

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO



MARCIO ANDRÉ CAETANO ALVES

CONVERSÃO DE MOTOS À COMBUSTÃO INTERNA
PARA TRAÇÃO ELÉTRICA

VITÓRIA – ES
MARÇO/2022

MARCIO ANDRÉ CAETANO ALVES

**CONVERSÃO DE MOTOS À COMBUSTÃO INTERNA PARA
TRAÇÃO ELÉTRICA**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Marcio André Caetano Alves**, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.



Prof. Dr. Oureste Elias Batista

Orientador

Marcio André Caetano Alves

Marcio André Caetano Alves

Aluno

VITÓRIA – ES

MARÇO/2022

MARCIO ANDRÉ CAETANO ALVES

CONVERSÃO DE MOTOS À COMBUSTÃO INTERNA PARA TRAÇÃO ELÉTRICA

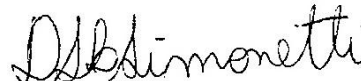
Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Marcio André Caetano Alves**, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 24 de março de 2022.

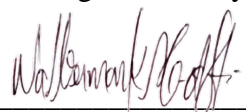
COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Dr. Oureste Elias Batista



Prof. Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti



Prof. Dr. Walbermark Marques dos Santos

VITÓRIA – ES

MARÇO/2022

À MINHA FAMÍLIA.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus familiares que me apoiaram e incentivaram para que pudesse chegar até aqui.

Aos meus colegas de trabalho que flexibilizaram os horários e me influenciaram a chegar onde estou.

Ao meu orientador, professor Dr. Oureste Batista, que disponibilizou tempo e recursos necessários para que chegássemos ao objetivo de forma satisfatória.

RESUMO

Os veículos elétricos existem há várias décadas, porém por uma série de fatores não obtiveram sucesso comercial. Entretanto, nos últimos anos viu-se um apelo ambiental para diminuir a emissão de CO₂ e, conseqüentemente, o consumo de combustíveis fósseis. Neste momento os veículos com tração elétrica começaram a ganhar visibilidade novamente, já que não emitem poluentes enquanto em movimento. Alguns países já colocaram metas para extinguir os veículos à combustão, mas isso causaria um impacto significativo se houvesse a necessidade de trocar toda a frota em um espaço curto de tempo, por isso uma alternativa seria a conversão dos atuais veículos à combustão em elétricos. No Brasil, as motocicletas são maioria, por esse motivo optou-se por descrever essa conversão, modificando-se o mínimo possível a moto original, utilizando materiais de baixo custo, de modo que se possa obter o retorno do investimento o mais breve possível com economia de manutenção e combustível. São apresentadas as premissas, as decisões de projeto, cada equipamento e o motivo de sua escolha e como irão contribuir para o incremento de desempenho da motocicleta. Espera-se que ao fim da leitura deste documento seja possível compreender os parâmetros necessários para se converter uma motocicleta de combustão interna em elétrica, obtendo uma moto convertida que possui autonomia de cerca de 60 km e que atinge velocidade superior à 40 km/h.

Palavras-chave: Conversão para moto elétrica. Motocicletas elétricas. Tração elétrica. Veículos elétricos.

ABSTRACT

Electric vehicles have been around for several decades, but for a number of reasons they did not take off. However, in recent years there has been an environmental appeal to reduce CO₂ emissions and, consequently, the consumption of fossil fuels. Now, vehicles with electric traction began to gain visibility again, as they do not emit pollutants while in motion. Some countries have already set targets to extinguish combustion vehicles, but this would have a significant impact if there was a need to change the entire fleet in a short space of time, so an alternative would be the conversion of current combustion vehicles to electric. In Brazil, motorcycles are the majority, for this reason we chose to describe this conversion, modifying the original motorcycle as little as possible, using low-cost materials, so that the return on investment can be obtained as soon as possible with maintenance and fuel savings. The premises, the design decisions, each equipment and the reason for its choice will be presented and how they will contribute to the increase in the motorcycle's performance. It is hoped that at the end of reading this document it will be possible to understand the parameters necessary to convert an internal combustion motorcycle into an electric one, obtaining a converted motorcycle that has a range of about 60 km and that reaches speeds above 40 km/h.

Keywords: Conversion to electric motorcycle. Electric motorcycles. Electric traction. Electric vehicles.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Primeiro automóvel.....	13
Figura 2 – Primeiro veículo a ultrapassar os 100 km/h.....	14
Figura 3 – Equivalência dos sistemas elétrico e mecânico.....	18
Figura 4 – Sundown Max 125	19
Figura 5 – Transmissão por corrente da motocicleta elétrica.....	21
Figura 6 – Ligação entre o controlador e o motor BLDC	25
Figura 7 – Formas de onda num motor BLDC	26
Figura 8 – Motor Kunray MY1020.....	27
Figura 9 – Curvas de desempenho do motor Kunray MY1020.....	28
Figura 10 – Circuito típico de controle do motor CC brushless	29
Figura 11 – Controlador Kunray.....	30
Figura 12 – Constituição física da bateria Freedom DF300.....	33
Figura 13 – Curvas de descarga da bateria DF300 sob corrente constante.....	34
Figura 14 – Equalizador de baterias HA01	35
Figura 15 – Ligação entre baterias e equalizadores	36
Figura 16 – Acelerador.....	36
Figura 17 – Teste de bancada	38
Figura 18 – Sistema montado para testes	39
Figura 19 – Sistema de alimentação do motor.....	39
Figura 20 – Esquema de ligação dos sistemas de alimentação, controlador e motor	40
Figura 21 – Motocicleta desmontada	41
Figura 22 – Localização do novo sistema de propulsão	42
Figura 23 – Soldagem do suporte das baterias e motor	42
Figura 24 – Bandeja para suporte do sistema de alimentação e motor	43
Figura 25– Disposição do banco de baterias	43
Figura 26 – Disposição final dos equipamentos	44
Figura 27 – Disposição final dos equipamentos	44
Figura 28 – Teste em movimento	47
Figura 29 – Motocicleta convertida	48
Figura 30 – Formulário DETRAN.....	52

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Despesa acumulada na manutenção das motocicletas	51
--	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Especificações técnicas da Sundown Max 125	20
Quadro 2 – Especificações técnicas da Sundown Max 125	21
Quadro 3 – Vantagens e desvantagens do motor CC brushless.....	26
Quadro 4 – Vantagens e desvantagens do motor CC brushless.....	27
Quadro 5 – Equipamentos utilizados e custos	49
Quadro 6 – Custo de manutenção anual Sundown Max a combustão	50
Quadro 7 – Custo de manutenção anual da moto convertida	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CNM	Confederação Nacional dos Municípios
DENATRAN	Departamento Nacional de Trânsito
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FCEM	Força contra-eletromotriz
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
DETRAN	Departamento Estadual de Trânsito
IPVA	Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores

LISTA DE SÍMBOLOS

i	relação de transmissão (adimensional)
Z_1	número de dentes do pinhão (adimensional)
Z_2	número de dentes da coroa (adimensional)
d_1	diâmetro primário do pinhão (m)
d_2	diâmetro primário da coroa (m)
ω_1	velocidade angular do pinhão (rad/s)
ω_2	velocidade angular da coroa (rad/s)
f_1	frequência do pinhão (hz)
f_2	frequência da coroa (hz)
n_1	rotação do pinhão (rpm)
n_2	rotação da coroa (rpm)
M_{T_1}	torque do pinhão (Nm)
M_{T_2}	torque da coroa (Nm)
v	velocidade (m/s)
d_{pneu}	diâmetro do pneu (m)
C_a	capacidade da bateria (Ah)
I_d	corrente de descarga da bateria (A)
K, n	constantes dependentes dos parâmetros construtivos da bateria (adimensional)
t_1	tempo de descarga com corrente mínima (s)
t_2	tempo de descarga com corrente máxima (s)
I_1	corrente de descarga mínima (A)
I_2	corrente de descarga máxima (A)
t	tempo de descarga (s)
$C, C_{eq}, C_1, C_2, \dots, C_n$	capacitância do capacitor (F)
V	tensão elétrica (V)
P	potência (W)

SUMÁRIO

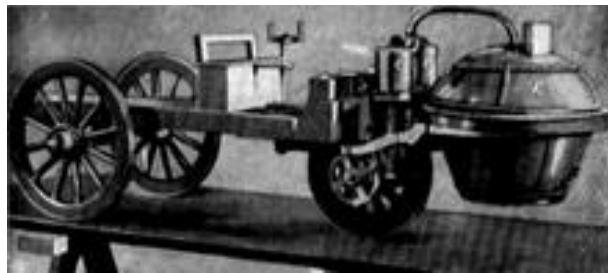
1	INTRODUÇÃO AO PROJETO DE GRADUAÇÃO	13
1.1	INTRODUÇÃO	13
1.2	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	15
1.3	OBJETIVO	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	MOTOCICLETA	19
2.2	MOTOR.....	23
2.3	CONTROLADOR.....	28
2.4	BATERIA	30
2.5	EQUALIZADOR DE BATERIA	35
2.6	ACELERADOR.....	36
3	METODOLOGIA E ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO	38
3.1	TESTES PRELIMINARES	38
3.2	PREPARO DA MOTOCICLETA	40
4	RESULTADOS	46
4.1	TESTE SEM CARGA.....	46
4.2	TESTE COM CARGA	46
4.3	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS.....	48
5	CONCLUSÃO.....	53
5.1	TRABALHOS FUTUROS	54
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

1 INTRODUÇÃO AO PROJETO DE GRADUAÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

Em 1769, o engenheiro francês Nicolas-Joseph Cugnot criou a primeira carruagem movida a vapor. A partir de então, o transporte de pessoas revolucionou-se, já que este foi o primeiro veículo que não necessitava de força humana ou animal para tracionar o transporte. O automóvel de Cugnot funcionava através da queima de carvão. Originalmente foi criado para transportar o material bélico do exército francês, mas quando usado para transportar pessoas, poderia levar até quatro passageiros e atingia no máximo 3 km/h. A Figura 1 mostra o modelo deste veículo.

Figura 1 – Primeiro automóvel



Fonte: Meine Bibliothek (1769).

Devido ao grande compartimento de carvão, o veículo era muito pesado e exalava um odor fétido característico da fumaça deste combustível, além de ser barulhento e a queima do carvão liberar gases causadores do efeito estufa.

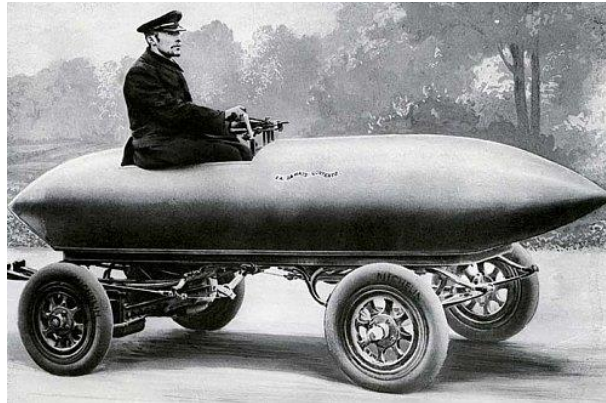
Naturalmente houve uma evolução na construção dos veículos de transporte de passageiros e em 1886, Karl Benz, criava o primeiro veículo com motor de combustão interna, precursor dos automóveis que utilizamos hoje. O veículo possuía cerca de 1 cv e era movido por uma mistura de gases contendo éter ou benzina. Não havia acelerador, sendo que o aumento ou a diminuição de velocidade se dava através do ajuste de vazão dos gases.

O grande problema do automóvel de Karl eram seus combustíveis, além de poluentes, eles são danosos ao ser humano. No caso do éter, ao ser inalado ele funciona como anestésico, podendo causar desmaios, já a benzina pode levar a morte.

Os veículos de Karl e Cugnot, apesar de serem ícones no desenvolvimento de transporte humano, compartilhavam da escolha de combustíveis danosos ao meio ambiente e ao ser humano.

Paralelamente a esses projetos, já em 1835 Thomas Davenport criou o primeiro veículo elétrico e, em 1899, utilizando um par de motores de 25 kW, com baterias de 200V e 124A, o carro elétrico criado por Camille Jenatzy foi o primeiro automóvel a ultrapassar os 100 km/h. Na Figura 2 é possível ver o carro elétrico de Camille Jenatzy.

Figura 2 – Primeiro veículo a ultrapassar os 100 km/h



Fonte: Grand Prix History (1899).

Apesar de estarem sendo desenvolvidos no mesmo período e em estágio mais avançado, verifica-se que os carros elétricos não ascenderam tanto quanto os veículos à combustão interna, principalmente aqueles movidos à gasolina, que viriam a dominar o mercado. Isso deve-se à necessidade de outras tecnologias incorporadas aos veículos elétricos para obter melhor desempenho, como baterias mais eficientes, além da dependência criada pelos países detentores das maiores reservas em torno dos combustíveis fósseis. A EPE (2016) estimou que cerca de 32% da matriz energética mundial ainda vem do petróleo.

Atualmente, em virtude do conhecimento mais profundo sobre os malefícios causados ao meio ambiente, em consequência da queima do petróleo pelos veículos com motores de combustão interna, o desenvolvimento de baterias mais eficientes e duradouras, além do avanço da eletrônica de potência e da microeletrônica, vem aumentando a cada dia a quantidade de veículos elétricos em circulação.

Além da preservação do meio ambiente e da consciência ambiental por parte da comunidade mundial, o carro elétrico apresenta uma série de vantagens, dentre elas, podemos citar:

- Maior economia e simplicidade na manutenção do automóvel;
- Motor mais silencioso;
- Emissão de poluentes nula quando o veículo está em movimento;
- Redução ou dispensa do pagamento do Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores – IPVA;
- Rendimento do motor elétrico muito superior ao rendimento do motor de combustão interna.

Em relação às motocicletas elétricas, houve um crescimento de fabricação na década de 1990, mas logo entrou em decadência devido à diminuição dos custos de fabricação e desenvolvimento das motocicletas de combustão interna *flex* que podem ser abastecidas com gasolina ou álcool. Porém, da mesma maneira que vem acontecendo com os carros elétricos, as motocicletas elétricas têm voltado a ser destaque, principalmente porque grandes marcas fabricantes de motos como Harley Davidson e Ducati entraram na disputa pelo desenvolvimento de motocicletas elétricas e com a disputa do MotoE World Cup, o mundial de motovelocidade disputado apenas por motos elétricas, que mostra que os veículos elétricos também alcançam velocidades altíssimas sobre duas rodas.

1.2 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

Historicamente, crises mundiais devido à baixa oferta ou alta demanda por petróleo fez com que diversos países do mundo buscassem alternativas para substituir esse combustível fóssil por outro combustível, principalmente mais barato. Entretanto, essa busca por alternativas sempre se mostrou temporária e dependente de incentivos governamentais, como o Proálcool no Brasil, assim a dependência por petróleo ainda persiste.

A busca por alternativas temporárias de substituição do petróleo se mostrou ineficiente e o mundo continuou a utilizar esse combustível como fonte principal de energia, principalmente nos veículos. O maior problema resultante do uso de derivados de petróleo não é econômico e sim ambiental. Assistiu-se nos últimos anos diversos estudos que mostraram que a utilização

desse combustível fóssil é extremamente danosa ao meio ambiente, já que as queimas desses hidrocarbonetos liberam diversos gases que causam poluição atmosférica, diminuem a camada de ozônio, contribuindo assim para o aumento do efeito estufa.

Abriu-se novamente os olhos para os veículos elétricos, já que esses não emitem qualquer tipo de poluentes enquanto em movimento e mostraram-se muito mais econômicos já que não é necessário trocar óleo, velas ou cabo de velas, regular as válvulas do motor, limpar o bico injetor, trocar correia dentada, correia do alternador, bomba de água, radiador, aditivo do radiador, alternador, bomba de combustível, sistema de escapamento, catalisador, mangueiras, distribuidor, motor de arranque, filtro de óleo do motor, filtro de combustível, filtro de ar etc.

Como os veículos elétricos se mostraram mais econômicos e menos poluentes, alguns países já estabeleceram metas para encerrar a circulação e a venda de veículos de combustão interna, como a Noruega que estipulou uma meta para que até 2025 todos os veículos vendidos no território norueguês sejam de automóveis elétricos. Entretanto, estabelece-se outro problema, o que fazer com os veículos de combustão interna já em circulação? Serão simplesmente descartados? Em um país como o Brasil, onde o Instituto Brasileiro de Pesquisa e Estatística (2020) estimou que existam mais de 100 milhões de veículos de combustão interna em circulação, não há a possibilidade de se descartar esse montante de veículos e adquirir automóveis novos elétricos, em primeiro lugar devido ao custo alto de aquisição desses veículos no país e, em segundo lugar, não é possível estimar qual o percentual desses veículos que seriam devidamente reciclados. A parte da frota que não fosse reciclada poderia parar em lixões e a decomposição das partes desses automóveis poderia contaminar lençóis freáticos e o solo, causando mais problemas que os solucionando.

Uma possibilidade seria utilizar os veículos já existentes e convertê-los em veículos elétricos, substituindo partes pontuais desses automóveis que não seriam necessárias e destinando-as a um descarte correto. A escolha por fazê-lo em motocicletas neste estudo, deve-se ao fato de que o CNM (2018) apontou que em 17 estados brasileiros a quantidade de motocicletas é maior que o número dos demais veículos, assim atingir-se-ia a maior parte dos municípios brasileiros que poderiam ser afetados por uma regulamentação que exigisse que a frota deveria passar a ser de veículos elétricos.

1.3 OBJETIVO

Este projeto tem como objetivo converter uma motocicleta de combustão interna em motocicleta elétrica, modificando minimamente a moto original, com o menor custo possível.

Espera-se que através deste trabalho seja possível compreender como realizar os cálculos necessários para atender determinadas especificações do projeto como carga mínima que a moto deverá carregar ou velocidade máxima que ela poderá atingir e direcionar a execução do processo de conversão.

Além disso, deseja-se verificar o comportamento elétrico e mecânico do motor em diversas situações (como em superfícies planas, subidas etc.), entender o processo de carga e descarga da bateria e como reduzir o impacto sobre ela, já que se trata de um sistema elétrico com variações constantes de carga e torque.

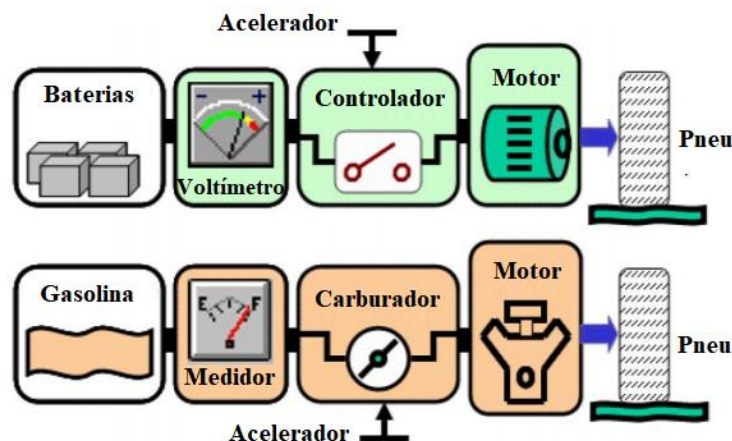
Por fim, pretende-se obter um protótipo e um manual de referência para este tipo de conversão, onde alguém interessado possa segui-lo e, apenas substituindo as partes indicadas em sua motocicleta de combustão interna, obter uma motocicleta elétrica.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A abordagem teórica fundamental para a execução deste projeto consiste na substituição do sistema atual de energia e seus acessórios na motocicleta de combustão interna por outro sistema, cuja origem do movimento mecânico seja a partir de componentes movidos à energia elétrica.

A origem da potência do motor de combustão interna também tem seu equivalente em funcionalidade elétrica. Por exemplo, o equivalente a combustível serão as baterias, o equivalente ao medidor de combustível será um medidor de tensão do banco de baterias, etc. A equivalência dos sistemas elétrico e mecânico pode ser vista na Figura 3.

Figura 3 – Equivalência dos sistemas elétrico e mecânico



Fonte: Oscar Isaías García (2018).

Nota: Modificado pelo autor.

O foco desta seção será dado à utilização e a relevância dos equipamentos definidos para a conversão. Explicações sobre o funcionamento de baterias, por exemplo, serão omitidas, haja vista que se tratam de conhecimentos amplamente difundidos e tomariam diversas páginas com assuntos encontrados facilmente em diversos livros. Por esse motivo tratar-se-á de como foram escolhidos os dispositivos e porque, de acordo com seu funcionamento, eles serão relevantes para este projeto.

2.1 MOTOCICLETA

Uma motocicleta é um veículo de duas rodas que possui um motor e pode transportar um ou dois ocupantes. A primeira moto surgiu por volta dos anos 1885.

Algumas características típicas deste veículo são quadro tubular, apoio de pés em pedais, tanque de combustível a frente do piloto, câmbio manual sequencial, peso distribuído, utilização de embreagem para troca de marcha e utilização dos pés para troca de marcha e frenagem.

A moto escolhida para realização da conversão foi uma Sundown Max 125. A escolha deu-se por ser um modelo mais barato, com *design* comum entre as motocicletas brasileiras, além de suas especificações serem muito similares aos modelos elétricos vendidos atualmente no mercado brasileiro. O modelo escolhido pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 – Sundown Max 125



Fonte: O Tempo (2007).

Este modelo foi fabricado pela Sundown e atingiu o auge de vendas no ano de 2007. Possui torque máximo de 0,87 kgfm @ 7000 rpm e potência máxima de 12,5 cv @ 8500 rpm, além de um câmbio manual de 5 velocidades com transmissão por corrente. Segundo o fabricante, esta moto pode ultrapassar os 100 km/h de velocidade máxima em superfície plana. O peso seco

desta motocicleta é de 112 kg. Outros dados sobre a construção da Sundown Max podem ser encontrados no Quadro 1 a seguir:

Quadro 1 – Especificações técnicas da Sundown Max 125

(continua)

	ITENS	DADOS
DIMENSÕES	Comprimento total	2010 mm
	Largura total	760 mm
	Altura total	1120 mm
	Altura do assento	768 mm
	Distância entre-eixos	1300 mm
	Distância do solo	170 mm
	Câmbio	5 marchas
	Diâmetro x curso	56,5 x 49,5 mm
	Tipo do motor	Monocilíndrico, 4T, OHV, refrigerado a ar
	Cilindrada	124 cm ³
	Potência máxima	12,5 cv @ 8500 rpm
	Torque máximo	0,87 kgfm @ 7000 rpm
	RODAS	Roda dianteira / aro
Roda traseira / aro		90/90 – 18”
SISTEMA ELÉTRICO	Bateria	12 V / 6 Ah
	Partida	Elétrica / Pedal
	Ignição	CDI (Ignição por descarga capacitiva)
	Fusível	15 A
	Farol (alto / baixo)	12 V – 35 W / 35 W
	Lanterna / luz de freio	12 V – 5 W / 21 W
	Luz da sinaleira (pisca)	12 V – 10 W x 4
	Indicador das luzes da sinaleira (pisca)	12 V – 1,7 W x 2
	Luzes – Painel de instrumentos	12 V – 1,7 W
	Indicador de farol alto	12 V – 1,7 W

Quadro 2 – Especificações técnicas da Sundown Max 125

(conclusão)

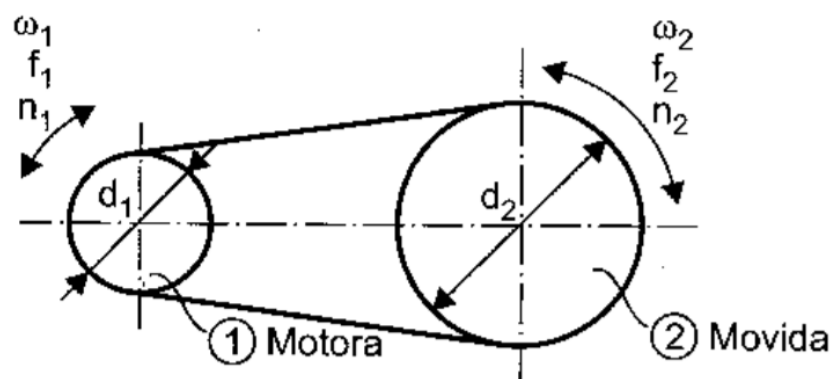
	ITENS	DADOS
CAPACIDADE	Peso bruto	112 kg
	Carga máxima	155 kg
	Tanque de combustível	14 L
	Velocidade máxima	> 100 km/h
FREIOS	Dianteiro	Disco
	Traseiro	Tambor ($\varnothing = 130$ mm)

Fonte: Sundown (2007).

Arbitrariamente decidiu-se que a velocidade máxima que a moto elétrica deveria alcançar seria de pelo menos 50 km/h. Como não é necessário manter o câmbio, este foi retirado, juntamente com as partes mecânicas dispensáveis para o funcionamento do motor elétrico como carburador, escapamento etc. Por esse motivo, o motor foi acoplado diretamente no pinhão.

Na Figura 5 vê-se um esquema de como será a transmissão da velocidade angular do motor, que será acoplado em 1, para a roda traseira, que será acoplado em 2.

Figura 5 – Transmissão por corrente da motocicleta elétrica



Fonte: Sarkis Melconian (2009).

O movimento do pinhão (1 – na figura anterior) e da coroa (2 – na figura anterior) podem ser relacionados através da equação (1):

$$i = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{f_1}{f_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{M_{T_2}}{M_{T_1}} \quad (1)$$

Sabendo que o pneu traseiro usado nesta motocicleta tem por especificação 90/90R18 (desprezando os índices de carga e velocidade), onde os números antes da “/” indicam a largura (em mm), em seguida a proporção entre largura e altura nominal, a letra indica a construção, neste caso, radial e os dois últimos números dão o diâmetro interno (em polegadas) do pneu. Considerando que seja acoplado o eixo do motor diretamente no pinhão, obtêm-se a velocidade angular da coroa necessária para atingir 50 km/h de velocidade linear através da equação (2):

$$v = \frac{\omega_2 \cdot d_2}{2} \quad (2)$$

Pode-se considerar ainda que o pneu está paralelamente acoplado à coroa, logo as velocidades angulares da coroa e do pneu serão as mesmas, por isso pode ser utilizado o diâmetro do pneu na equação (2).

Calculando o diâmetro do pneu com as informações das especificações supracitadas, obtêm-se:

$$d_{pneu} = \frac{90 \cdot 90 \cdot 2}{100} + 18 \cdot 25,4 = 619,2 \text{ mm} \quad (3)$$

Portanto, a velocidade angular do pneu e da coroa será:

$$\omega_2 = \frac{2 \cdot v}{d_{pneu}} = \frac{2 \cdot 50 \cdot 10^3}{619,2 \cdot 10^{-3} \cdot 3600} = 44,86 \text{ rad/s} \quad (4)$$

Através da relação dada na equação (1), calcula-se a velocidade angular do pinhão, considerando rendimento de 100% na transmissão e sabendo que a coroa utilizada possui 43 dentes e o pinhão 11:

$$\omega_1 = \frac{\omega_2 \cdot Z_2}{Z_1} = \frac{44,86 \cdot 43}{11} = 175,36 \text{ rad/s} \quad (5)$$

A velocidade angular do pinhão necessária para atender à especificação será de 175,36 rad/s, esta também será a velocidade angular do eixo do motor, porém é praxe que a rotação do eixo seja dada em rpm, por isso a representação será convertida em rpm.

$$1 \text{ rpm} = 1 \frac{\text{rotação}}{\text{minuto}} = \frac{2\pi \text{ rad}}{60 \text{ segundos}} = \frac{\pi}{30} \text{ rad/s} \quad (6)$$

Logo,

$$n_2 = \frac{175,36 \cdot 30}{\pi} = 1674,60 \text{ RPM} \quad (7)$$

Portanto, o motor escolhido precisava ter rotação máxima superior a 1674 RPM para satisfazer a condição de projeto.

Mais informações sobre a Sundown Max 125 podem ser encontradas no Manual do Proprietário e Garantia.

2.2 MOTOR

Uma premissa do projeto era realizar as escolhas dos componentes elétricos que seriam necessários à conversão de modo que o desempenho se mantivesse parecido ao desempenho da moto original ou das motos elétricas disponíveis no mercado.

O motor de combustão interna da moto original possui torque máximo de 0,87 kgfm @ 7000 rpm e potência máxima de 12,5 cv (aproximadamente 9 kW) @ 8500 rpm. Um motor elétrico com essa potência tem um preço elevado para esse momento do projeto, por isso optou-se por aquele que tivesse a especificação mais próxima possível, com preço adequado ao orçamento disponível para esse projeto. Além disso, as motocicletas elétricas disponíveis no mercado atualmente são amplamente vendidas com motor de 3 kW, portanto optando por um motor com uma potência tão acima da potência utilizada normalmente em outros veículos elevaria o custo desnecessariamente e ainda destoaria do mercado de veículos elétricos atual.

Analisando alguns motores elétricos disponíveis no mercado, verificou-se que os motores do fabricante asiático Kunray apresentavam as especificações necessárias a preços inferiores aos

de seus concorrentes. Sabendo disso, procurou-se no catálogo deste fabricante, o motor que melhor se adequaria a este projeto visando as especificações anteriormente citadas.

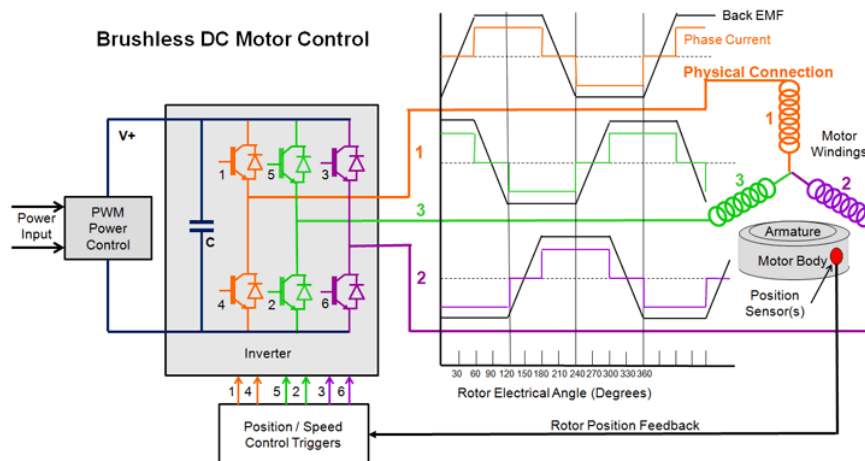
Procurando por motores que pudessem melhor se adequar a esse projeto, verificou-se que no mercado tem se utilizado para este tipo de aplicação motores CC sem escovas. Neste projeto foram estudados diversos motores, mas optou-se também por um motor CC *brushless* (BLDC) por requerer menos manutenção, gerar menos ruído e ter uma maior densidade de potência e faixa de velocidade se comparado ao motor de comutação escovada. Além disso, o sistema de alimentação e controle é mais simples se comparado aos motores síncronos e de indução assíncronos. Também possuem menor custo, maior torque de arrancada, são mais leves que os motores citados, além de sofrerem menos perdas e serem mais silenciosos que os motores síncronos de relutância.

Basicamente, um motor síncrono com um ímã permanente no rotor e operado em modo autocontrolado – usando um sensor de posição no rotor e um inversor trifásico para controlar a corrente nos enrolamentos do estator – é geralmente conhecido como motor CC sem escovas ou *brushless* ou ainda motor BLDC. O sensor de posição e as chaves no inversor desempenham o papel das escovas e do comutador mecânico do motor.

O estado ligado-desligado destas chaves pode ser controlado a partir dos sensores de posição no rotor que em geral são sensores de efeito Hall. Uma configuração de inversor com transistor alimentada por uma fonte de corrente CC pode ser usada para um sistema de acionamento do motor BLDC. O sensor de posição no rotor controlará os instantes de ligar e desligar de modo que o ângulo entre o campo do rotor e o campo do estator seja regulado em 90° , portanto as chaves do inversor são ligadas a cada 60° elétricos.

Se o inversor for alimentado por uma fonte de tensão CC, a modulação por largura de pulso (PWM) das chaves pode fornecer a regulação da corrente do motor. Adiante, pode ser visto na Figura 6 um exemplo de construção do sistema de controle e a ligação num motor CC sem escovas.

Figura 6 – Ligação entre o controlador e o motor BLDC



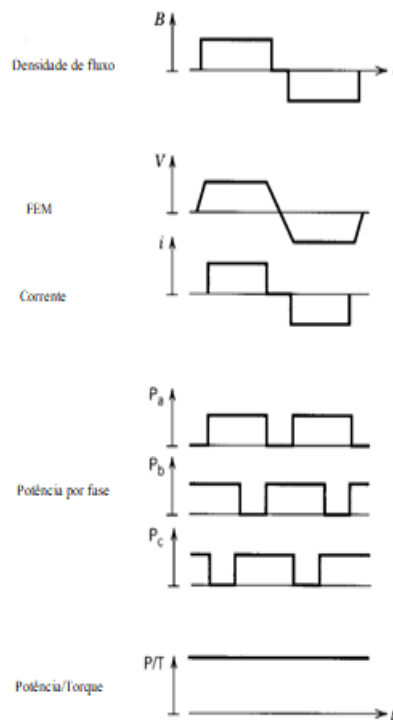
Fonte: MPowerUK (2005).

Existem dois tipos básicos de motores BLDC: tipo trapezoidal e tipo senoidal. No tipo trapezoidal, a FCEM é de formato trapezoidal, ou seja, a corrente de fase é uma onda quase retangular. No tipo senoidal, a FCEM é senoidal com rotor cilíndrico com ímãs permanentes, geralmente é mais eficiente que um motor de indução de mesma potência e é utilizado onde há exigência de ajuste fino no controle de torque e velocidade. Também há a necessidade de um sistema de controle mais complexo. Neste momento a atenção será dada ao motor do tipo trapezoidal devido ao motor escolhido.

Uma FCEM trapezoidal é gerada por ímãs permanentes no rotor com uma distribuição de fluxo quadrado e um enrolamento de estator concentrado. O motor do tipo trapezoidal requer um sensor de posição, sendo o esquema de comutação simples e, em geral, com apenas duas chaves. No entanto, a ondulação do torque poderá ser alta.

Na Figura 7 é possível ver os formatos das ondas num motor BLDC tipo trapezoidal.

Figura 7 – Formas de onda num motor BLDC tipo trapezoidal



Fonte: PC Sen (2013).

Nota: Modificado pelo autor.

A seguir pode ser visto o Quadro 2 contendo as principais vantagens e desvantagens do motor CC brushless.

Quadro 3 – Vantagens e desvantagens do motor CC brushless

(continua)

VANTAGENS	DESvantagens
Pequeno tamanho do rotor e alta densidade de potência, devido à ausência de comutadores mecânicos, escovas e enrolamentos de campo	Requer sensor de posição do rotor
Inércia mais baixa e resposta dinâmica mais rápida.	Eletrônica de potência mais complexa
Maior velocidade e capacidade de torque, devido à ausência de escovas e comutadores	Controladores mais complexos
Menor custo de manutenção	Alto custo de aquisição do sistema em relação ao motor com escova

Quadro 4 – Vantagens e desvantagens do motor CC brushless

(conclusão)

VANTAGENS	DESVANTAGENS
Alta relação torque / inércia	
Melhor dissipação de calor, devido ao enrolamento da armadura estacionária	

Fonte: PC Sen (2013).

Dentre os motores CC *brushless* da marca Kunray disponíveis o que apresenta melhor custo benefício às especificações foi o modelo MY1020. Este motor pode ser visto na Figura 8.

Figura 8 – Motor Kunray MY1020



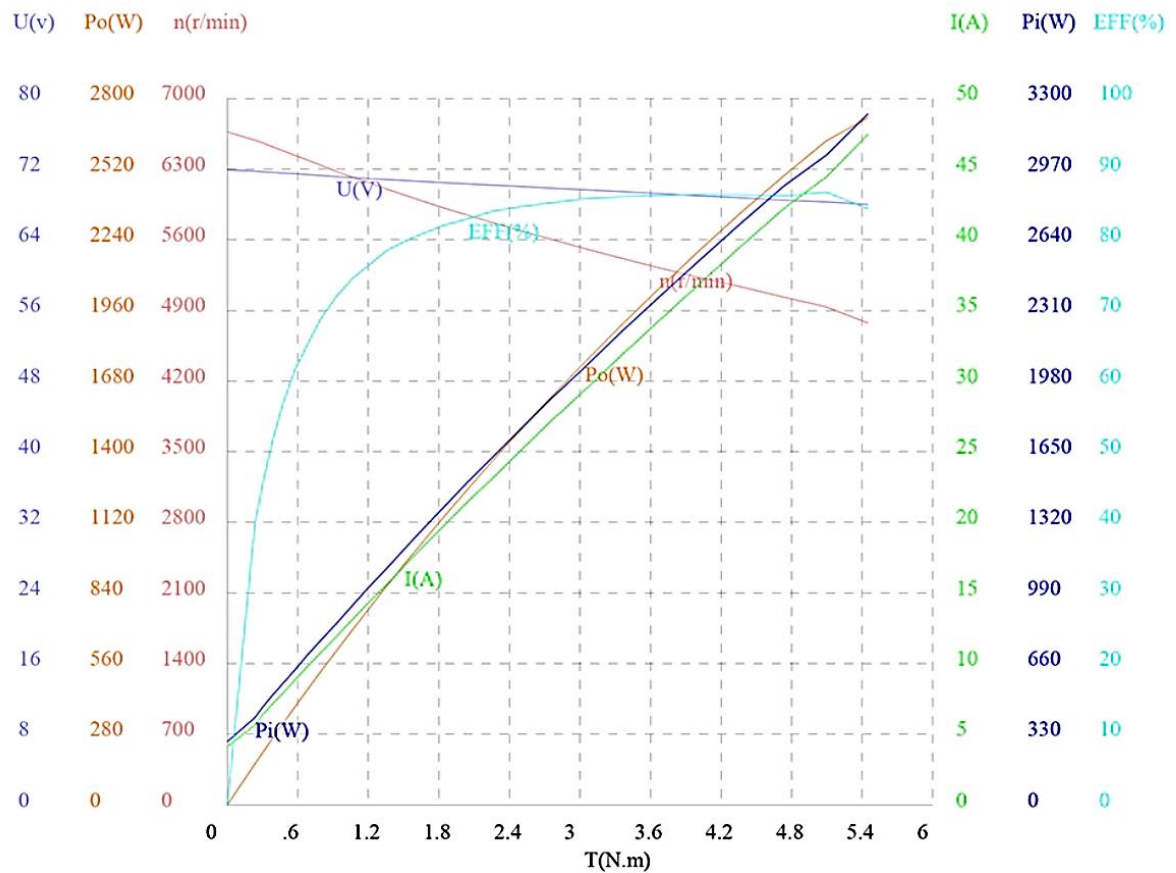
Fonte: Kunray (2018).

Como pode ser visto, o motor é bem compacto e pesa apenas 5,5 kg. Este motor é alimentado em 72V, possui potência de entrada de 3 kW e eficiência máxima de 87% aos 4900 rpm, rotação nominal de 4900 rpm e máxima de 5800 rpm com torque máximo de 5,4 Nm @ 4800 rpm.

Portanto, este motor satisfaz algumas das premissas de projeto, como torque próximo ao do modelo atual e rotação superior ao calculado para atingir a velocidade de 50 km/h quando seu eixo é acoplado ao pinhão. Além de estar em linha com os motores de outras motos elétricas vendidas atualmente.

A figura a seguir mostra as curvas de desempenho do motor escolhido.

Figura 9 – Curvas de desempenho do motor Kunray MY1020

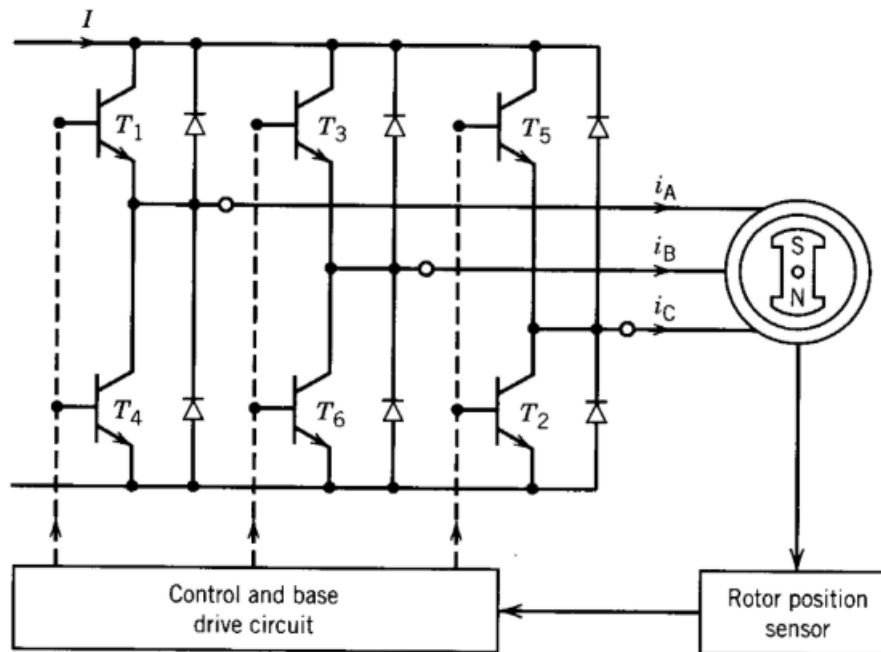


Fonte: Kunray (2018).

2.3 CONTROLADOR

Por questão de compatibilidade, optou-se por utilizar um controlador também da marca Kunray. O fabricante não disponibiliza o circuito desse dispositivo, mas um circuito típico pode ser encontrado facilmente em qualquer livro de máquinas elétricas que trate de motores CC *brushless*. Um circuito de controle típico para um motor BLDC pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 – Circuito típico de controle do motor CC brushless



Fonte: PC Sen (2013).

O controlador Kunray que foi utilizado é composto por 24 mosfets e tem a função de realizar a leitura da posição do rotor a partir dos sensores de efeito Hall e desta maneira controlar a velocidade do motor através de um sinal PWM com níveis altos defasados em 120° em cada fase, pode variar a tensão entre 48V e 72V e fornecer uma corrente de até 80A. Além disso, também é possível realizar frenagem regenerativa, proteger o motor contra subtensão, sobretensão ou sobrecorrente, reverter o sentido de giro ou bloquear o giro do motor. São algumas características deste controlador:

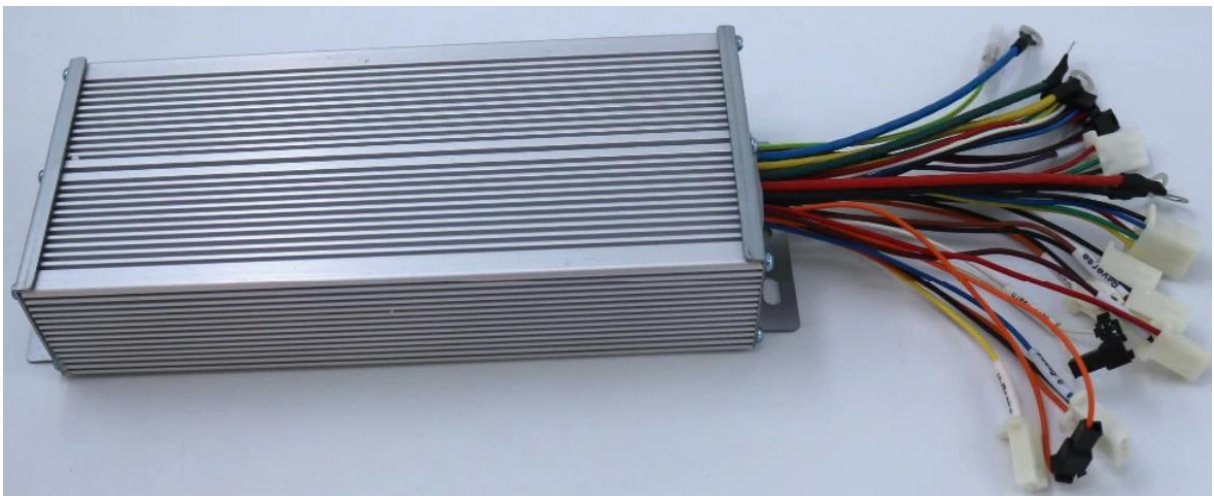
- Unidade de velocidade variável e controle de freio em um único componente;
- Os *designs* dos MOSFETs de potência fornecem alta eficiência e operação silenciosa;
- Impede a utilização do acelerador durante a partida do motor e só o liga quando o acelerador retorna à posição neutro (sem aceleração);
- O circuito de proteção e compensação térmica impede o funcionamento do motor quando a temperatura excede o limite especificado, bem como em temperatura baixa e limita a corrente em toda a faixa de operação;
- A função de corte de tensão mínima protege contra a baixa tensão da bateria;
- O controlador desliga o motor caso não identifique o acelerador no circuito para evitar condições fora de controle;

- Instalação simples sem a necessidade inicial de ajustes;

Este controlador também é programável, podendo se modificar vários parâmetros para limitar o desempenho, por exemplo. A eficiência deste modelo é superior a 83% e o consumo é inferior a 1,5 W.

A Figura 11 mostra o modelo do controlador escolhido.

Figura 11 – Controlador Kunray



Fonte: Kunray (2018).

2.4 BATERIA

A escolha da bateria está baseada em premissas de economicidade e capacidade, ou seja, a bateria escolhida deveria ser encontrada no mercado a um preço acessível e possuir uma capacidade de carga que desse autonomia de pelo menos 20 minutos para a motocicleta, sendo esse valor arbitrado tomando-se como referência as motos e patinetes elétricos de mesma potência encontradas no mercado.

Segundo a norma ABNT NBR 14206:2014, o acumulador chumbo-ácido estacionário regulado por válvula é aquele que, por natureza do serviço, funciona imóvel e permanentemente conectado a uma fonte de corrente contínua, o que obviamente não acontecerá, já que a função da motocicleta é se locomover constantemente.

Entretanto, a bateria estacionária foi projetada para oferecer quantidade constante de corrente por um longo período de tempo, diferentemente de outras baterias, este modelo pode sofrer descargas profundas diversas vezes, também oferece a possibilidade de ser recarregada continuamente enquanto em operação. Por esses motivos optou-se pela bateria estacionária, sua capacidade de descarga profunda é ideal para este tipo de aplicação, além disso, o projeto de uma bateria que pudesse trabalhar imóvel deve-se ao fato de que outros modelos de baterias, como as automotivas, podem sofrer com a estratificação do eletrólito, ou seja, há a separação da água e do ácido quando ficam imóveis durante um longo período, já a bateria estacionária é fabricada com o eletrólito preso a uma “grade”, o que reduz o efeito da estratificação e o fato de poder ser recarregada continuamente é ideal para utilização de frenagem regenerativa, que recarregará as baterias enquanto os freios estiverem acionados.

Os pontos negativos são que estas baterias foram projetadas para trabalhar fornecendo corrente constante e o motor de um veículo elétrico demanda diferentes correntes durante todo o tempo. Por isso, foi necessário adquirir uma bateria com maior capacidade, pois como ela não trabalhará sob corrente constante, haverá o efeito Peukert que será visto a seguir. Ainda, as baterias estacionárias de chumbo-ácido são pesadas, porém as de íon-lítio, que são as melhores alternativas disponíveis no mercado em relação ao peso, apresentam um custo até 100% maior.

Portanto, tomando as precauções necessárias, utilizar a bateria estacionária para esta finalidade não trará dano algum para o projeto.

Como há variação na corrente de trabalho do motor, a bateria será afetada pelo efeito Peukert. Esse efeito foi descrito pela primeira vez pelo cientista alemão Wilhelm Peukert em 1897, sua equação indica a capacidade real de uma bateria de chumbo-ácido em termos da taxa na qual é descarregada, quando a corrente é diferente da corrente de descarga projetada para aquela bateria. A equação é expressa como:

$$C_a = \frac{K}{I_d^{n-1}} = I_d^n \cdot t \quad (8)$$

onde:

$$n = \frac{\log t_2 - \log t_1}{\log I_1 - \log I_2} \quad (9)$$

$$K = I_1 \cdot t_1 \cdot I_1^{n-1} = I_2 \cdot t_2 \cdot I_2^{n-1} \quad (10)$$

Pelas equações (8), (9) e (10) é possível concluir que a medida que a taxa de descarga aumenta, a capacidade disponível da bateria diminui.

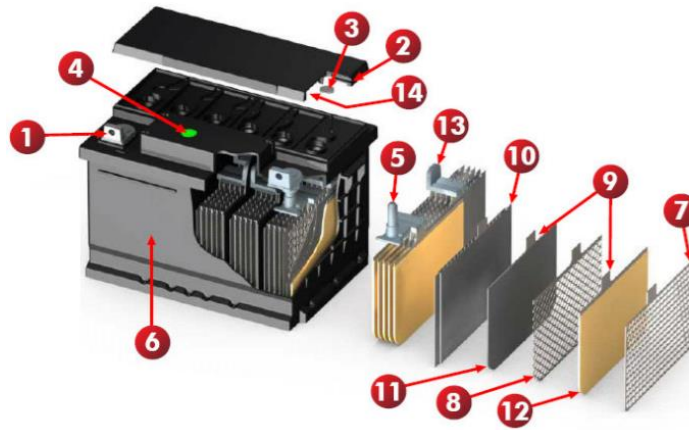
Supondo que o motor trabalhe em sua máxima potência durante todo o tempo (numa situação de rodovia, por exemplo), ou seja, demandando 42A de corrente, sendo essa a condição de maior esforço para o motor e sabendo que um valor típico do coeficiente de Peukert para baterias de chumbo-ácido é 1,2, é possível calcular a capacidade mínima que a bateria deve ter para que seja possível andar por 20 minutos.

Calculando através das equações anteriores, obtêm-se que a capacidade mínima é 29Ah. Por questões de custo, apresentou ser mais vantajoso financeiramente adquirir uma bateria estacionária Freedom 30Ah.

Portanto, para este projeto foram escolhidas baterias estacionárias chumbo-ácido do fabricante Freedom, modelo DF300, de 12V e 30Ah, formando um banco com seis baterias ligadas em série, pesando 8,8 kg e medindo 175 x 175 x 175 mm (comprimento x largura x altura) cada.

Na Figura 12 podem ser vistos os aspectos contrutivos da bateria Freedom DF300.

Figura 12 – Constituição física da bateria Freedom DF300

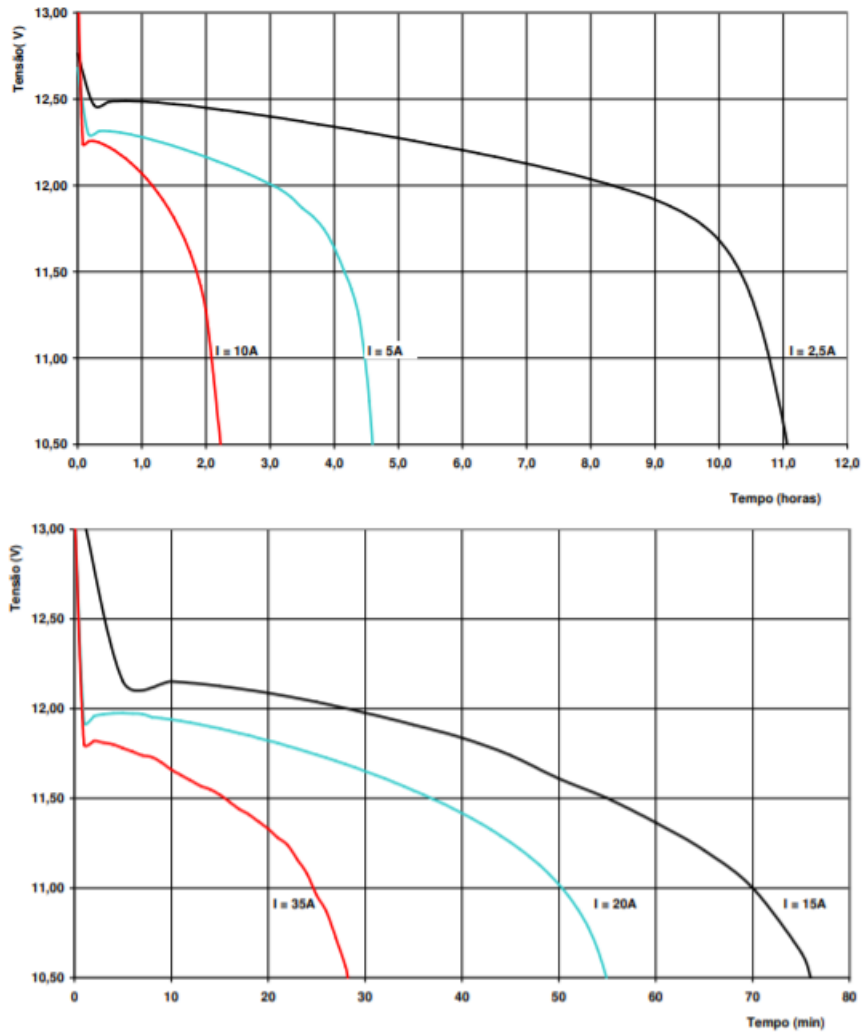


1. Terminal tipo "L"
2. Respiro
3. Filtro Anti-Chama
4. Indicador de Teste
5. Poste Reforçado
6. Caixa Polipropileno
7. Grades Positivas fundidas em Liga de Chumbo - Cálcio - Prata
8. Grades Negativas expandidas em Liga de Chumbo - Cálcio
9. Terminal da placa centralizado** com área 36% maior que a concorrência
10. Separador em Polietileno
11. Material Ativo Negativo
12. Material Ativo Positivo
13. Conexão 36% maior que a concorrência
14. Labirinto

Fonte: Freedom (2008).

As curvas de descarga sob corrente constante podem ser vistas na Figura 13.

Figura 13 – Curvas de descarga da bateria DF300 sob corrente constante



Fonte: Freedom (2008).

Segundo o fabricante, a descarga da bateria sob corrente constante igual a 42 A ficaria entre 15 e 30 minutos, corroborando para o cálculo feito acima. Uma tabela mais detalhada com várias correntes de descarga pode ser encontrada no Manual Técnico de Baterias Estacionárias Freedom.

O tempo necessário para a carga completa desta bateria, segundo a Freedom, é de 8h sob tensão de 15,5 V.

2.5 EQUALIZADOR DE BATERIA

Devido à aspectos construtivos, do estado de carga, da temperatura e da idade, as baterias não apresentam a mesma resistência interna, já que esta advém da soma da resistência do eletrólito, placas positiva e negativa, separadores etc. Por esse motivo, as baterias em série não fornecerão a mesma tensão e será necessário um controle sobre elas para que não haja sobrecarga.

O equalizador de bateria é utilizado para ligar baterias em série, mantendo o carregamento e o descarregamento uniformes, aumentando a autonomia e a durabilidade das baterias.

Neste projeto serão utilizados 5 equalizados modelo HA01 projetados para uso com baterias de chumbo-ácido, capazes de manter o descarregamento equilibrado de duas baterias de 12V quando a diferença de tensão entre elas é superior a 20mV.

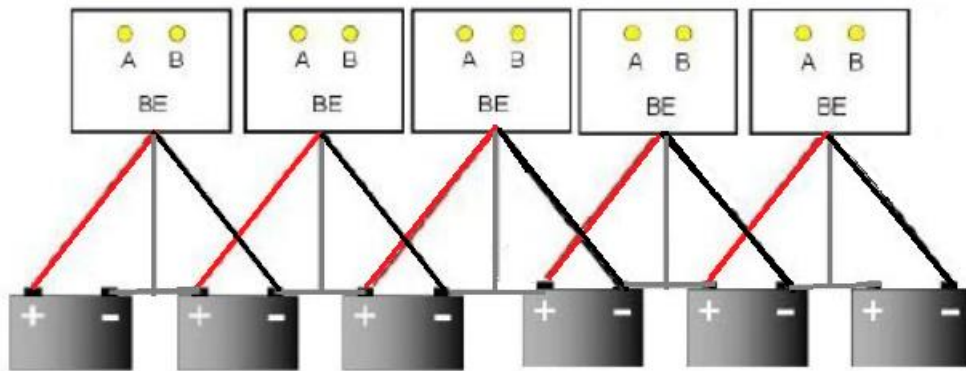
A Figura 14 mostra o modelo do equalizador usado enquanto a Figura 15 ilustra como foi o esquema de ligação entre os equalizadores e as baterias.

Figura 14 – Equalizador de baterias HA01



Fonte: Green Energy (2018).

Figura 15 – Ligação entre baterias e equalizadores



Fonte: Produção do próprio autor.

2.6 ACELERADOR

Para informar ao controlador o quanto é necessário de velocidade e torque no motor é preciso utilizar um acelerador.

O acelerador deveria ser compatível com o restante dos equipamentos, ou seja, trabalhar com tensão de até 72 V, poder seleccionar os modos de trabalho e o sentido de rotação do motor.

Por isso escolheu-se um acelerador conforme a Figura 16.

Figura 16 – Acelerador



Fonte: Produção do próprio autor.

Este acelerador possui cerca de 12 cm de comprimento e é capaz de selecionar três modos de velocidade, o sentido de rotação e variar a velocidade de acordo com o modo escolhido, propiciando variações de torque para atender às diversas condições durante um trajeto.

Internamente o acelerador possui um sensor de efeito Hall que detecta a variação do campo magnético. Acoplado à peça que giramos para modificar a velocidade há um pedaço de metal imantado que passa na frente do sensor. Na posição sem aceleração, a presença de campo magnético é grande e, conforme o acelerador é acionado, a peça metálica vai sendo retirada da frente do sensor e diminuindo o campo magnético. Com isso é enviado um sinal que vai de 0 V à 5 V para um microcontrolador presente dentro do controlador que faz o processamento e ajusta a condição para o funcionamento correto do motor.

3 METODOLOGIA E ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO

3.1 TESTES PRELIMINARES

Os equipamentos utilizados foram descritos nos itens anteriores e já explicitado os motivos de cada escolha.

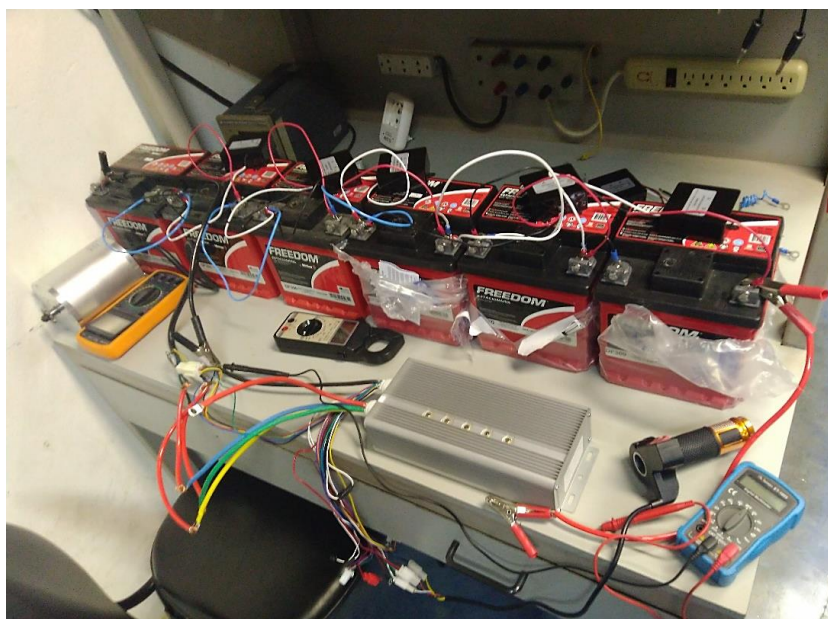
A fim de manter uma organização lógica no projeto e realizar estudos mais aprofundados sobre o assunto, houve uma divisão para que o projeto ocorresse em duas etapas distintas:

- Estudo e caracterização dos equipamentos em bancada;
- Estudo e aperfeiçoamento do sistema na moto.

No primeiro momento foram realizados o estudo e a caracterização dos equipamentos em bancada. Esta etapa é importante para que possam ser verificados possíveis problemas ou se há possibilidade de aperfeiçoamento e melhora dos equipamentos que serão utilizados.

Foram realizados testes de corrente, tensão e velocidade, bem como a verificação da descarga da bateria. A montagem do teste de bancada pode ser vista na Figura 17.

Figura 17 – Teste de bancada



Fonte: Produção do próprio autor.

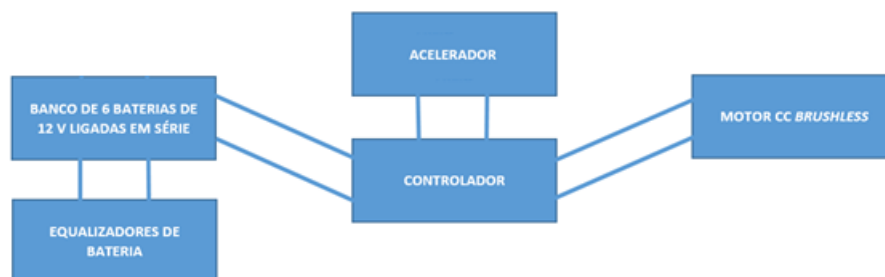
Durante os testes realizados foi possível obter as três velocidades máximas nos modos disponibilizados pelo controlador. As velocidades medidas foram 2651 RPM, 4430 RPM e 5720 RPM. Em cada um desses modos é possível obter mais ou menos torque, potência e alcançar velocidades lineares maiores. A escolha do modo de utilização fica a cargo do motociclista e da condição de utilização da motocicleta. A tensão medida variou entre 57,8 V e 74 V e a corrente entre 28,8 A e 42 A.

Todos os testes foram feitos com o motor girando nos sentidos horário e anti-horário, mas as grandezas medidas apresentaram dados muito similares.

O motor trabalhou sem carga no eixo durante todo o teste e após mais de 30 minutos com o motor trabalhando continuamente o banco de baterias apresentava tensão de 74,2 V.

Na Figura 18 é possível visualizar um esquemático do sistema montado.

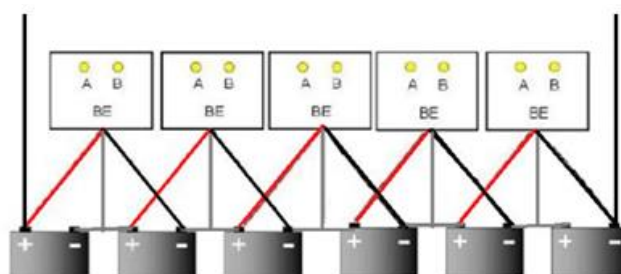
Figura 18 – Sistema montado para testes



Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 19 mostra o conjunto banco de bateria mais os equalizadores de baterias que será chamado apenas de alimentação do motor.

Figura 19 – Sistema de alimentação do motor

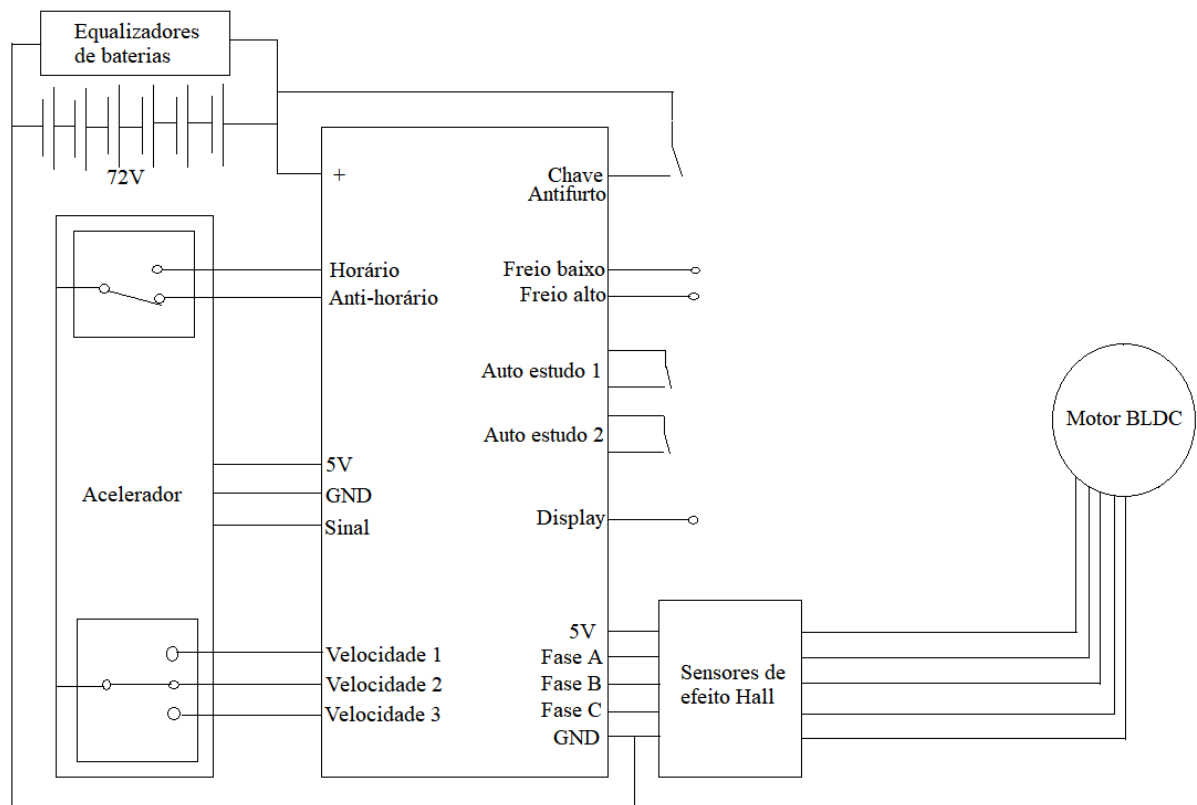


Fonte: Produção do próprio autor.

O sistema de alimentação do motor fornece uma tensão de 72 V para o controlador que será responsável por coordenar a rotação do motor através de um sinal PWM.

Na Figura 20 é possível ver como é feita a ligação entre o sistema de alimentação, o controlador e o motor.

Figura 20 – Esquema de ligação dos sistemas de alimentação, controlador e motor



Fonte: Produção do próprio autor.

3.2 PREPARO DA MOTOCICLETA

Ao finalizar a etapa de testes é necessário preparar a motocicleta para receber os equipamentos elétricos. Diversas partes da moto são dispensáveis para a utilização do motor elétrico ou até mesmo atrapalham o desempenho do novo sistema, por isso é necessário retirar as partes desnecessárias.

A moto estava com todos as partes mecânicas em seu lugar, por isso foi necessário realizar uma desmontagem completa para verificação do que seria útil ou não. Na Figura 21 é possível ver a etapa de desmontagem.

Figura 21 – Motocicleta desmontada

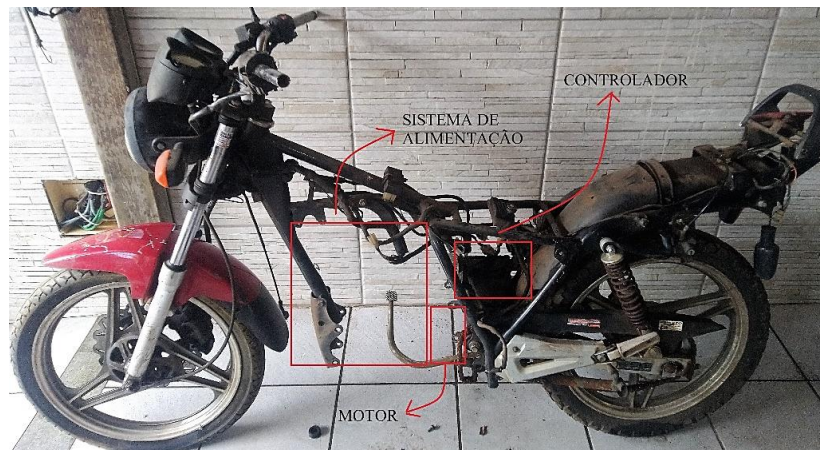


Fonte: Produção do próprio autor.

Algumas partes que foram retiradas nesta etapa: motor, caixa de marchas, filtros de ar e óleo, bateria, banco, tanque de combustível, vela, acelerador, cabos de acelerador e vela, todos os chicotes de carga, ignição, partida, força e injeção, escapamento, retrovisores, luzes de freio, faróis e outras partes. As peças retiradas totalizaram aproximadamente 50 kg. No fim ficaram apenas o chassi, rodas, sistema de transmissão e painel.

Com a motocicleta praticamente desmontada é possível ver onde se encaixam melhor os equipamentos, afinal é preciso adaptar a moto para receber o sistema elétrico novo. A melhor alternativa encontrada para esse modelo pode ser vista na Figura 22.

Figura 22 – Localização do novo sistema de propulsão



Fonte: Produção do próprio autor.

Por conta do pouco espaço disponível, fez-se necessária uma adaptação no chassi que será mostrada adiante. Porém, da forma como ficou distribuído o novo sistema de propulsão não foi necessário mudar a forma de pilotagem e, além disso, mantém mais ou menos o centro de gravidade da moto, mantendo o veículo de uma forma que o motociclista já está adaptado.

Com relação à adaptação no chassi, realizou-se uma alteração com o objetivo de dar sustentação às baterias e o motor. Para isso, soldou-se uma bandeja de metal e uma estrutura de fixação do novo motor na parte inferior da motocicleta onde antes localizava-se o motor à combustão e a caixa de marchas. Além disso, parte da barra frontal do chassi e do para-lama dianteiro foi retirado. Esta etapa pode ser vista na Figura 23.

Figura 23 – Soldagem do suporte das baterias e motor



Fonte: Produção do próprio autor.

Com a nova estrutura manteve-se os pedais de apoio e o pedal de freio na posição original. O novo arranjo pode ser visto na Figura 24.

Figura 24 – Bandeja para suporte do sistema de alimentação e motor



Fonte: Produção do próprio autor.

Com o ajuste realizado fixou-se o motor na parte mais próxima da roda traseira de modo que não foi necessário alterar o comprimento da corrente e colocou-se quatro baterias lado a lado e duas apoiadas sobre esse conjunto de quatro como pode visto na Figura 25. A distância entre o motor e o conjunto de baterias ficou em cerca de 5 cm.

Figura 25– Disposição do banco de baterias



Fonte: Produção do próprio autor.

Manteve-se o aterramento original da moto, ou seja, ligado ao chassi.

Utilizou-se o espaçamento entre o tanque e as baterias para acomodar os equalizadores de baterias e a caixa de ferramentas foi retirada para colocação do controlador. A disposição final pode ser observada na Figura 26.

Figura 26 – Disposição final dos equipamentos

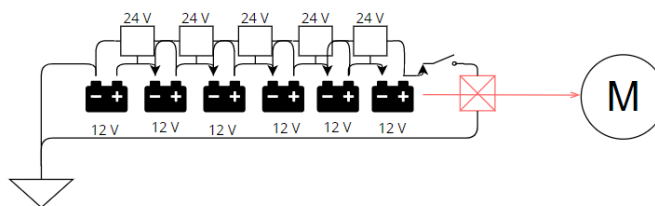


Fonte: Produção do próprio autor.

O veículo utilizado neste projeto não possuía a chave, portanto optou-se por substituir a ignição por um botão liga/desliga. Do ponto de vista de segurança não é algo tão eficiente, porém supre a necessidade para acionar o sistema motriz.

Um esquemático da montagem realizada pode ser visto na Figura 27.

Figura 27 – Disposição final dos equipamentos



Fonte: Produção do próprio autor.

Após a instalação de todos os equipamentos necessários seguiu-se para a etapa de testes em movimento. Os testes foram divididos em duas etapas: teste sem carga e com carga.

Na etapa de teste sem carga realizaram-se as verificações do comportamento dos equipamentos sem carga no eixo do motor, ou seja, apenas a roda era acoplada ao eixo sem que houvesse piloto na moto.

Já o teste com carga incluía o piloto sobre a moto.

4 RESULTADOS

4.1 TESTE SEM CARGA

O primeiro teste realizado foi sem que houvesse piloto na motocicleta, ou seja, apenas houve a suspensão da moto sobre um cavalete e foi verificado se a montagem e os equipamentos estavam corretamente dispostos, bem como seria a resposta do sistema em suas respectivas posições e com diferentes modos de aceleração acionados.

Não houve diferenças significativas entre os resultados encontrados nesta etapa e os encontrados nos testes em bancada mostrados no item 3.1, por isso não serão repetidos neste tópico.

4.2 TESTE COM CARGA

Esta é a etapa de verificação do funcionamento real do equipamento. Realizou-se um teste em movimento com piloto sobre a moto para verificação do comportamento do novo sistema de propulsão.

A motocicleta preparada foi levada para uma via onde pudesse ser testada e o desempenho avaliado. O teste foi realizado em uma via plana, pouco movimentada e o piloto da moto não utilizou capacete para que pudesse ter uma visibilidade melhor dos equipamentos e medições que estavam sendo realizadas durante o teste. Na Figura 28 é mostrada uma imagem do momento em que os testes eram realizados.

Figura 28 – Teste em movimento



Fonte: Produção do próprio autor.

Durante 3 horas intervaladas foram realizados vários testes para verificação do desempenho da motocicleta. Por questões de segurança não se levou o veículo até o limite de velocidade, pois um dos freios não era confiável.

A velocidade máxima medida durante os testes foi de cerca de 40 km/h marcada através do velocímetro presente na moto. A tensão nas baterias quando se mantinha a aceleração constante era de 74,2 V e apresentava queda de tensão ao acelerar e desacelerar repetidamente, porém esse fato não implicou em perda de desempenho significativa. Já a corrente não pôde ser obtida de forma satisfatória porque o multímetro utilizado fazia leituras de até 20 A, valor que foi mostrado pelo equipamento.

Não foi verificado mudança no desempenho ao alterar o modo de velocidade disponível no acelerador. Como os testes foram realizados em uma rua plana, o modo de menor torque supriu a demanda para tirar a moto da inércia e mantê-la em movimento, talvez se houvesse um trajeto com maior inclinação tivesse sido observado alteração de desempenho.

Do lado negativo, o motor apresentou um aquecimento elevado, isso fez com que a proteção do controlador fosse acionada para proteger o sistema contra superaquecimento. A localização do motor também não favoreceu uma ventilação adequada, já que se encontrava atrás das baterias que formavam uma espécie de parede impedindo o resfriamento durante a locomoção.

Somando todos os testes realizados, foram cerca de 30 minutos em bancada, mais 30 minutos com motor acoplado à roda e mais de 30 minutos contínuos com carga, ou seja, mais de uma hora e meia em funcionamento com uma mesma carga de bateria.

Ao fim do período de testes o banco de baterias marcava 58 V.

4.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS

O objetivo de realizar a conversão de uma motocicleta à combustão em uma moto elétrica e obter um veículo com motor elétrico movido a baterias foi alcançado com sucesso. Na Figura 29 é possível verificar a motocicleta concluída.

Figura 29 – Motocicleta convertida



Fonte: Produção do próprio autor.

Durante os testes, a moto convertida atingiu cerca de 40 km/h com uma carga total de mais de 200 kg, considerando o conjunto moto e piloto. Essa carga está acima do recomendável para motos com motor de mesma potência comercializáveis no Brasil. Esse excesso de peso deve-se principalmente às baterias utilizadas que são do tipo chumbo-ácido e, considerando apenas o banco de baterias, há um peso de mais de 50kg. Num próximo momento elas poderão ser trocadas por baterias de lítio que são mais leves e menores, porém trariam um custo mais elevado.

Considerando o tempo de testes e a velocidade obtida, é possível supor que a motocicleta teria autonomia de mais de 60 km, em linha com as motos de mesma potência e capacidade de baterias disponíveis no mercado brasileiro.

Tratando de custos, no Quadro 3 são apresentados os equipamentos utilizados, o valor de aquisição e respectivo peso.

Quadro 5 – Equipamentos utilizados e custos

EQUIPAMENTO	QUANTIDADE	VALOR ESTIMADO/UN	PESO ESTIMADO/UN
Moto	1	R\$900	62 kg
Motor elétrico BLDC	1	US\$380 ¹	6 kg
Controlador	1	US\$190 ¹	2 kg
Bateria	6	R\$300	8,8 kg
Equalizador de bateria	5	US\$14,85 ¹	200 g
Acelerador	1	US\$10 ¹	200 g
Extras ²		R\$500	
TOTAL		R\$6.575,93³	124 kg

Fonte: Produção do próprio autor.

Nota: ¹ Valor do frete e impostos inclusos

² Custos extras devido às mudanças no chassi

³ Valor do dólar utilizado na conversão igual a R\$ 5,16

Com os dados acima é possível fazer um pequeno estudo de viabilidade do projeto. Para o cálculo será considerado o valor de R\$6.575,93 para verificar a viabilidade para quem não possui a motocicleta e R\$5.675,93 desconsiderado o preço de aquisição da motocicleta para aqueles que já possuem uma moto e gostariam apenas de convertê-la.

Para comparação será considerado o trajeto diário realizado pelo autor deste projeto que é de 30 km durante 5 dias na semana, ou seja, em torno de 7560 km por ano. A moto original consome de cerca de 34 km/l de gasolina. No Quadro 4 possuem os custos para manutenção da motocicleta tendo como referência os valores conhecidos pelo autor que possui um modelo similar.

Quadro 6 – Custo de manutenção anual Sundown Max a combustão

ITEM	VALOR AO ANO
Gasolina ¹	R\$1.479
Revisão ²	R\$600
Troca de óleo ³	R\$166
Troca de filtros e outros	R\$400
TOTAL	R\$2.645

Fonte: Produção do próprio autor.

Nota: ¹ Valor de R\$6,65 por litro

² Será realizada uma revisão anual

³ Troca de óleo a cada 1000 km, sendo R\$22 por troca

Não foram considerados itens comuns aos dois modelos como troca de pneus ou transmissão, por exemplo.

No Quadro 5 são apresentados os dados com os custos esperados para manutenção da moto convertida.

Quadro 7 – Custo de manutenção anual da moto convertida

ITEM	VALOR AO ANO
Recarga de bateria ¹	R\$170,88
Troca de baterias ²	R\$450
TOTAL	R\$620,88

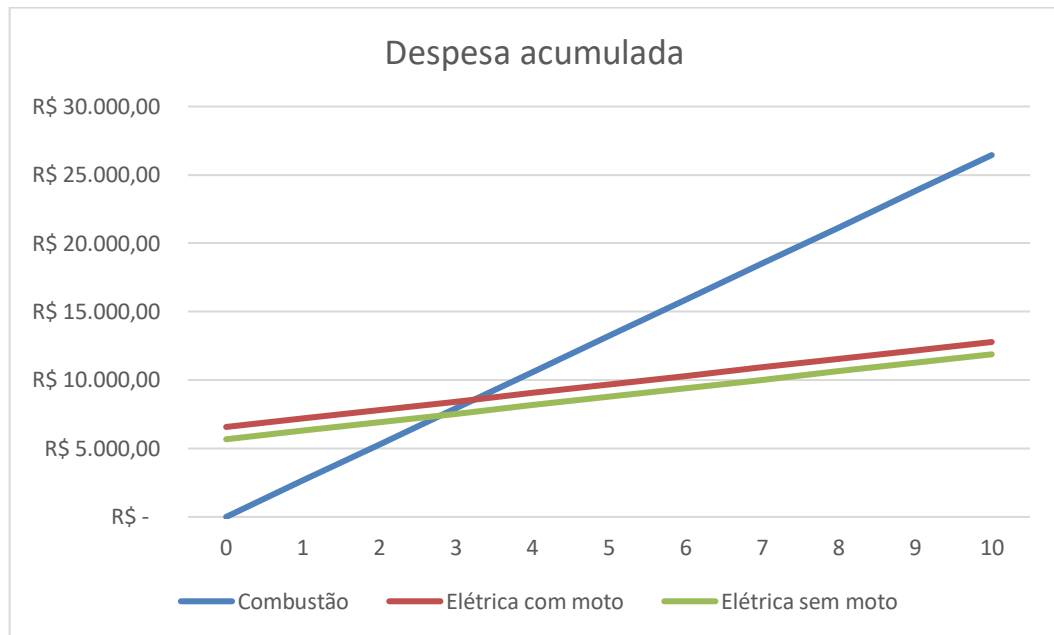
Fonte: Produção do próprio autor.

Nota: ¹ Custo de R\$0,78/kWh

² Reserva para troca das baterias que possuem vida útil de 500 ciclos, segundo o fabricante

A seguir, vê-se no Gráfico 1 a despesa acumulada na manutenção da motocicleta à combustão e na elétrica.

Gráfico 1 – Despesa acumulada na manutenção das motocicletas



Fonte: Produção do próprio autor.

Como pode-se verificar através do Gráfico 1, a partir do terceiro ano a motocicleta elétrica passa a ter uma despesa acumulada menor, ou seja, mesmo com o custo de conversão, compensa realizar a transformação da motocicleta, caso o proprietário tenha a pretensão de mantê-la por pelo menos 3 anos.

Não foi computada a isenção de IPVA para os veículos elétricos no cálculo de viabilidade econômica, pois esse benefício deve ter fim ao longo dos próximos anos, já que é um incentivo fiscal temporário. Ademais, a legislação não é clara quanto à validade desse desconto para os veículos convertidos.

Após realizada a conversão é necessário seguir para a parte burocrática, ou seja, como houve alteração na propulsão e das características originais da moto será preciso informar ao DETRAN para seguir com a atualização da documentação.

Para regularizar a situação do veículo deve ser preenchido o formulário disponível na página do DETRAN na internet e possuir a seguinte documentação:

- Chassi do veículo;
- Placa;

- UF de origem;
- Município de emplacamento atual;
- Nome, CPF e endereço do proprietário;
- Recibo, DUT ou nota fiscal do veículo.

Uma parte do formulário de pedido de regularização pode ser visto na Figura 29.

Figura 30 – Formulário DETRAN

Detran Digital - Governo do Estado do Espírito Santo
Secretaria de Estado da Segurança Pública e Defesa Social

Como Proceder

- 1 - Preencher este Formulário Eletrônico e imprimi-lo através do botão **Imprimir Formulário**, existente no final do formulário.
- 2 - Assinar o requerimento com o mesmo padrão de assinatura do documento de identificação pessoal.
- 3 - Digitalizar (escanear) o requerimento junto com os demais documentos do processo e anexá-los ao formulário. **Clique aqui** para visualizar os documentos necessários para a realização do procedimento.

Atenção: Evite o indeferimento do processo. A qualidade do documento deve ser no mínimo de 300 DPI, de forma que permita a visualização de todas as informações. **Tamanho máximo do arquivo: 30MB.**

Processos com anexos que não estejam no formato PDF e perfeitamente legíveis serão indeferidos.

- 4 - Após clicar em **Enviar Processo**, o processo será enviado ao **Detran-ES** e a janela será automaticamente fechada.
- 5 - Um **e-mail** será enviado para o endereço informado, confirmando o recebimento do processo pelo **Detran-ES**.

Dados do Processo

Serviço Solicitado *

CIRETRAN *

Outros Serviços

<input type="checkbox"/> Alteração de tipo de aluguel*	<input type="checkbox"/> Mudança de característica
<input type="checkbox"/> Alteração de tipo oficial*	<input type="checkbox"/> Mudança de categoria
<input type="checkbox"/> Conversão placa Mercosul a pedido*	<input type="checkbox"/> Mudança de município da placa
<input type="checkbox"/> Emissão de segunda via de CRV	<input type="checkbox"/> Regravação de chassi
<input type="checkbox"/> Gravação de motor	<input type="checkbox"/> Substituição de motor
<input type="checkbox"/> Inclusão/substituição de 2ª placa traseira*	<input type="checkbox"/> Substituição de placa*
<input type="checkbox"/> Inclusão de gravame	<input type="checkbox"/> Baixa de gravame

Veículo

Chassi *

UF de Origem *

Fonte: DETRAN ES (2022).

Por fim, os resultados obtidos ficaram em linha com as motocicletas elétricas disponíveis no mercado com motor de 3kW, entretanto melhorias poderão ser realizadas, como poderá ser visto no item 5.2.

5 CONCLUSÃO

Durante o projeto foram estudados todos os componentes e encontrados os que ofereciam a melhor relação desempenho/custo para obter uma motocicleta elétrica com o menor custo possível. O mercado de veículos elétricos evoluiu e estão disponíveis diversas alternativas de motores, baterias, inversores e controladores que podem levar ao mesmo resultado. A escolha deve ser feita de acordo com o projeto e o orçamento disponível. Pelas pesquisas realizadas verificou-se que os motores DC *brushless* possuem menor custo quando comparados com outros modelos, bem como as baterias de chumbo-ácido apresentam valor inferior às de lítio.

A conversão de uma motocicleta com motor à combustão em elétrica foi realizada e todos os passos podem ser vistos ao longo dos tópicos anteriores. É importante ressaltar que cada motocicleta possui um chassi desenhado especificamente para receber os componentes mecânicos que tracionam uma moto à combustão e cada caso deve ser visto de forma única e é preciso verificar o que deve ser retirado ou não e onde devem ser colocados cada um dos novos equipamentos que farão parte do veículo convertido. O ideal é que não haja mudanças drásticas no *design* para que não fragilize a estrutura da moto e altere a forma de pilotar.

Apesar da retirada de várias partes mecânicas, a inclusão das baterias de chumbo-ácido fez com que a moto ficasse um pouco mais pesada que o modelo original. Esse fato não impactou a dirigibilidade porque o peso ficou distribuído de forma parecida em relação a moto à combustão interna. Além disso, quando em movimento, o piloto não sente esse aumento de peso, afinal são cerca de 12 kg a mais. Por outro lado, o desempenho da moto convertida em relação à original pode ter sido impactado porque houve a troca de um motor com mais potência, por um com menos e colocado numa moto mais pesada. Mesmo assim, as premissas iniciais de projeto foram atingidas.

Por fim, o mercado de conversão de veículos à combustão em elétricos pode ser bastante promissor. Os veículos elétricos possuem um custo bem mais elevado quando comparados aos de combustão interna. Uma moto elétrica nova com potência e autônias semelhantes não são encontradas por menos de R\$15.000. Além disso, quando em bom estado, as partes mecânicas podem ser direcionadas para centros de reciclagem, o que diminuiria o custo de conversão para

o proprietário da motocicleta e evitaria a necessidade de construção de novos equipamentos e utilização de mais matérias primas.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Devido ao tempo disponível alguns itens tiveram que ser deixados de lado para que a conversão pudesse ser realizada.

Dentre os itens cortados no momento inicial estão a inclusão de capacitores para auxiliar a partida do motor. Visto que no trânsito há a necessidade de acionamento recorrente do motor seria importante incluir um banco de capacitores com o propósito de auxiliar a bateria quando houver picos de tensão muito comum na partida e com alta carga no eixo do motor.

Também seria interessante realizar um estudo sobre o superaquecimento do motor para que não houvesse acionamento do sistema de proteção do controlador. Uma possibilidade seria incluir uma caixa de redução de forma a diminuir a carga no motor ou mesmo um sistema de resfriamento mais adequado.

As baterias poderiam ser trocadas por baterias de lítio de modo que houvesse uma redução de peso e ganho de desempenho.

Este trabalho ficará disponível para que outras pessoas possam utilizá-lo como base afim de obter a conversão de motocicletas à combustão em elétricas, portanto outras possibilidades poderão ser encontradas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, A. **Microrrede Autônoma Móvel Caracterizada Por Um Painel Solar Fotovoltaico Integrado a um Triciclo Elétrico**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14206: **Acumulador chumbo-ácido estacionário regulado por válvula** — Terminologia. Rio de Janeiro. 2014.

CNN BRASIL. **Carros elétricos já são dois terços do mercado na Noruega, liderados por Tesla**. Disponível em <https://www.cnnbrasil.com.br/business/carros-eletricos-ja-sao-dois-tercos-do-mercado-na-noruega-liderados-por-tesla/>. Acesso em: 26 jan. 2022.

BÄUML T. Modelling, simulation and validation of an electrical zero emission off-road motorcycle. In: 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2010, Lille. **Anais [...]**. Lille: IEEE, 2010. p. 1-5.

CHAN C. C.; CHAU K. T. An overview of power electronics in electric vehicles. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 44, n. 1, p. 3-13, fev. 1997.

CHANG S. C.; PA P. S. Model Analysis and Performance Assessment of Electrical Motorcycles. In: 2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2009, Zhangjiajie, Hunan. **Anais [...]**. Los Alamitos: IEEE, 2009. v. 3, p. 644-647.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIOS. **A frota de veículos nos municípios em 2018**. Disponível em: <https://is.gd/2xedKG>. Acesso em: 26 jan. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PESQUISA E ESTATÍSTICA. **Frota de veículos – 2020**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/22/28120>. Acesso em: 25 jan. 2022.

ELECTROPAEDIA. **Electric drives – brushless DC / AC and reluctance motors: description and applications**. Disponível em: <https://is.gd/PAuMTC>. Acesso em: 11 mai. 2019.

EV PROPULSION. **Some basic EV calculations**. Disponível em: <https://is.gd/xX3Cuw>. Acesso em: 11 mai. 2019.

FREEDOM. **Manual técnico de bateria estacionária**. Disponível em: <https://is.gd/5SfCNQ>. Acesso em: 05 mai. 2019.

HANIFAH R. A.; TOHA S. F.; HANIF N. H. H. M.; KAMISAN N. A. Electric Motorcycle Modeling for Speed Tracking and Range Travelled Estimation. **IEEE Access**, vol. 7, p. 26821-26829, 2019.

JUNG-SHAN L.; LI-CHEN F. Model analysis and controller design of electric motorcycles. In: Proceedings of the 1999 American Control Conference (Cat. No. 99CH36251). 1999, San Diego. **Anais [...]**. San Diego: IEEE, 1999. v. 4, p. 2698-2702.

MELCONIAN, S. **Elementos de máquinas**. 9. ed. São Paulo: Érica. 2009.

NILSON J. W.; RIEDEL S. A. **Circuitos elétricos**. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall. 2009.

SADIKU, M. N. O. **Elementos de eletromagnetismo**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman. 2012.

SEN, P. C. **Principles of electric machines and power electronics**. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons. 2013.

STIPPICH A. et al. Key components of modular propulsion systems for next generation electric vehicles. **CPSS Transactions on Power Electronics and Applications**, v. 2, n. 4, p. 249-258, dez. 2017.

SUN Y.; JOU H.; WU J. Multilevel Peukert equations based residual capacity estimation method for lead-acid battery. In: 2008 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies. 2008, Singapore. **Anais [...]**. Singapore: IEEE, 2008. p. 101-105.

TORRES, O. I. G. **Manual de conversión de motocicleta de gasolina a eléctrica**. Disponível em: <https://is.gd/zrOPOH>. Acesso em: 27 abr. 2019.

UMANS, S. D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH. 2014.

UNIPOWER. **Saiba o que é bateria estacionária**. Disponível em: <https://is.gd/Gu5PWy>. Acesso em: 05 mai. 2019.

UTOMO A. R.; HUSNAYAIN F.; PRIAMBODO P. S. Analysis of Lead Acid battery operation based on Peukert formula. In: 2014 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICEECS). 2014, Kuta. **Anais [...]**. Denpasar: IEEE, 2014. p. 345-348.

DETRAN. **Detran Digital - Governo do Estado do Espírito Santo**. Disponível em: <https://conteudo.detran.es.gov.br/AppNet02/UnityForm.aspx?key=UFKey>. Acesso em: 28 fev. 2022.