



UNISUL

UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA

FELIPE GASPARETTO KLOPP

**DESENVOLVIMENTO DE CONVERSOR APLICÁVEL EM PEQUENOS
VEÍCULOS ELÉTRICOS**

Palhoça

2020

FELIPE GASPARETTO KLOPPEL

**DESENVOLVIMENTO DE CONVERSOR APLICÁVEL EM VEÍCULOS
ELÉTRICOS DE PEQUENOS PORTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Elétrica da
Universidade do Sul de Santa Catarina como
requisito parcial à obtenção do título de
Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Anderson Soares André

Palhoça
2020

FELIPE GASPARETTO KLOPPEL

**DESENVOLVIMENTO DE CONVERSOR APLICÁVEL EM VEÍCULOS
ELÉTRICOS DE PEQUENOS PORTE**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Engenheiro Eletricista e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Palhoça, 29 de junho de 2020.

Professor e orientador Anderson Soares André, Eng.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Professor Claudio Coelho, Eng.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Dayane Freire Fernandes, Eng.
Statkraft Energias Renováveis S.A.

*“A ciência não é apenas compatível com a
espiritualidade; ela é uma profunda fonte de
espiritualidade”*

Carl Sagan

AGRADECIMENTOS

Agradeço, ao meu orientador, professor Anderson, por todo apoio, não só neste trabalho mas como em toda a jornada acadêmica. Estendo também minha gratidão aos demais professores que também foram fundamentais durante toda esta caminhada. Aos membros da banca pelo auxílio e contribuição.

Por fim à minha, amigos e colegas que, de alguma forma me acompanharam e também contribuíram, ajudaram e me incentivaram nesta jornada.

RESUMO

Atualmente a crescente demanda por mobilidade eficiente e barata, em contrapartida às fortes tendências de preservação ambiental e desenvolvimento sustentável aliadas aos sempre crescentes preços de combustíveis fósseis, culminam na busca por alternativas de veículos acessíveis, eficientes e eco amigáveis. Em resposta aos anseios de nossa realidade, veículos elétricos vem se disseminando e fazendo cada vez mais parte de nosso dia a dia. Ainda que, mais timidamente, já se nota no Brasil, reflexos desta forte tendência mundial, devido a fatos como o preço elevado, falta de subsídios por parte do governo que se devem a que total ausência de fabricação nacional.

O presente trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um conversor eletrônico CC-CC, destinado à aplicação em veículo elétrico de pequeno porte, tendo como foco a construção de um protótipo, capaz de alimentar e controlar um motor elétrico.

Com o objetivo maior de apropriar e internalizar desta tecnologia, possibilitando assim iniciativas de fabricação nacional, almejando uma maior disseminação do uso de automóveis movidos à eletricidade.

Palavras-chave: Veículo Elétrico, Motor CC, Drive ou Conversor CC-CC

ABSTRACT

Today's growing demand for efficient and inexpensive mobility, as opposed to strong trends in environmental preservation and sustainable development coupled with ever-increasing prices of fossil fuels, culminate in the search for affordable, efficient, and eco-friendly vehicle alternatives. In response to the longings of our reality, electric cars are spreading and becoming more and more part of our daily lives. Even more shyly, it is already noted in Brazil, reflections of this strong worldwide trend, due to facts such as the high price, lack of subsidies by the government that are due to the total absence of national manufacturing.

This work aims to develop a DC-DC electronic converter, intended for application in a small electric vehicle, focusing on the construction of a prototype, capable of powering and controlling an electric motor.

With the main objective of appropriating and internalizing this technology, thus enabling national manufacturing initiatives, aiming at a greater dissemination of the use of automobiles powered by electricity.

Keywords: Electric Vehicle, DC Motor, Drive or DC-DC Converter

LISTA DE SIGLAS

BMW - Bayerische Motoren Werke

GM - General Motors

VE - Veículo Elétrico

VCI - Veículo a combustão interna

CC - Corrente contínua

CA - Corrente alternada

EUA - Estados Unidos da América

V - Volt

A - Ampere

W - Watt

km - kilometer

km/h – kilometer per hour

PWM - Pulse width modulation

MOSFET - Metal oxide semiconductor field effect transistor

IGBT - Insulated gate bipolar transistor

SCR - Silicon controlled rectifier

GTO - Gate turn-off thyristor

BJT - Bipolar junction transistor

DC – Direct current

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Ford T	20
Figura 2 - Gurgel Itaipu	21
Figura 3 - Veículo Lunar	21
Figura 4 - GM EV1.....	22
Figura 5 - Tesla <i>Model S</i>	23
Figura 6 - Super Caminhão Elétrico eDumper	23
Figura 7 - Patinete Elétrico Yellow	24
Figura 8 - Esquema de Tração VE Primitivo	25
Figura 9 - Sistema de um VE moderno	27
Figura 10 - Sistema de Propulsão dos VEPP.....	28
Figura 11 - Topologia Primária de um VE	29
Figura 12 - Topologia Transmissão Fixa.....	30
Figura 13 - Topologia Transmissão Fixa Compacta	30
Figura 14 - Topologia Multi Motor	31
Figura 15- Topologia In-Wheel Drive.....	31
Figura 16 - Topologia Driving Wheel	32
Figura 17 - Esquema de Construção de Um Motor CC.....	34
Figura 18 - Configuração de Campos Magnéticos	35
Figura 19 - Interação Magnética do Motor CC	35
Figura 20 - Circuito de Ligação do Motor <i>Shunt</i>	36
Figura 21- Circuito de Ligação do Motor Série	36
Figura 22- Circuito de Ligação do Motor Composto	37
Figura 23- Circuito de Ligação do Motor Separadamente Excitado.	37
Figura 24 - Construção de Um Motor de Indução Gaiola de Esquilo	38
Figura 25 - Circuito Básico	41
Figura 26 - Gráfico Acionamento x Tensão Média.....	41
Figura 27 - Corrente em Função do Acionamento da Chave	42
Figura 28 - Conversor <i>Buck</i>	45
Figura 29 - Conversor Buck	46
Figura 30 - Conversor Meia Ponte	46
Figura 31 - Conversor <i>Full Bridge</i>	47
Figura 32 - Gráfico dos Quadrantes de Operação do Conversor.....	49

Figura 33 - Gráfico de Quadrantes de Operação do Motor	49
Figura 34 - Esquema Conversor <i>Buck</i> Proposto	52
Figura 35 - Transitório da Partida do Motor	53
Figura 36 - IRF540	54
Figura 37 - MUR1620CTG	55
Figura 38 - Diagrama de Blocos STM32F446	57
Figura 39 - Nucleo-64	58
Figura 40 - Fluxo de Operação do Software.....	60
Figura 41 - Funcionamento do Software no Microcontrolador.....	61
Figura 42 - Opto Acoplador 6n136.....	62
Figura 43 - Esquema Elétrico Circuito Auxiliar.....	62
Figura 44 - Conversor de Potência CC-CC	64
Figura 45 - Protótipo do Conversor CC-CC.....	65
Figura 46 - Sinal MCU vs. Sinal Opto Acoplador	66
Figura 47 - Chaveamento Região Linear Com Carga	67
Figura 48 - Conversor CC-CC Final	68
Figura 49 - Protótipo Finalizado.....	69
Figura 50 - Forma de Onda do Conversor em Funcionamento	69
Figura 51 - Forma de Onda Alimentação do Motor DC.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros Elétricos Máximos IRF540	54
Tabela 2 - Parâmetros Elétricos Máximos MUR1620CTG.....	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	TEMA	13
1.2	PROBLEMA.....	13
1.3	JUSTIFICATIVA	15
1.4	OBJETIVOS	16
1.4.1	Geral.....	16
1.4.2	Específicos.....	16
1.5	DELIMITAÇÃO.....	17
1.6	PROPOSTA DA SOLUÇÃO	17
1.7	METODOLOGIA DE PESQUISA.....	17
1.8	ESTRUTURA DA MONOGRAFIA	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1	HISTÓRICO	19
2.2	O VEÍCULO ELÉTRICO.....	25
2.2.1	Sistemas de Tração de Veículos Elétricos	26
2.2.2	Sistemas de Tração de Veículos Elétricos de Pequeno Porte	27
2.2.3	Topologias Dos Veículos Elétricos	28
2.2.3.1	Topologia Primitiva.....	29
2.2.3.2	Topologia Transmissão Fixa	29
2.2.3.3	Topologia Transmissão Fixa Compacto	30
2.2.3.4	Topologia Multi Motor.....	30
2.2.3.5	Topologia <i>In-Wheel Drive</i>	31
2.2.3.6	Topologia <i>Driving Wheel</i>	32
2.3	SUBSISTEMA DE PROPULSÃO ELÉTRICA.....	33
2.3.1	O Motor Elétrico	33
2.3.1.1	Motores Com Comutação.....	33
2.3.1.2	Motores Sem Comutação	37
2.3.2	O Conversor de Potência	40
2.3.2.1	Controle por Chaveamento.....	40
2.3.2.2	Transistores e PWM	43
2.3.2.3	Conversores CC-CC	44
2.3.2.4	Operação dos Conversores CC-CC	47

3	DESENVOLVIMENTO	51
3.1	O CIRCUITO ESCOLHIDO	51
3.2	O CIRCUITO DE COMANDO	56
3.2.1	O Microcontrolador	56
3.2.2	O Software	58
3.2.3	O Circuito Auxiliar de Controle	61
3.3	DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO	63
3.4	RESULTADOS OBTIDOS	65
4	CONCLUSÃO	72
	REFERÊNCIAS	75
	ANEXOS	77

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será descrito o escopo do presente projeto, abordando os seguintes tópicos:

- a) Tema;
- b) Problema;
- c) Justificativa;
- d) Objetivos;
- e) Delimitação e Proposta da Solução.

1.1 TEMA

Desenvolvimento de um conversor eletrônico CC-CC, capaz de alimentar um motor utilizado em um sistema de tração de um veículo elétrico de pequeno porte.

1.2 PROBLEMA

Sempre crescente, a enorme demanda por petróleo ainda é um assunto delicado e complexo, que não só está, mas ainda estará em pauta nas mais diversas discussões que concernem assuntos como sustentabilidade, preservação do meio ambiente e mobilidade, pelo fato de se tratar de um recurso não renovável que ruma a escassez.

Dentre eles, a mobilidade tem ganhado cada vez mais destaque, por apresentar soluções promissoras e já factíveis para a substituição do uso de combustíveis fósseis, isto é, advindos do petróleo, pelo uso de fonte de energias renováveis, com ênfase na energia elétrica. A energia elétrica já é amplamente utilizada em veículos automotores, sendo eles os mais diversos, como por exemplo em carros, motos e afins.

Atualmente, a já crescente demanda por veículos automotores, que funcionem a base de energia elétrica, vem se intensificando ainda mais. Por ser uma fonte renovável e não poluente, ela se mostra como uma excelente alternativa para a substituição de automóveis movidos à combustão interna.

Já é possível notar um crescimento expressivo no número de unidades de carros elétricos em países mais desenvolvidos. Segundo a revista online Auto Esporte (2018), a frota mundial de carros elétricos apresentou um crescimento de 55% com relação ao primeiro trimestre de

2017, isso se deve principalmente à países de primeiro mundo, como por exemplo, China e Noruega, que já apresentaram aumento significativo nas unidades deste tipo de automóvel. Destaque também para Alemanha, cujo crescimento nas unidades elétricas já indicam que logo irá ultrapassar a Noruega se tornando o maior mercado europeu deste nicho.

Outro indício que também corrobora com os fatos acima, é o surgimento de empresas como a Tesla, que já investe massivamente em pesquisas, desenvolvimento de novas tecnologias, visando disseminar ainda mais o uso de veículos elétricos. Isso tudo sem mencionar os investimentos de gigantes do setor automobilístico como BMW, Volvo, Toyota, Nissan dentre outras marcas, que já se encontra na vanguarda deste movimento de transição.

Entretanto, esta não é a situação no Brasil, que diverge de tais tendências. Segundo a revista eletrônica Exame (2019), não só no Brasil, mas como em toda a América do Sul, ainda há uma forte tendência das principais montadoras aqui presentes, como GM, Fiat Chrysler e Toyota, manterem seus investimentos na produção de veículos movidos à combustão interna, devido a existências de bons subsídios oferecidos pelos governos.

Apesar de já existirem no Brasil iniciativas do governo para o incentivo do uso de veículos elétricos, em 2020 ainda estamos muito aquém em comparação a outros países mais desenvolvidos, devido a fatos como o custo ainda elevado destes automóveis e praticamente 100% dos carros movidos a eletricidade utilizados no Brasil são importados.

No Brasil, mesmos os patinetes elétricos, que se popularizaram em todo país, e são oferecidos para locação através de aplicativos, não são fabricados aqui, o que faz com que o valor não só dos patinetes, mas também de todos os veículos elétricos no geral, cheguem ao consumidor com preço elevado, tornado estas alternativas inviáveis na maioria dos casos.

Uma das razões para a baixa utilização de veículos elétricos no Brasil, é que ainda não se detém o *know how* para fabricação em larga escala deles, exceto por iniciativas ainda tímidas de algumas pequenas empresas, como por exemplo, a Mobilis, que já oferece três modelos de automóveis. Porém ainda não adequados para o uso em vias públicas. Outra empresa nacional que já apresenta uma maturidade um pouco maior neste nicho de mercado é a Hitech Electric, que conta com dois modelos distintos de carros elétricos e dois modelos de caminhões também movidos a eletricidade. Ambos já apropriados para utilização em vias públicas, porém com preços ainda muito distantes do “popular”.

Nos últimos anos este mercado de veículos elétricos, ainda restritivo, começou a dar sinais de mudança, devido ao surgimento de veículos elétricos de pequeno porte (VEPP). Disponibilizados principalmente em formato de bicicletas, patinetes e scooters, eles vêm conquistando cada vez mais usuários.

Por se mostrarem alternativas muito mais baratas e acessíveis que carros elétricos, além de proporcionarem uma mobilidade ainda maior, pelo fato de poderem transitar em vias mais alternativas e não estarem submetidos às mesmas regulamentações dos demais automóveis, estes pequenos veículos já são amplamente utilizados em diversos grandes centros urbanos ao redor de todo mundo.

Além do preço diminuto de cada pequeno veículo elétrico, a iniciativa de algumas *startups* como a Grim, passaram a disponibilizar também estas unidades para locação, de maneira rápida e simples através de um *APP* de smartphone, o que contribuiu ainda mais para a adesão massiva a estes meios de transportes.

Apesar do baixo valor, estes pequenos veículos ainda não são opções atrativas em países como o Brasil, chegando a custar mais caro que uma motocicleta comum. Isto se deve ao fato de que ainda não há uma iniciativa consistente de produção em massa de VEPP's, fazendo com que as unidades comercializadas aqui sejam importadas, estando sujeitos a taxas de importação e impostos elevados, o que acaba onerando seu custo.

Em suma, pode-se perceber pelos fatos expostos acima que uma boa alternativa para ampliar o uso de veículos elétricos, é a priori a apropriação do conhecimento para não só desenvolver, mas também fabricar estes automóveis, e a posteriori a internalização de sua fabricação em larga escala.

Sendo assim, este trabalho se propõe a apresentar o desenvolvimento de um protótipo de conversor eletrônico, capaz de controlar o sistema de tração elétrica de um veículo de pequeno porte, como uma bicicleta ou scooter, com o intuito de provar a viabilidade na fabricação destes dispositivos em território nacional, visando a aquisição deste capital intelectual e a internalização deste conhecimento. Com o objetivo de futuramente auxiliar na popularização do uso de veículos elétricos, através do pleito de incentivos e subsídios advindos do governo, proporcionando assim preços mais atrativos e acessíveis.

1.3 JUSTIFICATIVA

A já crescente procura por veículos elétricos no mundo inteiro vem se intensificando ainda mais nos últimos anos, devido a fatores como desenvolvimento sustentável, preservação do meio-ambiente e principalmente a grande necessidade de mobilidade compartilhada por

quase todos, aliada aos aumentos sucessivos de combustíveis fósseis. Porém, no Brasil ainda é muito perceptível uma resistência à absorção desta nova tendência mundial.

Resistência essa que se deve ao custo ainda elevado dos veículos elétricos em território nacional, sejam eles carros, bicicletas patinetes e afins. O alto valor, por sua vez, advém da necessidade de importação de quase 100% das unidades movidas à eletricidade, da falta de subsídios representativos oferecidos pelo governo federal e a quase total ausência de fabricantes brasileiros.

Porém, mesmo com a resistência a adesão de carros elétricos, o surgimento de veículos elétricos pequenos, como bicicletas e patinetes, se popularizou rapidamente inclusive no Brasil. Através de serviços de locação, ou até mesmo aquisição de uma unidade, os VEPP já são uma realidade no mundo inteiro, se mostrando uma alternativa fácil e relativamente barata para os problemas de mobilidade urbana.

Assim sendo, este trabalho propõe o desenvolvimento de um conversor eletrônico CC-CC, tendo como premissas a obtenção de um produto de baixo custo, funcionamento simples e robusto.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Geral

O objetivo geral deste trabalho é implementar o protótipo de um conversor eletrônico, capaz de controlar e alimentar um sistema de tração propulsado por um motor elétrico, que seja aplicável à um veículo automotor, utilizando materiais e tecnologias de baixo custo.

1.4.2 Específicos

- Identificar motores adequados para a aplicação em veículos de pequeno porte.
- Estudar conversores aplicáveis no acionamento do motor CC de pequeno porte.
- Desenvolver um protótipo de conversor eletrônico CC-CC capaz de alimentar e controlar o motor escolhido.

1.5 DELIMITAÇÃO

Neste trabalho será proposto o desenvolvimento de um protótipo de Drive CC-CC, que realize o controle e fornecimento de energia a um motor elétrico de corrente contínua, restringindo-se ao projeto, montagem e teste deste conversor eletrônico. Vale ressaltar, que este trabalho não almeja a construção de um veículo elétrico completo, em função da complexidade dos sistemas mecânicos e elétricos que o compõe. Será contemplado somente a concepção do dispositivo, avaliação de seu desempenho e a coleta e exposição dos resultados obtidos.

1.6 PROPOSTA DA SOLUÇÃO

A proposta deste trabalho é o desenvolvimento de protótipo de conversor eletrônico CC-CC, capaz de controlar e fornecer a potência necessária para o acionamento de um motor elétrico de corrente contínua aplicável em veículos de pequeno porte. A concepção deste dispositivo irá contemplar os seguintes pontos:

- Identificar motor adequado.
- Estudar topologias aplicáveis.
- Selecionar uma topologia
- Projeto de um Conversor CC-CC;
- Implementação de um protótipo.
- Realização de testes com o protótipo desenvolvido.

1.7 METODOLOGIA DE PESQUISA

Este trabalho consiste em uma pesquisa bibliográfica e experimental, devido ao fato de que não busca somente obter conhecimentos em livros, artigos ou fontes fidedignas, mas também na aplicação deles através da construção de um protótipo para estudo.

1.8 ESTRUTURA DA MONOGRAFIA

Para que se tenha uma visão clara e objetiva deste trabalho, seu conteúdo foi organizado da seguinte forma:

- **Capítulo 1:** Apresenta as definições do projeto, tais como: tema, problema, justificativa, objetivos, delimitações, proposta da solução e metodologia de pesquisa.
- **Capítulo 2:** Apresenta a fundamentação teórica, necessário para o desenvolvimento do trabalho.
- **Capítulo 3:** Apresenta o desenvolvimento da solução, funcionamento e simulações do projeto.
- **Capítulo 4:** A conclusão do trabalho é apresentada neste capítulo, como também os problemas enfrentados no decorrer do seu desenvolvimento.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os fundamentos teóricos em que se baseia este trabalho. Inicialmente é apresentado um breve histórico sobre veículos elétricos, relatando como surgiram, como evoluíram e por fim como estão presentes nos dias de hoje.

Também será realizada uma abordagem conceitual sobre seus componentes, quais são e como são empregados. Dando ênfase aos Veículos Elétricos de Pequeno Porte (VEPP), mais especificamente sobre os conversores eletrônicos responsáveis pelo acionamento e controle de seu motor elétrico.

2.1 HISTÓRICO

Veículos elétricos já ocupam seu espaço em nossa sociedade a muito mais tempo que se imagina. Foram eles os primeiros tipos de veículos automotores concebidos pela humanidade. Desde sua concepção eles já passaram por incontáveis evoluções, partindo de modelos extremamente rudimentares, sendo aperfeiçoado ao longo do tempo, assumindo a forma similar ao conceito de automóveis contemporâneos e sendo até mesmo miniaturizado em pequenas motonetas e patinetes de uso urbano. Segundo Denton (2009, p. 5) os primeiros VE's surgiram na Escócia e EUA, entre os anos de 1801 e 1850.

Entretanto, a história dos VEs está ligada diretamente ao desenvolvimento das baterias, conforme Hoyer (2007, p. 1), e dos motores a combustão, assim como suas fontes de energia, conforme Anderson e Anderson (2010, p. 21):

“O crescimento da industrialização [...] viu a escalada de uma das necessidades mais básicas dos seres humanos - o transporte”. Ninguém pode ser creditado pela invenção do automóvel que você dirige hoje. Desenvolveu-se pouco a pouco a partir das ideias, imaginação, fantasia e consertos de centenas de pessoas ao longo de centenas de anos. Os primeiros anos do desenvolvimento do automóvel mostraram uma grande rivalidade entre veículos movidos a gasolina, a vapor e elétricos. A inovação gerou mais inovação à medida que uma grande variedade de fabricantes e empreendedores surgiu, fornecendo a um público apaixonado uma ampla gama de carros para despertar seu interesse e atender as suas necessidades. Alguns fabricantes empreendedores até tinham híbridos gasolina-elétricos na estrada. Foi um momento emocionante.”

Os primeiros veículos elétricos tripuláveis, se pareciam com charretes, sua grande popularização se deu ao fato de serem menos barulhentos, não emitirem fumaça e a sua partida era muito mais fácil que os veículos movidos a combustão, conforme (NOCE, 2009). Além disso, os motores a combustão possuíam riscos de incêndio.

Em 1903 iniciou-se um processo de declínio dos veículos elétricos, isso ocorre devido ao surgimento da partida elétrica e o motor de arranque que foi popularizado no modelo Ford T. Isso facilitava a utilização de motores a combustão, que sempre apresentaram maior autonomia que os veículos elétricos (BALDISERRA, 2012).

Figura 1- Ford T



Fonte: <https://revistaautoesporte.globo.com/Classicos/noticia/2012/11/classico-do-dia-ford-t.html>, acesso em 21/06/20

Outro momento histórico que acabou alavancando as pesquisas dos VE's foi a crise do petróleo. Os veículos elétricos desenvolvidos durante esse período ainda utilizavam baterias de chumbo-ácido, o que acabava afetando a autonomia. Os esforços com relação autonomia duraram até metade da década de 80, segundo Noce (2009, p.26)

Esta crise também contribuiu com a iniciativa de utilização de veículos elétricos no Brasil. Em 1974, a empresa Gurgel apresenta no Salão do Automóvel seu projeto pioneiro o Gurgel Itaipu.

Figura 2 - Gurgel Itaipu



Fonte: <http://www.gurgel800.com.br/publicacoes/quatorrodas/564/>, acesso em 21/06/20

Carregando o nome da hidroelétrica na fronteira em Paraguai e Brasil, maior do mundo até então e, segundo (Quatro Rodas, 2007) ele contava com um motor elétrico de 3,2 KW, pequeno porte levando somente dois passageiros, carroceria de em fibra de vidro e dez baterias. Tais características proporcionavam ao Itaipu uma velocidade máxima de 50 Km/h e autonomia de 60 a 80 Km.

Porém, nesta década, o VE com maior destaque foi sem dúvida o modelo explorador lunar utilizado na missão Apollo 15. Ele permitiu a tripulação chegar a 5 km de distância do local do pouso. Desenvolvido pela NASA, possuía um motor elétrico para cada roda, tinha velocidade e torque baixos, sua direção era através de um joystick, suas baterias de prata-zinco forneciam 36 V, sua velocidade máxima era 13 km/h, com uma autonomia de 92 km.

Figura 3 - Veículo Lunar

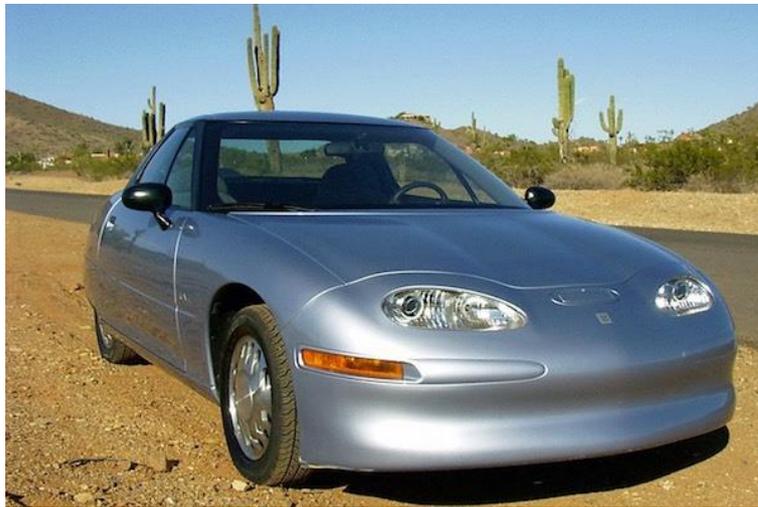


Fonte: <http://autoetecnica.band.uol.com.br/fly-me-to-the-moon-quando-a-gm-visitou-a-lua/>, acesso em 21/06/20

Com o passar da crise, o preço do petróleo voltou a cair, os avanços na eletrônica também contribuíram para os motores a combustão. Além disso, no Brasil o surgimento do programa governamental Proálcool, contribuiu para um novo aumento na atratividade de veículos com motores de combustão interna, em detrimento do uso de dos veículos elétricos, fazendo com que sua produção em solo nacional entrasse em declínio.

Durante os anos 90 ocorrem diversas discussões sobre o aumento da poluição e dos gases causadores efeito estufa, o que coloca em pauta novamente os VE's no mercado, dando se destaque ao modelo da GM o EV1, o veículo utilizava de conversores eletrônicos no motor, além de outras tecnologias. Seu grande destaque era a autonomia.

Figura 4 - GM EV1



Fonte: <https://dylar.com/posts/175/electric-cars-the-future-from-the-past>, acesso em 21/06/20

Atualmente uma das empresas que mais contribui com pesquisas de VE's é a montadora Tesla Motors, fundada em 2003, em 2014 é lançado o modelo Tesla S, com uma autonomia de 530 km, tração nas quatro rodas e piloto automático. Sendo que em 2015, houve um aumento significativo no número de eletro postos e automóveis elétricos pelo mundo, foi estimado que no ano a frota de VE's era de aproximadamente 1,26 milhão.

Fonte: <http://br.rfi.fr/franca/20180622-autolib-paris-abandona-locacao-de-carros-eletricos-e-adota-patinetes-0>, acesso em 21/06/20.

Figura 5 - Tesla *Model S*



Fonte: <https://www.cnet.com/roadshow/reviews/2014-tesla-model-s-review/>, acesso em 21/06/20.

Há também diversos tipos de veículos elétricos que vão mais além do estereótipo de simples automóveis, como por exemplo ônibus, camionetas, caminhões de transporte e os conhecidos como super caminhões, que geralmente são utilizados na indústria de mineração.

Figura 6 - Super Caminhão Elétrico eDumper



Fonte: <https://quatorrodas.abril.com.br/noticias/supercaminhao-eletrico-leva-65-toneladas-e-gera-sozinho-toda-a-sua-energia/>, acesso em 21/06/20.

Porém, apesar de contarem com sistemas extremamente sofisticados, terem uma grande autonomia e até mesmo estarem aptos a realizar as mais diversas tarefas, não foram os estes os veículos elétricos que mais se disseminaram pelo mundo e nem os que tiveram a maior

aderência ao mercado consumidor. Estes títulos são ostentados hoje em dia pelos veículos elétricos de pequeno porte.

Os VEPP, apresentam um design simples e reduzido, geralmente disponibilizado como bicicletas, scooters e patinetes elétricos. Utilizando motores elétricos de baixa potência em corrente contínua e baterias de pequeno porte, suportando apenas um ou dois passageiros e, devido a esta simplicidade e tamanho reduzido, fez com que eles se tornassem acessíveis aos mais diversos níveis do mercado consumidor graças ao preço reduzido.

Fatores como o grande aprimoramento da mobilidade urbana e de não demandarem habilitação para condução, também contribuíram para rápida adesão de novos usuários destes meios de transporte, fazendo com que sua popularidade logo atingisse o mundo inteiro.

De acordo com (SISTEMA FIEP, 2019) a frota mundial destes veículos passou de 300 milhões de unidades ainda no ano de 2018, impactando de maneira positiva aspectos como congestionamento e emissão de gases do efeito estufa.

Figura 7 - Patinete Elétrico Yellow



Fonte: <https://tecnoblog.net/297315/prefeitura-rio-janeiro-regulamenta-patinetes-eletricos-taxas-empresas/>, acesso em 21/06/20.

A aceitação dos VEPP foi tamanha, que logo ruas de grandes centros urbanos passaram ser permeadas pela ampla circulação destes veículos. Tal sucesso propiciou inclusive o serviço de locação de patinetes e scooter elétricas. Este serviço passou ser oferecido em meados de

2018, por uma *startup* mexicana chamada *Grin*, proporcionando a locação simples e rápida de patinetes elétricos via *APP*, o que contribuiu ainda mais para a ampla popularização dos VEPP.

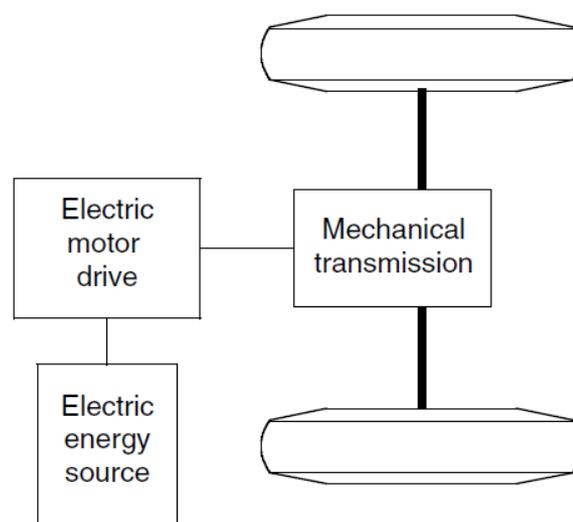
2.2 O VEÍCULO ELÉTRICO

Veículo elétrico consiste em todo e qualquer veículo automotor, cuja propulsão é realizada por um ou mais motores elétricos, de maneira automática, e sem a necessidade de esforço humano para tal. De acordo com (Barreto, 1986) um sistema composto por uma ou mais máquinas elétricas, dotado de um dispositivo de acionamento e controle, destinado ao transporte de pessoas ou cargas em geral é um veículo elétrico.

Estes veículos são alimentados exclusivamente por baterias eletroquímicas, dispensando a utilização de qualquer combustível, fato este que o faz ser considerado emissão zero, porém resulta em uma autonomia reduzida do sistema.

De acordo com (Ehsani *et al.*, 2010) nos primórdios os VE's consistiam na simples substituição do motor de combustão interna por um motor elétrico, na troca de seu tanque de gasolina por baterias. Mantinham -se todos os demais componentes presentes no veículo de combustão interna (VCI), gerando excesso de peso, pouca flexibilidade no sistema e degradação da performance. Abaixo um esquema do sistema de tração de um carro elétrico primitivo.

Figura 8 - Esquema de Tração VE Primitivo



Já os veículos elétricos mais modernos são construídos a partir de um novo projeto de chassi e carroceria, segundo (WILTUSCHNIG, 2016) ambos são projetados visando redução de peso e a otimização do centro de massa, satisfazendo as necessidades estruturais de um VE o que por consequência proporciona um melhor aproveitamento da tração elétrica.

A seguir serão abordados quais e como são constituídos os sistemas de tração empregados nos mais diversos tipos de veículos elétricos, sejam eles automóveis tradicionais ou até mesmo bicicletas, patinetes e afins.

2.2.1 Sistemas de Tração de Veículos Elétricos

Um sistema moderno de tração elétrica, aplicado em veículos de maior porte como carros e afins, segundo (Ehsani *et al*, 2004) é composto de três subsistemas principais sendo eles o de propulsão elétrica, fonte de energia e sistema auxiliar.

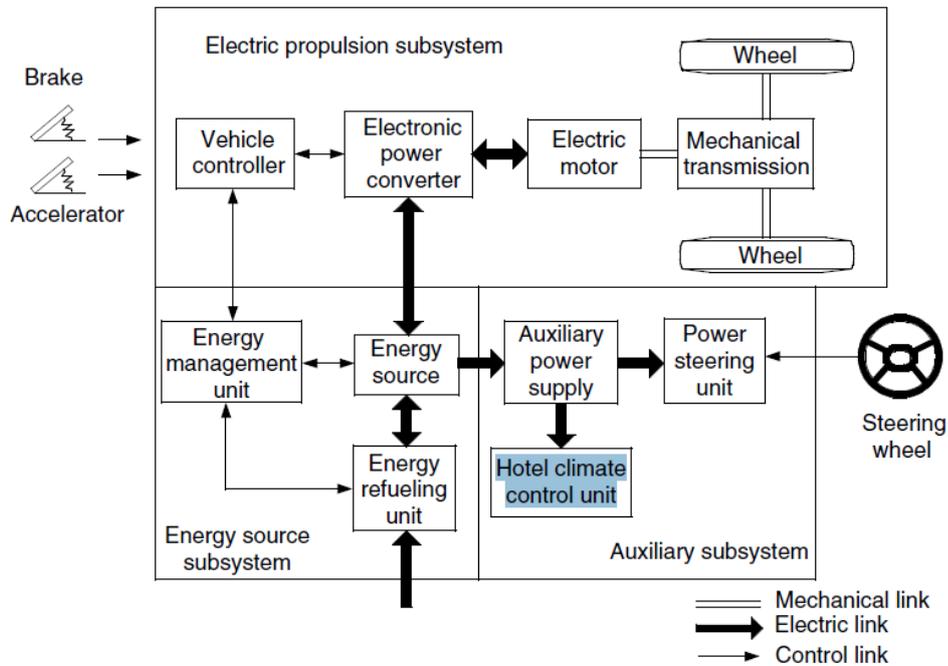
O subsistema de propulsão elétrica é composto por um ou mais motores elétricos, controlador e conversor eletrônico que realizam o controle e entrega de potência ao motor e por fim uma transmissão mecânica que é responsável pela transferência da potência mecânica gerada pelo motor às rodas do VE.

Já o subsistema de fonte de energia engloba a unidade de gerenciamento de energia, responsável pelo controle da carga da fonte de energia em questão e por fim a unidade de carregamento que se encarrega de realizar e monitorar o reabastecimento da fonte de energia.

Quanto ao subsistema auxiliar é constituído por uma unidade de direção assistida, ar condicionado e fonte de alimentação auxiliar.

O diagrama abaixo ilustra composição de um veículo elétrico genérico que integra os três sistemas citados a priori.

Figura 9 - Sistema de um VE moderno



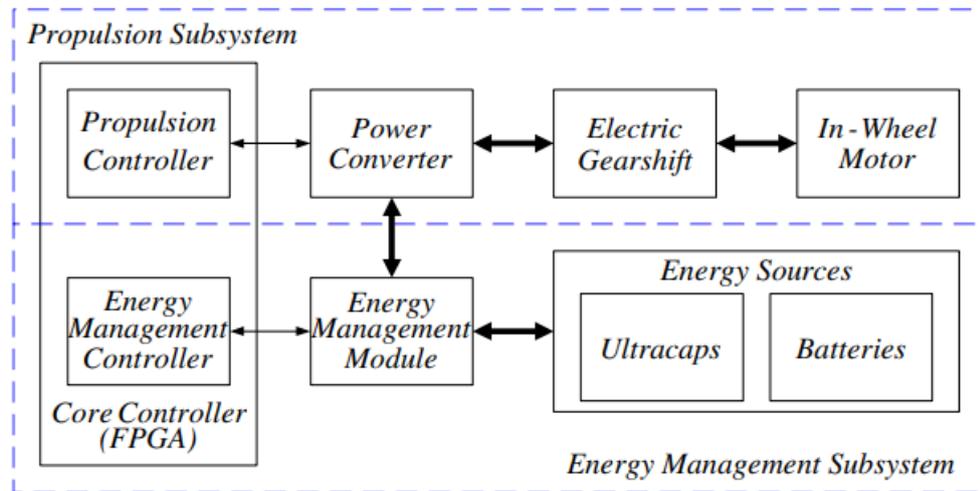
Fonte: Modern Electric, Hybrid Electric & Fuel Cell Vehicles 1ª edição pag. 100.

Descrevendo o funcionamento do sistema de uma maneira simples, pode-se dizer que, os pedais de acelerador e freio geram sinais adequados para o controlador eletrônico, que por sua vez interage com o conversor eletrônico regulando o fluxo de potência entre a fonte de energia e o motor.

2.2.2 Sistemas de Tração de Veículos Elétricos de Pequeno Porte

Os veículos de design mais simples e modesto como pequenas motonetas, scooters e patinetes elétricos, segundo (Yang *et al.*, 2010), são compostos somente por dois subsistemas. O subsistema de propulsão elétrica e um subsistema dedicado ao gerenciamento de energia, como mostra o diagrama a seguir.

Figura 10 - Sistema de Propulsão dos VEPP



Fonte: An energy management system for a directly driven electric scooter

O subsistema de propulsão é composto por um acelerador (*Propulsion Controller*), conversor de potência, transmissão eletrônica e um ou dois *In-wheel Motor*, também conhecido como motor de cubo, dependendo do porte do veículo em questão.

Já o subsistema de gerenciamento é composto por um módulo de gerenciamento de energia e uma fonte de energia, sendo geralmente composto por baterias, porém em veículos mais modernos já começam a apresentar a utilização de super capacitores.

Vale ressaltar que tanto o acelerador e o módulo de gerenciamento de energia são controlados por um microcontrolador ou até mesmo um microprocessador, sendo ele o núcleo de controle do veículo como um todo. Ele irá receber sinais eletrônicos gerados pelo acionamento do acelerador, freios entre outros, interpretando-os e atuando no controle do motor e regulando o consumo de carga da fonte energética.

Tendo descrito de maneira geral a composição do sistema de propulsão aplicado nos veículos elétricos, serão abordados a seguir os possíveis arranjos para aplicação de motores elétricos nos VE, bem como nos VEPP.

2.2.3 Topologias Dos Veículos Elétricos

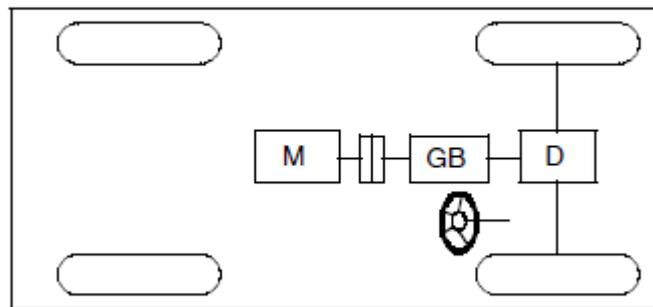
Mesmo na atualidade, não há um modelo fixo para o sistema de um veículo elétrico, de acordo com (Ehsani et al, 2004) existem várias possibilidades de configuração para um VE. Isso graças não só aos diversos tipos de motores elétricos e sua enorme versatilidade de uso, mas

também às inúmeras fontes energias, que podem ser utilizadas na concepção de um automóvel elétrico. É possível dividi-las em seis topologias principais, que serão brevemente descritas a seguir.

2.2.3.1 Topologia Primitiva

Como citado anteriormente, nesta topologia, são mantidos todos os elementos mecânicos de um VCI comum, sendo substituído somente o motor de combustão interna por um motor elétrico. O motor elétrico é ligado a uma transmissão mecânica, que por sua vez é conectada a um eixo diferencial, passando por uma embreagem e por fim entregando a potência mecânica às rodas.

Figura 11 - Topologia Primária de um VE



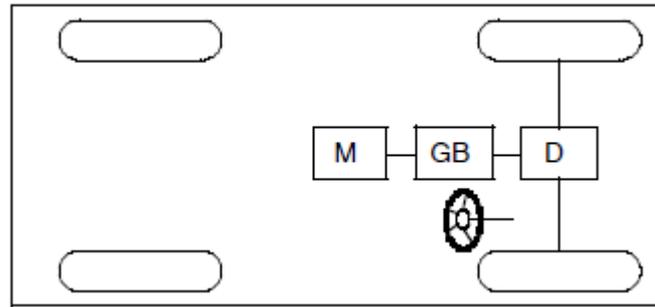
Fonte: Modern Electric, Hybrid Electri & Fuel Cell Vehicles 1ª edição pag. 102.

2.2.3.2 Topologia Transmissão Fixa

Se assemelha a topologia anterior pois alguns componentes mecânicos ainda são mantidos, como o eixo diferencial e a transmissão. Porém nesta configuração é utilizado um tipo de motor cuja potência é constante em um longo intervalo de velocidades, possibilitando a velocidade ser controlada através do próprio motor.

Graças a esta característica, não é preciso empregar uma transmissão de multiv velocidades, o que reduz significativamente o peso do veículo em questão. Também é possível dispensar o uso de embreagem, simplificando o sistema de tração, pois a troca de marchas não é necessária.

Figura 12 - Topologia Transmissão Fixa

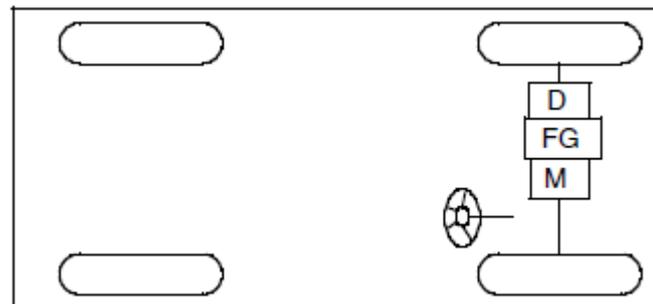


Fonte: Modern Electric, Hybrid Electric & Fuel Cell Vehicles 1ª edição pag. 102.

2.2.3.3 Topologia Transmissão Fixa Compacto

Similar a configuração com transmissão fixa, dispensa o uso de embreagem, utilizando somente uma transmissão de velocidade fixa, onde a velocidade do VE também é controlada através do motor. Se diferencia, principalmente devido ao fato de seu sistema tração ser constituído por uma peça única, formada pelo acoplamento do motor elétrico, eixo diferencial e transmissão em um só elemento, tornando o sistema ainda mais leve e compacto.

Figura 13 - Topologia Transmissão Fixa Compacta



Fonte: Modern Electric, Hybrid Electric & Fuel Cell Vehicles 1ª edição pag. 102.

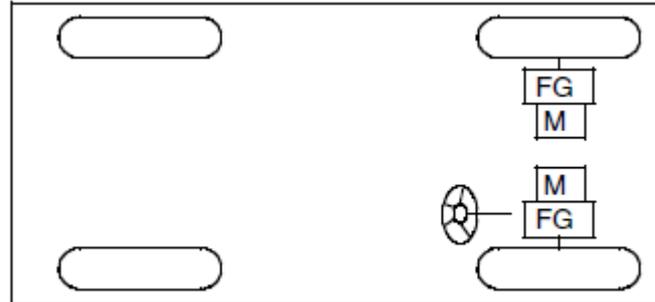
2.2.3.4 Topologia Multi Motor

Nesta configuração simplifica-se ainda mais o sistema de tração do VE, eliminando a necessidade do eixo diferencial.

Nela são utilizados, no mínimo dois motores elétricos, posicionados nas periferias de duas ou até mesmo das quatro rodas do veículo, sendo acoplados em transmissões mecânicas responsáveis por transferir o torque às mesmas.

Cada uma das rodas é tracionada por seu próprio motor, possibilitando que elas operem em velocidades diferentes, principalmente quando o VE percorre um trajeto curvilíneo, proporcionando um controle de tração mais aprimorado.

Figura 14 - Topologia Multi Motor



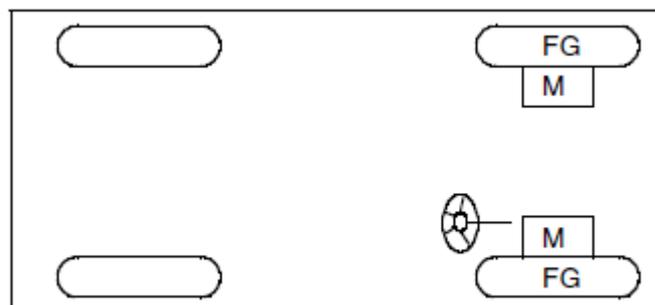
Fonte: Modern Electric, Hybrid Electri & Fuel Cell Vehicles 1ª edição pag. 102.

2.2.3.5 Topologia *In-Wheel Drive*

Simplificando ainda mais o sistema de tração do VE, nesta topologia o motor elétrico é inserido no interior das rodas, daí o porquê do nome “*In-Wheel*”, termo em inglês para “na roda”. Neste sistema um conjunto de pequenas engrenagens planetárias é utilizado para realizar a redução da velocidade de rotação do motor e amplificar seu torque, atuando como a transmissão mecânica do veículo.

Essa configuração também dispõe da possibilidade de controle de velocidade individual em cada roda, dispondo da mesma forma de um sistema de controle de tração aprimorado.

Figura 15- Topologia *In-Wheel Drive*



Fonte: Modern Electric, Hybrid Electri & Fuel Cell Vehicles 1ª edição pag. 102.

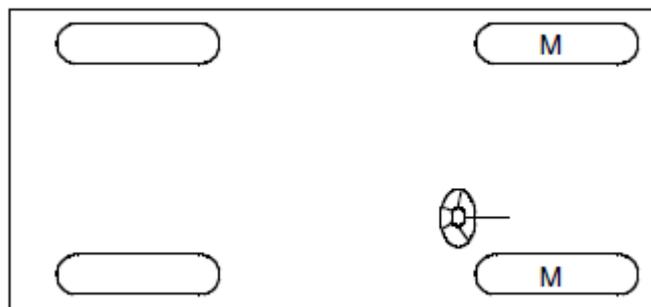
2.2.3.6 Topologia *Driving Wheel*

Abandonando completamente quaisquer engrenagens mecânicas existentes entre o motor elétrico e a roda do VE, esta topologia faz o uso de um tipo diferente de motor, dotado de um rotor externo de baixa velocidade.

Diferentemente dos demais motores que são constituídos por um estator em sua camada mais externa e um rotor localizado em seu centro, este motor é exatamente o oposto. Seu estator se localiza no centro e seu rotor posicionado no exterior do motor.

O controle de velocidade do veículo nesta configuração é equivalente a controlar a velocidade de rotação do motor, porém este arranjo requer um torque mais elevado que as demais configurações, para que seja possível tirar o VE do estado de inércia.

Figura 16 - Topologia *Driving Wheel*



Fonte: Modern Electric, Hybrid Electric & Fuel Cell Vehicles 1ª edição pag. 102.

Destacando-se das demais, estas duas últimas topologias apresentadas são amplamente empregadas na construção de veículos elétricos de pequeno porte. Isto graças a sua simplicidade e possibilidade de miniaturização, possibilitando designs mais compactos, tornando-se aplicáveis em patinetes, bicicletas e scooters.

Vale ressaltar que devido à redução no tamanho do motor aplicado nestes pequenos veículos e, ambas topologias demandarem mais torque para romper a inércia por não contarem com nenhum tipo de transmissão mecânica, se faz necessário um impulso inicial por parte do usuário.

Uma vez que fora demonstrado o conceito geral sobre a definição dos veículos elétricos, de seus sistemas, e suas possíveis topologias, será abordado de maneira mais profunda, o subsistema de propulsão elétrica aplicado em um VEPP, dando foco aos conversores CC-CC empregados no controle de seu sistema de propulsão, sendo este um dos principais objetivos do presente trabalho.

2.3 SUBSISTEMA DE PROPULSÃO ELÉTRICA

O subsistema de propulsão elétrica, ou sistema de tração elétrica, é o núcleo principal de um veículo elétrico. Responsável por realizar e controlar a locomoção do VE. Como visto anteriormente, é composto basicamente por um motor elétrico, que é alimentado por um conversor eletrônico de potência, que por sua vez, é comandado por um controlador eletrônico, usualmente composto por um microprocessador.

Neste item, serão aprofundadas as definições sobre cada um dos componentes do subsistema de propulsão elétrica, a partir de uma descrição mais detalhada a respeito de respectivas funções, composição, propriedades e tipos.

2.3.1 O Motor Elétrico

Componente indispensável em um veículo elétrico, o motor elétrico é responsável pelo movimento. É ele que realiza a conversão da energia elétrica entregue pelo conversor de potência em energia mecânica.

Os motores utilizados em veículos elétricos, diferentemente de um motor elétrico industrial, devem ser capazes de suportar condições adversas, como constantes acelerações e frenagens, prover alto torque em baixas velocidades e uma ampla faixa de velocidade de operação.

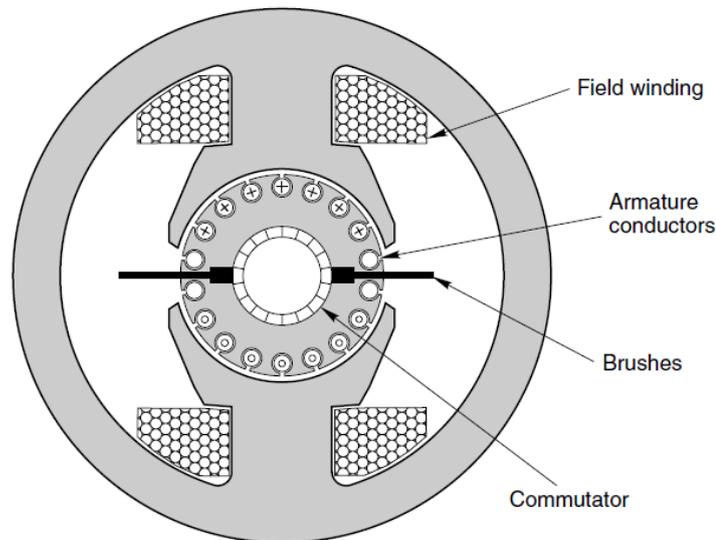
Segundo (Ehsani *et al.*, 2004) pode-se dividir os motores empregados em veículos elétricos em dois grupos principais, motores com comutação, basicamente composto por motores de corrente contínua, e motores sem comutação, formado por motores de indução.

A seguir serão descritos de maneira mais detalhadas as características principais e os tipos de motores que compõe cada um destes grupos.

2.3.1.1 Motores Com Comutação

São classificados como motores com comutação, os motores de corrente contínua (CC). Necessitam de comutadores e escovas para o suprimento de corrente, devido a isso demandam mais manutenção, é inapropriado para altas velocidades e por fim são dotados de baixa densidade de potência. Apesar de algumas características adversas, motores de corrente contínua ainda tem destaque no uso em VE's, devido a sua tecnologia muito madura e facilidade de controle. Abaixo um esquema genérico de um motor CC.

Figura 17 - Esquema de Construção de Um Motor CC



Fonte: Electric Motors and Drives 3ª edição pág. 83.

De acordo com (HUGS, 2003) um motor CC é composto por dois circuitos separados. Um circuito menor composto pelas espiras que envolvem cada um dos polos, e um circuito principal formado por espiras presentes no núcleo ligadas a um componente chamado escova.

O circuito menor, também chamado de enrolamento de polos, localizados no estator do motor. Segundo quando ambos enrolamentos são percorridos por correntes elétricas produzindo um campo magnético de sentido fixo entre os polos, normal ao sentido do campo que será formado no rotor posteriormente. Porém a potência fornecida aos enrolamentos dos polos não é convertida em potência mecânica, se dissipando na forma de calor no próprio estator.

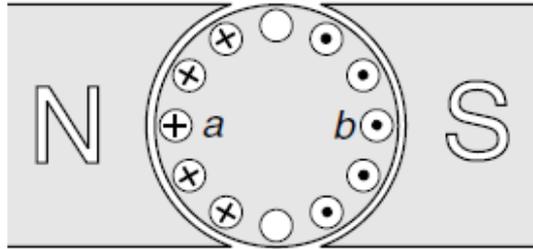
Quanto ao circuito principal, é formado pelo conjunto de espiras ou enrolamentos de armadura, localizadas em cavidades presentes no rotor, onde serão induzidos campos magnéticos, originados pela passagem de corrente elétrica através dos enrolamentos.

Esta corrente elétrica é fornecida para as espiras do núcleo com o auxílio de dos componentes, as escovas e o comutador. As escovas são basicamente blocos de carbono, capazes de conduzir corrente elétrica. Com o auxílio de molas as escovas são pressionadas contra o comutador estabelecendo contato elétrico com ele.

O comutador por sua vez consiste em um anel segmentado de cobre, ligado diretamente as espiras do rotor. Tendo um papel fundamental na geração de torque, garante o sentido correto do campo magnético que será gerado nas cavidades do rotor, fazendo com que as correntes dos enrolamentos mantenham sempre a direção.

Na imagem demonstra-se como deve ser a configuração do campo magnético formado no estator, bem como a direção das correntes nos enrolamentos do rotor.

Figura 18 - Configuração de Campos Magnéticos



Fonte: Electric Motors and Drives 3ª edição pág. 87.

Gerando no rotor campos magnéticos de sentidos opostos ao campo formado pelos polos do estator, resultando no surgimento de força para baixo próximo do polo Norte e outra para cima quando próximo polo sul, fazendo com que a potência elétrica fornecida é convertida em potência mecânica, a partir da interação entre ambos campos magnéticos, melhor demonstrado pelo esquema abaixo.

Figura 19 - Interação Magnética do Motor CC



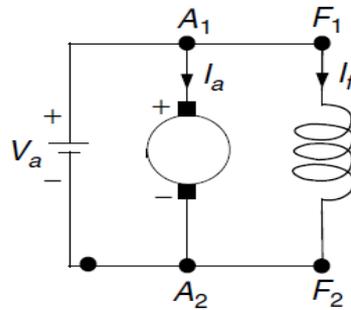
Fonte: Electric Motors and Drives 3ª edição pág. 89.

A partir das particularidades nos dois circuitos de alimentação dos enrolamentos tanto do estator como nos do rotor, pode-se segundo (Ehsani *et al.*, 2004), existem quatro tipos principais de motores CC que podem ser utilizados em um VE, sendo eles motores *Shunt*, motores em Série, Separadamente Excitados e motores Compostos.

Motores shunt tem como principal característica a ligação do circuito menor e do circuito principal em paralelo, sendo ambas alimentadas pelo mesmo circuito. Esta ligação faz

com que motores *shunt* sejam capazes de se manterem operando em velocidade quase que constante. Em Abaixo o esquema elétrico mostra o circuito de ligação de um motor shunt.

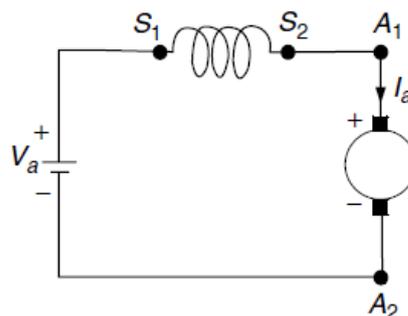
Figura 20 - Circuito de Ligação do Motor *Shunt*



Fonte: Modern Electric, Hybrid Electric & Fuel Cell Vehicles 1ª edição pag. 143.

Já os motores em série, como sugere o próprio nome, possui seu circuito menor e circuito principal ligados em série. Devido a esta característica de seus circuitos de alimentação pode-se dizer que o fluxo magnético em seu interior é diretamente proporcional a corrente no enrolamento de armadura. Muito utilizado em sistemas de tração devido ao fato de como os arranjos de alimentação simples, os motores em série apresentarem um grande torque em baixas velocidades. No esquema abaixo está ilustrado o esquema do circuito de ligação deste motor.

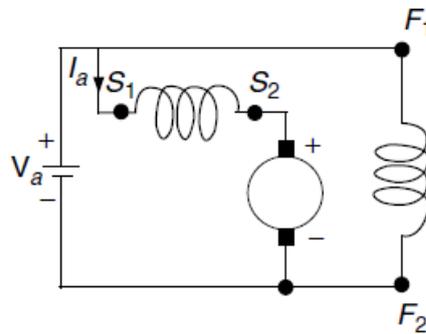
Figura 21- Circuito de Ligação do Motor Série



Fonte: Modern Electric, Hybrid Electric & Fuel Cell Vehicles 1ª edição pag. 143.

Motores Compostos podem ser definidos como uma composição entre um motor *shunt* e um motor em série. Conta com dois enrolamentos em seu estator, um ligado em série e outro ligado em paralelo (*shunt*), o que proporciona a este motor uma ampla faixa de operação tanto em torque como em velocidade. Abaixo o esquema de ligação de um motor composto.

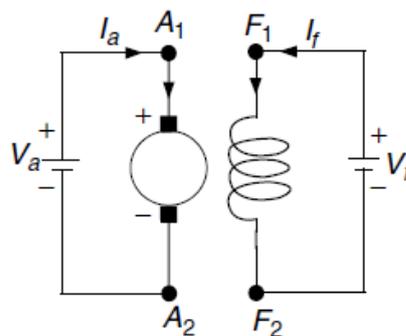
Figura 22- Circuito de Ligação do Motor Composto



Fonte: Modern Electric, Hybrid Electri & Fuel Cell Vehicles 1ª edição pag. 143.

Quanto aos motores separadamente excitados, são constituídos por dois circuitos independentes para alimentação de seu enrolamento de armadura e de seu enrolamento de polos. Esta característica o torna o mais fácil de ser controlado dentre os motores CC, pois pode-se controlar sua velocidade, torque e sentido de rotação apenas com a aplicação de tensão corrente e polaridade apropriadas. Abaixo o esquema de ligação dos enrolamentos de um motor separadamente excitado.

Figura 23- Circuito de Ligação do Motor Separadamente Excitado.



Fonte: Modern Electric, Hybrid Electri & Fuel Cell Vehicles 1ª edição pag. 143.

2.3.1.2 Motores Sem Comutação

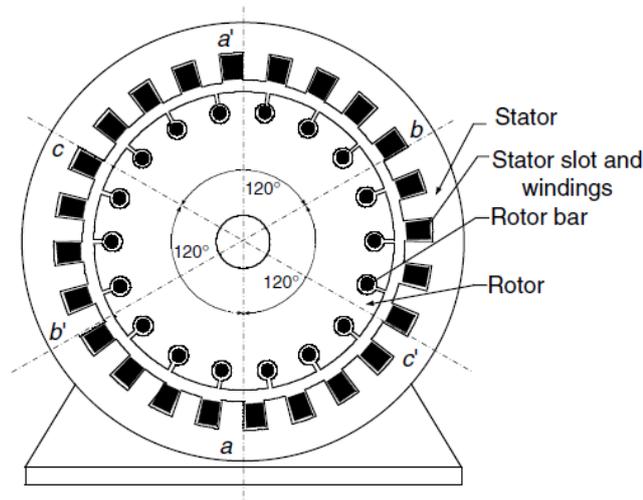
Motores sem comutação são compostos principalmente por motores de indução, ou motores de corrente alternada (CA). São mais resistentes, exigem menos manutenção, são mais

leves, menos volumosos e possuem menor preço com relação aos motores CC, porém ao custo de um controle complexo.

Controles convencionais como variação de tensão e corrente são ineficazes para estes tipos de motores, fazendo com que não atinjam uma performance apropriada. Contudo devido ao uso de eletrônica de potência aliada à utilização de microcomputadores e aplicação do princípio de campo orientado ou controle do vetor de indução, os motores CA tornaram-se mais fáceis de serem controlados, tornando-os novamente uma opção viável para os EV's.

Motores de indução são compostos por um estator, um rotor e seus respectivos enrolamentos, como demonstra a imagem abaixo.

Figura 24 - Construção de Um Motor de Indução Gaiola de Esquilo



Fonte: Modern Electric, Hybrid Electric & Fuel Cell Vehicles 1ª edição pag. 156.

Segundo (HUGS, 2003), o estator é constituído por conjuntos de enrolamentos idênticos, inseridos em cavidades presentes no mesmo. Cada um dos conjuntos é conectado à uma fase diferente do circuito de alimentação trifásico, como mostra a imagem acima.

Na figura 16, temos três conjuntos de enrolamentos a-a', b-b' e c-c', onde cada um deles é conectado a uma das fases do sistema, e dispostos de maneira precisa no estator, formando um ângulo de 120° entre si.

Já rotor segundo (FITZGERALD, 2014) pode ser construído de duas formas distintas, o que permite a classificação dos motores de indução em dois tipos, o motor de indução com rotor bobinado e o motor de rotor gaiola de esquilo.

O motor de rotor bobinado, conta com enrolamentos (espiras) nas cavidades presentes em seu rotor, conectados por um anel de cobre que por sua vez é recebe o contato de escovas, possibilitando a alimentação dos enrolamentos do rotor.

Porém algumas peculiaridades dos motores de rotor bobinado o tornam inapropriado para o uso em VE's. Características como o uso de escovas, que faz com estes motores demandem manutenção periódica, falta de robustez e custo elevado inviabilizam sua utilização em veículos elétricos.

Já o motor de indução rotor gaiola de esquilo, substitui os enrolamentos nas ranhuras de seu rotor por barras condutoras curto circuitadas em ambos os lados por anéis metálicos. A utilização das barras agrega ao motor simplicidade de construção e muita robustez, tornando este motor o mais utilizado de todos.

O princípio de funcionamento de um motor de indução, se dá a partir do arranjo formado com os enrolamentos do estator, como o demonstrado na figura 16, aliado a variação de corrente, tensão e fase na alimentação em cada um deles, resultando na produção diversos campos magnéticos no interior do estator, gerando um fenômeno conhecido como Campo Girante.

De acordo com (HUGS, 2006), o campo girante é o grande responsável pelo funcionamento de um motor de indução. A grosso modo o campo girante atua de tal maneira que “simula” a rotação do estator, criando de fato um campo magnético que está em rotação.

Devido a variação do campo magnético no interior do motor, são induzidas correntes elétricas nos enrolamentos presentes no rotor. Por sua vez as correntes que trafegam nas espiras do rotor geram novos campos magnéticos.

É a partir da interação entre o campo magnético gerado no estator e o campo magnético induzido no rotor que surge a força que irá movimentar o rotor, e realizar a conversão da energia elétrica em mecânica.

Apesar de que grande parte dos motores sem comutação funcionarem através de indução, há um tipo outro tipo de motor CC que vem sendo utilizado nos mais diversos propósitos, o Motor CC Sem Escovas, ou *Brushless DC Motor* (BLDC).

Eles utilizam ímãs permanentes de alta potência para geração do campo de excitação. Segundo (Ehsani *et al.*, 2004) eles apresentam uma alta densidade de potência, são capazes de atingirem altas velocidades e tem grande eficiência de operação. Os BLDC são compactos, de fácil controle apresentam baixo aquecimento, necessidade de manutenção e emissão de ruídos eletromagnéticos.

No entanto são motores caros, devido ao custo elevado dos ímãs de terras raras empregados em sua construção. Também representam riscos quando utilizados em veículos elétricos, pois no caso de ocorrência de acidentes se a(s) roda(s) do VE em questão estiver rodando livremente, haverá ainda uma alta tensão no barramento do motor, devido a excitação contínua dos ímãs.

2.3.2 O Conversor de Potência

O conversor de potência é um elemento fundamental em um veículo elétrico, ele consiste em um circuito eletrônico composto por um estágio de potência comandado por um controlador eletrônico, que usualmente é um microprocessador.

Segundo (HUGS, 2003) a função de um de um conversor de potência é extrair energia elétrica de uma determinada fonte, suprindo um motor elétrico com a tensão e corrente elétrica em uma frequência apropriada, fazendo com que ele forneça o torque e a velocidade desejada.

Existem diversos tipos de conversores de potência utilizados em veículos elétricos, porém nota-se uma grande predominância de conversores CC-CC e CC-CA (inversores de frequência), ambos com seu princípio de funcionamento baseado na comutação ou chaveamento.

Conversores CC-CC são amplamente utilizados no controle de tração não só em carros e motos elétricas, mas também em empilhadeiras, bondes e carregadores de minérios. Isto devido a características como fornecer controle de aceleração suave, alta eficiência e terem uma resposta dinâmica rápida, além do fato de apresentarem design simples e compacto, tornando-o uma opção economicamente mais atrativa devido ao seu baixo custo.

Levando em conta tais características, o grande foco deste trabalho serão os conversores CC-CC, dado a sua ampla aplicabilidade em veículos elétricos de pequeno porte. Abordando seu princípio de funcionamento e quais as topologias mais utilizadas nos VEPP.

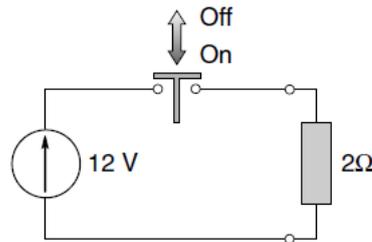
2.3.2.1 Controle por Chaveamento

O princípio básico de funcionamento de um conversor de potência controlado por chaveamento, de acordo com (HUGS, 2006) pode ser demonstrado analogamente, através a

operação repetitiva de uma chave mecânica, variando seu estado entre aberta e fechada à uma determinada razão de tempo.

Através deste chaveamento, ou do inglês *switching*, é possível controlar a tensão média entregue a uma determinada carga. Por exemplo, um determinado circuito composto por uma fonte de 12Vcc, uma chave e um resistor de 2Ω, mostrado na figura a seguir.

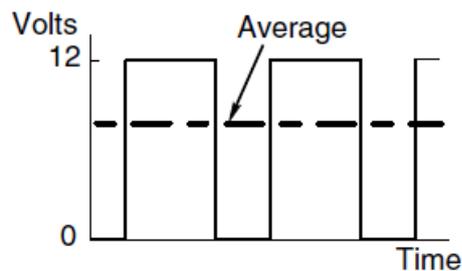
Figura 25 - Circuito Básico



Fonte: Electronic Motors and Drives; Fundamental, Types and Applications 3ª edição pag. 48.

Variando o estado desta chave à uma determina frequência, mantendo-a ligada durante a metade do tempo de cada ciclo, por exemplo, pode-se por fornecer à carga uma tensão média de 6V, como ilustrado no gráfico a seguir.

Figura 26 - Gráfico Acionamento x Tensão Média



Fonte: Electronic Motors and Drives; Fundamental, Types and Applications 3ª edição pag. 48.

De acordo com (RASHID, 2007) a chave de um conversor CC-CC pode ser operada um ciclo de trabalho (*Duty Cycle*) “D”, que é definido pela razão entre o tempo de chave ligada (*on*), pela soma dos tempos de chave ligada e desligada (*off*). Esta soma nada mais é que um ciclo ou um período “T” de funcionamento, como demonstra a equação a seguir.

$$D \equiv \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T}$$

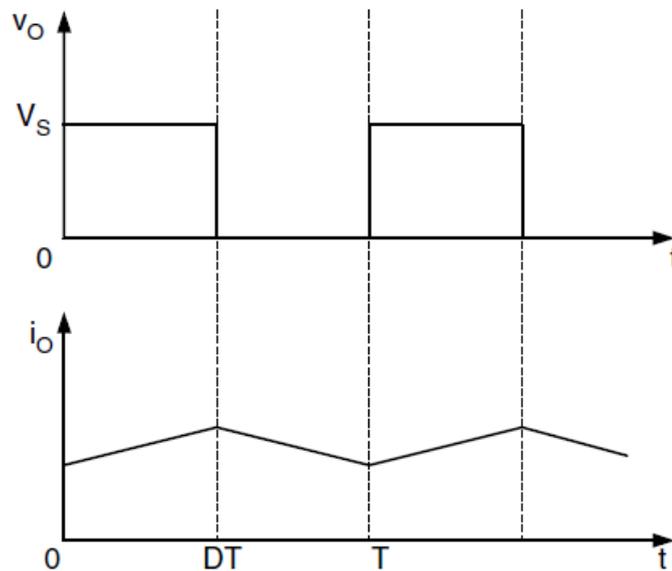
O período T varia de acordo com a frequência de comutação imposta ao conversor em questão, fazendo que sua tensão de saída varie de acordo com a seguinte relação.

$$V_O = DV_S$$

Na equação acima, V_O representa a tensão de saída do conversor, D é o *Duty Cycle* e, por fim V_S é a tensão da fonte CC utilizada.

Devido à natureza indutiva da carga, que neste caso é um motor, utiliza-se um diodo, instalado em antiparalelo no circuito, fazendo com que a energia acumulada, em forma de campo magnético nos enrolamentos do motor, possa gerar uma corrente elétrica que irá realimentar a máquina quando a chave for aberta. Deste modo a corrente de carga nunca atingirá 0A. No gráfico a seguir podemos observar o comportamento desta corrente em função do acionamento da chave.

Figura 27 - Corrente em Função do Acionamento da Chave



Fonte: Power Electronics Handbook 2ª edição pag. 247.

Percebe-se que a corrente na carga apresenta *ripples*, isto é, oscilações não tão abruptas quanto a tensão fornecida, mas ainda assim ela ocorre. Porém, com a finalidade de simplificar o equacionamento, considera-se que tanto a corrente média como a tensão média entregues ao motor são constantes.

A partir destes princípios é possível controlar a tensão e a corrente média fornecidas ao motor, que por sua vez são responsáveis por determinar seu torque e a velocidade de operação, bastando para isso alterar o *duty cycle* de operação da chave em um determinado conversor.

Porem para que a utilização do chaveamento seja possível, necessita-se de componentes e artifícios eletrônicos específicos, para que seja possível atingirmos frequências de comutação que tornem viáveis o funcionamento de um conversor, que serão abordados a seguir.

2.3.2.2 Transistores e PWM

Levando em conta a alta frequência de comutação da chave, torna-se inviável a utilização de dispositivos mecânicos como mostrado no exemplo anterior. Até mesmo o uso de chaves eletromecânicas como relés, se torna inviável tendo em vista o alto desgaste que será imposto.

Em projetos reais, o chaveamento é realizado através do uso de transistores, que são componentes semicondutores, que em determinadas condições de operação, podem se comportar como “chaves”.

Os transistores são capazes de comutar em altas frequências sem sofrer desgastes, devido à ausência de quaisquer componentes mecânicos em sua constituição. Além disto uma de suas maiores vantagens é a capacidade de ser controlado eletronicamente.

Segundo (BIRD, 2007) os transistores se dividem em duas classes principais, os bipolares (BJT) e os de efeito de campo, do inglês *field effect* (FET). Podendo ser classificados de acordo com o material semicondutor do qual é composto (silício ou germânio) e suas aplicações.

Para aplicações em conversores de potência, são mais utilizados transistores do tipo FET, mais especificamente o MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*), devido a sua velocidade de comutação e capacidade para correntes relativamente altas.

O MOSFET de acordo com (RASHID, 2014) é um dispositivo controlado basicamente por tensão, demandando somente uma pequena injeção de corrente. Capazes de comutar a velocidades extremamente elevadas, na ordem dos nano segundos.

Graças as propriedades destes transistores, é possível empregar o uso de eletrônica digital no controle dos níveis de tensão e fluxo de corrente que são fornecidos aos motores

elétricos, através do uso de uma técnica conhecida como PWM (*Pulse Width Modulation*) ou modulação em largura de pulso.

O PWM consiste basicamente na criação de pulsos elétricos de largura variável, que quando aplicados ao terminal de *Gate* de um transistor, são capazes de controlar os intervalos de condução deste componente. Desta maneira é possível controlar tensão equivalente fornecida ao motor elétrico, que variará em função da largura ou período destes mesmos pulsos.

Uma vez introduzidos os conceitos básicos para o controle da operação de conversores de potência, serão abordados de maneira mais aprofundada nesta seção os conversores CC-CC e CC-CA que mais são utilizados nos veículos elétricos, contemplando os principais tipos, topologias, características e funcionamento.

2.3.2.3 Conversores CC-CC

Conversores CC-CC vem sendo amplamente utilizados em veículos elétricos de pequeno porte. Segundo (Ehsani *et al.*, 2004) eles são excelentes alternativas para aplicações que demandam um ajuste preciso de velocidade, sucessivas partidas, paradas e reversões, o que se deve ao fato da maturidade tecnológica em que se encontram e à sua simplicidade de controle.

São popularmente conhecidos também como *choppers* e recebem este nome devido ao fato de que realizam o controle de motores “cortando” (cortar em inglês significa *chopp*) a ligação com a fonte de energia, de modo a entregar um determinado nível de tensão média.

De acordo com (RASHID, 2014), são muitos aplicados nos mais diversos tipos de soluções de tração mecânica. Utilizados entre uma fonte de tensão CC com nível de tensão contínua, fazem com que a tensão média entregue à armadura do motor seja variada de acordo com *duty cycle* empregado.

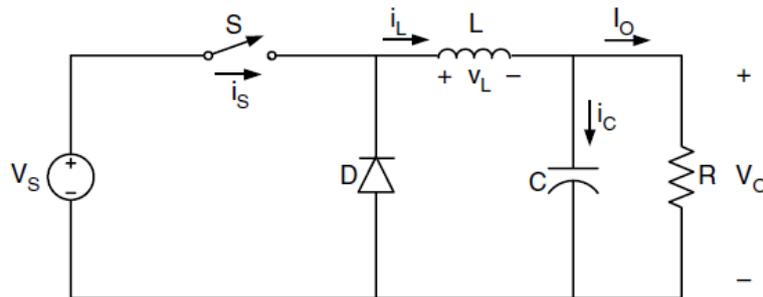
Conversores do tipo *chopper*, baseiam-se no controle por chaveamento, visto anteriormente, controlando sua tensão média de saída através do uso de *PWM*. Devido à carga indutiva presente em seus circuitos, são capazes de utilizar a energia armazenada em forma de campo magnético nos instantes em que houver abertura da chave, de modo a elevar ou reduzir a tensão média fornecida, variando de acordo com a disposição deste indutor (ou enrolamento) no sistema.

Atualmente são conhecidos inúmeros tipos de conversores de corrente contínua, diferenciados por suas características construtivas e de regulação de tensão.

Segundo (RASHID, 2007) há dois tipos principais de conversores CC, conversores *Buck* ou *Step-Down*, cuja principal característica é a reduzir o nível de tensão fornecida e,

conversores *Boost*, que eleva a tensão de saída. As características de ambos podem ser combinadas em um terceiro tipo conhecido como *Buck-Boost*, que como sugere o nome é capaz tanto de elevar como reduzir a tensão de saída em um valor pré-determinado pelo projetista. O esquema elétrico a seguir mostra um conversor do tipo *Buck*.

Figura 28 - Conversor *Buck*



Fonte: Power Electronics Handbook 2ª edição pag. 248.

Existem ainda variações destes conversores que recebem nomes específicos de acordo com a presença de um transformador e do número de chaves que utilizam em seu circuito.

Um bom exemplo é conversor *Flyback*, que é um conversor extremamente utilizado como fonte dos mais diversos equipamentos eletrônicos de baixo consumo de potência. Consiste basicamente em um *Buck-Boost*, porém conta com a presença de um transformador em meio a seu estágio primário e secundário, proporcionando uma isolamento galvânica entre a entrada e saída de tensão, tendo como uma de suas vantagens a maior segurança para o usuário final.

Porém, quando tratamos de conversores especificamente aplicados para o controle de motores elétricos, eles recebem segundo (RASHID, 2014) a designação de *Drives*.

Os *drives*, aplicados ao controle de motores CC, são quase exclusivamente do tipo *Buck*. Estes conversores que têm como sua principal característica, a entrega de um nível de tensão inferior, ou no máximo igual, ao da fonte energética que o alimenta. Devido a isso, também é conhecido como *Step-Down*. Tais conversores, estão entre os mais robustos, são capazes de suportar a potência necessária para alimentar um motor.

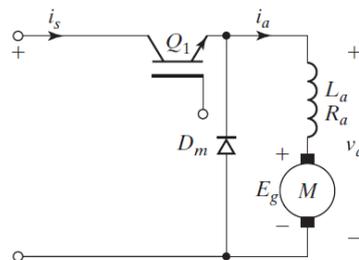
Para garantir o suprimento de corrente e tensão adequado à um motor CC, estes conversores, Segundo (Ehsani *et al.*, 2004), apresentam alta eficiência de funcionamento, flexibilidade de controle, apresentam uma rápida resposta, sendo leves e compactos.

Analogamente aos conversores CC-CC, mencionados anteriormente, os *Drives* que são utilizados em VEPP também são considerados variantes do tipo *Buck*. Diferem entre si de

acordo com a topologia de seus respectivos sistemas, quantidades e chaves, e modos de opções nos quais são capazes de atuar, porém, em seu cerne, partilham do mesmo princípio de funcionamento e, realizam o controle do motor da mesma maneira, ou seja, mediante a redução da tensão de armadura do motor.

O mais aplicado dos conversores CC-CC é o conversor *Buck* tradicional. Devido a sua simplicidade, baixo custo e fácil controle, é empregado em praticamente todos os veículos de pequeno porte. É constituído basicamente por um transistor, do tipo MOSFET e um diodo em antiparalelo com a carga. É conectado a uma fonte de tensão e a motor, como mostra o seguinte esquema.

Figura 29 - Conversor Buck

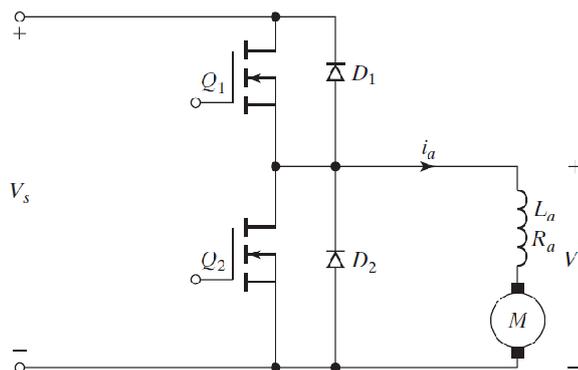


Fonte: Power Electronics, Devices, Circuits and Applications 4ª edição pag. 723.

De construção mais complexa e já capaz de realizar regeneração de energia, o conversor conhecido como *Half-Bridge* também tem seu uso bem difundido, principalmente no meio industrial, onde suas propriedades são mais bem aproveitadas.

Para ser capaz de tirar melhor proveito da energia, e promover o aumento da eficiência, este *Drive* necessita de dois transistores e dois diodos para possibilitar seu funcionamento, como mostra o esquema a seguir.

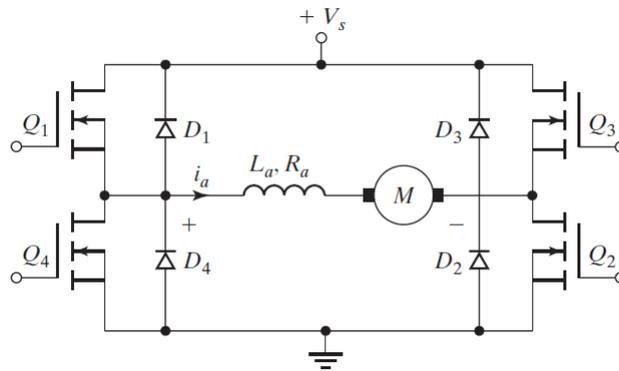
Figura 30 - Conversor *Half-Bridge*



Fonte: Power Electronics, Devices, Circuits and Applications 4ª edição pag. 729.

Por fim, o *Drive* que apresenta maior número de funcionalidades, porem ao custo de grande complexidade é o conversor ponte completa ou do inglês *full bridge*. Ele conta com o uso de quatro chaves e quatro diodos, também conectado a uma fonte e uma carga, mostrado no seguinte esquema.

Figura 31 - Conversor *Full Bridge*



Fonte: Power Electronics, Devices, Circuits and Applications 4ª edição pag. 730.

O uso destes quatro transistores, lhe confere a possibilidades de operar em sentido reverso e capacidades regenerativas para funcionamento em ambos. Mas o uso de tantas chaves aumenta a complexidade do controle e seu custo mais elevado, fazendo com que seja empregado somente em veículos elétricos mais sofisticados.

2.3.2.4 Operação dos Conversores CC-CC

Cada conversor conta com um número específico de chaves, arranjadas de maneiras diferentes em seus circuitos, como mostrado anteriormente, conferindo a eles modos distintos de operação, descritos por representações gráficas chamadas de quadrantes.

De acordo com (RASHID, 2014) existem quatro quadrantes de operação distintos nos quais um conversor pode atuar, cada um deles descreve o comportamento no qual o *Drive* operará, bem como quais componentes se encontram acionados naquele instante.

O quadrante I, mais comumente utilizado, é chamado controle de potência ou aceleração, nele a corrente flui para carga. Neste caso tanto a tensão como a corrente entregue ao motor são positivas.

Este modo de operação pode ser realizado por todos os conversores CC-CC, devido ao fato que para tal é necessário o acionamento de somente um transistor, que fará com que a corrente flua para o motor. Também é preciso um único diodo, que fará com que a corrente gerada pela energia armazenada na forma de campo eletromagnético possa recircular pela carga, entrando em condução após abertura da chave. Vale ressaltar que, este é o único quadrante no qual o conversor *Buck* tradicional é capaz de atuar.

Já o segundo quadrante denomina-se controle de frenagem regenerativa. Nele o motor passa a atuar como um gerador, transformando sua energia cinética em elétrica e, retornando-a à fonte de alimentação. Neste quadrante a tensão na carga é positiva, porém a corrente torna-se negativa, isto é, passa a fluir da carga para fonte, devido ao fato de estar retornando energia.

São capazes de operar neste modo somente os conversores *half bridge* e *full bridge*, pois serão necessários mais transistores e diodos dispostos de forma que possibilitem a circulação de corrente da carga para fonte, mantendo a tensão positiva no motor.

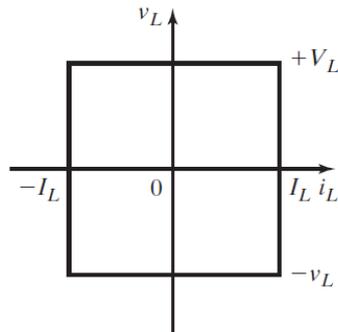
O quadrante III é basicamente o oposto do I, conhecido como controle de potência reverso. Nele o motor passa a operar no sentido oposto ao seu funcionamento normal, para tal tanto a tensão como a corrente fornecidas à carga são negativas.

Por fim o quadrante IV chamado de controle de regeneração reversa, nele o motor também atuará como gerador, mas neste caso a tensão na carga será negativa e a corrente positiva, fazendo com que seja retornada a energia quando a máquina estiver operando em sentido reverso.

Somente é capaz de operar nos modos III e IV o conversor *full bridge*, devido ao fato de que para realizar a aceleração e regeneração reversa, será necessária a inversão no sentido da tensão e da corrente, para tal é preciso a utilização duas chaves e dois diodos a mais que no conversor meia ponte, afim de possibilitar ambas operações.

No gráfico a seguir estão demonstrados os comportamentos de tensão e corrente na carga em cada um dos quadrantes de operação do conversor.

Figura 32 - Gráfico dos Quadrantes de Operação do Conversor

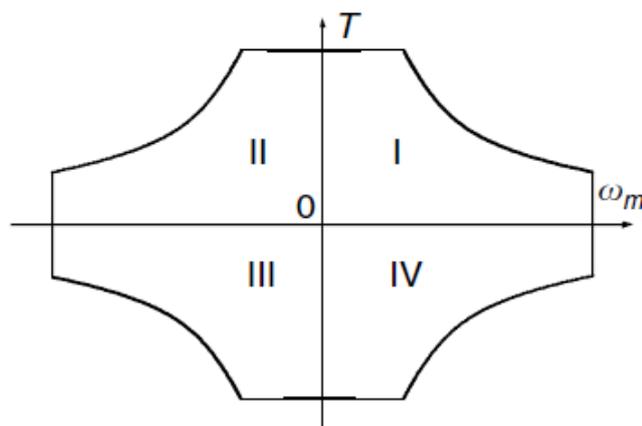


Fonte: Power Electronics, Devices, Circuits and Applications 4ª edição pag. 252.

Analogamente, cada um destes quadrantes, irá descrever um determinado comportamento no motor, que por sua vez também contará com quatro quadrantes distintos.

De acordo com (Ehsani *et al.*, 2004) no quadrante “I” o torque é máximo no instante 0, porém à medida que a velocidade aumenta o torque tende a diminuir, tal modo de operação denota um movimento para frente. Já no quadrante “II” apesar de o torque também ser máximo na origem e reduzir com aumento da velocidade, porém agora em sentido contrário, constituindo um movimento reverso. Por fim, os quadrantes “III” e “IV” representam o comportamento de frenagem reversa e para frente respectivamente, devido ao fato de ambas apresentarem torque negativo.

Figura 33 - Gráfico de Quadrantes de Operação do Motor



Fonte: Modern Electric, Hybrid Electric & Fuel Cell Vehicles 1ª edição pag. 152.

Caso o veículo elétrico conte com o uso de algum tipo de transmissão mecânica, ou combinação de engrenagens para realizar as operações de regime reverso, será necessário somente a operação nos quadrantes I e IV do gráfico.

3 DESENVOLVIMENTO

Uma vez apresentados os principais conceitos que fundamentam a estrutura e funcionamento de um veículo elétrico, enfatizando a constituição e funcionamento dos tipos de conversores com maior aplicabilidade no controle de motores CC presentes em veículos elétricos de pequeno porte, serão apresentados neste capítulo os processos utilizados para construção de um protótipo de conversor CC-CC no qual reside o cerne deste trabalho.

Inicialmente foi selecionando uma topologia de conversor apropriada ao propósito que se destina, levando em conta o motor elétrico que será utilizado na tração do VEPP e, tendo como premissas a simplicidade e o baixo custo, devido ao fato destes veículos terem como maior atrativo a acessibilidade de um amplo espectro de consumidores.

Uma vez selecionado o tipo de conversor, será necessário a utilização de elementos de eletrônica digital, que irão atuar no controle do conversor, através da seleção e do uso de um microcontrolador. Ele capaz de receber e interpretar entradas analógicas comandadas por um usuário, que neste caso serão representadas por elementos como freio e acelerador, para então gerar um sinal *PWM* que será entregue ao dispositivo e, por sua vez controlará o motor de acordo com a vontade do passageiro.

A partir da definição do conversor e do microcontrolador, será possível então construção do protótipo, apresentando então uma descrição detalhada de seu desenvolvimento. Por fim a realização de experimentos práticos e, posteriormente a obtenção de demonstração dos resultados obtidos.

3.1 O CIRCUITO ESCOLHIDO

Para a escolha de uma topologia de conversor apropriada, partiu-se inicialmente dos modos de operação nos quais ele deverá atuar, tais como aceleração, aceleração reversa, controle de regeneração e controle de regeneração reverso, descritos no capítulo anterior.

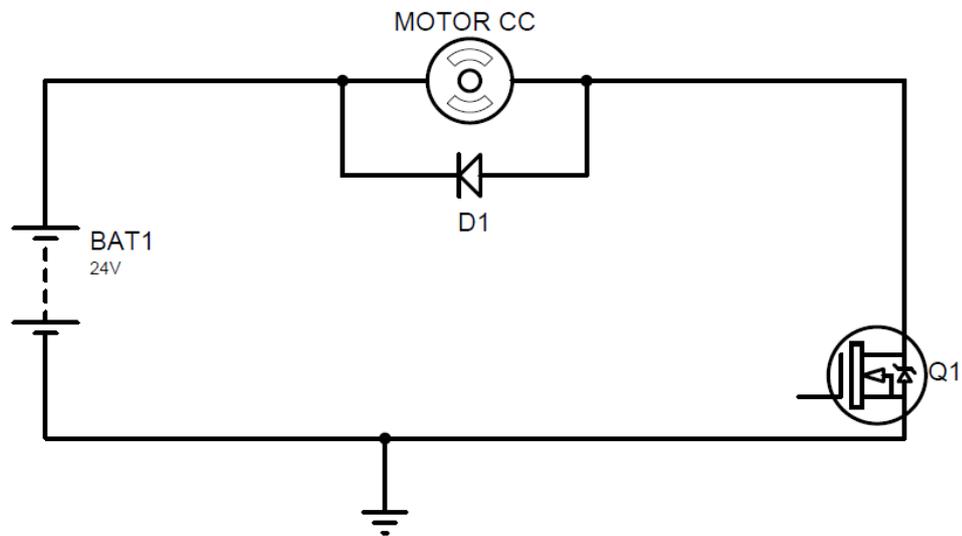
Levando em conta premissas como simplicidade, baixo custo e o fato de que o veículo a que se destina o conversor proposto é de pequeno porte, tornam-se desnecessários os modos de operação de aceleração e regeneração reversa, bem como o controle de regeneração.

Devido ao fato de que tais características trariam somente maior complexidade ao projeto além de elevar seu custo, sem proporcionar diferenciais significativos, já que um VEPP

não necessita de ré e, nem possui motores e baterias grandes o suficiente para valer a pena o uso de mecanismos de regeneração de energia.

Tendo o escopo de operação do conversor definido, optou-se então pelo uso de um conversor tipo *Buck*, descrito anteriormente. Pelo fato de ele contemplar as características necessárias para o funcionamento do VEPP, possuir uma construção muito simples e ser facilmente controlado, se mostrou como a melhor alternativa para este projeto.

Figura 34 - Esquema Conversor *Buck* Proposto



Fonte: Autor, 2020.

Após a seleção da topologia de conversor, partiu-se então para análise das características elétricas do motor, selecionado previamente e adequado à aplicação em veículos elétricos de pequeno porte.

O motor empregado neste desenvolvimento consiste em um motor de corrente contínua, de potência nominal de 250W e tensão de 24V, que consumirá aproximadamente 10A quando funcionando em regime de operação.

Para um dimensionamento preciso do conversor e dos componentes que serão utilizados em sua construção, não seria prudente confiar somente nos valores fornecidos pelo fabricante do motor, ainda mais levando-se em conta o pico de corrente que sempre ocorre quando e dada a partida em um motor elétrico, denominado corrente de *in rush*. Então adotou-se a boa prática de realizar ensaios e em laboratório.

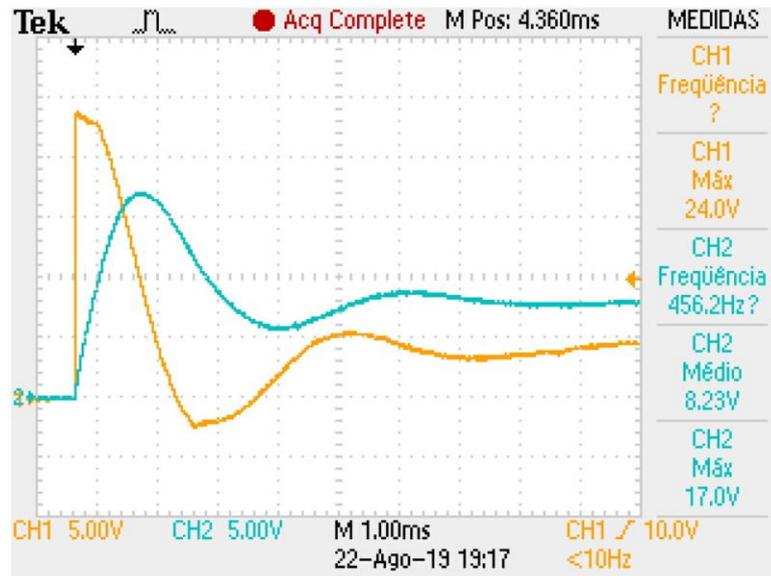
Para possibilitar a realização do ensaio de maneira segura e controlada, utilizou-se uma fonte regulável, ajustada para fornecer um nível de tensão 24V, correspondente ao valor

nominal do motor. Limitou-se também a corrente fornecida à 10A, garantindo a segurança dos equipamentos e dos indivíduos envolvidos no ensaio, em caso de algum erro ou defeito no dispositivo em teste.

Após a energização do motor, foram aferidos os valores de tensão e corrente consumidas pelo motor, no momento de sua partida e após ele entrar em regime de operação. As medições foram realizadas com o auxílio de um osciloscópio.

Fazendo uma análise conservadora, optou-se por dimensionar o circuito e seus componentes tomando como base o pior caso, ou seja, o momento de maior esforço do conversor, quando é dado a partida no motor. Através medições realizadas foram obtidas as seguintes imagens.

Figura 35 - Transitório da Partida do Motor



Fonte: Autor , 2020.

No gráfico acima, a curva em amarelo demonstra o comportamento da tensão durante a partida do motor. No início deste processo ela se encontra em seu valor máximo, que neste caso é de 24V. Logo em seguida sofre uma queda abrupta, isto ocorre devido ao pico de corrente consumido no início da operação da máquina, representada pela curva em azul no mesmo gráfico.

Percebe-se que o pico de corrente chega próximo aos 17A, portanto para a concepção do conversor proposto terá como uma de suas premissas suportar no mínimo um valor de igual magnitude, isto à uma tensão de 24V.

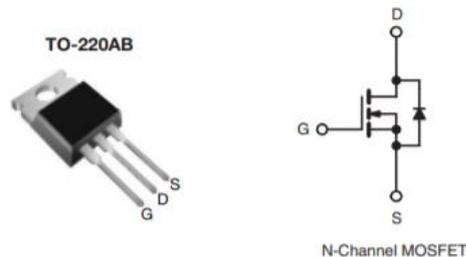
Vale ressaltar que a medição de corrente foi realizada com o auxílio de uma ponta de prova específica para este propósito, que ao ser conectada ao osciloscópio apresenta o valor aferido na unidade de Volts, isto devido a uma característica de funcionamento intrínseca ao equipamento utilizado.

Levando em consideração as análises realizadas a partir dos ensaios de laboratório, foi possível fazer a seleção de componentes adequados para construção do conversor.

Primeiramente foi selecionado uma chave adequada para suportar os níveis de corrente demandados pelo motor, também ser capaz de comutar em altas frequências. Para tal propósito foi escolhido um transistor do tipo MOSFET, devido ao fato de serem componentes com grandes capacidades de condução e comutação, amplamente utilizados em diversas aplicações e possuem um custo baixo, satisfazendo assim as condições impostas pelo projeto.

O modelo escolhido foi o IRF540, produzido há algum tempo por diversos fabricantes de circuitos integrados, este transistor satisfaz os requisitos necessários por possuir capacidade de suportar tensões de até 100V entre os terminais *Drain* e *Source* (V_{DS}), uma corrente de até 28A (I_D) e ser capaz de comutar em altas frequências.

Figura 36 - IRF540



Fonte: Vishay.

Tabela 1 - Parâmetros Elétricos Máximos IRF540

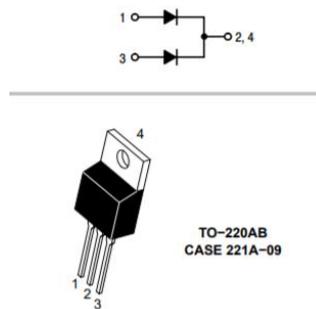
ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ($T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$, unless otherwise noted)				
PARAMETER	SYMBOL	LIMIT	UNIT	
Drain-Source Voltage	V_{DS}	100	V	
Gate-Source Voltage	V_{GS}	± 20		
Continuous Drain Current	V_{GS} at 10 V	$T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$	28	A
		$T_C = 100\text{ }^\circ\text{C}$	20	
Pulsed Drain Current ^a		I_{DM}	110	
Linear Derating Factor			1.0	W/ $^\circ\text{C}$
Single Pulse Avalanche Energy ^b		E_{AS}	230	mJ
Repetitive Avalanche Current ^a		I_{AR}	28	A
Repetitive Avalanche Energy ^a		E_{AR}	15	mJ
Maximum Power Dissipation	$T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$	P_D	150	W
Peak Diode Recovery dV/dt^c		dV/dt	5.5	V/ns
Operating Junction and Storage Temperature Range		T_J, T_{stg}	- 55 to + 175	$^\circ\text{C}$
Soldering Recommendations (Peak Temperature)	for 10 s		300 ^d	
Mounting Torque	6-32 or M3 screw		10	lbf · in
			1.1	N · m

Fonte: Vishay.

Uma vez selecionada a chave, restou somente a escolha de um diodo adequado à aplicação, capaz de suportar no mínimo 17A e 24V. Vale ressaltar que pelo fato de o diodo em questão será utilizado como roda livre, ou seja, estará inserido no circuito em antiparalelo com o motor, ele somente entrará em condução nos momentos em que a chave do conversor for aberta. Sendo assim ficará constantemente submetido à tensão reversa e este parâmetro deverá ser levado em consideração na seleção deste componente.

Tendo como base estas informações, optou-se então pelo uso do diodo MUR1620CTG. Este componente é capaz de suportar uma corrente de 16A tensão de até 600V e tensão reversa de até 200V. O esquema de ligação deste semiconductor bem como suas características elétricas estão demonstradas abaixo.

Figura 37 - MUR1620CTG



Fonte: ON Semiconductor.

Tabela 2 - Parâmetros Elétricos Máximos MUR1620CTG

Features

- Ultrafast 35 and 60 Nanosecond Recovery Times
- 175°C Operating Junction Temperature
- Popular TO-220 Package
- Epoxy Meets UL 94 V-0 @ 0.125 in
- High Temperature Glass Passivated Junction
- High Voltage Capability to 600 V
- Low Leakage Specified @ 150°C Case Temperature
- Current Derating @ Both Case and Ambient Temperatures
- These are Pb-Free Devices*

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	MUR16					Unit
		10CT	15CT	20CT	40CT	60CT	
Peak Repetitive Reverse Voltage Working Peak Reverse Voltage DC Blocking Voltage	V_{RRM} V_{RWM} V_R	100	150	200	400	600	V
Average Rectified Forward Current Total Device, (Rated V_R), $T_C = 150^\circ\text{C}$	$I_{F(AV)}$ Per Leg Total Device	8.0 16					A
Peak Rectified Forward Current (Rated V_R , Square Wave, 20 kHz), $T_C = 150^\circ\text{C}$	I_{FM} Per Diode Leg	16					A
Nonrepetitive Peak Surge Current (Surge applied at rated load conditions halfwave, single phase, 60 Hz)	I_{FSM}	100					A
Operating Junction Temperature and Storage Temperature	T_J, T_{stg}	-65 to +175					°C

Fonte: ON Semiconductor.

3.2 O CIRCUITO DE COMANDO

Após as considerações sobre a topologia mais apropriada de conversor para a aplicação pretendida, dos componentes que serão utilizados em seu circuito e, uma vez que esteja definido o escopo do projeto, será possível iniciar o desenvolvimento de um circuito de comando capaz de controlar este dispositivo e por sua vez o motor.

Para realizar o comando do conversor será empregada eletrônica digital, através dela será possível o uso de lógica computacional, o que consiste no desenvolvimento de um algoritmo para realizar este controle, tornando-o mais preciso além de facilitar seu desenvolvimento, permitir a integração futura com os mais diversos dispositivos e também a implementação de melhorias no futuro sem a necessidade de alteração no circuito. Optou-se então pelo uso de um microcontrolador para este propósito.

3.2.1 O Microcontrolador

Microcontroladores ou MCU, como são popularmente conhecidos, consistem em circuitos integrados, dotados de poder computacional. Eles contam com uma unidade de processamento, memória, *timers*, osciladores, conversores AD, dentre outras entradas e saídas programáveis, agregados em um único encapsulamento, são considerados um computador completo em um único chip.

Existem inúmeros modelos de microcontroladores, que são produzidos por diversos fabricantes e, cada qual com características específicas para as aplicações a que são destinados. Para facilitar a utilização e seleção de um MCU, as empresas desenvolvedoras destes dispositivos, os disponibilizam em versões chamadas de placas de desenvolvimento.

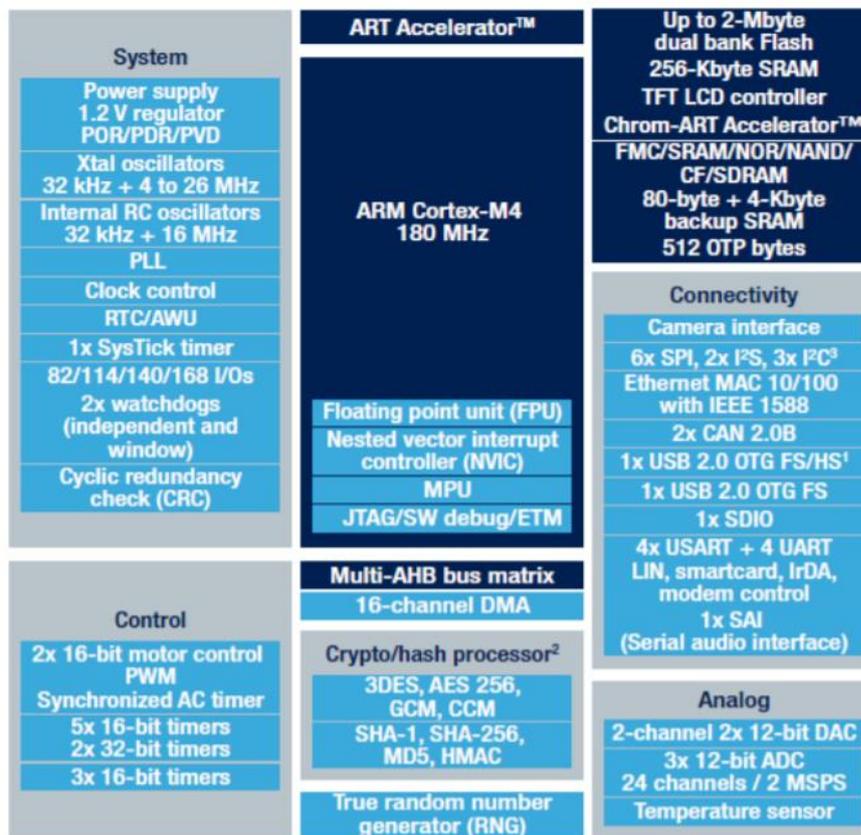
Para seleção de um microcontrolador apropriado, foram buscados modelos que satisfaçam os requisitos mínimos necessários para controlar o conversor de maneira adequada e, também atendendo as premissas de simplicidade e baixo custo.

O microcontrolador que utilizado neste desenvolvimento deverá contar com saídas capazes de gerar sinais *PWM*, pois é através dele que será controlado acionamento do MOSFET responsável por realizar o chaveamento. Também deverá ter interfaces USB e serial que possibilitem a programação e integração com o MCU, por fim número de entradas e saídas

suficiente para proporcionar a adição de novos recursos futuramente, como controle de LED's, medições entre outros.

A partir destas considerações o modelo de microcontrolador selecionado foi o STM32F446. Este MCU vem equipado com um córtex ARM M4, capaz de trabalhar em frequências de até 180MHz, consumindo somente 200µA quando em máxima performance. Ele dispõe também de todos os pré-requisitos descritos anteriormente, contando com duas saídas de sinal *PWM*, interfaces USB e serial, conversores AD de alta resolução dentre várias outras portas disponíveis. A imagem a seguir traz o diagrama de blocos deste CI, ele mostra uma descrição mais detalhada, fornecida pelo fabricante.

Figura 38 - Diagrama de Blocos STM32F446



Fonte: ST.

Para propósitos de desenvolvimento de protótipos, como proposto neste trabalho, o fabricante ST, disponibiliza este microcontrolador em uma versão chamada de placa de desenvolvimento, chamada Nucleo-64, mostrada na imagem a seguir.

Figura 39 - Nucleo-64



Fonte: ST.

Estas placas contam com um MCU e diversos outros componentes em sua montagem, responsáveis por fornecer alimentá-lo adequadamente além de proteger seus terminais, também fornece interfaces de comunicação como USB e serial, que possibilitarão a configuração e programação destes microcontroladores.

Por serem fornecidas montadas elas aceleram e facilitam o desenvolvimento de um protótipo, pois não há necessidade de desenvolver um esquema elétrico complicado logo no início do projeto. Pelo fato de contar com tais características, além de ter um baixo custo e ser de fácil acesso, está será a placa utilizada para realizar o desenvolvimento circuito de comando do conversor.

3.2.2 O Software

Após a seleção do microcontrolador, deu-se início ao desenvolvimento ao desenvolvimento do software, que dará as instruções ao MCU, de como e quando ele deverá atuar.

Para o desenvolvimento deste software foi utilizado uma IDE (*integrated development environment*) no português ambiente de desenvolvimento integrado. Tais sistemas apoiam o desenvolvimento do software, fornecendo compiladores, corretores de código, diversas bibliotecas de códigos, ferramentas para *debug*, dentre inúmeros artifícios para auxiliar o desenvolvimento de programas, tornando o processo de criação mais rápido e preciso.

A IDE utilizada neste desenvolvimento foi a *System Workbench for STM32*, que é uma ferramenta aberta fornecida pela empresa AC6, sediada em Paris e parceira do fabricante ST. Este sistema suporta o desenvolvimento de toda a família de MCU STM32.

Uma vez selecionada a ferramenta de desenvolvimento, pode-se iniciar a codificação do sistema que irá rodar no microcontrolador.

A linguagem de programação utilizada foi o “C”, por sua simplicidade e ampla difusão nos mais diversos desenvolvimentos, o que facilita a busca por auxílio externo em caso de surgirem *bugs* de software, além de ser compatível com a biblioteca de drivers fornecida pela ST.

A programação do sistema consistiu primeiramente na escolha dos periféricos do MCU que seriam utilizados. Neste desenvolvimento foram utilizados três periféricos diferentes, as *GPIO's (General Purpose In and Out)* que são pinos genéricos presentes no microcontrolador capazes de servir como entrada ou saída sinais analógicos ou digitais. Os *timers* que como o no já sugere são temporizadores capazes de controlar e medir o tempo e a frequência de sinais, funcionando também como osciladores. Utilizou-se também a *UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter)* que tem a finalidade de envio e recebimento de dados, que neste caso foi utilizada como interface entre homem e máquina, possibilitando o controle do conversor.

Escolhidos os periféricos necessários, deu-se início a codificação, através da inclusão das bibliotecas de códigos necessárias, configuração das entradas e saídas necessárias, através do uso das bibliotecas de drivers fornecidas pelo fabricante.

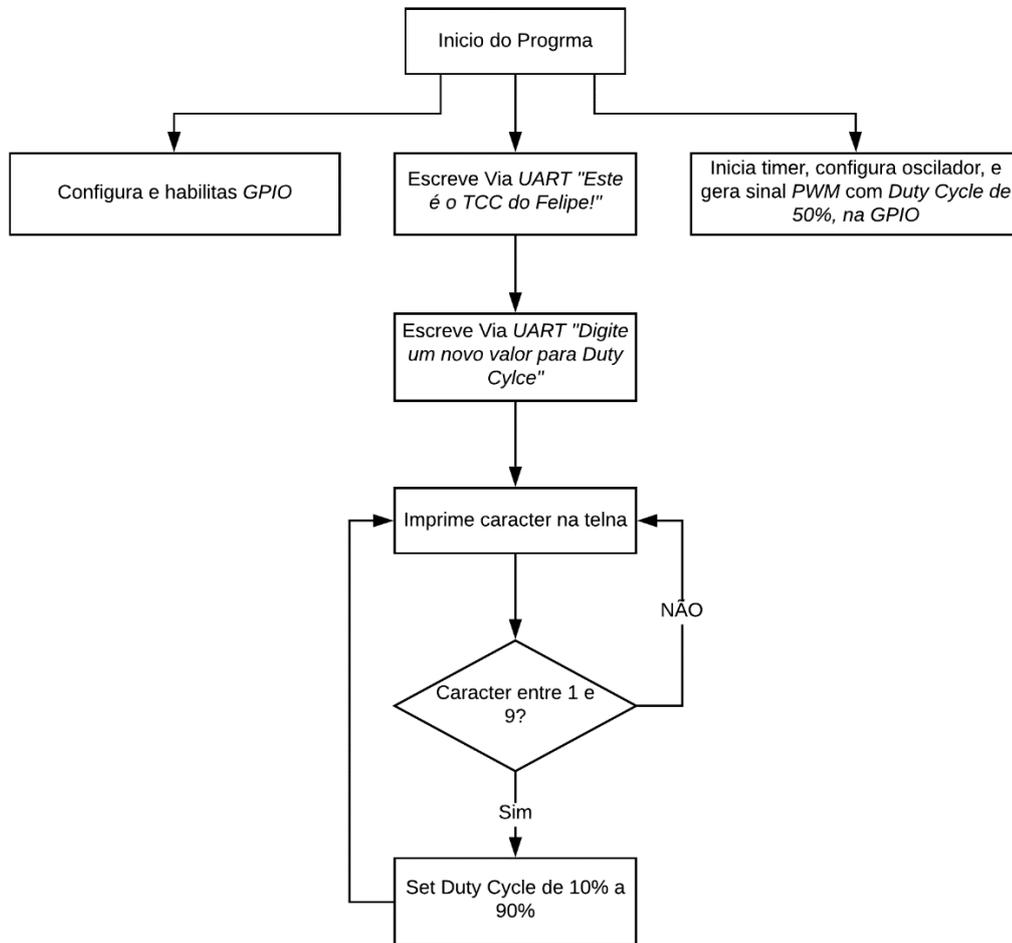
Para o controle das tarefas e interrupções realizadas pelo MCU, também foi utilizado um recurso de *software* chamado RTOS (*Real Time Operating System*) que se trata de um sistema operacional em tempo real, capaz de gerenciar com precisão todas as demandas submetidas ao microcontrolador, através do uso de um *scheduler*, que seria um “agendador” de processos e, um *task manager* ou gerenciador de tarefas.

Neste desenvolvimento foi empregado o *Free-RTOS*, que é um sistema aberto, desenvolvido em parceria com os maiores fabricantes de Chip do mundo e, distribuído gratuitamente pelo *Massachusetts Institute of Technology (MIT)*. Para sua utilização, foi a inclusão de suas bibliotecas na IDE e, a posteriori, configurá-las de acordo com chip escolhidos e funcionalidades desejáveis no funcionamento do programa.

Vale ressaltar que, os meandres das configurações da IDE, bem como a construção do código fonte, fogem ao escopo deste trabalho e não serão aprofundados posteriormente, limitando-se a exposição do funcionamento do software desenvolvido.

Após a implementação de todas as configurações e construção do código fonte, o software desenvolvido passou a funcionar plenamente, operando segundo o fluxograma mostrado a seguir.

Figura 40 - Fluxo de Operação do Software



Fonte: Autor, 2020.

Apesar o funcionamento simples, está rotina de programação é capaz de fazer com que o MCU gere um sinal PWM através de uma de suas *GPIO's*, podendo funcionar em frequências de 1Hz até 180MHz, controlando seu *Duty Cycle* em tempo real, isto através do envio de um caractere via *UART*. Digitando-se 1 o ciclo de trabalho será configurado em 10%, 2 será 20% e assim por diante, atingindo o valor máximo de 90%.

A imagem a seguir mostra o funcionamento do software, através de interface serial criada por ele e sinal de PWM gerado.

Figura 41 - Funcionamento do Software no Microcontrolador



Fonte: Autor, 2020.

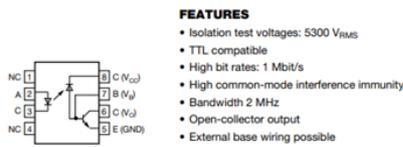
Como mostra imagem acima, o MCU comportou-se de maneira esperada, gerando com precisão um sinal PWM com frequência de 100KHz, valor que se pretende utilizar na operação da chave do conversor e *Duty Cycle* de aproximadamente 50%, porém o nível da amplitude deste sinal está na caso 3,3V, que é insuficiente para o acionamento do MOSFET empregado no dispositivo de acionamento do motor. Tal constatação acarretou a necessidade de desenvolvimento de um circuito auxiliar de controle.

3.2.3 O Circuito Auxiliar de Controle

Devido ao nível de tensão máximo do *PWM* provido pelo MCU, ser insuficiente para acionar o MOSFET do conversor, optou-se pelo desenvolvimento de um circuito auxiliar que irá promover o aumento na amplitude da oscilação do sinal gerado, de 3,3V para 5V, que será suficiente para operação da chave.

Para o desenvolvimento deste circuito foi utilizado um circuito integrado conhecido como opto acoplador. Ele consiste em um diodo emissor de luz (LED) justaposto a um fototransistor agrupados em um único encapsulamento do tipo DIP. A figura abaixo lista as especificações e esquema elétrico do opto acoplador 6n136, proveniente do *datasheet* do fabricante.

Figura 42 - Opto Acoplador 6n136

**FEATURES**

- Isolation test voltages: 5300 V_{RMS}
- TTL compatible
- High bit rates: 1 Mbit/s
- High common-mode interference immunity
- Bandwidth 2 MHz
- Open-collector output
- External base wiring possible

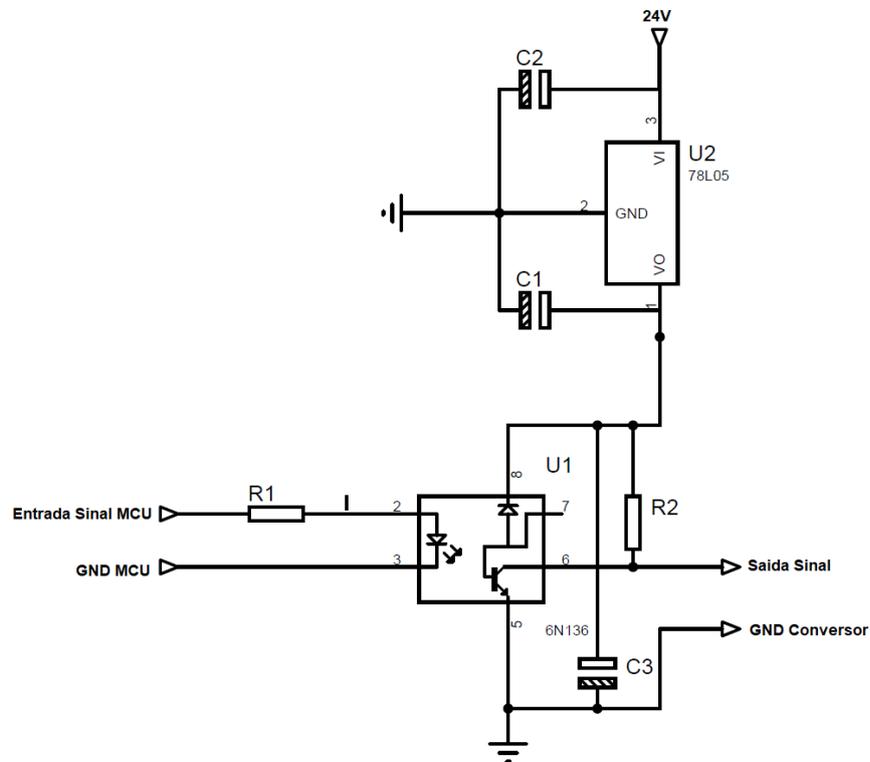
ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified)

PARAMETER	TEST CONDITION	PART	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
INPUT							
Forward voltage	$I_F = 16\text{ mA}$		V_F	-	1.33	1.9	V
Breakdown voltage	$I_R = 10\text{ }\mu\text{A}$		V_{BR}	5	-	-	V
Reverse current	$V_R = 5\text{ V}$		I_R	-	0.5	10	μA
Capacitance	$V_R = 0\text{ V}, f = 1\text{ MHz}$		C_D	-	30	-	pF
Temperature coefficient, forward voltage	$I_F = 16\text{ mA}$		$\Delta V_F/\Delta T_A$	-	-1.7	-	mV/ $^{\circ}\text{C}$
OUTPUT							
Logic low supply current	$I_F = 16\text{ mA}, V_O = \text{open}, V_{CC} = 15\text{ V}$		I_{CCL}	-	150	-	μA
Logic high supply current	$I_F = 0\text{ mA}, V_O = \text{open}, V_{CC} = 15\text{ V}$		I_{CCH}	-	0.01	1	μA
Output voltage, output low	$I_F = 16\text{ mA}, I_O = 1.1\text{ mA}, V_{CC} = 4.5\text{ V}$	6N135	V_{OL}	-	0.1	0.4	V
	$I_F = 16\text{ mA}, I_O = 3.0\text{ mA}, V_{CC} = 4.5\text{ V}$	6N136	V_{OL}	-	0.1	0.4	V
Output current, output high	$I_F = 0\text{ mA}, V_O = V_{CC} = 5.5\text{ V}$		I_{OH}	-	3	500	nA
	$I_F = 0\text{ mA}, V_O = V_{CC} = 15\text{ V}$		I_{OH}	-	0.01	1	μA
COUPLER							
Capacitance (input to output)	$f = 1\text{ MHz}$		C_D	-	0.6	-	pF

Fonte: Vishay Semiconductors.

À medida que o sinal muda para o estado alto, o LED é acendido, e a luz emitida por ele atinge o foto-transistor colocando-o em condução, fazendo com que o sinal injetado no terminal 2 do opto acoplador seja replicado no terminal 6, por meio do seguinte circuito.

Figura 43 - Esquema Elétrico Circuito Auxiliar



Fonte: Autor, 2020.

Outra propriedade fundamental do opto acoplador, é o fato de ele proporcionar isolamento entre os estágios de potência e de comando, fornecendo assim segurança elétrica ao microcontrolador. Evita interferências em seu funcionamento ou até mesmo sua deterioração, dada sua sensibilidade a alterações abruptas de tensão e a correntes elevadas, que são fenômenos de ocorrência quando se controla conversores com consumo alto de energia através do uso de chaveamento.

No circuito são utilizados os resistores e capacitores segundo as recomendações do fabricante do 6n136, que indica o uso dos resistores de modo a limitar tanto a corrente do sinal de entrada assim como o de saída, protegendo o a *GPIO* do MCU, LED, foto-transistor e o *Gate* do MOSFET. Também é sugerido o uso de um capacitor para mitigar qualquer *Ripple* proveniente da alimentação advinda da fonte de tensão.

Neste caso a fonte consiste em um CI regulador chamado L7805, também fabricado pela ST. Ele recebe 24V, da mesma alimentação do conversor, reduzindo-a a 5V, que são entregues em seu terminal de saída. O fabricante deste componente também recomenda o uso de dois capacitores, um na entrada e o outro na saída de tensão, com o objetivo de reduzir quaisquer flutuações elétricas.

Na imagem a seguir estão demonstrados o *PWM* de entrada gerados pelo MCU e, também o sinal replicado pelo opto acoplador com sua amplitude elevada.

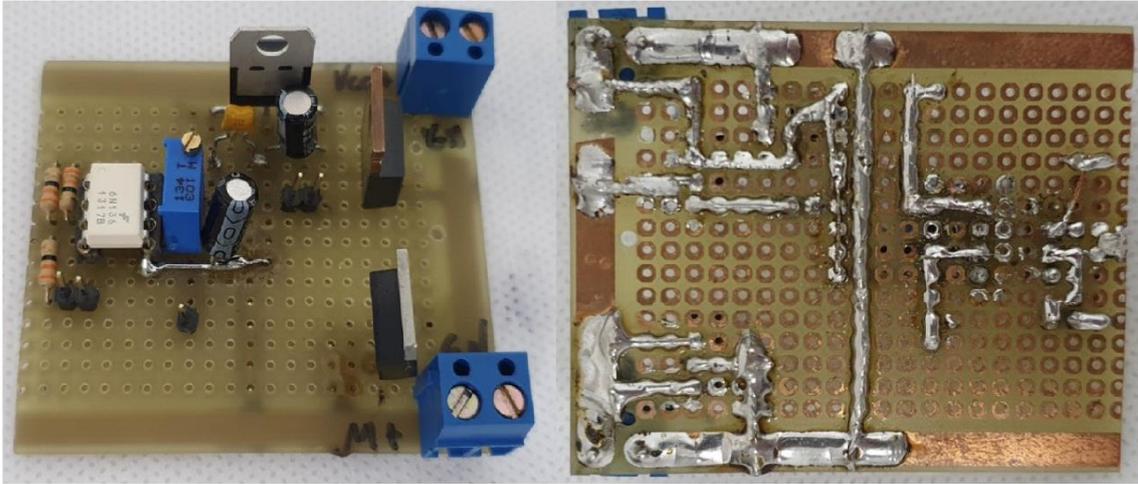
3.3 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

Uma vez que foram concluídas as etapas de desenvolvimento do software para aplicação, validado o funcionamento do microcontrolador como esperado e desenvolvido o circuito que será a interface entre os estágios de comando e potência do conversor, restou somente realizar a integração dos sistemas e comprovar seu funcionamento.

No esquema elétrico a seguir mostra a versão final do conversor, integrando circuito de controle e potência em um único sistema:

Após a montagem foi obtido o seguinte protótipo.

Figura 45 - Protótipo do Conversor CC-CC



Fonte: Autor, 2020.

Seu aspecto rudimentar, se deve ao fato de que a placa universal utilizada na montagem conta somente com uma camada de cobre, fazendo com que seja necessário empregar alguns artifícios técnicos, como o uso condutores previamente estanhados e *jumpers*, para possibilitar todas as ligações. Também, devido à baixa resistência térmica entre cobre e fenolite, muitas das ilhas de cobre são rompidas no processo de montagem.

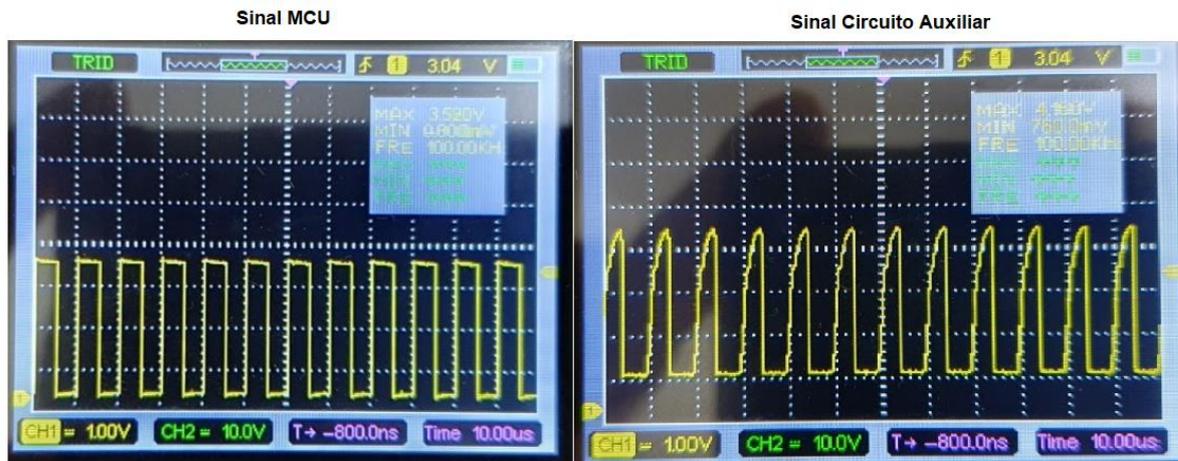
Uma vez montado o conversor, foi possível dar início aos ensaios de laboratório, para comprovar seu pleno funcionamento e, a obtenção das formas de onda resultantes, que serão apresentados e discutidos na sessão seguinte.

3.4 RESULTADOS OBTIDOS

Na realização do ensaio do protótipo desenvolvido, inicialmente foram realizadas as conexões à fonte de alimentação e ao MCU, energizando assim o circuito e possibilitando a aferição do sinal fornecido ao terminal *Gate* do MOSFET, sem pôr em risco os dispositivos de medição, o conversor desenvolvido e o executor do teste.

Através da utilização de um osciloscópio, foi possível a obtenção do sinal gerado pelo microcontrolador, bem como do *PWM* replicado pelo circuito auxiliar. Vale ressaltar que para os ensaios, foram configurados os parâmetros da forma de onda em 100KHz e *Duty Cycle* de 50%, obtendo-se assim as seguintes formas de ondas.

Figura 46 - Sinal MCU vs. Sinal Opto Acoplador



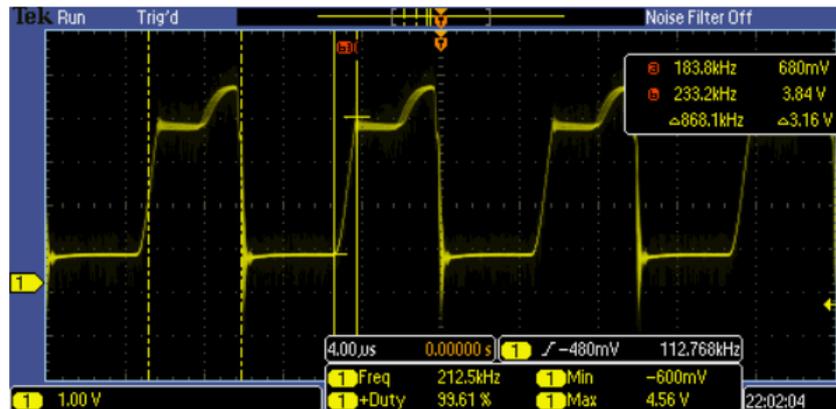
Fonte: Autor, 2020.

Como é perceptível na imagem acima, o sinal resultante não atendeu às expectativas. Nota-se primeiramente, que sua amplitude não atingiu o nível de tensão esperado, limitando-se a somente 4,16V, valor mínimo para o acionamento do MOSFET de maneira adequada. Além disso, as medições evidenciam o surgimento de ruídos, bem como um amortecimento na borda de subida sinal, que se deve a soma dos efeitos capacitivos intrínsecos ao transistor e opto acoplador.

Tais características terão efeitos nocivos no funcionamento do conversor, devido ao fato que o MOSFET operará em uma região conhecida como linear. Nela há passagem de corrente, porém segundo (RASHID, 2014), o transistor apresenta um comportamento resistivo, fazendo que parte da potência, que deveria ser entregue ao motor, seja dissipada neste componente em forma de calor, podendo assim deteriorá-lo completamente.

Com o objetivo de obter uma comprovação prática do fenômeno relatado acima, o motor foi ligado ao conversor e, de maneira análoga ao experimento anterior, foram realizadas medições através do uso de um osciloscópio, obtendo-se a seguinte forma de onda.

Figura 47 - Chaveamento Região Linear Com Carga



Fonte: Autor, 2020.

Percebe-se na imagem acima que, apesar dos parâmetros do sinal gerado serem os mesmos do primeiro ensaio, o surgimento de diversos ruídos, fazem com que o equipamento gere valores de frequência e *Duty Cycle* errados. Apesar disto o motor foi capaz de entrar em operação, mas em uma velocidade diferente da esperada e, as custas de um aquecimento severo no MOSFET.

Levando em conta que, o cerne desta aplicação jaz no controle da velocidade do motor DC, mediante ao controle da tensão média fornecida a ele, será necessário que o MOSFET opere em uma faixa de funcionamento conhecida como saturação.

Segundo (RASHID, 2014), esta região se destaca pelo fato de que a corrente de dreno é praticamente constante para qualquer valor de tensão entre os terminais *Drain* e *Source*, tornando-a ideal para aplicações de amplificação de tensão. Vale ressaltar que, quando operando em saturação o MOSFET apresenta impedância extremamente elevada, reduzindo significativamente a passagem de corrente elétrica por ele, resultando em menor dissipação de potência na forma de calor e consequentemente evitando danos ao componente.

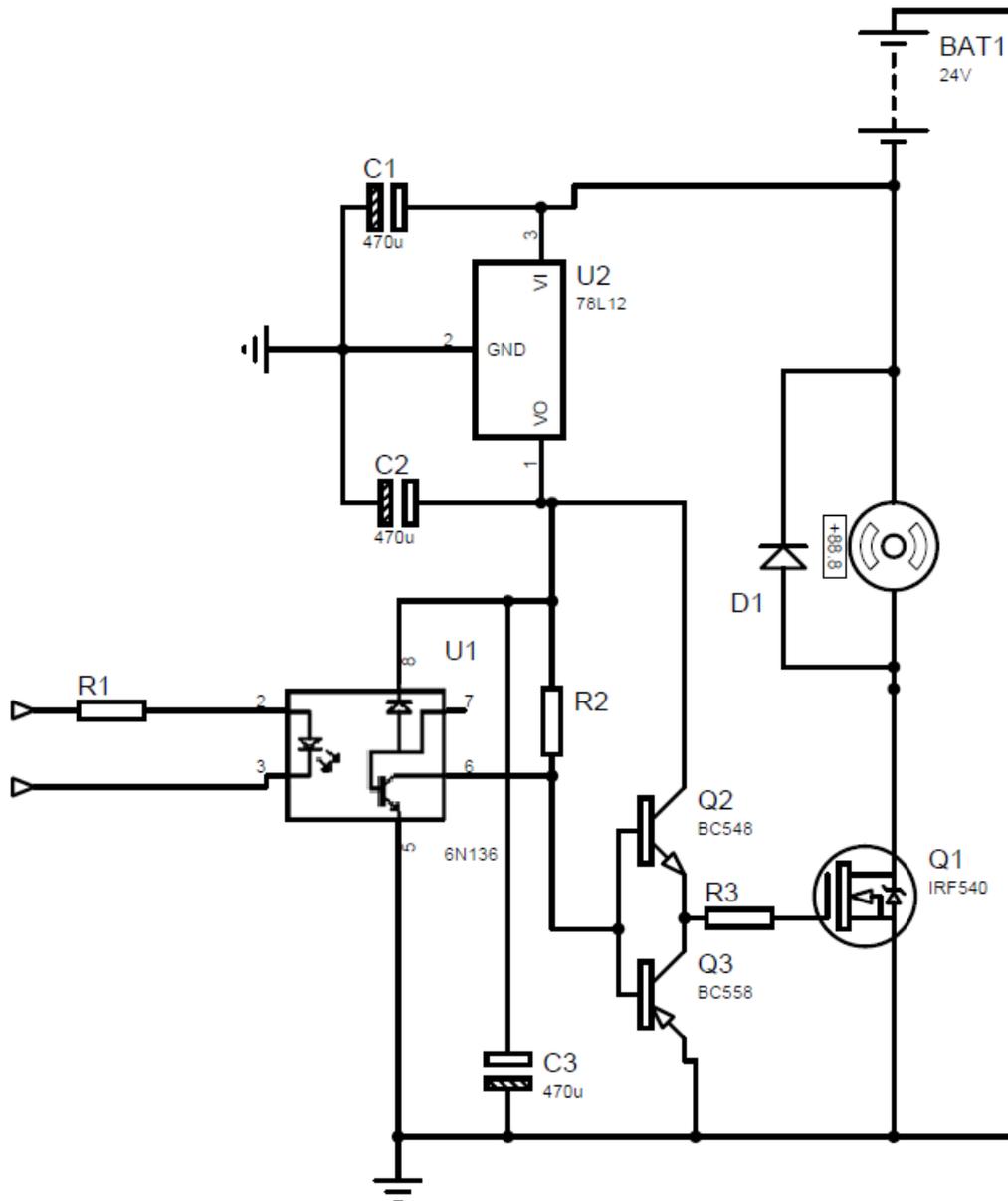
A fim de possibilitar o funcionamento correto do conversor, também o controle de velocidade do motor de maneira adequada e precisa, foram necessários ajustes ao circuito mostrado anteriormente, de modo a obter um sinal com um nível de tensão grande o suficiente, garantindo a operação do MOSFET na zona de saturação.

Os ajustes consistem basicamente, na adição de dois transistores, o BC548 e o BC557, eles irão amplificar a corrente do sinal *PWM*, fazendo com que sua borda de subida seja rápida o bastante, garantindo que não haja tempo para a chave operar na zona linear. Além disso, deverá ser feita a substituição do regulador L7805 pelo L7812, que conta com 12V de tensão

de saída. Assim pode-se assegurar que, a amplitude do sinal será suficientemente alta fazendo com que o MOSFET opere somente em saturação.

Após as melhorias realizadas no esquema elétrico do conversor CC-CC, obteve-se o seguinte circuito.

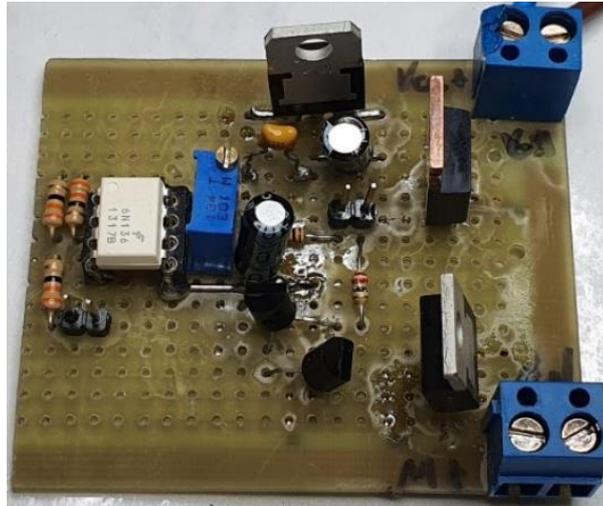
Figura 48 - Conversor CC-CC Final



Fonte: Autor, 2020.

Em seguida as alterações previstas no esquema elétrico, foram replicadas também no protótipo, como mostra a imagem abaixo.

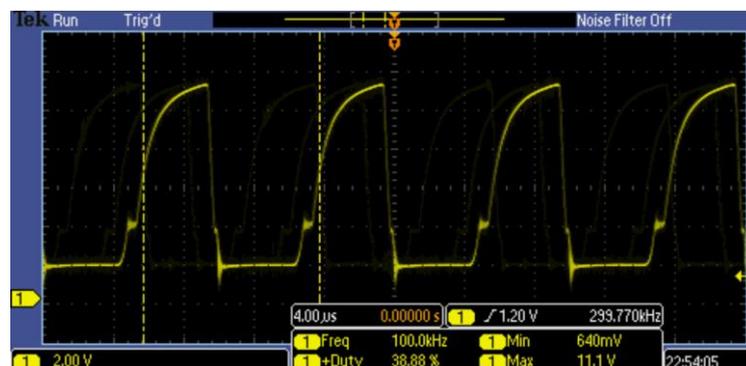
Figura 49 - Protótipo Finalizado



Fonte: Autor, 2020.

Uma vez que todas as melhorias foram implementadas, deu-se início a uma nova rodada de ensaios, mantendo o motor conectado ao conversor, sinal a 100KHz, porem agora com um *Duty Cycle* a 40% e, concentrando a analise somente no *PWM* de saída, ou seja, aquele que será recebido pelo *Gate* do MOSFET. A imagem a seguir traz a forma de onda obtida durante o teste.

Figura 50 - Forma de Onda do Conversor em Funcionamento

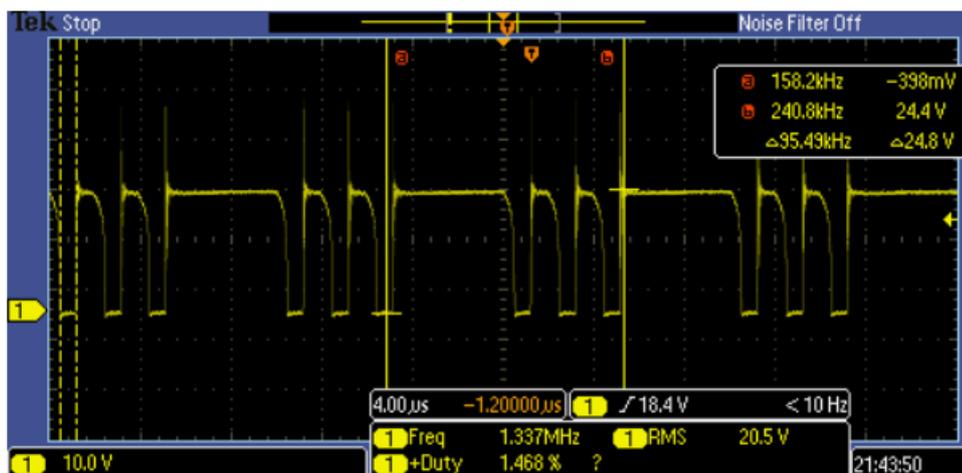


Fonte: Autor, 2020.

Através da forma de onda obtida, é possível perceber a elevação bastante significativa nos níveis de tensão da amplitude máxima do *PWM*, para aproximadamente 11V, tensão suficiente para levar o MOSFET a saturação. Além disso houve também aumento satisfatório na velocidade na borda de subida, garantindo a não operação na região linear. Também se nota a redução nos ruídos devido a nitidez do sinal obtido pelo osciloscópio, que nesta ocasião registrou medidas muito mais precisas.

Por fim, foi possível constatar o funcionamento adequado do conversor, isto devido ao controle preciso do motor que ele pode proporcionar, variando sua velocidade de maneira proporcional ao aumento no *Duty Cycle*. Também foi perceptível a redução drástica no aquecimento do MOSFET, que foi capaz de operar como o previsto e, também comprovado na forma de onda obtida através da medição feita nos terminais do motor, mostrada a seguir.

Figura 51 - Forma de Onda Alimentação do Motor DC



Fonte: Autor, 2020.

No gráfico é possível observar o comportamento da tensão entregue ao motor, novamente com *PWM* de 100KHz e 50% de *Duty Cycle*. Através da medição realizada com o auxílio dos cursores “a” e “b”, comprova-se o funcionamento adequado do conversor, fazendo com que o chaveamento da alimentação opere a 95,5KHz, muito próximo ao valor pretendido.

Ao aprofundar a análise da forma de onda obtida, percebe-se também que, o ciclo da tarefa está correto, levando em conta que, o pulso mais largo, compreendido entre os cursores “a” e “b”, corresponde ao intervalo de condução do MOSFET que representa aproximadamente 50% do período.

Quanto aos dois pulsos menores, também compreendidos no mesmo intervalo, correspondem aos períodos onde o MOSFET não está em condução, devido ao sinal *PWM* no terminal de *Gate* estar em 0V. Por tanto, o nível de tensão presente nos terminais do motor nestes instantes, se deve a energia armazenada nos enrolamentos da máquina em, na forma de campo magnético que, na abertura da chave volta a ser liberada na forma de corrente, circulando através do diodo de “roda-livre”.

Graças a isto, pode-se comprovar o funcionamento do conversor CC-CC proposto, bem como sua aplicabilidade ao propósito a que se destina, necessitando somente de poucos ajustes no projeto inicial.

4 CONCLUSÃO

Com a popularização crescente de veículos elétricos, com ênfase nas unidades de pequeno porte, devido à sua ampla acessibilidade. Potencializado ainda, por fatores como a conscientização da preservação ambiental por parte da população e, mobilidade urbana precária, isto considerando o cenário nacional, cria-se um nicho de mercado extremamente atrativo para os VEPP.

Porém, mesmo que estes veículos sejam mais baratos que os tradicionais com motores de combustão interna, seu custo ainda é elevado. Isto exclui uma grande parte do potencial mercado, composto por indivíduos com renda mais modesta e, que certamente tirariam muito proveito de uma alternativa mais barata, simples e limpa de locomoção que, ainda tem como grande vantagem evitar engarrafamentos, devido ao seu porte pequeno.

Para possibilitar uma adesão sólida dos VEPP ao mercado nacional, é fundamental a criação de iniciativas para viabilizar a fabricação nacional destes veículos, tendo em vista que grande parte do seu custo, se deve ao fato de que praticamente todas as unidades comercializadas no Brasil são importadas, o que onera significativamente o preço para o consumidor final, devido à alta incidência de taxas e impostos.

Fabricando estes veículos em solo nacional, tornará seu custo ainda mais atrativo, pois a tributação será muito inferior quando comparada à um produto importado. Havendo também uma grande possibilidade de pleito de incentivos fiscais junto ao governo, que geralmente apoia iniciativas de pesquisa, desenvolvimento e fabricação de produtos no Brasil.

Sendo assim, este trabalho pode ser considerado um pequeno passo em direção ao desenvolvimento de veículos elétricos no Brasil, fomentando sua fabricação. Isto através de pesquisa de uma solução barata e simples.

Foi possível construir o protótipo, através do uso de materiais simples, como transistores, resistores, capacitores e diodos que são componentes facilmente obtidos no mercado local por um baixo preço, com exceção do microcontrolador, o único item da solução que teve de ser adquirido via internet e, que também representou o maior custo do desenvolvimento.

O investimento total estimado foi de aproximadamente R\$ 200,00, que é compatível ao ser comparando ao preço das demais soluções similares, já disponíveis no mercado. Porém vale ressaltar que, pelo fato de ainda ser um protótipo, seu custo ainda poderá ser substancialmente reduzido, uma vez que para fabricação de um produto final, não será necessária a aquisição de

uma placa desenvolvimento, podendo-se comprar os componentes que a constituem, inclusive o MCU, para montagem em uma nova placa, torando seu valor final, muito mais atrativo. Isso sem mencionar que este projeto ainda oferece suporte para inclusão desenvolvimentos futuros.

Além de satisfazer a premissa do baixo custo, o protótipo foi capaz de controlar o motor selecionado, assim como o previsto. Isto através da entrega de potência adequada às necessidades de funcionamento do motor, e comandando sua velocidade mediante a variação da tensão média na armadura da máquina, a partir das alterações na largura do pulso injetado no terminal do MOSFET, como é evidenciado pelas capturas do osciloscópio mostradas durante o capítulo de desenvolvimento.

Apenas uma ressalva quanto às formas de onda mostradas, é que a visível presença de ruídos, que se devem ao fato de ter sido utilizada uma placa universal para montagem dos componentes e, o uso de *jumpers* para transmissão de alguns sinais. Portanto, uma vez que seja feito um *layout* adequado e, a *posteriori* a fabricação de uma placa de circuito impresso apropriada, eles serão quase que totalmente extintos.

Levando em conta tais considerações, pode-se comprovar então, que é sim factível o desenvolvimento de um veículo elétrico totalmente nacional. Podendo este projeto, ser considerado como uma base para desenvolvimentos futuros, a partir da mesma plataforma de *hardware* apresentada, composta pela solução do conversor desenvolvido juntamente com o microcontrolador utilizado.

Esta plataforma sem sombra de dúvida está apta a comportar a adesão de inúmeras funcionalidades, como a instrumentação do veículo, medindo consumo, velocidade e a carga da fonte energética. Também poderá suportar o controle do carregamento de uma bateria, sistema de segurança, sincronização com dispositivos inteligentes, dentre incontáveis possibilidades.

Por fim, após a construção deste trabalho, proposição de um sistema para controlar um motor de um possível veículo elétrico, bem como a prototipagem desta solução. Percebe-se o enorme desafio que representa um desenvolvimento de um dispositivo eletrônico, por mais simples que seja.

Inúmeras horas tiveram de ser investidas a cada etapa do desenvolvimento, sendo que em cada uma delas novos problemas, que não haviam sido previstos, surgiram e demandaram mais pesquisas e ensaios laboratoriais, para que fosse possível contornar tais adversidades. O que tornou possível vislumbrar alguns dos motivos, pelos quais as iniciativas de pesquisa e concepção de dispositivos eletrônicos ainda tímida no Brasil, em face da complexidade que representa.

Contudo, é possível afirmar que apesar dos desafios apresentados neste projeto, foi uma experiência extremamente edificante. Tanto sob a perspectiva acadêmica, devido à todas as pesquisas que foram necessárias para decidir as diretrizes do trabalho, bem como fundamentá-las. Como sob o viés do desenvolvimento prático de eletrônica, por meio da construção do protótipo, ensaios laboratoriais e, da análise dos resultados das medições realizadas e dados obtidos. Proporcionando assim, um aprendizado aprofundado de todos os conceitos utilizados na concepção da solução proposta, e consolidando o aprendizado destes conteúdos.

REFERÊNCIAS

FROTA MUNDIAL DE CARROS ELÉTRICOS CRESCE 55% NO PRIMEIRO SEMESTRE DE 2018: Mercado global atinge 3,2 milhões de unidades e foi impulsionado pela demanda da China. São Paulo: Editora Globo S.a., 30 ago. 2018. Disponível em: <<https://revistaautoesporte.globo.com/Noticias/noticia/2018/08/frota-mundial-de-carros-eletricos-cresce-55-em-um-ano.html>>. Acesso em: 30 ago. 2018.

AMÉRICA DO SUL RESISTE A MOVIMENTO GLOBAL POR VEÍCULOS ELÉTRICOS. São Paulo: Editora Abril, 27 abr. 2019. Disponível em: <<https://exame.abril.com.br/negocios/america-do-sul-resiste-a-movimento-global-por-veiculos-eletricos/>>. Acesso em: 27 abr. 2019.

HØYER, Karl G. **THE HISTORY OF ALTERNATIVE FUELS IN TRANSPORTATION: The case of electric and hybrid cars.** Oslo University College, 1 Oct. 2008. Norway, 2008.

WILTUSCHNIG, Igor Pasa. **PROJETO E DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE TRACÇÃO PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS.** 2016. 188 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

BALDISSERA, Luciano B. **DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE UM VEÍCULO ELÉTRICO.** 2012. 86 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2016.

TOSHIZAEMON, Noce. **ESTUDO DO FUNCIONAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS E CONTRIBUIÇÕES AO SEU APERFEIÇOAMENTO.** 2009. 129 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

AHMED, Asfaq. **ELETRÔNICA DE POTÊNCIA.** Tradução Bazán Tecnologia e Linguística. Revisão técnica João Antônio Martino. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2000.

MOHAN, Ned. UNDELAND, Tore M. ROBBINS, William P. **POWER ELETRONICS: Converters, applications and design.** 3rd Ed. - Nova Jersey and London: John Wiley & Sons, Inc., 2003.

ANDERSON, Curtis D. ANDERSON, Judy. **ELETRIC AND HYBRID CARS: A History.** 2nd Ed. – North Carolina: Mc Farland & Company, Inc., 2010.

RASHID, Muhammad H. **ELETRÔNICA DE POTÊNCIA.** Tradução Leonardo Abramowicz. Revisão técnica Carlos Marcelo de Oliveira Stein. 4 Ed. – São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014.

DELGADO, Fernando. COSTA, José E. G. FEBRARO, Júlia. SILVA, Tatiana B. da. **CARROS ELÉTRICOS.** Rio de Janeiro: FGV Energia, 2017. Disponível em: <

https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/caderno_carros_eletricos-fgv-book.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2019.

CHAPMAN, Stephen J. **FUNDAMENTOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS**. Tradução Anatólio Laschuk. 5 Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

UMANS, Stephen D. **MÁQUINAS ELÉTRICAS DE FITZGERALD E KINGSLEY**. Tradução Anatólio Laschuk. 7 Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

DENTON, Tom. **VEÍCULOS ELÉTRICOS E HÍBRIDOS**. Tradução Jorge Augusto Pessatto Mondadori. São Paulo: Blucher, 2018.

YANG, Yee-pien; LIU, Jieng-jang; HU, Tsung-hsien (ed.). **AN ENERGY MANAGEMENT SYSTEM FOR A DIRECTLY DRIVEN ELECTRIC SCOOTER**. Energy Conversion And Management. Taiwan, p. 621-629. 17 ago. 2010.

QUATRO RODAS. São Paulo: Abril, n. 564, abr. 2007

SISTEMA FIEP (Paraná). **Patinetes elétricos, bikes compartilhadas e o futuro da mobilidade**. 2019. Disponível em: <https://g1.globo.com/pr/parana/especial-publicitario/fiep/sistema-fiep/noticia/2019/08/29/patinetes-eletricos-bikes-compartilhadas-e-o-futuro-da-mobilidade.ghtml>. Acesso em: 02 maio 2020

RASHID, Muhammad H.. **POWER ELECTRONICS HANDBOOK**. 2. ed. San Diego: Elsevier, 2007.

RASHID, Muhammad H.. **POWER ELECTRONICS: devices, circuits, and applications**. 4. ed. Boston: Pearson, 2014.

ANEXOS