesar de suas vantagens, as baterias de Li-Ion apresentam várias inconveniências. São muito frágeis e requerem um circuito de proteção durante o processo de carga, já que a tolerância de variação de tensão por célula é de aproximadamente $\pm 0,005$ V. A aplicação de uma sobretensão nos terminais da bateria faz com que a mesma sofra aquecimento excessivo fazendo com que os materiais constituintes se tornam agentes oxidantes, perdendo estabilidade e liberando oxigênio (MICHELINI, 2017). Além disso, as baterias de íon lítio possuem elevado preço de venda, fato que pode ser determinante na escolha de uma bateria em projetos que há necessidade de ser realizado com redução de custos.

As baterias de Li-Ion são as mais utilizadas em bicicletas elétricas, motivadas principalmente pela sua grande densidade de energia da bateria e o baixo peso, fato que diminui o peso da bicicleta e conseqüentemente eleva-se a autonomia total da bicicleta.

2.6 CARREGADOR DE BATERIA DE CHUMBO ÁCIDO

Um carregador de bateria é capaz de recarregar uma bateria secundária através da injeção de uma corrente elétrica contínua em seus terminais. São necessários alguns estágios de potência e conversão de energia para atingir a tensão nominal da bateria ou banco de baterias. A Figura 29 apresenta o diagrama de blocos proposto para um carregador de bateria de chumbo ácido.

Figura 29- Diagrama de blocos de um carregador de bateria.



Fonte: O Autor (2018).

Conversores CA/CC realizam conversão de uma tensão alternada, comumente provinda da rede elétrica, para uma tensão contínua. Esse processo consiste basicamente na utilização de um transformador rebaixador de tensão, ponte retificadora e capacitores de *ripple*. A utilização de um transformador rebaixador é necessária para atender as características de tensão nominal da carga, nesse caso uma bateria, que possui valor de tensão nominal menor que a rede elétrica. Já os conversores CC/CC podem ser utilizados em processos de variação de tensão contínua ou ganhos de corrente.

3 ESPECIFICAÇÃO DO PROJETO

O presente projeto visa desenvolver um sistema eletrônico capaz de realizar o controle de velocidade de um motor BLDC acoplado em uma bicicleta além de monitorar variáveis como velocidade e distância percorrida pela mesma. Portanto, para atingir tal objetivo se faz necessário a utilização de todos os componentes apresentados na Figura 30.

Figura 30- Visão em âmbito geral do projeto.



Fonte: O Autor (2018).

O protótipo conta com um acelerador eletrônico (1) que será o meio por qual o usuário solicitará ao sistema a variação de velocidade do motor BLDC. O motor BLDC (2) utilizado possui potência e tensão nominal de 350W e 36V respectivamente, além de atingir velocidade máxima de até 25 Km/h. O controlador (3) é o circuito eletrônico responsável pelo acionamento do motor BLDC, o mesmo é composto por um conversor boost utilizado para variar a tensão média aplicada ao motor e um ESC de capacidade nominal de corrente de 40 A que é responsável pela interpretação do sinal da FCEM e acionamento do motor BLDC. O fornecimento de energia para todo o sistema será realizado através de uma associação de 3 baterias de chumbo (4) ácido de 12V/7Ah. O protótipo também conta com um aplicativo (5)

desenvolvido para aparelhos celulares de plataforma *Android*, para habilitação do sistema e monitoramento da velocidade instantânea e distância percorrida no último acesso. A comunicação entre o sistema e o aparelho celular é realizada através de um módulo *bluetooth* HC-05. A bicicleta (6) representa o modelo utilizado para desenvolvimento do protótipo, a mesma trata-se de uma bicicleta modelo barra circular da marca Colli. A escolha por este modelo remete ao fato de que a mesma já possui o bagageiro, facilitando assim o alojamento dos componentes na mesma.

4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

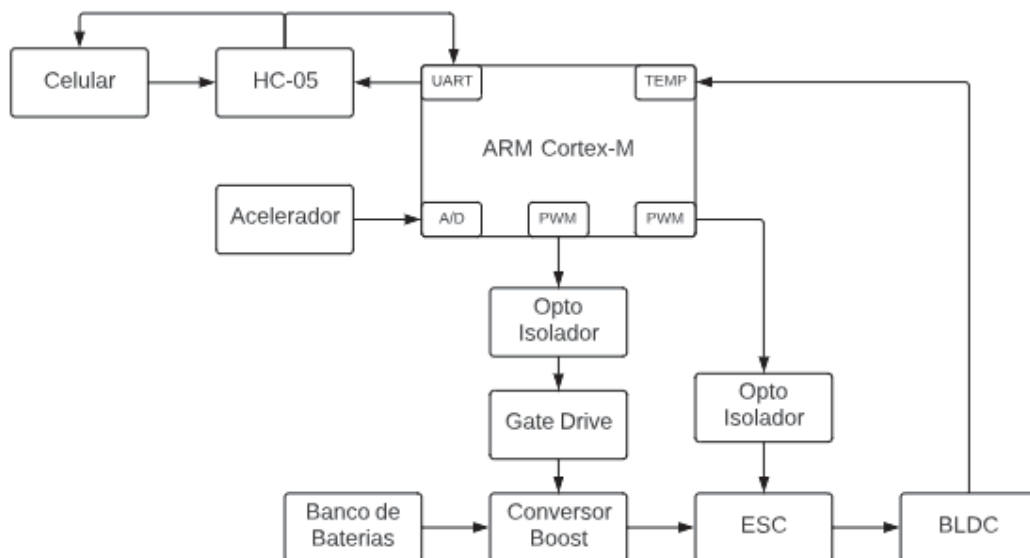
Para abordar todos os componentes do protótipo de forma detalhada este capítulo será dividido em termos de *hardware*, *firmware* e estrutura mecânica. Os tópicos em questão serão apresentados nas subseções a seguir.

4.1 HARDWARE

O *hardware* do projeto pode ser melhor especificado através do diagrama de blocos apresentando na Figura 31. Admite-se que todos os circuitos de hardware utilizado estão apresentados de forma detalhada no Apêndice A.

Observa-se que o microcontrolador é o cerne do projeto, o mesmo é responsável pelo acionamento dos conversores de potência através de dois módulos PWM, interpreta o sinal do sensor hall do motor BLDC através de um temporizador configurado em modo captura e interpreta o sinal do acelerador através de um conversor AD. O módulo UART do microcontrolador é utilizado para enviar os dados via módulo bluetooth HC-05, de velocidade e distância percorrida pela bicicleta além de receber os comandos de habilitar e desabilitar o sistema em questão. Observa-se ainda que optoacopladores são utilizados protegendo assim, o microcontrolador de qualquer surto do circuito de potência.

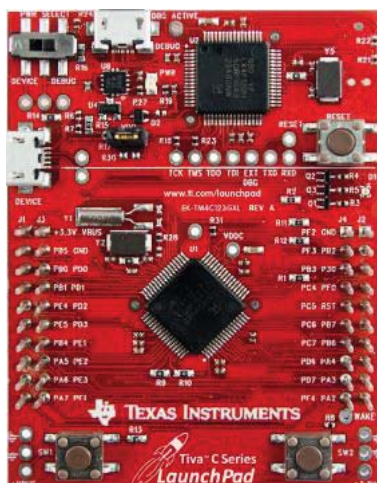
Figura 31- Diagrama de blocos do projeto.



4.1.1 MICROCONTROLADOR

O microcontrolador escolhido foi o TM4C123 presente na EK-TM4C123GXL *LaunchPad*, uma placa de desenvolvimento produzida pela *Texas Instruments*®, apresentada na figura 32. Ele possui um processador ARM® Cortex M4 de 32 bits e 80 MHz, 256 kB de memória *Flash*, 32 kB de memória RAM e 2 kB de memória EEPROM, além de dois conversores A/D de 12 bits, doze temporizadores de 16/32 ou 32/64 bits, módulo PWM, e comunicações seriais UART, SPI e I2C. Admite-se, que a escolha do mesmo foi realizada pelo fato de o autor do presente relatório possuir maior intimidade com este microcontrolador no decorrer do curso, dito isso, todas ações realizadas pelo mesmo poderiam também serem feitas com um microcontrolador do tipo PIC. Observa-se na Figura 32 o microcontrolador em questão.

Figura 32-Tiva™ EK-TM4C123GXL LaunchPad.



Fonte: Texas Instruments (2013)

Para a realização deste projeto se fez necessário a utilização de alguns módulos do microcontrolador. Utilizou-se dois módulos PWM com frequência de 20kHz e 333Hz para gerar o sinal de acionamento para o MOSFET do conversor boost e sinal de controle do ESC respectivamente. A interpretação do sinal do acelerador eletrônico é realizada a partir de um módulo de conversor AD. A comunicação entre o módulo bluetooth HC-05 e o aparelho celular é realizada através de um módulo UART. Além disso, se faz necessário mensurar a velocidade instantânea da bicicleta através de um temporizador que trabalha em modo captura

e monitora o sinal de um dos sensores hall do motor BLDC, para depois via firmware mensurar os dados requeridos.

4.1.2 ACELERADOR ELETRÔNICO DE PUNHO

O acelerador eletrônico é o dispositivo pelo qual o usuário solicita ao sistema a variação de velocidade do motor BLDC. O acelerador utilizado trata-se de um dispositivo da marca Kasinski, este modelo pode ser utilizado tanto em bicicletas elétricas como scooters elétricas e é descrito pela própria fabricante como um acelerador universal. A Figura 33 apresenta o acelerador eletrônico em questão.

Figura 33- Acelerador eletrônico de punho Kasinski.



Fonte: O Autor (2018).

Sua tensão de alimentação é de 5V, possui internamente um sensor de efeito hall e um ímã, fazendo com que se altere a densidade do campo magnético aplicado ao ímã conforme se varia a posição do acelerador. O sinal de saída do sensor hall é obtido em forma de tensão contínua, com variação de 1V até 4 V para a posição mínima e máxima do acelerador respectivamente.

O sinal de saída do acelerador é interpretado pelo microcontrolador através de um A/D, o valor mensurado através do mesmo é utilizado para definir o ciclo de trabalho do sinal de acionamento do conversor boost e ESC.

4.1.3 CONVERSOR BOOST

O conversor boost é o circuito responsável no presente projeto pela manutenção da tensão do barramento CC entregue ao motor BLDC. Através da variação da tensão de saída do conversor se obtém a variação de velocidade do motor BLDC.

O projeto de um conversor boost passa principalmente pelo dimensionamento do indutor e capacitor presentes no circuito. Os mesmos são responsáveis pelo processo de filtragem do sinal, ou seja, regulam o ripple da tensão e corrente entregue aos terminais do conversor e armazenamento de energia.

Segundo Rashid (2014), a tensão de saída do conversor boost pode ser obtida através da Equação (7), que relaciona a tensão de saída (V_o) desejada do conversor com a tensão de entrada (V_s) e o ciclo de trabalho (k) aplicado ao MOSFET do conversor. Para este projeto em específico espera-se variar a tensão de saída de 12V que é a tensão nominal das baterias especificadas no projeto até 36V que se refere a tensão nominal do motor BLDC.

$$V_o = \frac{V_s}{1 - k} \quad (7)$$

$$36 = \frac{12}{1 - k}$$

$$k = 66\%$$

Segundo Rashid (2014), o dimensionamento do capacitor C do conversor pode ser obtido através da Equação (8). Algumas variáveis de projeto necessitam ser admitidas para completar a equação. Adotou-se que a frequência de trabalho do conversor será de 20kHz visando evitar ruídos audíveis durante o processo de chaveamento, o *ripple* de tensão admitido na saída do conversor é de apenas 100mV e a corrente máxima solicitada pelo conversor é de aproximadamente 10 A, valor que pode variar dependendo da região de trabalho do motor BLDC.

$$\Delta V_c = \frac{I_a \cdot k}{f \cdot C} \quad (8)$$

$$100\text{mV} = \frac{10\text{A} \cdot 0,666}{20\text{kHz} \cdot C}$$

$$C = 3300\mu\text{F}$$

Rashid (2014) afirma ainda que o dimensionamento do indutor L pode ser obtido através da equação (9). Admite-se que a variação de corrente na saída do conversor seja de até 500mA.

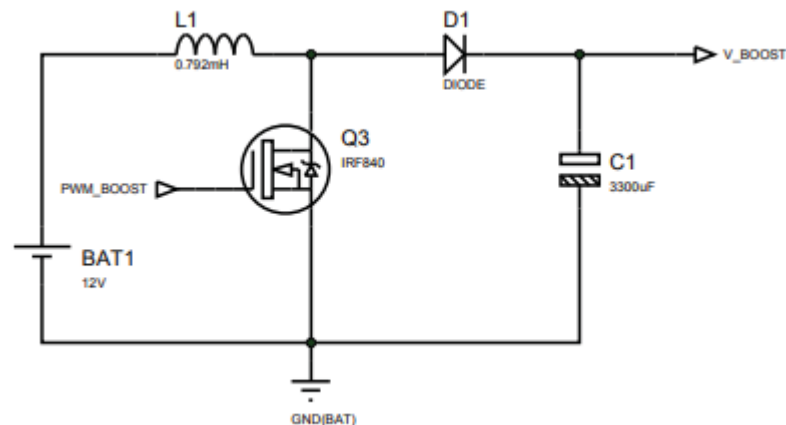
$$\Delta I = \frac{V_s \cdot k}{f \cdot L} \quad (9)$$

$$500\text{mA} = \frac{12\text{V} \cdot 0,666}{20\text{kHz} \cdot L}$$

$$L = 0,792 \text{ mH}$$

A chave utilizada no circuito do conversor em questão trata-se do MOSFET IR840 que suporta correntes de dreno-fonte de até 18A. O diodo utilizado trata-se do diodo de potência SKN 12/04 que suporta correntes de até 12 A. Dessa forma na Figura 34 é apresentado a configuração final do circuito do conversor boost utilizado no presente projeto.

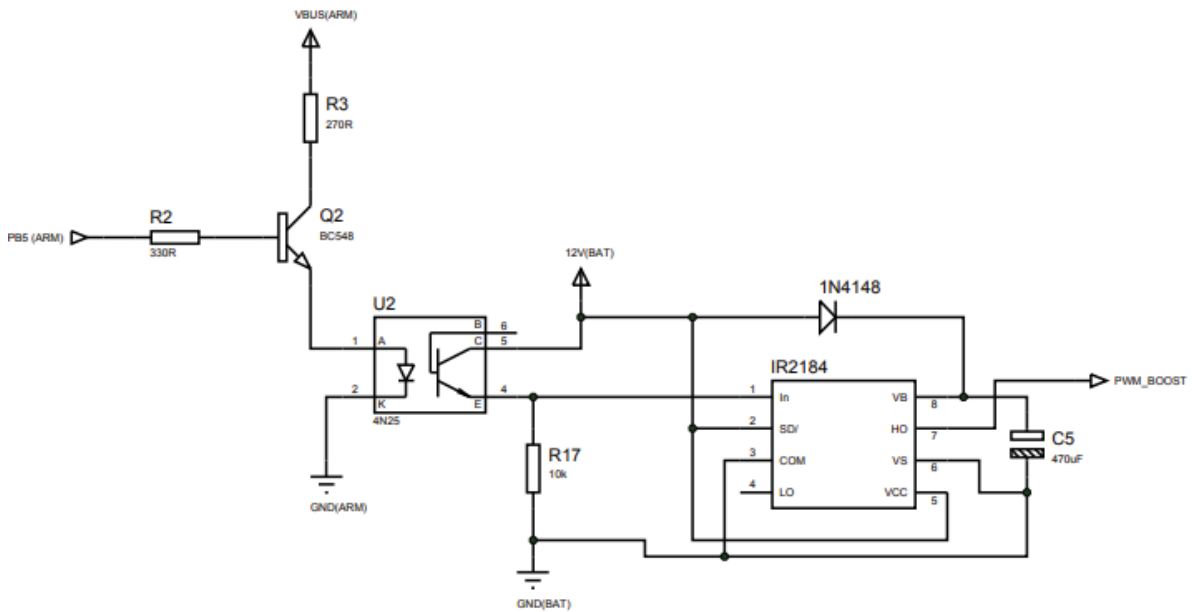
Figura 34- Circuito conversor boost projetado.



Fonte: O Autor (2018).

O sinal de acionamento do MOSFET do conversor boost é gerado pelo microcontrolador, dessa forma utilizou-se o optoacoplador 4N25 para fornecer isolamento galvânica entre o circuito de potência e o microcontrolador para evitar possíveis danos ao mesmo. Além disso, se fez necessário a utilização do gate drive IR2184 que fornece ganho de tensão e corrente no sinal dessa forma acionando o MOSFET com mais facilidade. O circuito de acionamento descrito acima pode ser observado na Figura 35.

Figura 35- Circuito de acionamento MOSFET conversor boost.



Fonte: O Autor (2018).

O cálculo do resistor R2 é dado pela equação (10), onde V_b é o nível de tensão em nível lógico alto de saída do microcontrolador, $V_{be(sat)}$ é a tensão de saturação do transistor que é de 0,7V e I_b é a corrente de base desejada que é de 8mA. A utilização do transistor justifica-se pela garantia e tranquilidade no acionamento do optoacoplador sem causar danos a saída do microcontrolador.

$$R2 = \frac{V_b - V_{be(sat)}}{I_b} \quad (10)$$

$$R2 = \frac{3,3V - 0,7V}{8mA}$$

$$R2 = 325\Omega \approx 330\Omega$$

O cálculo do resistor R3 é dado pela equação (11), onde Vcc corresponde a tensão VBUS do microcontrolador de valor nominal de 5V, Vce(sat) é a tensão de saturação do transistor e Ic é a corrente de coletor do transistor. A corrente de acionamento do optoacoplador admite valores de 10mA até 60mA, dessa forma admitiu-se que a corrente será de 20mA.

$$R3 = \frac{V_{cc} - V_{ce(sat)}}{20mA} \quad (11)$$

$$R3 = \frac{5V - 0,2V}{20mA}$$

$$R3 = 240\Omega \approx 270\Omega$$

4.1.4 CONTROLE ELETRÔNICO DE VELOCIDADE - ESC

O ESC (*Electronic Speed Control* – Controle Eletrônico de Velocidade) é um dispositivo capaz de realizar o acionamento e controle de velocidade em motores BLDC além disso ainda pode ser utilizado como freio dinâmico. O modelo do ESC utilizado no presente projeto se trata do ESC HW-40, o mesmo suporta em regime contínuo correntes de até 40 A e correntes de pico de até 45 A por um período de 10 segundos. Observa-se na Figura 36 o ESC HW-40.

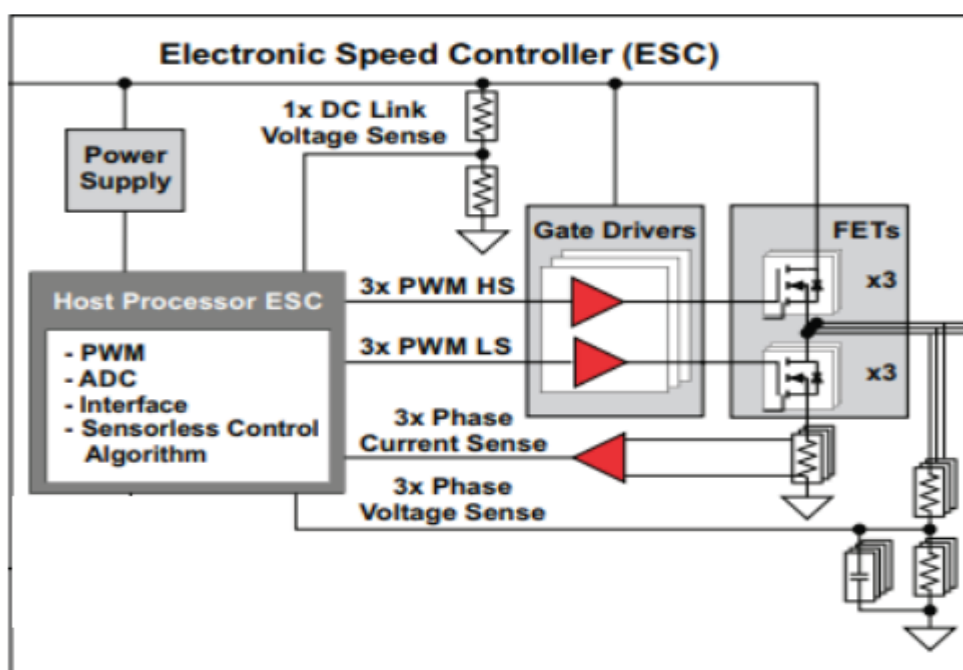
Figura 36- ESC HW40.



Fonte: O Autor (2018).

Baseada na metodologia inserida na secção 2.3, o circuito do ESC é formado por um inversor trifásico, gate drives e um microcontrolador responsável pelo acionamento das chaves do inversor. Seu método de identificação da posição do rotor é baseado no método de controle *sensorless*, dessa forma possui sensores de tensão para análise da FCEM e sensores de corrente para análise da corrente de fase do motor BLDC. A estrutura descrita acima pode ser melhor observada no diagrama de blocos do ESC apresentado na Figura 37.

Figura 37- Diagrama de blocos ESC.



Fonte: Com adaptação de TEXAS INSTRUMENTS (2018).

A escolha pelo ESC para realizar o acionamento do motor no projeto passa principalmente pela dificuldade imposta de desenvolver um sistema similar em dimensões reduzidas e que apresente as mesmas funcionalidades. Além disso o ESC utilizado é de baixo custo, tornando mais viável economicamente do que o desenvolvimento de um circuito que desenvolva a mesma função.

4.1.5 MOTOR BLDC

O motor BLDC utilizado no projeto trata-se de um modelo de motor específico para utilização em bicicletas elétricas. O mesmo é acoplado nos raios da bicicleta, que são distribuídos de forma que aumentem a estabilidade do motor na roda da bicicleta. Possui

especificação nominal de potência e tensão de 350W e 36V respectivamente e atinge velocidade máxima de até 25 Km/h. O motor em questão pode ser observado na Figura 38.

Figura 38- Motor BLDC utilizado no projeto.



Fonte: O Autor (2018).

Considerando que a eficiência em motores brushless é de aproximadamente 80% o valor da corrente nominal I_n do motor pode ser obtido através da equação (12).

$$I_n = \frac{P_2}{\eta \cdot V_n} \quad (12)$$

Onde:

P_2 é a potência de saída do motor;

η é o rendimento do motor e

V_n é a tensão nominal do motor.

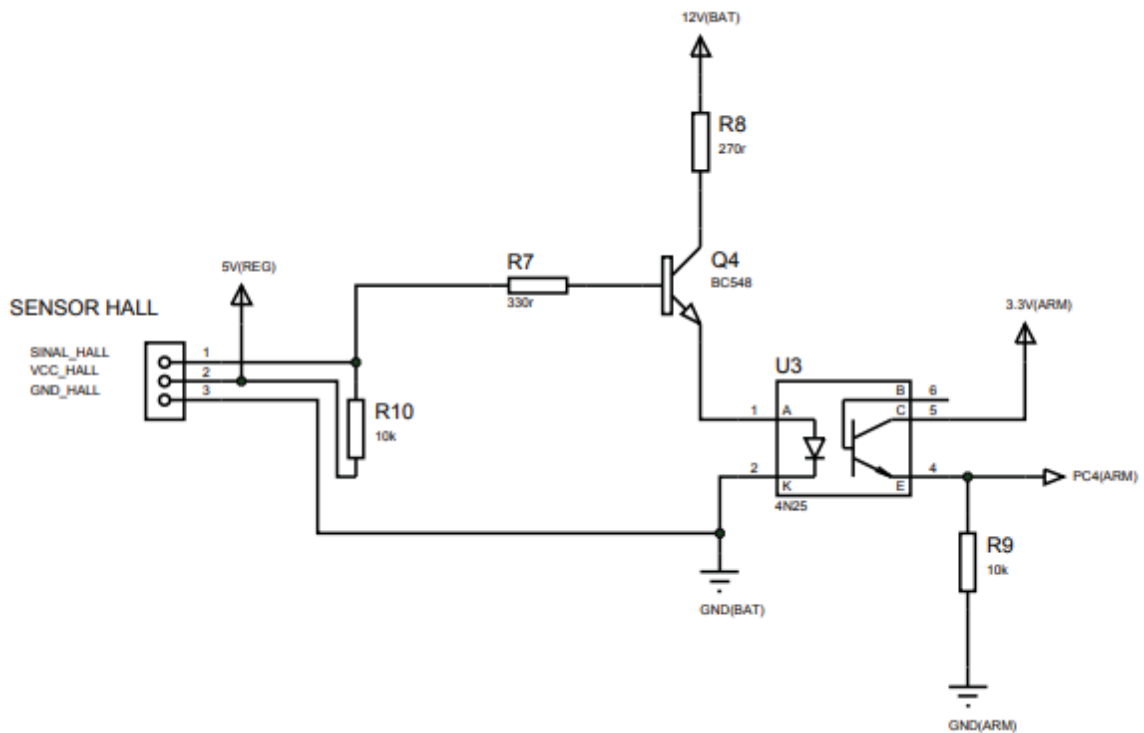
$$I_n = \frac{350W}{0,8 \cdot 36V} \quad (12)$$

$$I_n = 12,57 A$$

A empresa responsável pela venda do motor não possui folha de dados referente ao motor, sendo as informações apresentadas anteriormente as únicas compartilhadas. Portanto, no capítulo de resultados e discussão será realizado alguns ensaios com o motor BLDC visando adquirir maiores informações construtivas do mesmo.

O motor BLDC utilizado é composto três por sensores hall, entretanto o método de verificação da posição do rotor aplicado no projeto é o sensorless, dessa forma um dos sensores hall será utilizado para mensurar a velocidade instantânea e distância percorrida pela bicicleta. Conforme mencionado na subseção 4.1.3 para todo e qualquer sinal entregue ao microcontrolador será utilizado um circuito para fornecer isolamento galvânica. O circuito de interpretação do sinal do sensor hall desenvolvido no software Proteus pode ser observado na Figura 39.

Figura 39- Circuito de interpretação sinal sensor hall.



Fonte: O Autor (2018).

4.1.6 INTERFACE COM O USUÁRIO

A interface com o usuário escolhida para o presente projeto trata-se de um aplicativo elaborado no desenvolvedor online *Mit App Inventor 2* para aparelhos celulares que possuam sistema operacional android Android. O aplicativo nomeado como *Eletrical Bike* é o meio pelo qual o usuário pode habilitar e desabilitar o funcionamento do sistema e monitorar a velocidade instantânea e distância percorrida pela bicicleta desde o momento do acesso ao aplicativo. O layout do *Eletrical Bike App* pode ser observado na Figura 40.

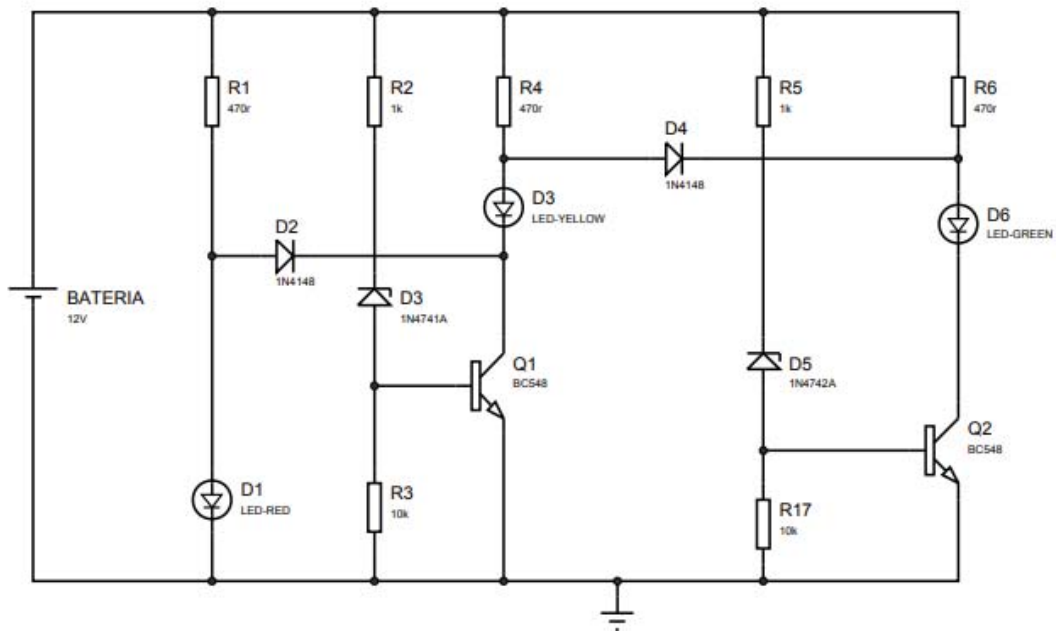
Figura 40- Layout Eletrical Bike App.



Fonte: O Autor (2018).

Além do aplicativo foi desenvolvido um circuito de monitoramento do estado da bateria de chumbo ácido responsável pela alimentação do sistema de potência. O circuito possui três led's sinalizadores informando quando a tensão da bateria está totalmente carregada, meia carga ou descarregada. Apresenta-se na Figura 41 o circuito responsável pela aferição da tensão da bateria.

Figura 41- Circuito de monitoramento estado da bateria de chumbo ácido.



Fonte: Com adaptação de Pratical Eletronics (1976).

Quando conectado a bateria, o circuito mantém o led vermelho aceso caso a tensão da bateria apresente valor inferior a 11,6V, para valores entre 11,6 e 12,6 V acende-se o led amarelo e acima de 12,6V acende-se o led verde. O funcionamento do circuito passa pela variação da polarização dos diodos zeners do circuito que variam de acordo com o valor da tensão da bateria.

4.1.7 MÓDULO BLUETOOTH HC-05

O módulo bluetooth HC-05 é o dispositivo responsável pela comunicação entre o sistema e o aparelho celular que possui o aplicativo *Eletrical Bike App*. O HC-05 trata-se de uma fonte confiável e de baixo custo para realizar transmissão de dados sem fio por até 10 metros de distância entre o dispositivo receptor e emissor, trabalha a partir do módulo UART de transmissão de dados seja como mestre ou escravo. Observa-se Figura 42 o módulo bluetooth HC-05.

Figura 42- Módulo bluetooth HC-05.



Fonte: O Autor (2018).

O dispositivo possui 6 terminais de acesso, sendo eles VCC e GND destinados a tensão de alimentação do dispositivo que é de 5V, RX e TX são os terminais pelos quais o dispositivo recebe e transmite dados respectivamente. O terminal EN refere-se ao pino de habilitação do dispositivo e deve ser alimentado com uma tensão de 3,3V e o terminal STATE emite um sinal em nível lógico alto informando quando o dispositivo foi devidamente pareado com outro dispositivo.

4.1.8 BANCO DE BATERIAS

A fonte primária de alimentação do sistema é composta de uma associação em paralelo de 2 baterias de chumbo ácido de 12V/7Ah destinadas a alimentação do motor BLDC, conversores de potência e demais circuitos utilizados. O microcontrolador Cortex ARM possui uma bateria de 9V exclusivamente para sua alimentação, esta atitude foi necessária para isolar o microcontrolador de qualquer circuito de potência do sistema visando proteger o mesmo de surtos de tensão e corrente. Observa-se na Figura 43 uma das bateria de chumbo ácido utilizada.

Figura 43- Bateria de chumbo ácido 12V/7Ah.

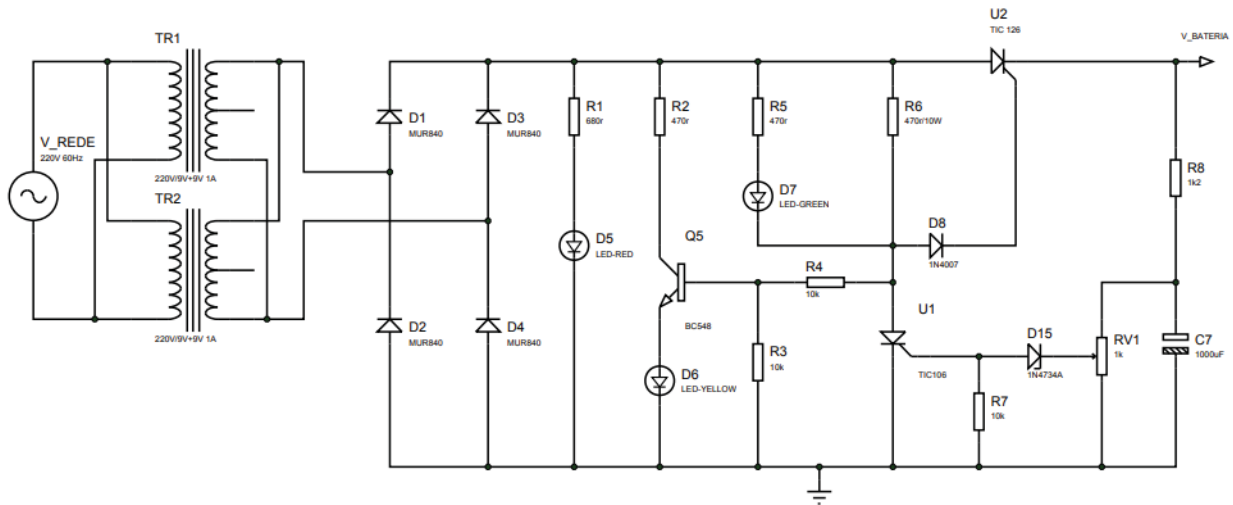


Fonte: O Autor (2018).

4.1.9 CARREGADOR DE BATERIA DE CHUMBO ÁCIDO

Além de realizar um sistema de controle de tração para uma bicicleta elétrica o presente projeto também possui como um dos objetivos o desenvolvimento de um carregador de baterias de chumbo ácido. O carregador desenvolvido admite carga a baterias de chumbo ácido com tensão nominal de 12V e suporta corrente de carga de até 2 A. O circuito do carregador desenvolvido no software Proteus pode ser observado na Figura 44.

Figura 44- Circuito carregador de baterias de chumbo ácido.

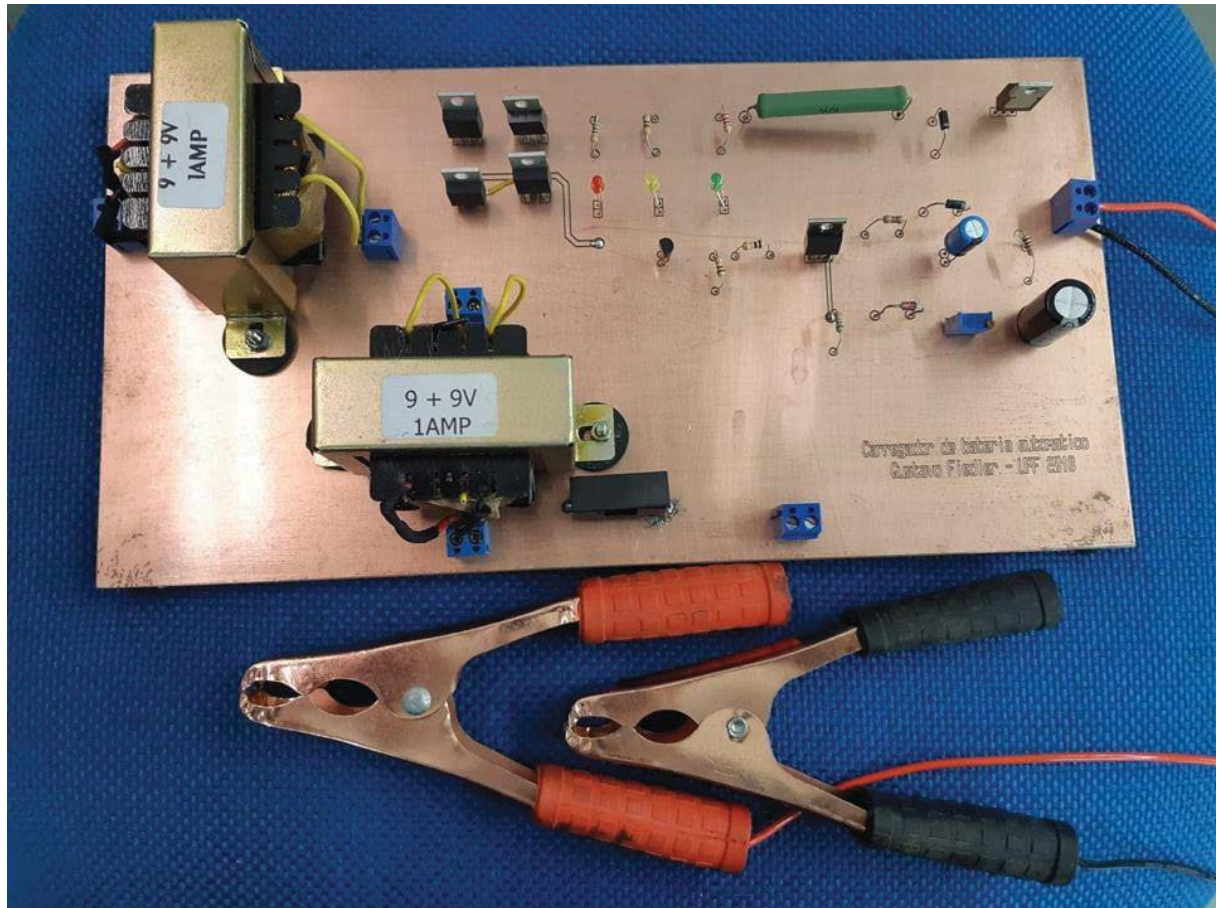


Fonte: Com adaptação de ALMEIDA (1985).

O circuito do carregador é composto por dois transformadores 220V/9+9V 1 A ligados em paralelo visando rebaixar a tensão da rede elétrica. A associação dos transformadores foi necessária para elevar a capacidade de corrente de carga da bateria para 2 A e diminuir os custos totais do projeto já que ambos se encontravam a disposição no almoxarifado. Posteriormente ao rebaixamento de tensão foi utilizado uma ponte retificadora de onda completa em ponte formada pelos diodos de potência MUR840 que possuem capacidade nominal de até 8 A para realizar a retificação do sinal provindo da rede elétrica. Três leds de sinalização de cor vermelha, amarelo e verde informam o status do carregador, sendo o led vermelho sinalizando que o carregador está ligado, o led amarelo sinalizando que a bateria está sendo carregada e o led verde acionado quando a bateria estiver carregada. A o dispositivo responsável pela comutação do carregador com a bateria trata-se do SCR TIC 126 que possui capacidade de corrente de até 12 A. O trimpot RV1 possui função de programar o disparo do segundo SCR do sistema que interfere diretamente no valor de carga máxima desejada para a bateria.

A placa de circuito impresso desenvolvida para o carregador de chumbo ácido em questão pode ser observada na Figura 45.

Figura 45- Placa de circuito impresso carregador de bateria de chumbo ácido.



Fonte: O Autor (2018).

4.2 FIRMWARE

O microcontrolador é o dispositivo responsável pelo controle de todo o sistema, e por isso esta secção é direcionada para a descrição do firmware do microcontrolador. O fluxograma do firmware do microcontrolador pode ser observado na Figura 46.

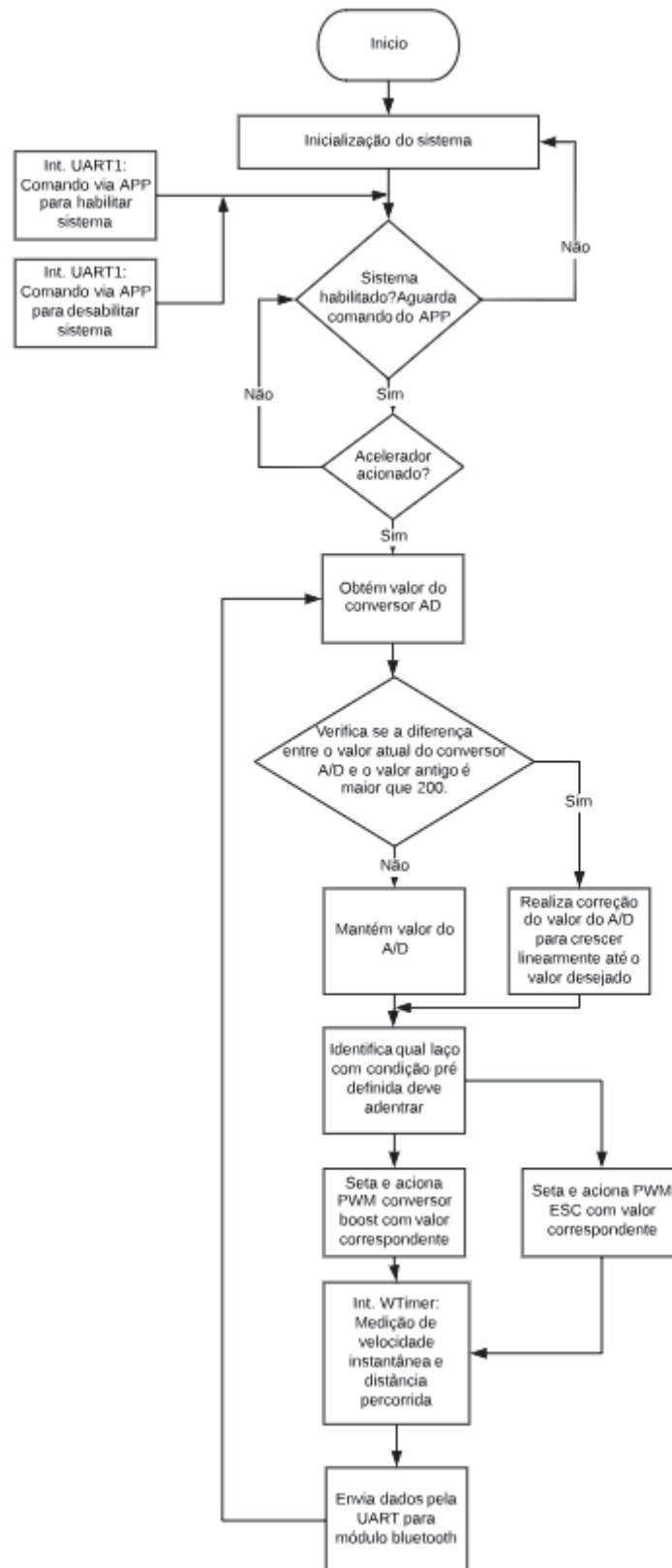
Após o usuário acionar a chave mecânica de comutação das baterias com o sistema, o usuário deve acessar o aplicativo *Eletrical Bike App* conectar-se ao módulo bluetooth e habilitar o sistema através do botão “Habilitar o Sistema” no layout do aplicativo. Quando o sistema é habilitado via aplicativo o microcontrolador recebe um sinal de comando via interrupção UART ativando a flag de habilitação do sistema. Com o sistema habilitado inicia-se o monitoramento do acelerador eletrônico através do conversor A/D do microcontrolador, uma série de valores pré-definidos em ensaios realizados estão dispostos no firmware, onde a condição de entrada em um desses laços se deve ao valor obtido pelo conversor A/D. Os valores pré-definidos remetem-se as configurações de ciclo de trabalho do PWM do ESC e conversor boost, fato que corresponde a variação de velocidade do motor BLDC. Após iniciado o movimento do motor BLDC o microcontrolador monitora o sensor hall do motor BLDC, fato que estima a velocidade instantânea e distância percorrida pelo motor BLDC. A última etapa do firmware remete-se ao envio das informações estimadas de velocidade e distância percorrida para o aplicativo, via módulo UART.

A qualquer instante o sistema pode ser desabilitado pelo aplicativo pressionando o botão “Desabilitar o Sistema”, fato que encerra o acionamento dos conversores de potência, motor BLDC e os demais encargos do firmware.

Para o conversor boost em específico o firmware realiza um controle de prevenção na partida do motor caso o usuário varie bruscamente a posição do acelerador, fato que poderia acarretar em uma demanda elevada de corrente no momento da partida do motor. Este controle faz com que o ciclo de trabalho seja acrescido em forma crescente em um espaço de tempo pré-definido sem prejudicar os circuitos do sistema além do motor BLDC. Admite-se também que o mesmo controle utilizado na partida do motor é aplicado no uso contínuo do mesmo.

Todo firmware foi desenvolvido em linguagem C, utilizando o compilador IAR Embedded Workbench. A estrutura de programação teve como base as bibliotecas disponibilizadas gratuitamente pela Texas Instruments.

Figura 46- Fluxograma de firmware do projeto.



Fonte: O Autor (2018).

4.3 ESTRUTURA MECÂNICA

A estrutura mecânica do projeto consiste basicamente na estrutura da bicicleta que teve o motor BLDC acoplado na roda traseira. O motor BLDC que é específico para uso em bicicletas elétricas é fixado através dos raios que foram distribuídos de forma que aumente a estabilidade do motor durante seu funcionamento. A Figura 47 apresenta o motor BLDC já inserido na bicicleta.

Figura 47- Acoplamento motor BLDC.



Fonte: O Autor (2018).

Desenvolveu-se uma estrutura de madeira para elevar a roda traseira a alguns centímetros do chão para melhor apresentar o funcionamento do protótipo conforme Figura 48.

Figura 48- Suporte de chão para bicicleta.



Fonte: O Autor (2018).

Utilizou-se também um suporte para celular conforme Figura 49, que foi alojado no guidão da bicicleta, onde o usuário pode repousar o celular e monitorar os dados apresentados na tela do celular via aplicativo Eletrical Bike App.

Figura 49- Suporte para celular.



Fonte: O Autor (2018).

Admitiu-se que para a estrutura em questão a melhor maneira de fixar as baterias de chumbo ácido e as placas de circuito impresso visando maior estabilidade é alocando os itens em questão no bagageiro da bicicleta conforme Figura 50.

Figura 50- Alocação de baterias e placas de circuito impresso na bicicleta.



Fonte: O Autor (2018).

No apêndice C apresenta-se diferentes imagens do protótipo para melhor visualização do mesmo.

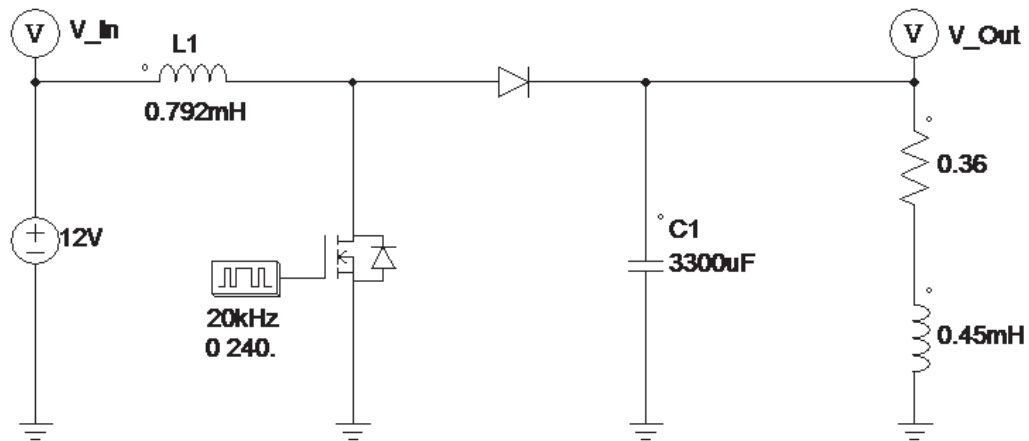
4.4 SIMULAÇÕES DE HARDWARE

Esta secção é destinada para as simulações dos conversores de potência utilizados no projeto, dessa forma complementando o estudo sobre os mesmos e servindo também como parâmetro de comparação com os resultados que serão obtidos no capítulo de resultados e discussão. Todas as simulações foram realizadas através do software PSIM.

4.4.1 CONVERSOR BOOST

Para comprovar a veracidade do projeto do conversor boost realizado na subseção 4.1.3 realizou-se a simulação do circuito proposto através do software PSIM. Admite-se que a carga a ser acionada trata-se de um motor brushless que possui impedância formada por uma parcela resistiva e indutiva, a carga utilizada na simulação trata-se da soma dos valores de duas bobinas do motor BLDC utilizado no projeto. A simulação proposta aqui reserva-se apenas a simulação com uma carga estática, já que com o motor BLDC em pleno funcionamento o valor da reatância do motor varia proporcionalmente a velocidade do mesmo. Observa-se na Figura 51 o circuito simulado no *software* PSIM.

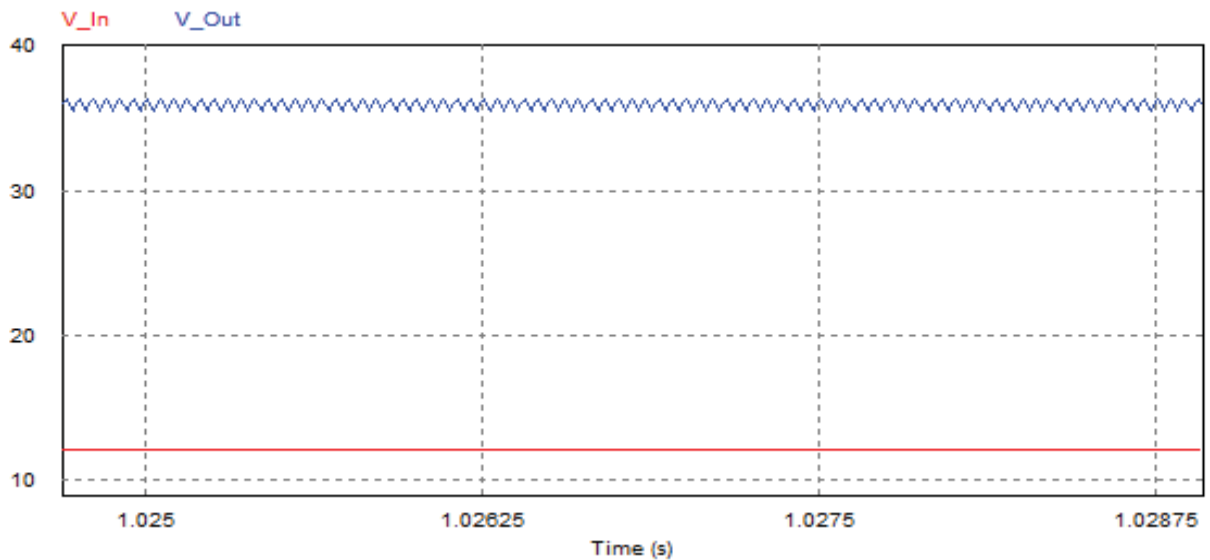
Figura 51- Circuito conversor boost simulado no software PSIM.



Fonte: O Autor (2018).

O ciclo de trabalho aplicado ao MOSFET é de aproximadamente 66,66%, mesmo valor adotado no momento do projeto. Observa-se na Figura 52 que para este ciclo de trabalho a tensão de saída do conversor boost, em azul no gráfico, obteve o valor desejado e com baixa ondulação dentro da faixa prevista. O sinal em vermelho refere-se a tensão de entrada do conversor boost.

Figura 52- Gráfico de tensão de saída obtido com ciclo de trabalho de 66%.



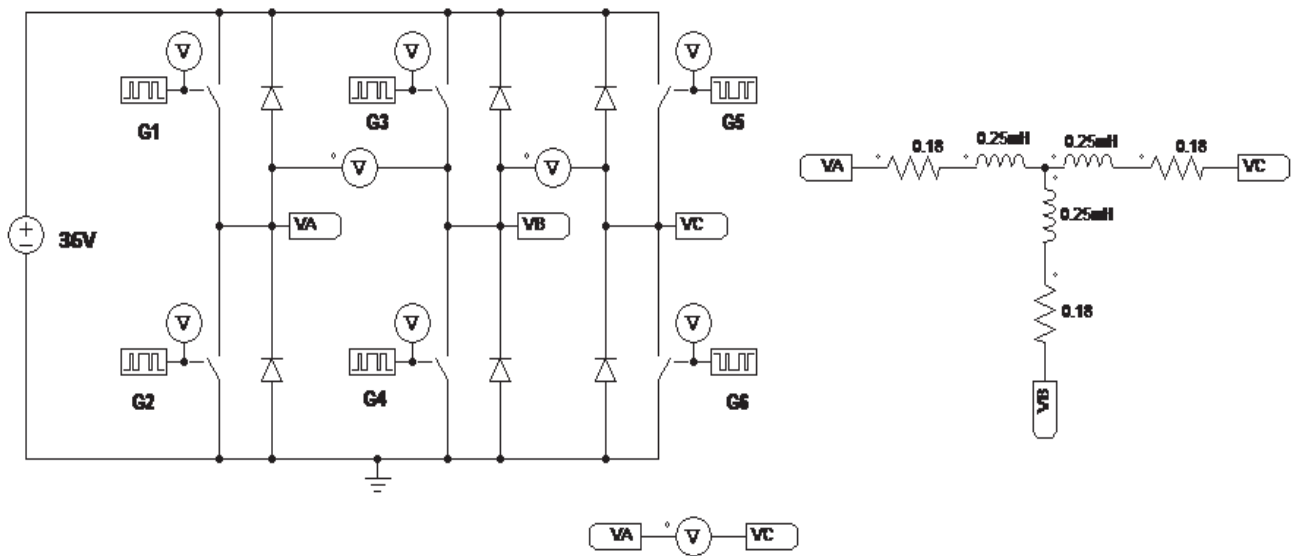
Fonte: O Autor (2018).

Analisando o gráfico observa-se que a tensão de saída (V_Out) atinge os 36V desejados com ondulação de aproximadamente 1Vpp.

4.4.2 INVERSOR TRIFÁSICO

Conforme apresentado na subseção 4.1.4 o ESC é um dos dispositivos responsáveis pelo acionamento do motor BLDC, informou-se também que o mesmo é composto por um inversor trifásico e demais circuitos. Dito isso, esta subseção foi destinada para simulação do inversor trifásico visando apresentar sua forma de funcionamento em condução de 120° . Observa-se na Figura 53 o circuito do inversor trifásico simulado, a carga aplicada ao mesmo trata-se de uma carga trifásica RL com ligação em estrela, sendo que os valores de R e L referem-se aos valores da bobina do motor BLDC.

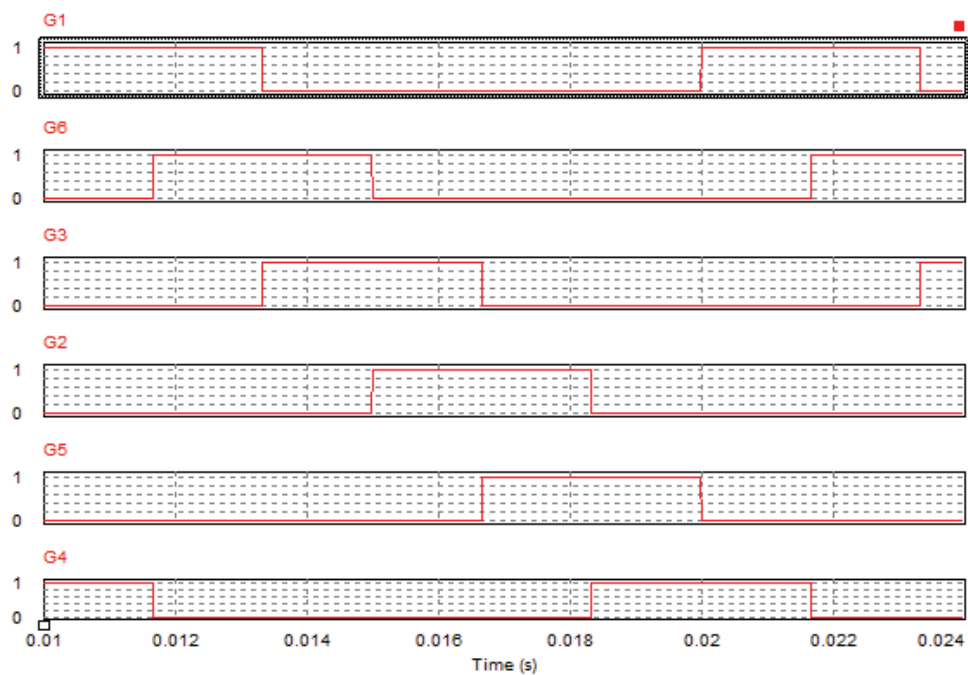
Figura 53- Circuito inversor trifásico simulado no software PSIM.



Fonte: O Autor (2018).

Admite-se que os sinais de comando aplicados as seis chaves do inversor trifásico apresentados na Figura 54 remetem ao modo de funcionamento do ESC, sendo que os momentos de comutação variam de acordo com a resposta de realimentação da FCEM obtida pelo sistema. Observa-se que cada chave conduz por 120° elétricos e a cada 60° ocorre a troca do par de chaves acionadas, conseqüentemente o par de ramos do inversor comutado.

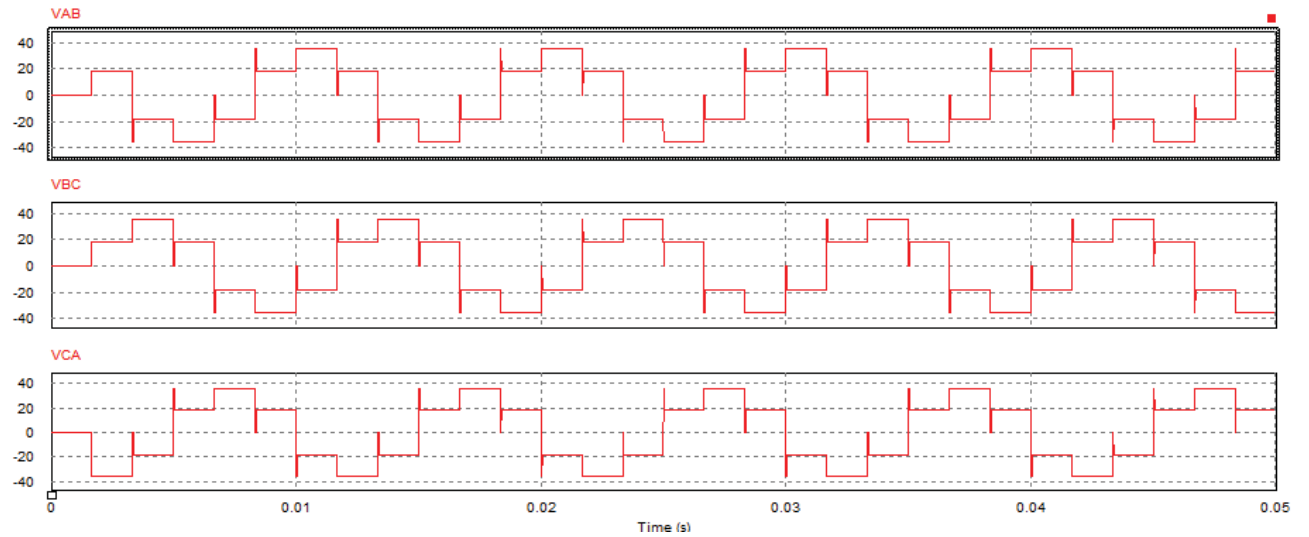
Figura 54- Sinais de acionamento inversor trifásico para acionamento em 120° .



Fonte: O Autor (2018).

Apresenta-se na Figura 55 os gráficos das tensões de linha obtidas com a simulação do inversor para uma carga LC. Observando o sinal mensurado é possível perceber os instantes da troca do par de bobinas comutadas através dos ruídos apresentados no sinal.

Figura 55- Gráfico de tensão de linha do inversor trifásico obtido no software PSIM.



Fonte: O Autor (2018).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

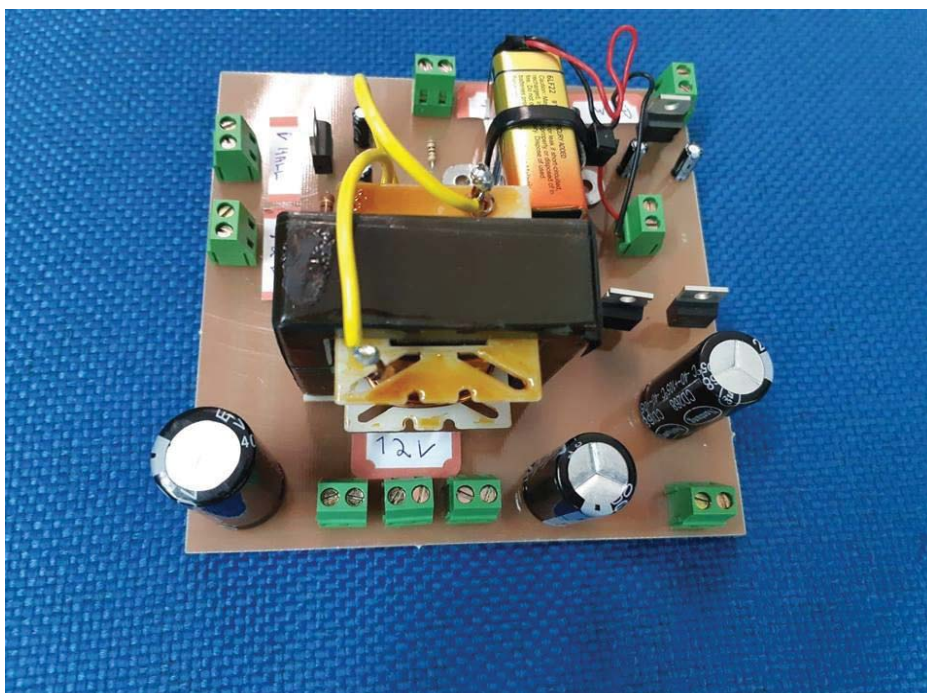
Este capítulo é reservado para apresentação dos resultados práticos obtidos com o desenvolvimento do projeto em questão. Todos ensaios realizados para aferição dos resultados obtidos serão descritos e posteriormente comentados. Os resultados validam os desenvolvimentos teóricos e demonstram o desempenho do sistema.

5.1 PCI'S DO SISTEMA DESENVOLVIDO

Nesta subseção serão apresentadas as placas de circuito impressas desenvolvidas para o sistema de controle do motor BLDC e demais dispositivos utilizados. Para o mesmo foram desenvolvidas duas PCI's, com o desenvolvimento de duas placas almeja-se distanciar o microcontrolador do conversor boost, já que campos eletromagnéticos podem afetar o funcionamento do microcontrolador.

Observa-se na Figura 56 a placa de circuito desenvolvida para o conversor boost, que corresponde ao circuito apresentado na Figura 35. A PCI ainda conta com circuitos reguladores de tensão utilizados para fornecer alimentação para o microcontrolador, dispositivos e circuitos integrados utilizados no projeto.

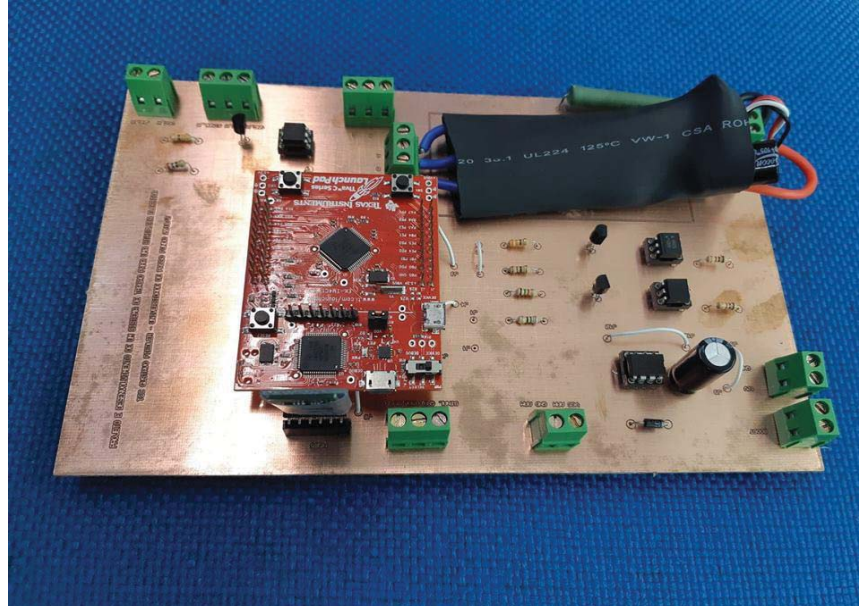
Figura 56- Placa de circuito impresso conversor boost.



Fonte: O Autor (2018).

Observa-se na Figura 57 a segunda placa de circuito impresso desenvolvida para o sistema, a mesma aloca o microcontrolador Cortex ARM, o ESC e os demais circuitos utilizados e apresentados na Figura 35 e Figura 39.

Figura 57- Placa de circuito impresso do controlador.



Fonte: O Autor (2018).

Apresenta-se ainda na Figura 58 o visor formado pelos led's do circuito de monitoramento da tensão da bateria.

Figura 58- Visor de led's para monitoramento de estado da bateria do sistema.



Fonte: O Autor (2018).

Por fim utilizou-se duas chaves ON/OFF para desconectar as baterias que alimentam o sistema do controlador e o microcontrolador conforme Figura 59. Ambas chaves foram utilizadas como medida de segurança e também para evitar que os circuitos permaneçam energizados mesmo quando não são utilizados, fato que ocasionaria na aceleração da descarga das baterias.

Figura 59- Chaves para desconectar baterias do sistema.

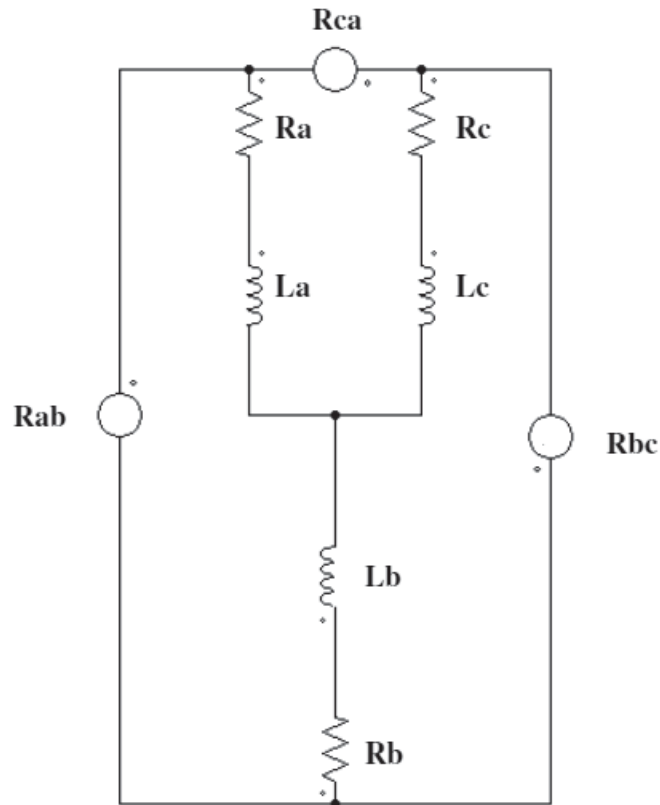


Fonte: O Autor (2018).

5.2 ENSAIO COM PONTE RLC

Como informado na subseção 4.1.5 a empresa responsável pela venda não possui material técnico referente ao motor BLDC, portando neste ensaio foram mensurados os valores de resistência e indutância de cada fase do motor BLDC utilizando uma ponte RLC portátil Minipa MC155. A Figura 60 ilustra o circuito de ensaio para aferição dos resultados.

Figura 60- Circuito de ensaio com ponte RLC Minipa MC155.



Fonte: O Autor (2018).

Os resultados obtidos com o ensaio podem ser observados no Quadro 4. As aferições foram realizadas em diferentes sequências, ou seja, variou-se a bobina de referência para realizar a medição.

Quadro 4- Ensaio do motor com ponte RLC.

Sequência	R_m (Ω)	L_m (H)
R_{AB}	0.45	0.21m
R_{BC}	0.5	0.23m
R_{CA}	0.45	0.22m

Fonte: O Autor (2018).

Após obtido os valores em questão observou-se que os cabos da Ponte RLC possuem uma resistência de aproximadamente 0.3Ω , interferindo na precisão das aferições. O procedimento foi realizado novamente, porém dessa vez inserindo os terminais do motor diretamente na ponte RLC obtendo por fim os resultados apresentados no Quadro 5.

Quadro 5- Ensaio do motor com ponte RLC sem cabo extensor.

Sequência	Rm (Ω)	Lm (H)
R_{AB}	0.18	0.21m
R_{BC}	0.2	0.23m
R_{CA}	0.16	0.22m

Fonte: O Autor (2018).

Observa-se que a primeira aferição realizada apresentava valores imprecisos já que quase que metade do valor da resistência medida nas bobinas referiam-se a própria resistência do cabo da ponte RLC. Conclui ainda que ambas as fases do motor apresentam valores de resistência e indutância parecidos fazendo com que o motor fique próximo de ser uma carga balanceada.

5.3 VERIFICAÇÃO DE GANHO DE TENSÃO CONVERSOR BOOST

Este ensaio teve como o objetivo o monitoramento da tensão de saída do conversor boost projetado variando o ciclo de trabalho aplicado a chave do conversor e posteriormente mensurado o ganho de tensão obtido. O ganho de tensão AV pode ser interpretado como a razão da tensão de saída do conversor pela tensão de entrada conforme equação (13).

$$AV = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (13)$$

Onde:

V_{out} , é a saída do conversor boost e

V_{in} é a tensão de entrada do conversor boost.

O Quadro 6 apresenta os resultados obtidos durante o ensaio relacionando a tensão de entrada do sistema que se manteve estática, o ciclo de trabalho aplicado ao MOSFET, a tensão de saída do conversor e o ganho de tensão obtido.

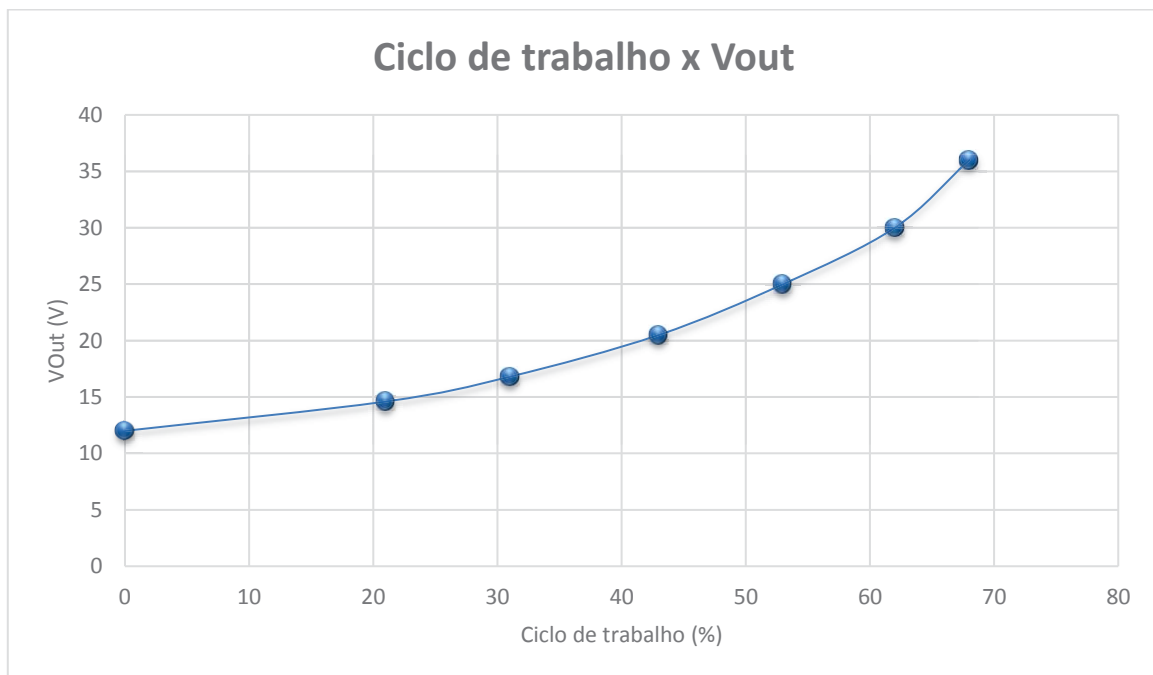
Quadro 6- Verificação de ganho de tensão conversor boost.

Tensão de entrada (V)	Ciclo de trabalho aplicado (%)	Tensão de Saída (V)	Ganho de tensão
12	21	14,6	1.21
12	31	16.8	1.4
12	43	20.5	1.71
12	53	25	2.08
12	62	30	2.5
12	68	36	3

Fonte: O Autor (2018).

Os resultados apresentados no Quadro 6 podem ser observados ainda em forma gráfica a partir da Figura 61, que relaciona o ciclo de trabalho aplicado a tensão de saída do conversor boost.

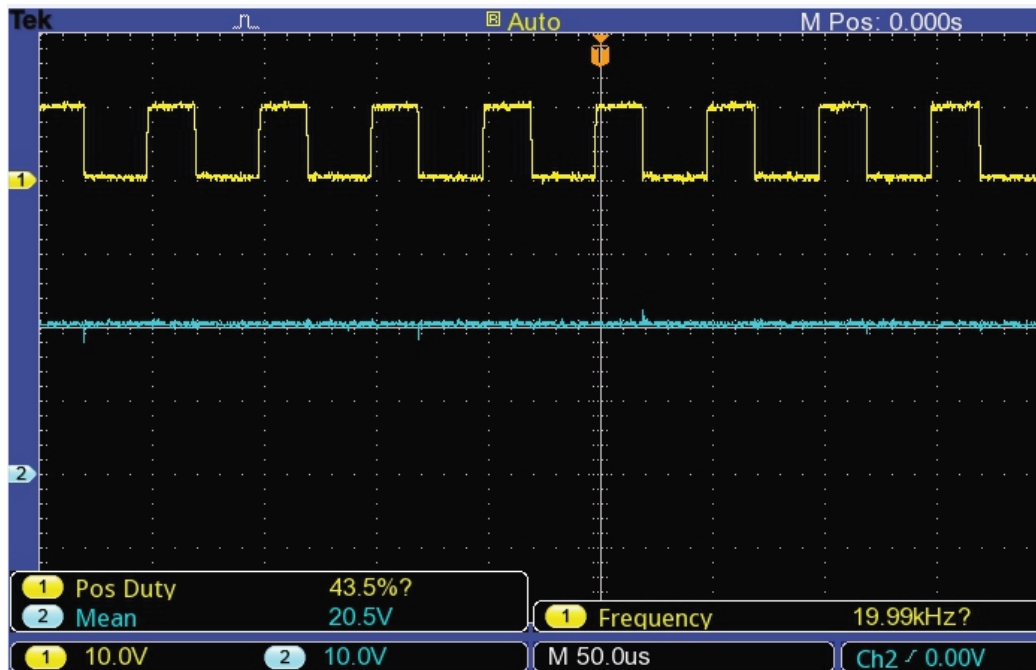
Figura 61 - Gráfico ciclo de trabalho versus tensão de saída conversor boost.



Fonte: O Autor (2018).

Observa-se na Figura 62 uma das formas de ondas obtidas durante o ensaio, onde o primeiro sinal refere-se ao sinal PWM aplicado e o segundo sinal refere-se a tensão de saída do conversor boost.

Figura 62- Forma de onda de sinal de acionamento e tensão de saída do conversor boost.



Fonte: O Autor (2018).

Analisando os resultados obtidos observa-se que o conversor boost obteve pleno funcionamento e os resultados mensurados estão dentro do esperado para o mesmo. Quando seu projeto foi realizado conforme apresentado seção 4.1.3 o mesmo deveria atingir a tensão de 36 V com um ciclo de trabalho de 66%, nos resultados práticos foi obtida essa tensão com 68%, fato que confirma o índice de exatidão na realização do projeto.

Admite-se ainda que o conversor é capaz de atingir tensões mais altas, elevando o valor do ciclo de trabalho aplicado, entretanto como o motor BLDC possui tensão nominal de 36 V os testes foram realizados apenas para os valores suportados no projeto.

5.4 ERRO RELATIVO DE MEDIÇÃO DE VELOCIDADE DO SISTEMA

Este ensaio teve como objetivo comprovar a exatidão na medida da velocidade da bicicleta realizada pelo sistema desenvolvido. Para comprovar tal fato foi utilizado um tacogerador Tako HT1200 devidamente calibrado para realizar a comparação dos resultados. Observa-se na Figura 63 o tacogerador em questão.

Figura 63- Tacogerador Tako HT12000.



Fonte: O Autor (2018).

O tacogerador em questão apresenta em seu display o valor da velocidade em RPM, dessa forma houve a necessidade de transformar o resultado mensurado para Km/h, mesma unidade mensurada pelo sistema desenvolvido. O processo de medição da velocidade ocorre quando o objeto circular na ponta do equipamento é inserido paralelamente a roda do motor, o mesmo possui perímetro de 3,2 cm. A transformação de RPM para Km/h pode ser obtida através da equação (14).

$$Vel_{Km/h} = RPM . P . CK \quad (14)$$

Onde:

$Vel_{Km/h}$ é a velocidade obtida em quilômetros por hora;

P é o diâmetro do objeto circular, neste caso 3,2 cm e

CK é a constante de transformação de centímetros por minutos para quilômetros por hora
 $G=0,0006$.

O erro percentual entre as medições pode ser obtido através da equação (15).

$$Erro(\%) = \frac{Vel_S - Vel_T}{Vel_T} \quad (15)$$

Onde:

Vel_S é a velocidade mensurada pelo sistema e

Vel_T é a velocidade mensurada pelo tacogerador

O Quadro 7 apresenta os resultados obtidos com a realização do ensaio informando a tensão aplicada ao motor para atingir tal velocidade, os resultados de velocidade mensurado pelo sistema e taco gerador e o erro percentual entre ambas as medições.

Quadro 7- Erro de medição de velocidade do sistema.

Tensão aplicada ao motor (V)	Velocidade mensurada pelo sistema (Km/h)	Velocidade mensurada pelo tacogerador (Km/h)	Erro Percentual (%)
16	12	12,3	-2,4
22	15	15,1	-0,66
25	17	17,3	-1.73
28	19	19,5	-2.56
30	21	21,5	-2.32
33	23	23,7	-2.95
36	24	24,9	-3.61

Fonte: O Autor (2018).

Observa-se a partir dos resultados obtidos que o erro de velocidade medido entre o sistema e o tacogerador é baixo e refere-se quase em sua totalidade as casas decimais posteriores à vírgula, que no sistema desenvolvido não são mensuradas pelo fato de serem imperceptíveis. É fato ainda que o erro cresce diretamente proporcional ao aumento de velocidade do motor BLDC.

5.5 CONSUMO DO SISTEMA E AUTONOMIA ESTIMADA

Este ensaio tem como objetivo monitorar o consumo do sistema e estimar a autonomia da bicicleta caso mantenha-se um valor de velocidade média. Para monitorar o valor da corrente foi utilizado um osciloscópio Tektronix TBS1072B e uma ponteira de corrente.

A autonomia estimada nesta subseção será apresentada com unidade em horas, dito isso o valor pode ser obtido através da equação (16).

$$Autonomia = \frac{C_{Bat}}{C_{Sis}} \quad (16)$$

Onde:

C_{Bat} é a capacidade da bateria em A/h e

C_{Sis} é o consumo do sistema em A/h

O Quadro 8 apresenta os resultados obtidos durante o ensaio relacionando a tensão aplicada ao motor, a velocidade média, consumo do sistema e a autonomia estimada.

Quadro 8- Aferições de consumo do sistema e autonomia estimada.

Tensão aplicada ao motor (V)	Velocidade (Km/h)	Consumo do sistema (Ah)	Autonomia estimada (Horas)
17	12,3	0.95	7.3
21	15,2	1.15	6.08
25	17,1	1.52	4.6
28	19,2	1.87	3.74
30	21,1	2.15	3.2
33	23,4	2.46	2.84
36	24,7	2.93	2.38

Fonte: O Autor (2018).

Admite-se que os resultados mensurados no Quadro 8 tratam de um ensaio realizado sem carga aplicada ao eixo do motor, dessa forma a autonomia da bicicleta quando em rotação plena e com carga irá diminuir em algumas proporções. A autonomia da bicicleta também pode ser alterada de acordo com o tipo de terreno com que o usuário a sujeite.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho de conclusão curso trata do desenvolvimento de um sistema de tração para uma bicicleta elétrica. Através dos resultados apresentados no decorrer do relatório, observa-se que o mesmo cumpriu com a função para qual foi projetado, apesar de ter sido realizado de maneira diferente da que foi idealizado inicialmente.

Observa-se que o sistema é funcional e aciona o motor BLDC com facilidade através do seu controle de velocidade realizado em rampa, evitando assim danos ao sistema e ao próprio motor BLDC. O aplicativo *Electrical Bike App* desenvolvido para monitoramento de velocidade e distância percorrida da bicicleta também apresentou resultados satisfatórios, o mesmo atualiza os dados mensurados a cada 1 segundo e se trata de um aplicativo de fácil manejo. Sua única adversidade é que em alguns momentos o mesmo não interpreta corretamente os dados enviados pelo microcontrolador, ocasionando em um erro apresentado na tela do aplicativo, sendo posteriormente normalizado.

O protótipo necessita de algumas melhorias para ter aplicação comercial, principalmente na questão que se refere ao peso total do mesmo, fato que diminui consideravelmente a autonomia da bicicleta. A utilização de baterias de chumbo ácido fez com que se elevasse demasiadamente o peso da bicicleta sendo indicado nesse caso a utilização de baterias de ion lítio, entretanto, o alto custo das baterias de ion lítio justifica a escolha para ensaios como protótipo e não como um produto comercial. Além disso pode-se optar também por uma bicicleta de menor peso, como as de fibra de carbono.

Como ideia para projetos futuros, idealiza-se a adição de um sistema de um monitoramento mais preciso da tensão da bateria, estimando assim, sua autonomia restante no decorrer do percurso além de o desenvolvimento de uma frenagem regenerativa para aumentar a autonomia da bicicleta.

REFERÊNCIAS

- AFP. **Possível proibição de carros a gasolina na China pode revolucionar a indústria.** Disponível em: < <https://g1.globo.com/carros/noticia/possivel-proibicao-de-carros-a-gasolina-na-china-pode-revolucionar-a-industria.ghtml> > Acesso em: 14 mai. 2018.
- AGUIRRE, Luis Antônio. **Fundamentos da Instrumentação.** 1 ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013.
- AKIN, Bilal et al. **Sensorless Trapezoidal Control of BLDC Motors.** Disponível em: < ftp://ftp.ti.com/pub/dml/DMLrequest/Christy_FTP-10-3012/controlSUITE/development_kits/DRV8312-C2-KIT_v128/BLDC_Sensorless/~Docs/Sensorless%20Trapezoidal%20Control%20of%20BLDC%20Motors.pdf > Acesso em: 04. Abr. 2018.
- ALMEIDA, José Luiz De. **Eletrônica Industrial.** 1.ed.São Paulo: Érica, 1985.
- ALMEIDA, Eduardo Barbosa, et al. **Gasto calórico nas atividades de trabalho e cotidianas, dos carteiros que utilizam bicicleta.** Rev. Bras. Cine. Des. Hum, v. 6, n 2, p. 53-61, 2004.
- AUTOMOVEIS ELÉTRICOS BLOGSPOT, **Motor CC sem Escovas.** Disponível em: < <http://automoveiseletricos.blogspot.com.br/2015/05/motor-ca-sincrono-ou-motor-cc-sem.html> > Acesso em: 30 mar. 2018.
- BARAN, Renato. **Introdução de veículos elétricos do Brasil: Avaliação do impacto consumo de gasolina e eletricidade.** 2012. 139f. Dissertação (Doutorado em Planejamento Energético) – Faculdade de Educação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- BARATIERI, Cássio Luciano. **Controle de velocidade sensorless de motores brushless DC submetidos a variações periódicas de carga.** 2011. 151f. Dissertação(Mestrado em engenharia elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria 2011.
- BICIMOTO, **Bicicleta Elétrica 1000W 48V com baterias de lítio.** Disponível em: < <http://www.bicimoto.com.br/bicicleta-eletrica-1000w-48v-com-baterias-de-litio>> Acesso em: 24 mar. 2018.
- BRAGA, Newton C. **Controle de Motor DC sem escovas utilizando o ATmega32M1.** Disponível em: < <http://www.newtonbraga.com.br/index.php/microcontroladores/138-atmel/2880-mic017> > Acesso em : 31 mar. 2018.
- BRAGA, Newton C. **Carregador automático de baterias.** Disponível em: < <http://www.newtonbraga.com.br/index.php/electronica/57-artigos-e-projetos/9907-carregador-automatico-de-baterias-art2259> > Acesso em: 25 abr. 2018.
- CALOI.CALOI **E-VIBE ELITE.** Disponível em: < <http://caloi.com.br/bike/e-vibe-elite#specs-da-bike/ficha-tecnica> > Acesso em: 15 nov. 2018.
- CHAI, H. **Electromechanical motion devices.** Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998.

CICLISMO ZONA LESTE. **Componentes de uma bicicleta.** Disponível em: < <http://ciclismozonaleste.blogspot.com.br/2016/09/componentes-de-uma-bicicleta.html> > Acesso em: 16 mai. 2018.

ESCOLA DE BICICLETA. **História da bicicleta no mundo.** Disponível em: < <http://www.escoladebicicleta.com.br/historiadabicicleta.html> > Acesso em: 24 mar. 2018.

FLARYS, Francisco. **Eletrotécnica geral.** 2.ed.São Paulo: Manole, 2013.

FREEPIK, **Evolution of Bicycle.** Disponível em: < https://nl.freepik.com/vrije-vector/evolutie-van-de-fiets-in-plat-design_892634.htm > Acesso em: 25 abr. 2018.

KOSOW, Irving L. **Maquinas elétricas e transformadores.** 15.ed. São Paulo: Editora Globo,2005.

MERCADO LIVRE. **Punho acelerador bicicleta.** Disponível em: < https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-991670586-punho-acelerador-bicicleta-scooter-eletrica-universal-_JM > . Acesso em: 15 mai. 2018.

MERWE, Christo van der. **Home-built brushless models.** Disponível em:<http://www.bavaria-direct.co.za/models/motor_info.htm>. Acesso em: 30 mar. 2018.

MICROSHIP, **Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals.** Disponível em: <[http://electrathonoftampabay.org/www/Documents/Motors/Brushless%20DC%20\(BLDC\)%20Motor%20Fundamentals.pdf](http://electrathonoftampabay.org/www/Documents/Motors/Brushless%20DC%20(BLDC)%20Motor%20Fundamentals.pdf) > Acesso em: 29 mar. 2018.

MICROSHIP, **Brushless DC (BLDC) Motor Control Made Easy.** Disponível em: < <http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00857a.pdf> > Acesso em: 29 mar. 2018.

NEVES, Felipe. **Utilizando microcontroladores para controle de conversor DC-DC.** Disponível em : < <https://www.embarcados.com.br/controle-conversor-dc-dc-personalizado-parte-2/> > Acesso em: 27 abr. 2018.

NIDEC, **Brushless Motors.** Disponível em:< <http://www.nidec.com/en-NA/technology/capability/brushless/> > Acesso em: 29 mar. 2018.

PRATICAL ELETRONICS. **Car Battery Condition Indicator.** Reino Unido,1976-. Mensal.

RASHID, Muhammad H. **Eletrônica de Potência.** 4 ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil,2014.

REVISTA BICICLETA, **Bicicletas Elétricas.** Disponível em: < <http://www.revistabicicleta.com.br/bicicleta.php?&id=2331>> Acesso em: 24 mar. 2018.

SIEMENS. **Motores de corrente contínua.** Disponível em: <http://www.marioloureiro.net/tecnica/electrif/Motores_CC_ind1.pdf> Acesso em: 26 mar. 2018.

STREETBIKE. **Bagageiro de ferro**. Disponível em: < <http://lojastreetbike.com.br/loja/aceessorios/b/bagageiros/bagageiro-de-ferro-319.html> > Acesso em: 15 mai. 2018.

SOARES, Rafael Della Gatta. **Bicicleta e Mobilidade Urbana: Modismo ou solução sustentável para o transporte na cidade de São Paulo**. 2015. 37f. Dissertação (Trabalho de conclusão de curso) – Escola de Comunicação e Artes, Universidade de São Paulo, São Paulo 2015.

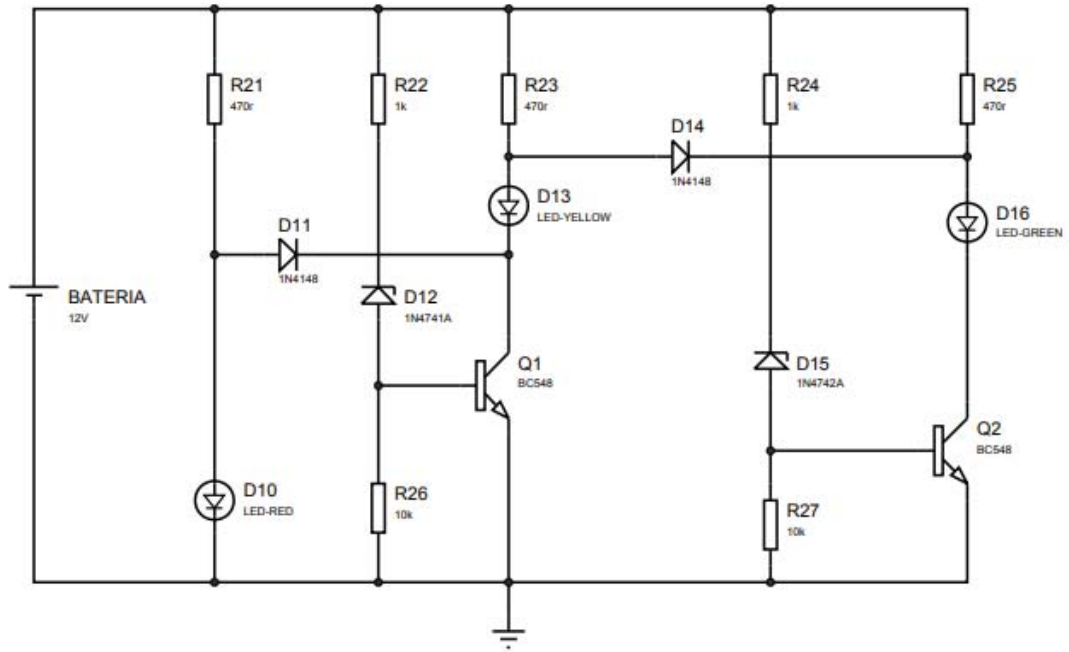
TEXAS INSTRUMENTS. **MCU TM4C123G Launch Pad**. Disponível em: < <http://www.ti.com/tool/EK-TM4C123GXL> > Acesso em: 27 mai. 2018.

TEXAS INSTRUMENTS. **Motor-control considerations for electronic speed control in drones**. Disponível em: < <http://www.ti.com/lit/an/slyt692/slyt692.pdf> > Acesso em: 18 nov.2018.

VEJA, **Bicicletas Elétricas**. Disponível em: < <http://vejasp.abril.com.br/cidades/bicicletas-eletricas-sao-paulo/> > Acesso em: 23 mar. 2018.

YECOM, **Brushless Electric Bicycle Engine, 48v 1000w**. Disponível em: < <https://www.yescomusa.com/products/26-electric-bicycle-hub-motor-rear-conversion-kit-48v-1000w> > Acesso em: 29 mar. 2018;

WOIE, **Bicicleta elétrica WOIE silver**. Disponível em: < <https://www.woie.com.br/bicicleta-eletrica-woie-silver.html> > Acesso em: 15 mai. 2018;

Figura A-4 – Blocos do circuito de *hardware* do projeto.

APÊNDICE B – PROTÓTIPO CONSTRUÍDO

Neste apêndice serão apresentadas algumas imagens referentes ao protótipo construído. Nas Figuras B-5, B-6 e B-7 apresenta-se o protótipo por diferentes ângulos visualizando a distribuição do sistema pelo corpo da bicicleta. Já na Figura B-8 observa-se o visor de led's para sinalizar o estado de carga da bateria e o suporte para fixar o celular.

Figura B-5 – Protótipo completo.



Figura B-6 – Protótipo completo.



Figura B-7 – Protótipo completo.

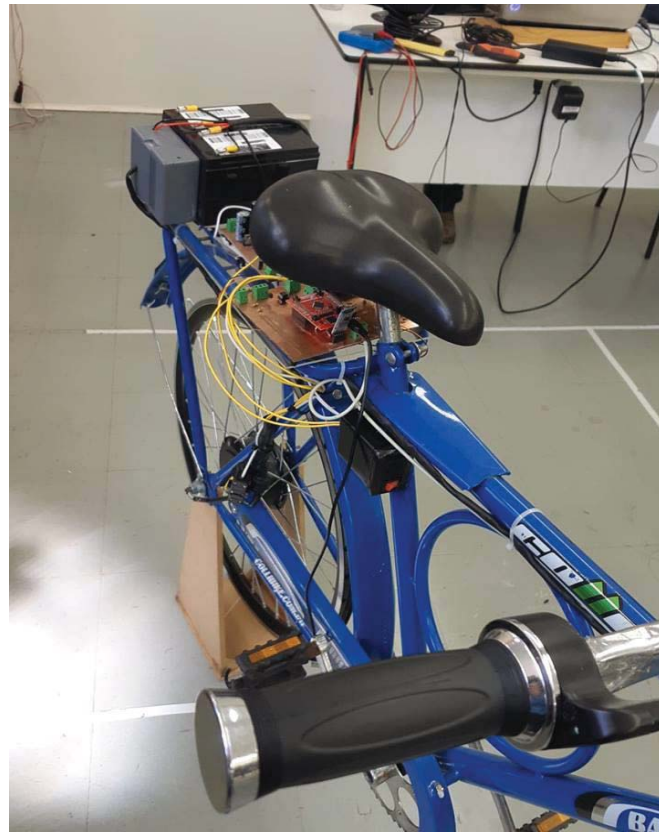


Figura B-8 – Visor de led e suporte para celular.

