

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

JÚLIA PAZIAN FIGUEIROA

COMPARAÇÃO EXPERIMENTAL ENTRE MOTORES BLDC PARA APLICAÇÃO EM
TRAÇÃO ELÉTRICA DE VEÍCULOS DE COMPETIÇÃO EM EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA.

Joinville
2021

JÚLIA PAZIAN FIGUEIROA

COMPARAÇÃO EXPERIMENTAL ENTRE MOTORES BLDC PARA APLICAÇÃO EM
TRAÇÃO ELÉTRICA DE VEÍCULOS DE COMPETIÇÃO EM EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA.

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial
para obtenção do título de Engenheira
Automotiva no Curso de Engenharia
Automotiva da Universidade Federal de
Santa Catarina, Campus de Joinville.

Orientador(a): Prof. Dr. Diego Santos Greff

Joinville
2021

JÚLIA PAZIAN FIGUEIROA

COMPARAÇÃO EXPERIMENTAL ENTRE MOTORES BLDC PARA APLICAÇÃO EM
TRAÇÃO ELÉTRICA DE VEÍCULOS DE COMPETIÇÃO EM EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA.

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 30 de Abril de 2021.

Banca Examinadora:

Orientador(a): Prof. Dr. Diego Santos Greff
Orientador(a)
Presidente

Sérgio Junichi Idehara
Membro(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Aline Durrer Patelli Juliani
Membro(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a Diogo Paccagnella Belentani (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meu pais, Nelson Domingues Figueiroa e Andréa Pazian Figueiroa, por todo apoio, incentivo, confiança, amor e por nunca medirem esforços para permitir que eu chegasse onde eu quisesse. E a minha irmã, Ana Clara Pazian Figueiroa, por sempre me completar e me inspirar.

Ao meu orientador, Diego Greff, por disponibilizar seu tempo e meios para me direcionar na execução deste trabalho. À Universidade Federal de Santa Catarina e todos seus colaboradores. Em especial aos professores do curso de Engenharia Automotiva, Sérgio Junichi Idehara e Thiago Antonio Fiorentin, que sempre estiveram dispostos a me orientar, auxiliar e compartilhar ensinamentos, tanto conhecimentos técnicos quanto experiências de vida, durante a graduação.

Ao Laboratório de Metrologia e Qualidade Industrial (METeQ), a professora Sueli Fischer Beckert e o aluno Flávio Bruni, por conceder materiais utilizados nesse trabalho.

À Equipe de Eficiência Energética - Eficem, por ceder os instrumentos imprescindíveis para o desenvolvimento do trabalho. Em especial a integrante Julia Christ, por todo o tempo e paciência disponibilizados para a troca de conhecimentos que possibilitaram a realização deste trabalho.

Agradeço a cada um dos amigos que entraram na minha vida durante os anos de faculdade, passando pelos bons e ótimos momentos juntos, e também me apoiando e ajudando a superar os momentos de crise. Especialmente a Anna Beatriz Ribeiro, Bruno Assis, Bruno Mamoru, Bruno Serpa, Daniel Rotter, Gabriel Borges Marthendal, Jorge Oliveira, Laura Carolina, e Renato Finoteli, que estiveram tão presentes. Agradeço a Júlia Abreu por ter sido família desde o começo. E agradeço a Mateus Barcelos, pela nossa conexão e sintonia incríveis.

RESUMO

Com o aumento das preocupações a respeito das questões ambientais e a busca por reduzir as emissões de poluentes, os olhares mundiais se voltaram para as fontes renováveis de energia e melhorias de eficiência energética, trazendo os veículos elétricos de volta ao mercado. Dentre os possíveis tipos de motores elétricos aplicados para a tração veicular, o motor síncrono com ímãs permanentes é uma das opções mais utilizadas atualmente, apresentando alta densidade de potência, elevada eficiência e boa dissipação de calor ao exterior como principais vantagens. Neste trabalho, é realizada uma comparação entre dois motores de ímãs permanentes aplicados em um veículo de competição de eficiência energética, buscando encontrar as melhores aplicações, desempenho e rendimento de cada motor. Para isso montou-se uma bancada de testes para medição parâmetros como tensão, corrente e velocidade. Dentre os resultados obtidos tem-se as curvas de torque, potência e eficiência por velocidade, de acordo com a carga aplicada, para cada motor, permitindo uma análise comparativa entre eles. Dentre os principais resultados, tem-se que o motor OutRider foi capaz de atingir maiores níveis de torque que o motor MXUS quando operados em uma tensão de 36V.

Palavras-chave: Veículos elétricos. Motor síncrono com ímãs permanentes. Eficiência energética.

ABSTRACT

With the rising concerns about environmental issues and the quest to reduce green house gas emissions, the world has turned its attention to renewable energy sources and energy efficiency improvements, bringing electric vehicles back to the market. Among the possible types of electric motors for vehicles traction, the permanent magnet synchronous motor is one of the most applied option, due to his high power density, high efficiency and good heat dissipation as main advantages. In this work, a comparison is made between two permagent magnet DC motors, that are applied to energy-efficient competition cars, seeking to find the best applications, performance and efficiency of each engine. To do so, a test bench was set up for parameters such as voltage, current and speed. Among the results obtained we have the torque, power and efficiency curves per speed, according to the applied load, for each motor, allowing a comparative analysis between them. Among the main results, the OutRider motor was able to reach higher levels of torque than the MXUS motor when operated at a voltage of 36V.

Keywords: Electric vehicles. Permanent magnet synchronous motor. Energy efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mercado dos VEHs nos Estados Unidos.	17
Figura 2 – Mercado dos VEs nos Estados Unidos.	17
Figura 3 – Oscilações no preço do petróleo de 1970 a 2008.	18
Figura 4 – Oscilações no preço do petróleo de 2008 a 2020.	19
Figura 5 – Eficiência dos automóveis.	20
Figura 6 – Configuração de um veículo elétrico <i>plug-in</i>	21
Figura 7 – Possíveis configurações em um veículo elétrico.	22
Figura 8 – Curvas ideais de torque e potência.	23
Figura 9 – Princípio de funcionamento de um motor de corrente contínua.	24
Figura 10 – Aspectos Construtivos Motor BLDC.	25
Figura 11 – Possíveis arranjos dos ímãs no rotor do BLDC.	26
Figura 12 – Chaveamento sequencial das bobinas do estator.	27
Figura 13 – Diagrama de blocos do acionamento do motor BLDC.	27
Figura 14 – Ponte inversora trifásica.	28
Figura 15 – Sinais de comando para o motor BLDC.	28
Figura 16 – Freio de Prony.	29
Figura 17 – Motor 1.	30
Figura 18 – Motor 2.	31
Figura 19 – Funcionamento do potenciômetro.	32
Figura 20 – Sensor de velocidade.	33
Figura 21 – Motor com disco acoplado para medição da velocidade.	33
Figura 22 – Contagem de voltas utilizando sensor e disco.	34
Figura 23 – Sistema para aplicação da carga.	35
Figura 24 – Representação braço de alavanca.	36
Figura 25 – Pesos padrões utilizados para a simulação da carga.	36
Figura 26 – Sapata de freio utilizada como elemento de atrito.	37
Figura 27 – Diagrama de corpo livre rolete.	38
Figura 28 – Representação das velocidades no pneu e no rolete.	39
Figura 29 – Medição de velocidade do rolete.	40
Figura 30 – Suporte, motor 2 e alavanca de frenagem montados em conjunto.	41
Figura 31 – Componentes de alimentação e medição de tensão e corrente.	42
Figura 32 – Valores obtidos de potência elétrica de entrada para os motores a vazio.	48
Figura 33 – Torque no eixo.	50
Figura 34 – Potência mecânica.	50

Figura 35 – Potência elétrica de entrada e eficiência com 2 kgf.	52
Figura 36 – Potência elétrica de entrada e eficiência com 2 kgf desconsiderando medição na rotação de 250 RPM.	53
Figura 37 – Potência elétrica de entrada e eficiência com 3 kgf.	54
Figura 38 – Potência elétrica de entrada e eficiência com 4 kgf.	54
Figura 39 – Potência elétrica de entrada e eficiência com 5 kgf.	55
Figura 40 – Eficiência energética dos motores com 2 kgf e 3 kgf.	55
Figura 41 – Eficiência energética dos motores com 4 kgf e 5 kgf.	56
Figura 42 – Eficiência energética por velocidade em km/h.	57
Figura 43 – Torque máximo atingido.	57
Figura 44 – Repetibilidade dos testes.	59
Figura 45 – Arquitetura em série.	65
Figura 46 – Arquitetura em paralelo.	66
Figura 47 – Arquitetura em Série-Paralelo.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações dos motores testados.	30
Tabela 2 – Especificações do controlador.	31
Tabela 3 – Verificação da relação entre as velocidades do motor MXUS e dos roletes.	44
Tabela 4 – Verificação da relação entre as velocidades do motor OutRider e dos roletes.	45
Tabela 5 – Potência elétrica de entrada nas condições A e B no motor MXUS. .	46
Tabela 6 – Potência elétrica de entrada nas condições A e B no motor OutRider.	46
Tabela 7 – Valores de carga extra obtidos.	47
Tabela 8 – Carga nos testes com o motor MXUS.	49
Tabela 9 – Carga nos testes com o motor OutRider.	49
Tabela 10 – Tensão e corrente teste em vazio motor MXUS.	68
Tabela 11 – Tensão e corrente teste carga 0 motor MXUS.	68
Tabela 12 – Tensão e corrente teste carga 2 kgf motor MXUS.	68
Tabela 13 – Tensão e corrente repetição teste carga 2 kgf motor MXUS.	69
Tabela 14 – Tensão e corrente teste carga 3 kgf motor MXUS.	69
Tabela 15 – Tensão e corrente teste carga 4 kgf motor MXUS.	69
Tabela 16 – Tensão e corrente teste carga 5 kgf motor MXUS.	69
Tabela 17 – Tensão e corrente teste em vazio motor OutRider.	70
Tabela 18 – Tensão e corrente teste carga 0 motor OutRider.	70
Tabela 19 – Tensão e corrente repetição teste carga 0 motor OutRider.	70
Tabela 20 – Tensão e corrente teste carga 2 kgf motor OutRider.	71
Tabela 21 – Tensão e corrente teste carga 3 kgf motor OutRider.	71
Tabela 22 – Tensão e corrente teste carga 4 kgf motor OutRider.	71
Tabela 23 – Tensão e corrente teste carga 5 kgf motor OutRider.	71

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivo	13
1.1.1	Objetivo Geral	13
1.1.2	Objetivos Específicos	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Histórico dos veículos elétricos	15
2.2	Tipos de veículos elétricos	18
2.2.1	Veículos elétricos puros	19
2.3	Motores elétricos para tração	21
2.3.1	Motor de Corrente Contínua	23
2.3.2	Motor de Indução	23
2.3.3	Motor de Relutância Chaveado	24
2.3.4	Motor Síncrono com Imãs Permanentes	25
2.3.4.1	Acionamento dos motores BLDC	26
2.4	Dinamômetros	28
3	METODOLOGIA	30
3.1	Motores	30
3.2	Alimentação e acionamento	31
3.3	Medição dos parâmetros	32
3.4	Sistema para aplicação da carga	34
3.5	Eficiência dos motores	40
3.6	Montagem da bancada	41
3.7	Condução dos testes	42
4	RESULTADOS	44
4.1	Verificação da ausência de escorregamento entre o pneu e os roletes	44
4.2	Estimativa da força imposta ao motor pela montagem do conjunto	45
4.3	Resultados obtidos nos testes	47
4.3.1	Testes em vazio	47
4.3.2	Torque no eixo e potência mecânica	48
4.3.3	Potência elétrica de entrada e eficiência energética	51
4.3.4	Torque máximo atingido	57
4.3.5	Repetibilidade dos testes	58
5	CONCLUSÕES	60

	REFERÊNCIAS	61
	APÊNDICE A	64
.1	Arquitetura em Série	64
.2	Arquitetura em Paralelo	65
.3	Arquitetura em Série-Paralelo	66
	APÊNDICE B	68
	APÊNDICE C	70
	ANEXO A	72

1 INTRODUÇÃO

Desde o fim do século XIX, os motores elétricos já eram utilizados para tração de automóveis, e eram inclusive considerados tecnologicamente superiores aos carros movidos a combustão e a vapor (BARAN, 2012). Entretanto, devido à baixa autonomia das baterias, falta de infraestrutura da rede elétrica e queda no preço da gasolina e dos veículos movidos a esse combustível, os veículos elétricos entraram em declínio, enquanto os a combustão se tornaram dominantes no mercado.

Atualmente, o setor de transporte é responsável por 61,3% do consumo de petróleo (CASTRO; FERREIRA, 2010) e 28% do consumo final de energia no mundo (ROITMAN, 2018). Ao mesmo tempo, as crescentes preocupações com o meio ambiente fizeram com que os olhares globais se voltassem para a busca de fontes de energia renováveis e melhorias na eficiência energética, impulsionando novamente o desenvolvimento dos veículos elétricos (VEs) e dos veículos elétricos híbridos (VEHs).

Acerca das preocupações com o meio ambiente, em 1997, foi criado o Protocolo de Kyoto, que definiu metas de redução de emissões para os países desenvolvidos, e entrou em vigor no dia 16 de fevereiro de 2005. De 2008 a 2012, 37 países industrializados e a Comunidade Europeia se comprometeram a reduzir em média 5% das emissões dos gases de efeito estufa em relação aos níveis de 1990. Em um segundo período de compromisso, de 2013 a 2020, os países se comprometeram a uma redução de pelos 18% abaixo dos níveis de 1990 (BRASIL, 20-a). O Acordo de Paris, que irá substituir o Protocolo de Kyoto a partir de 2020, foi aprovado em dezembro de 2015 e entrou em vigor no dia 4 de novembro de 2016, e o principal objetivo é limitar o aumento médio da temperatura global a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais. Até junho de 2017, o Acordo de Paris foi assinado por 195 países, entre eles o Brasil, que se comprometeu a reduzir as emissões dos gases de efeito estufa, em 37% abaixo dos níveis de 2005, até 2025 (BRASIL, 20-b).

Segundo Mayer, Péres e Oliveira (2015), motores de corrente contínua, de indução, síncronos com ímãs permanente e de relutância variável podem ser empregados para a tração de VEs e VEHs, sendo que os de ímãs permanentes é os mais empregados atualmente. Os motores síncronos com ímãs permanentes na superfície (*Brushless Direct Current* - BLDC) também podem ser aplicados em sistemas de refrigeração, periféricos de computador, máquinas industriais, servo motores cadeiras de rodas, carrinhos de golfe, entre outros (JULIANI, 2007 apud DREHER; ZAVASKI, 2013). Dreher e Zavaski (2013) destacam o elevado rendimento, reduzida manutenção, variedade de configurações de potência e torque e dispensa de comutador mecânico como principais vantagens dos BLDC. Sánchez (2012) aponta a

alta densidade de potência, elevada eficiência e alta eficiência de dissipação de calor ao exterior como razões para a utilização desses motores na tração dos automóveis.

O desenvolvimento e pesquisa na área de eficiência energética e renováveis acontece não somente nas grandes multinacionais, mas também nas universidades ao redor do mundo, impulsionados por competições de eficiência energética. Nessa vertente, a Shell Eco-Marathon promove competições de carros ultra eficientes fomentando o desenvolvimento em eficiência energética (SHELL BRASIL, 2020).

Iniciada em 1939, hoje a competição acontece nas Américas, na Ásia e na Europa, e, no Brasil, possui disputas em etanol, bateria elétrica e gasolina.

Com pesquisa, tecnologia e muita inovação, a competição estimula que estes futuros engenheiros possam encontrar maneiras criativas de reduzir emissões de carbono, desenvolver maior eficiência energética e lidar com os múltiplos desafios do transporte nas cidades(SHELL BRASIL, 2020)

A equipe de eficiência que representa a Universidade Federal de Santa Catarina Campus Joinville na Shell Eco-Marathon é chamada de Eficem, que foi criada em 2012 com iniciativa dos alunos do curso de engenharia automotiva. A equipe possui dois motores BLDC disponíveis para aplicação no protótipo elétrico. Um deles possui faixa de potência de 180 a 250 W e o outro 250 a 350 W, entretanto não se tem informação a respeito do desempenho, rendimento, e melhores condições de aplicação de cada um.

Assim, o objetivo deste trabalho é, a partir da montagem de uma bancada de testes, encontrar os principais parâmetros de funcionamento de cada motor, como tensão, corrente e velocidade, para determinadas condições de carga e velocidade. A partir dos resultados obtidos, é possível comparar o desempenho e eficiência de cada motor em cada condição aplicada.

1.1 OBJETIVO

Buscando comparar dois motores BLDC para aplicação em um protótipo de eficiência energética propõe-se neste trabalho os seguintes objetivos.

1.1.1 Objetivo Geral

Testar em bancada dois motores BLDC utilizados pela equipe de eficiência energética Eficem, buscando adquirir as curvas de funcionamento, de torque e potência, ao longo de uma faixa de velocidades para determinados níveis de carga aplicada, que permitam a comparação entre as duas máquinas elétricas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Planejamento e construção da bancada de testes;
- Planejamento e preparação dos testes específicos dos motores em bancada;
- Obtenção de valores de: corrente e tensão elétricas na faixa de velocidade de operação dos motores para diferentes torques requeridos;
- Avaliação da potência elétrica de entrada, potência e torque no eixo, e eficiência energética dos motores;
- Comparação entre os resultados obtidos nos testes de cada um dos motores.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é realizada uma revisão teórica, sobre os veículos elétricos e os principais motores utilizados na tração elétrica. É apresentada uma contextualização histórica a cerca dos veículos elétricos, os principais tipos de motores e acumuladores de energia, contendo as principais informações e conceitos sobre cada tópico.

2.1 HISTÓRICO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS

Os veículos elétricos (VEs) surgiram no fim do século XIX, e foram considerados tecnologicamente superiores em relação aos carros a combustão e a vapor, pois utilizavam componentes similares aos dos bondes elétricos, que eram o meio de transporte público principal nas cidades até então. Os primeiros veículos elétricos híbridos (VEHs) surgiram no início do século XX, e buscavam compensar a baixa eficiência das baterias e a infraestrutura precária da rede elétrica existente (BARAN, 2012). Apesar de na época as estradas não possuírem infraestrutura elétrica nem de postos de gasolina, a rede de distribuição de combustível para motores de combustão interna (MCI) logo se expandiu, pois o combustível era facilmente distribuído em pequenos galões.

Com a crescente necessidade de percorrer distâncias mais longas e a baixa autonomia dos veículos elétricos, a queda no preço da gasolina e a queda de preço dos automóveis a gasolina devido ao sistema de produção em série desenvolvido por Henry Ford, os veículos elétricos entraram em declínio, de modo que após 1920 os veículos movidos a motores MCI já eram predominantes (BARAN, 2012).

Ainda segundo Baran (2012), nos anos 60 os veículos elétricos voltaram a atrair atenção das montadoras devido ao crescimento da preocupação ambiental. Com a crise de petróleo em 1973, as pesquisas e produção de veículos elétricos foram retomadas mundialmente, devido ao aumento excessivo no preço desse combustível, que deixou claro a fragilidade das economias que eram dependentes da importação do petróleo, conforme Rodrigues (2017).

A partir de então, alguns países desenvolvidos iniciaram a formulação e desenvolvimento de ações e iniciativas a favor da produção e comercialização de automóveis movidos a tração elétrica (RODRIGUES, 2017). Na década de 70, o Japão concedeu financiamento públicos à pesquisa e desenvolvimento de novos modelos e programas de demonstração de protótipos, e também formulou políticas que se transformaram em quotas de mercado para os veículos elétricos que seriam comercializados. Entretanto, o objetivo de difundir veículos elétricos a bateria no mercado não foi alcançado como desejado (RODRIGUES, 2017). Na mesma época,

um grupo de empresas francesas, com apoio financeiro do estado, buscou avaliar as necessidades de potenciais usuários e estudar a lacuna entre o desempenho esperado e possibilidades técnicas do mercado de veículos elétricos, contudo se concluiu que não era possível, com as baterias desenvolvidas até então, atender às demandas identificadas (BARAN, 2012).

Nos Estados Unidos foram várias as tentativas de reinserir os automóveis movidos a motores elétricos. Em 1976, um programa com verba de US\$ 150 milhões foi autorizado para desenvolver veículos elétricos e híbridos; na década de 90, o estado da Califórnia definiu cota de vendas para veículos com emissão zero, e medidas similares foram adotadas em seguida pelos estados de Nova York e Massachusetts; em 1993, por meio de uma iniciativa do governo Clinton, cerca de um bilhão de dólares foi investido no desenvolvimento de três protótipos híbridos. Apesar dos esforços, os programas não cumpriram seus objetivos, e os veículos elétricos e híbridos não chegaram às linhas de produção (BARAN, 2012).

O Toyota Prius foi lançado e bem aceito no mercado japonês em 1997. O mercado americano recebeu o primeiro híbrido em 1999, o modelo Insight lançado pela Honda, em seguida o Prius chegou a esse mercado em 2000, e ambos modelos foram bem sucedidos. Uma versão híbrida do Civic foi lançada pela Honda em 2003, e em 2004 a Ford lançou o utilitário esportivo híbrido Scape (BARAN, 2012).

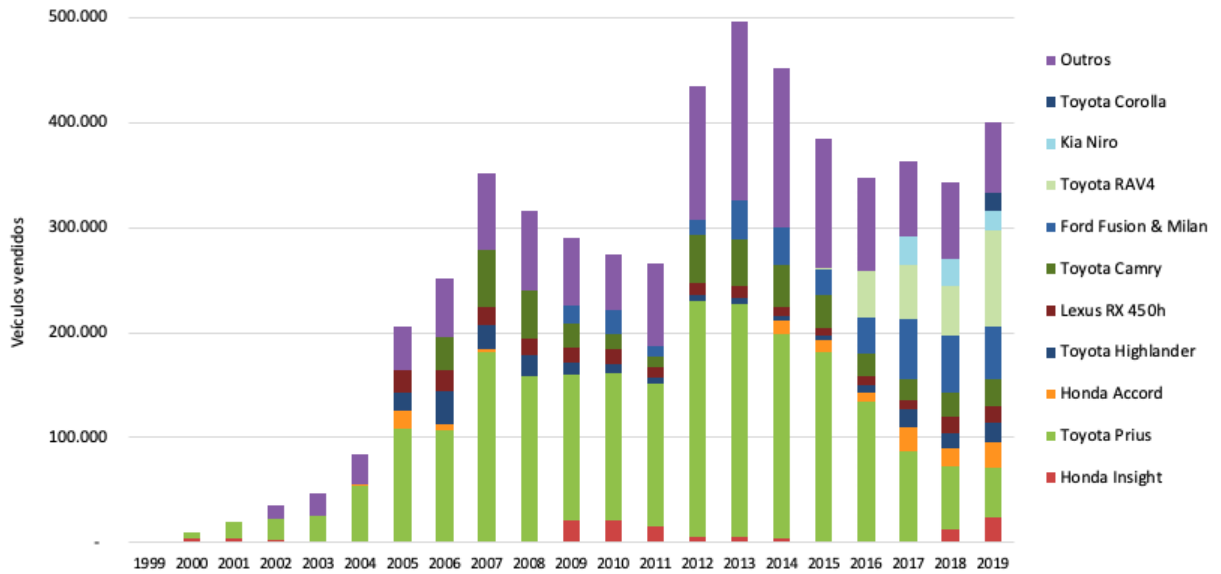
Buscando reduzir a dependência em relação ao petróleo e ampliar a produção de combustíveis limpos, o governo dos Estados Unidos destinou US\$ 95 milhões por ano, entre 2008 e 2013, à pesquisa e desenvolvimento de um sistema de transporte elétrico, à capacitação de capital humano na tecnologia de veículos elétricos e híbridos *plug in* e até US\$ 25 bilhões aos fabricantes que produzissem híbridos até 2020 através do *Energy Independence and Security Act* de 2007. Em 2009, institui-se pela promulgação do *American Clean Energy and Security Act* que as montadoras que se dedicassem ao desenvolvimento de híbridos e seus fornecedores de autopeças poderiam obter assistência financeira de até 50 bilhões de dólares até 2020 (BARAN, 2012).

As políticas de incentivo resultaram no aumento das vendas dos veículos híbridos, conforme representado na Figura 1, que mostra a evolução do número de veículos híbridos vendidos por ano nos Estados Unidos a partir de 1999. Em relação aos veículos elétricos puros, a Figura 2 mostra o crescimento do mercado estadunidense a partir de 2011. A Figura 2 evidencia também o sucesso do Tesla Model 3, responsável por mais de metade das vendas totais de veículos elétricos em 2018 e 2020 e, segundo Nery (2020), tornou-se o veículo elétrico mais vendido a nível global.

Nos dias atuais, Castro e Ferreira (2010) destacam três principais fatores para o crescimento do interesse nos veículos elétricos:

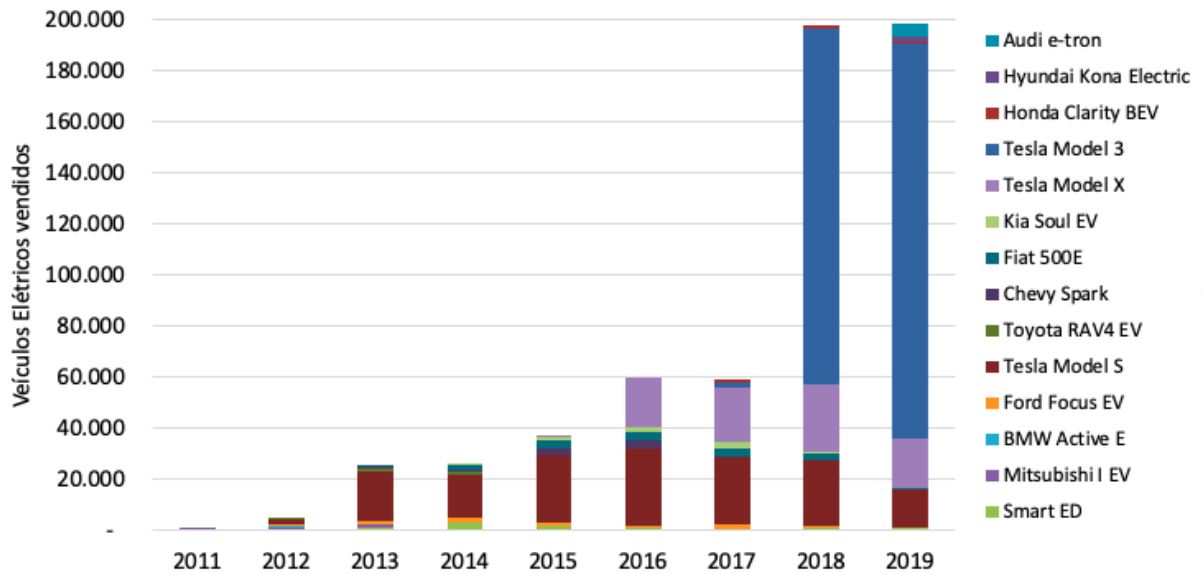
- Desenvolvimento tecnológico: a ampliação da densidade energética das baterias

Figura 1 – Mercado dos VEHS nos Estados Unidos.



Fonte: U.S. Department of Energy (2020a, online)

Figura 2 – Mercado dos VEs nos Estados Unidos.



Fonte: U.S. Department of Energy (2020b, online)

que permitiu aumentar a autonomia do veículo;

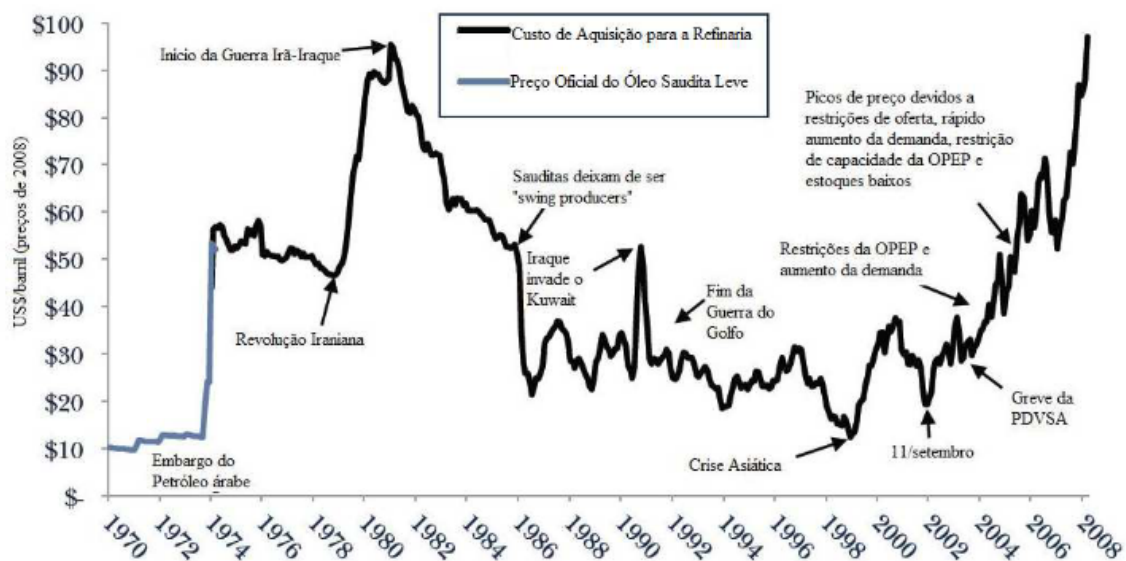
- Meio ambiente: nos Estados Unidos, 77% das emissões de monóxido de carbono, 56% das emissões de óxidos de nitrogênio, 47% das emissões de hidrocarbonetos e 28% das emissões de material particulado são causados por veículos convencionais ((PEREIRA, 2007 apud SÁNCHEZ, 2012)). No caso dos VEs e dos VEHS, Sánchez (2012) aponta que a vantagem mais evidente é que as

emissões atmosféricas dependerão da fonte de produção de energia, podendo ser maiores ou menores conforme o país ou região. Segundo Baran (2012), em torno de 90% da energia elétrica é gerada a partir de fontes renováveis no Brasil.

- Energia: o setor de transporte é responsável por cerca 61,3% do consumo de petróleo, entretanto a alta volatilidade do preço deste combustível torna a economia dos países importadores vulneráveis. Desse modo, o uso de motores elétricos nos automóveis permite rebalanceamento da matriz energética devido à multiplicidade de fontes geradoras de energia elétrica (CASTRO; FERREIRA, 2010).

As Figuras 3 e 4 permitem a visualização das variações do preço do barril de petróleo de 1970 a 2008, e de 2008 a 2020, respectivamente, sendo possível perceber o quão inconstante e suscetível a variações de acordo com o cenário mundial é este valor.

Figura 3 – Oscilações no preço do petróleo de 1970 a 2008.



Fonte: Baran (2012, p. 1)

2.2 TIPOS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

Nesta seção, são apresentados os veículos elétricos puros e suas tecnologias. Como os veículos híbridos não estão incluídos no escopo deste trabalho, mas são relevantes na inserção dos veículos elétricos no mercado, são apresentados no Apêndice A deste trabalho.

Figura 4 – Oscilações no preço do petróleo de 2008 a 2020.



Fonte: MacroTrends (2020, online)

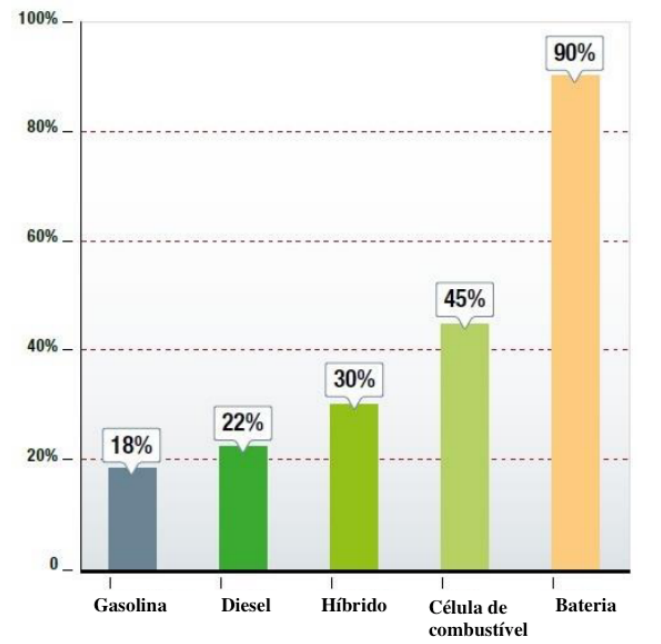
2.2.1 Veículos elétricos puros

Os veículos elétricos puros, ou apenas veículos elétricos, são movidos integralmente por energia elétrica, utilizando um ou mais motores elétricos para tracionar o automóvel, que é alimentado por uma fonte acumuladora, normalmente baterias eletroquímicas combinadas com supercapacitores. Por não possuírem motor a combustão interna, as emissões de poluentes dos VEs são nulas (MAYER; PÉRES; OLIVEIRA, 2015).

Tanaka (2013) destaca as seguintes vantagens dos veículos elétricos sobre os movidos a combustão interna, como: maior eficiência energética; mais silenciosos; simplicidade e facilidade de manutenção; capacidade de desenvolver alto torque em baixa rotação e menos fadiga ao motorista devido à menor vibração do motor. Tanaka (2013) também lista algumas desvantagens tais quais: menor autonomia; preço elevado; substituição das baterias ao final do ciclo de vida e tempo de abastecimento.

Nos veículos elétricos puros, não há perdas por exaustão de gases, que representam 40% da perda de energia dos MCI, e além disso, a maior parte das ligações mecânicas que existiriam em um motor a combustão interna é substituída por ligações elétricas, diminuindo a perda de energia por atrito e colaborando para sua eficiência (MAYER; PÉRES; OLIVEIRA, 2015; RODRIGUES, 2013). A Figura 5 traz uma comparação entre as eficiências dos veículos movidos a motor a combustão e a motor elétrico, que permite observar a superioridade das baterias em relação aos combustíveis nesse quesito.

Figura 5 – Eficiência dos automóveis.



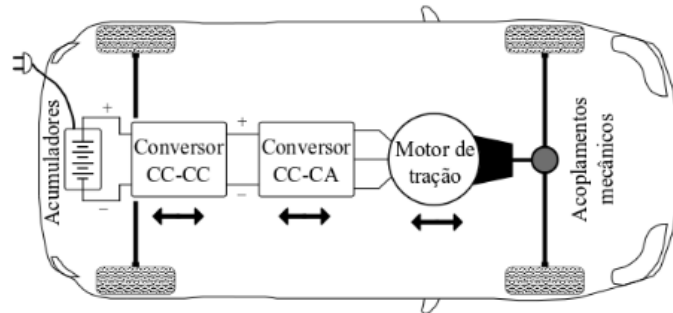
Fonte: Adaptado de Rodrigues (2013, p. 18)

Segundo Tanaka (2013), o sistema de tração dos VEs consiste em uma bateria para armazenamento de energia, um motor elétrico e um controlador/conversor de potência, sendo este último responsável por converter e adequar a energia da bateria às características do motor, controlando a potência fornecida. De modo bastante similar, Mayer, Péres e Oliveira (2015) classificam os veículos elétricos como automóveis *plug-in*, denominados *plug-in electric vehicles* (PEV), caracterizados pelo modo de carregamento das baterias, que é feito por meio de uma tomada externa conectada a rede elétrica. O conceito apresentado por Mayer, Péres e Oliveira (2015) é representado na Figura 6.

Os veículos elétricos podem ser configurados de variadas maneiras, de acordo com as características de tração elétrica e fontes de energia (RODRIGUES, 2017). A Figura 7 traz as configurações consideradas por Tanaka (2013) de maior interesse.

Na primeira alternativa (a), o motor elétrico simplesmente substitui o MCI de um veículo convencional, de modo que o sistema fica composto por um motor elétrico, uma embreagem, uma caixa de velocidades e um diferencial. Na configuração (b), a embreagem é eliminada e a caixa de velocidades substituída por uma caixa de redução, e utiliza-se um motor que opere a potência constante em uma grande faixa de velocidades. Na configuração (c), o sistema de tração é compactado e simplificado a partir da integração do motor, da caixa de redução e do diferencial em um único conjunto. Na configuração (d), a utilização de um motor em cada roda, operando em velocidades diferentes, permite a eliminação do diferencial. Na configuração (e), o motor é colocado

Figura 6 – Configuração de um veículo elétrico *plug-in*.



Fonte: Mayer, Péres e Oliveira (2015, p. 312)

dentro da roda (*in-wheel*) e utiliza-se um conjunto de engrenagens planetárias para aumentar o torque e reduzir a velocidade do motor. Na última configuração (f), o rotor externo de um motor elétrico *in-wheel* de baixa rotação é conectado diretamente a roda de tração, de modo que a transmissão mecânica entre motor e roda é eliminada (TANAKA, 2013).

2.3 MOTORES ELÉTRICOS PARA TRAÇÃO

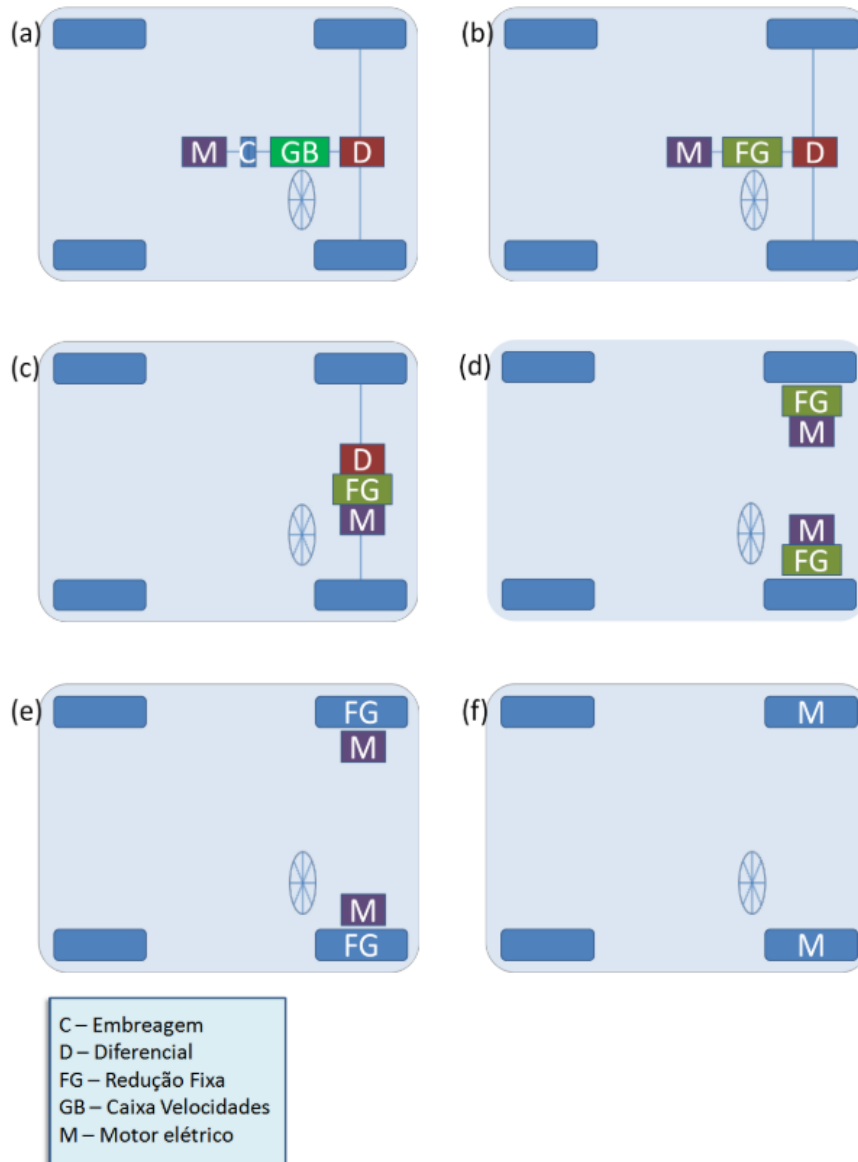
Os motores elétricos convertem energia elétrica em energia mecânica, podendo ser utilizados para propulsionar os veículos elétricos, e podem também realizar a função inversa, funcionando como um gerador durante frenagens, recuperando parte da energia e utilizando-a para recarregar as baterias (RODRIGUES, 2017; SÁNCHEZ, 2012).

Segundo Sánchez (2012), a escolha do tipo de sistema para tração elétrica irá depender de fatores tais quais a expectativa do motorista, as limitações do veículo e a fonte de energia. A expectativa do motorista é definida pelo perfil de condução, que inclui aceleração, velocidade máxima, subida em um plano inclinado, capacidade de frenagem e distância percorrida. Dentre as limitações, tem-se volume, peso e tipo de veículo.

Sánchez (2012) e Xu et al. (2009) apresentam os requisitos básicos que uma máquina elétrica devem cumprir em um sistema de tração para veículos elétricos:

- Alta densidade de torque e potência;
- Ampla faixa de velocidades com potência constante;
- Torque de partida elevado, ótima capacidade de subir planos inclinados e alta potência em velocidade de cruzeiro;
- Alta confiabilidade e robustez;
- Elevada eficiência em uma larga faixa de velocidades e torque;
- Capacidade de trabalhar com sobrecarga;

Figura 7 – Possíveis configurações em um veículo elétrico.



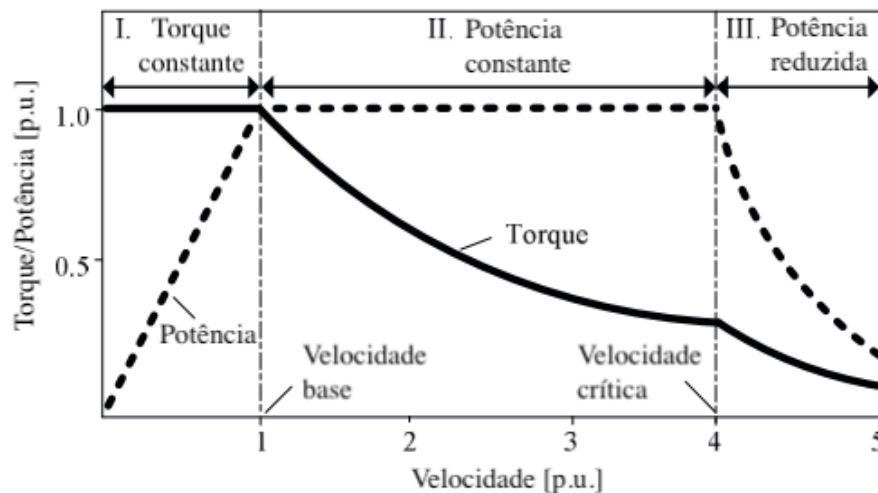
Fonte: Tanaka (2013, p. 45)

- Baixo nível de ruído acústico e oscilação de torque.

Xu et al. (2009) apresentam as curvas ideais de torque e potência por velocidade para um motor elétrico aplicado em tração de veículos elétricos, expostas na Figura 8. Na região I, de torque constante, o torque máximo é definido pela corrente nominal do conversor potência. Na região II, onde a potência é constante, o enfraquecimento de fluxo é empregado devido às limitações de tensão e corrente do conversor. Na região III, tem-se a redução do torque e da potência devido ao aumento da força eletromotriz (XU et al., 2009; TANAKA, 2013).

Corrêa et al. (2013) e Mayer, Péres e Oliveira (2015) apontam que as máquinas

Figura 8 – Curvas ideais de torque e potência.



Fonte: Adaptado de Xu et al. (2009, p. 167)

mais relevantes para aplicações em veículos elétricos ou híbridos são os motores de corrente contínua, os de indução, os de relutância magnética e os síncronos de ímãs permanentes.

2.3.1 Motor de Corrente Contínua

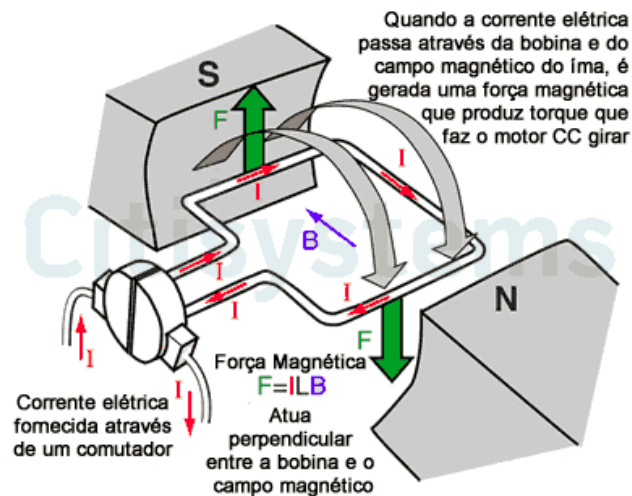
As características de torque-velocidade desse motor atendem bem aos requisitos de tração para veículos elétricos, possuindo alto torque com baixas velocidades, e facilidade de controle sobre a rotação, através da variação da tensão. Entretanto, a existência de escovas torna esse motor pesado, de alto custo de manutenção, e com baixa confiabilidade (RODRIGUES, 2017; SÁNCHEZ, 2012; XU et al., 2009).

A parte estática desses motores (estator), é constituída por um circuito magnético fixo (indutor), que pode ser formado por um ímã permanente ou enrolamentos. A parte dinâmica, chamada de armadura, é formada por um núcleo magnético de seção circular com ranhuras longitudinais. As escovas permitem o acesso ao rotor (parte móvel), que estará submetido ao campo magnético do estator, resultando em uma força mecânica que colocará a armadura em movimento, como indicado na Figura 9 (SÁNCHEZ, 2012).

2.3.2 Motor de Indução

Segundo Sánchez (2012), os motores de indução são os mais utilizados na indústria. São robustos, confiáveis, possuem construção simples, baixa manutenção e

Figura 9 – Princípio de funcionamento de um motor de corrente contínua.



Fonte: Silveira (2017, online)

baixo custo. A ausência de escovas permite aumento do limite máximo de velocidade e aumento no rendimento. A variação da velocidade desses motores pode ser controlada variando a frequência da tensão (SÁNCHEZ, 2012; RODRIGUES, 2017).

Xu et al. (2009) citam como principal desvantagem desse motor para aplicação em veículos elétricos, o fato de que a potência se mantém constante apenas até velocidades de 2 a 3 vezes a velocidade nominal, enquanto nos VEs seria ideal que essa faixa fosse de 4 a 5 vezes a velocidade nominal.

O princípio de funcionamento de um motor de indução trifásico consiste em um conjunto de espiras separadas em três fases, distribuídas de modo circular no estator. Cada fase do estator é alimentada por corrente alternada, defasadas entre si por 120° , de modo que surge um campo magnético girante, gerando uma variação de fluxo e induzindo uma corrente nas espiras do rotor. As correntes induzidas geram então um campo magnético oposto ao campo do estator, criando uma atração entre o rotor e o estator, de modo que a parte dinâmica do motor gira, o que se transforma em torque mecânico sobre o eixo do motor (SILVA et al., 2013).

2.3.3 Motor de Relutância Chaveado

De acordo com Sánchez (2012), essas máquinas possuem grande variedade disponível. A topologia típica de um motor de relutância chaveada tem o estator formado por enrolamentos de excitação, e o rotor não possui comutadores, escovas, ímã ou enrolamentos. Essa característica do rotor é possível pois o torque produzido por este irá se alinhar com a onda de fluxo produzida pelo estator, garantindo a maximização dos fluxos que surgem com a aplicação de corrente no estator. Além da baixa inércia do rotor, os motores de relutância variável possuem aceleração muito rápida, capacidade

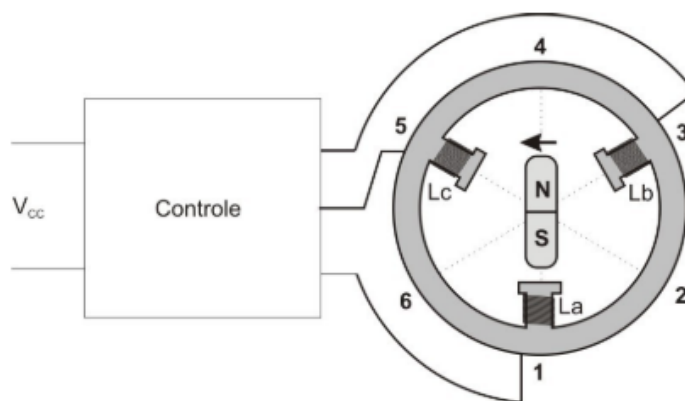
de operação em altas velocidades com potência constante e torque de partida elevado. Entre as desvantagens tem-se ondulações no torque e ruído acústico. Além disso, é necessário aplicar um controle de pulsos em função da posição do rotor, visto que o motor irá produzir torque na região onde existir variação de relutância (SÁNCHEZ, 2012; RODRIGUES, 2017).

2.3.4 Motor Síncrono com Ímãs Permanentes

Os motores síncronos com ímãs permanentes (BLDC) são frequentemente utilizados para tração de veículos por possuírem alta densidade de potência, elevada eficiência e boa dissipação de calor ao exterior (SÁNCHEZ, 2012).

Comumente são caracterizados por possuírem ímãs permanentes no rotor e estator bobinado, não possuem comutador mecânico, de modo que a comutação é realizada através de um circuito eletrônico, como representado na Figura 10. O ímã estabelece o campo magnético principal da máquina, e seu fluxo magnético reage com o fluxo magnético criado pela passagem de corrente no estator, resultando em um conjugado eletromecânico, que irá agir alinhando os dois campos. No instante do alinhamento, o circuito controlador inverte o sentido da corrente, mantendo a rotação (DREHER; ZAVASKI, 2013).

Figura 10 – Aspectos Construtivos Motor BLDC.



Fonte: Adaptado de Dreher e Zavaski (2013, p. 1)

Dentre as vantagens do uso de ímãs permanentes nos motores elétricos, Baratieri et al. (2011) cita o aumento na eficiência do motor, pois as perdas de excitação são reduzidas, o aumento da densidade de energia, redução de volume físico, melhor resposta dinâmica e simplificação de construção e manutenção em relação às máquinas com excitação eletromagnética. A forma, tamanho e composição dos ímãs podem variar de acordo com a distribuição de fluxo magnético adequado ao projeto. Um fator determinante para as características do ímã será a configuração do rotor.

A Figura 11 apresenta as possíveis configurações dos ímãs no rotor do motor.

No rotor com ímãs de superfície, a robustez mecânica do motor fica comprometida, não podendo operar em altas rotações, mas fornece alta densidade de fluxo magnético. O rotor com ímãs inseridos na superfície possui melhor robustez mecânica, mas aumenta-se também a variação da relutância. O rotor com ímãs internos apresenta a maior robustez mecânica entre as demais opções apresentadas, sendo aplicáveis em sistemas que necessitam de alta velocidade de rotação, entretanto essa construção é cara e complexa (BARATIERI et al., 2011).

Figura 11 – Possíveis arranjos dos ímãs no rotor do BLDC.



Fonte: Baratieri et al. (2011, p. 37)

Dreher e Zavaski (2013) afirmam que a maioria dos motores BLDC possuem três fases, sendo o estator formado por três bobinas.

Os motores síncronos com ímãs permanentes são alimentados com três fases defasadas em 120° , de modo que apenas duas fases são energizadas ao mesmo tempo. Como o enrolamento estatórico é distribuído uniformemente, será obtida uma força contra-eletromotriz (FCEM) trapezoidal, considerando a densidade de fluxo magnético constante (DREHER; ZAVASKI, 2013; BARATIERI et al., 2011).

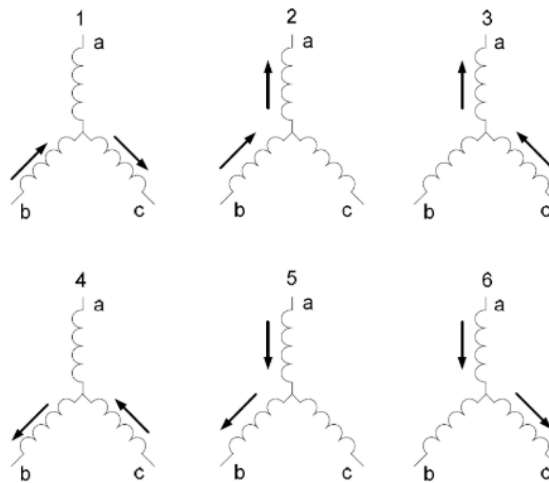
Em cada etapa de chaveamento, será aplicada corrente apenas em duas bobinas, uma com corrente positiva e a outra com corrente negativa, enquanto a terceira bobina permanecerá inativa. O controlador irá fornecer corrente às bobinas invertendo sua polaridade obedecendo uma ordem sequencial, que é determinada pelo posicionamento do rotor (BARATIERI et al., 2011; DREHER; ZAVASKI, 2013). Para o sistema apresentado na Figura 10, o chaveamento sequencial das bobinas seria realizado de acordo com a Figura 12.

Assim, a desvantagem dos motores BLDC é a necessidade de um circuito de acionamento sincronizado com a posição do rotor. Em alguns casos, o custo do sistema de acionamento é superior ao custo do próprio motor, entretanto, a flexibilidade no acionamento e controle do motor justifica seu uso (BARATIERI et al., 2011).

2.3.4.1 Acionamento dos motores BLDC

A Figura 13 traz a representação do diagrama de blocos do acionamento de um motor BLDC, que inclui: alimentação do sistema, retificador, inversor trifásico, sistema

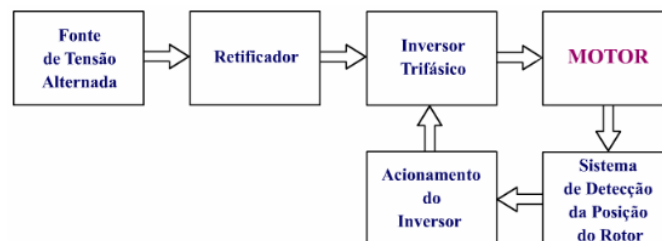
Figura 12 – Chaveamento sequencial das bobinas do estator.



Fonte: Adaptado de Dreher e Zavaski (2013, p.1)

de detecção da posição do rotor e controle do acionamento do inversor (JULIANI, 2007).

Figura 13 – Diagrama de blocos do acionamento do motor BLDC.

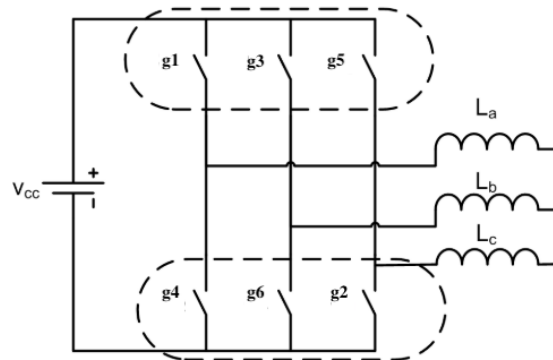


Fonte: Juliani (2007, p.18)

Uma ponte inversora trifásica, mostrada na Figura 14, pode ser utilizada no acionamento do motor, e o controle de velocidade pode ser realizado por modulação por largura de pulso (PWM). Variando a largura do pulso, é possível variar a tensão média que será aplicada às bobinas, controlando assim a corrente. Durante o acionamento, chaves da ponte inversora são acionadas no mesmo instante, uma semi-ponte positiva e uma semi-ponte negativa. A PWM pode ser aplicada somente na semi-ponte positiva (DREHER; ZAVASKI, 2013).

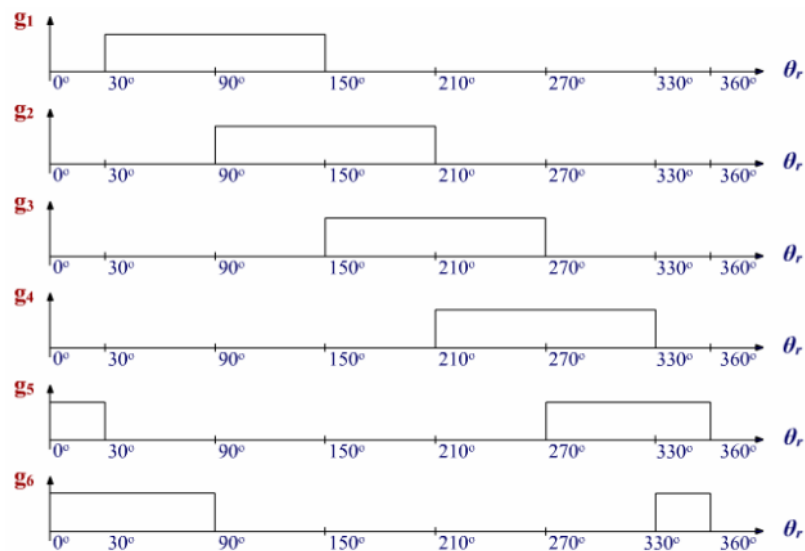
As chaves do inversor devem receber comandos de condução de um sistema de controle, sincronizado com a posição do rotor, conduzindo por 120° elétricos, como apresentado na Figura 15.

Figura 14 – Ponte inversora trifásica.



Fonte: Adaptado de Dreher e Zavaski (2013, p.1)

Figura 15 – Sinais de comando para o motor BLDC.



Fonte: Juliani (2007, p.20)

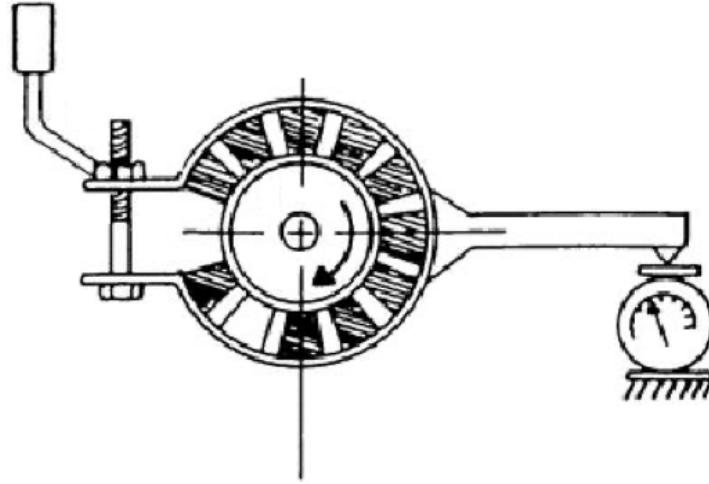
2.4 DINAMÔMETROS

Segundo Kollross et al. (2016) citando Martins (2006), dinamômetro é o equipamento usado na indústria automotiva para determinar o torque e a potência de motores, e podem ser divididos em dinamômetro de freio e de inércia. Albuquerque (2015) classifica o Freio de Prony como o tipo mais simples de dinamômetro dentre os diferentes tipos, por ser barato, de simples manejo e fácil fabricação.

No dinamômetro por freio de Prony, apresentado na Figura 16, um volante é acoplado ao eixo do motor, envolto por uma cinta dotada de sapatas de freio. A existência de uma manivela permite que se aperte ou afrouxe a cinta, variando a força de atrito. O movimento de rotação da cinta é limitado a um pequeno arco por meio de

um braço de alavanca, apoiado sobre uma balança (ALBUQUERQUE, 2015).

Figura 16 – Freio de Prony.



Fonte: Albuquerque (2015, p.9)

A aplicação do freio de Prony é limitada a motores de baixa rotação, devido as trepidações resultantes da cinta de freio, que tornam difícil manter a carga constante.

Existem ainda diversos outros tipos de dinamômetro, como por exemplo o elétrico, no qual um gerador, montado sobre rolamentos com esferas, pode ser usado para submeter carga no motor testado; e o hidráulico, no qual um disco é montado dentro de uma carcaça com água, de modo que a resistência girante é igual e oposta a reação que tende a fazer com que a carcaça gire (ALBUQUERQUE, 2015). Entretanto, como o freio de Prony é o que mais se aproxima do método aplicado neste trabalho, não será feita a descrição detalhada dos demais dinamômetros existentes.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, são apresentados e descritos os materiais utilizados na montagem de uma bancada de testes para medição dos parâmetros como corrente e tensão em determinadas faixas de velocidades de dois motores BLDC, aplicados a veículos de competição de eficiência energética, o que inclui componentes elétricos, mecânicos e eletrônicos. Foi construído um sistema que possibilitou submeter os motores a diferentes condições de cargas, e este teve seu funcionamento caracterizado e modelado matematicamente. Por fim, são apresentadas a montagem da bancada descrita e a metodologia utilizada para a condução dos testes.

3.1 MOTORES

Os modelos dos motores a serem testados, mostrados nas Figuras 17 e 18, são utilizados pela equipe de eficiência energética Eficem em seu protótipo elétrico. Ambos os motores são síncronos com ímãs permanentes, cujo princípio de funcionamento foi exposto anteriormente na Seção 2.3.4, e se diferem por suas especificações e fabricantes, indicados na Tabela 1.

Figura 17 – Motor 1.



Fonte: CHANGZHOU MXUS IMPEXP (2016, online)

Tabela 1 – Especificações dos motores testados.

	Motor 1	Motor 2
Fabricante	MXUS	OutRider
Faixa de potência [W]	250-350	180-250
Faixa de velocidades [RPM]	340-440	160-300
Massa [kg]	3,5	2,5

Fonte: CHANGZHOU MXUS IMPEXP (2016), Grin Technologies (20–).

Figura 18 – Motor 2.



Fonte: Grin Technologies (20—, online)

Ambos os motores serão submetidos a determinadas condições de carga, aplicadas por meio do conjunto apresentado na Seção 3.4, e terão seus parâmetros medidos conforme a Seção 3.3.

3.2 ALIMENTAÇÃO E ACIONAMENTO

Como exposto anteriormente na seção 2.3.4.1, para o funcionamento dos motores BLDC é necessária a utilização de uma fonte de alimentação para regular a tensão que será entregue ao motor, ou uma bateria, e um controlador para o acionamento correto das fases do motor. Neste trabalho, a alimentação dos motores é realizada utilizando uma bateria Íon-Lítio, composta por um pack de 10 baterias 18650 3,7v 2600mAh (nominal) ligadas em série.

Para o acionamento dos motores, utilizou-se um módulo controlador específico para motores BLDC, que irá acionar as suas fases com sinais de comando conforme apresentado previamente na Figura 15. O controlador empregado detecta a posição do rotor utilizando sensores Hall e possui as especificações apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Especificações do controlador.

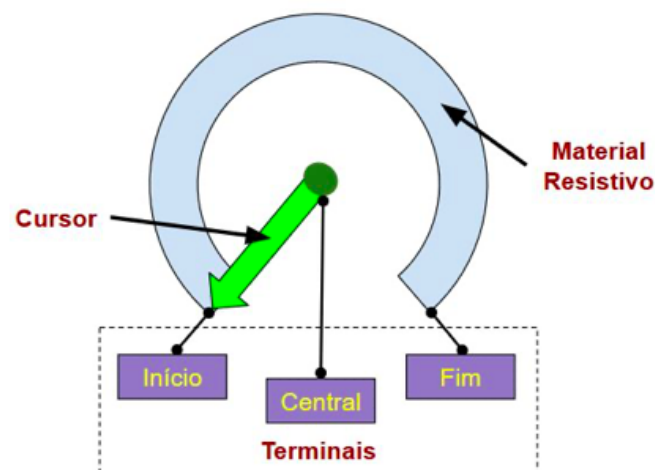
Tensão de entrada	36/48 V
Corrente máxima	18 A
Potência máxima	350 W

Fonte: A Autora (2021).

O controlador é conectado diretamente aos polos positivo e negativo da bateria, e alimenta as fases do motor de acordo com a leitura de posição realizada pelos sensores Hall. Segundo Antunes (2012), o sensor Hall é um semiconductor que envia um sinal elétrico com amplitude proporcional à intensidade do campo magnético aplicado, permitindo a medição da posição do rotor sem que seja necessário contato com este.

Para o ajuste de velocidade dos motores, conectou-se ao controlador um potenciômetro de 10k Ohms. Reis (2018) define um potenciômetro como um tipo especial de resistor de três terminais, no qual é possível a ajustar mecanicamente a resistência, a partir do movimento de um eixo móvel. Ao aplicar tensão elétrica entre os terminais de início e fim, indicados na Figura 19, a tensão elétrica que se obtém no terminal central irá variar de acordo com a posição do cursor no material resistivo.

Figura 19 – Funcionamento do potenciômetro.



Fonte: Reis (2018, online)

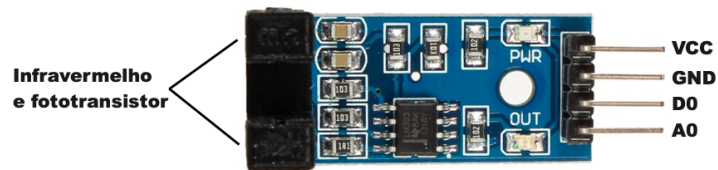
A tensão obtida no terminal central obedece a Lei de Ohm, apresentada na Equação 1, onde U é a tensão em volts, R a resistência em Ohms, e i a corrente em ampères. Assim, considerando uma determinada condição onde a corrente é teoricamente constante, a variação da resistência irá variar o nível de tensão enviado ao controlador, que irá por sua vez ajustar a velocidade de rotação do motor proporcionalmente à tensão recebida.

$$U = R.i \quad (1)$$

3.3 MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS

O primeiro parâmetro a ser medido é a velocidade de rotação dos motores. Para isso foi utilizado um sensor de velocidade (encoder), mostrado na Figura 20, medido por uma placa Arduino. O sensor funciona a partir da emissão de um feixe de luz infravermelho que é recebido por um fototransistor. Quando houver uma interrupção na recepção do feixe infravermelho no fototransistor, o saída digital D0 enviará o sinal alto, enquanto o feixe de luz for mantido sinal permanecerá baixo (ARDUINO E CIA, 2016).

Figura 20 – Sensor de velocidade.



Fonte: A Autora (2021)

O Arduino por si só consiste em uma plataforma de computação física composta por microcontroladores de placa única e um ambiente de desenvolvimento de programas para controle das placas. Tanto o código fonte do ambiente de desenvolvimento como os esquemáticos das placas são disponibilizados livremente, facilitando sua utilização (TARGA; SILVA; CEZAR, 2019).

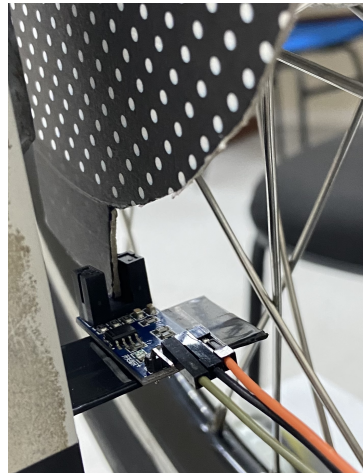
Para a medição da velocidade utilizando o sensor descrito, acoplou-se a cada motor um disco de papelão rígido, como mostrado na Figura 21, que faz com que a recepção do feixe de luz infravermelha seja interrompida uma vez a cada volta do motor, quando a região de maior raio do disco passa pelo sensor, como representado na Figura 22. O programa utilizado para controle da placa, disponível no Anexo A, mede o intervalo de tempo, em milissegundos, entre cada interrupção $[\Delta t]$, e calcula a velocidade angular, em rotações por minuto, a cada giro completo do motor conforme as Equações 2 e 3. A leitura da velocidade foi feita pela *monitor serial* do ambiente Arduino.

Figura 21 – Motor com disco acoplado para medição da velocidade.



Fonte: A Autora (2021)

Figura 22 – Contagem de voltas utilizando sensor e disco.



Fonte: A Autora (2021)

$$velocidade[rpm] = \frac{1\text{volta}}{\Delta t[ms]} \cdot \frac{1000[ms]}{1[s]} \cdot \frac{60[s]}{1[min]} \quad (2)$$

$$velocidade[rpm] = \frac{60000}{\Delta t} \quad (3)$$

Para a medição dos parâmetros de corrente e tensão na alimentação do motor, foram utilizados dois multímetros.

A medição de tensão contínua foi realizada utilizando o multímetro digital ICEL MD-1001, na escala de 200 V, na qual possui resolução de 100 mV e exatidão de $\pm(0,8\% + 5d)$ (ICEL MANAUS, 2019). O aparelho foi conectado em paralelo com a bateria, e os valores de tensão lidos no seu visor.

O multímetro Minipa ET-2082C foi utilizado para as medições da corrente CC foi ligado em série entre o polo positivo da bateria e o polo positivo da alimentação do controlador, e possui limite de corrente de 20 A. A escala selecionada foi a de 20 A, que possui resolução de 10mA e precisão de $\pm(2\% + 10d)$ (MINIPA, 2009).

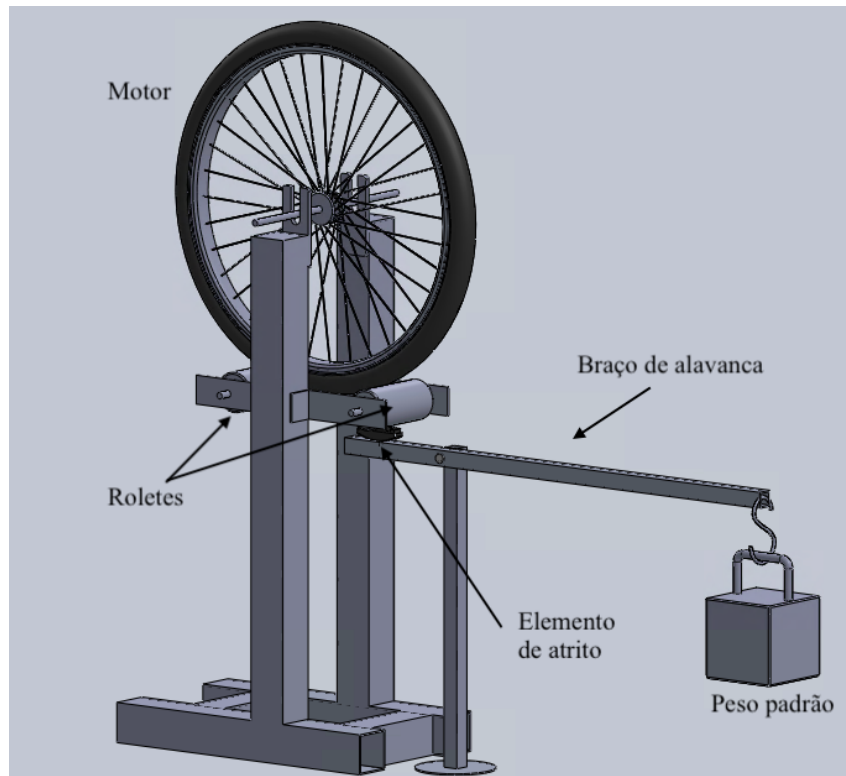
Com os valores obtidos, é possível calcular a potência elétrica (P_{in}) em Watts (W), a partir da Equação 4.

$$P_{in} = i.U \quad (4)$$

3.4 SISTEMA PARA APLICAÇÃO DA CARGA

Para que fosse possível testar o desempenho de cada motor em diferentes condições de operação, foi necessária a montagem de um sistema que permitisse a aplicação de diferentes cargas nos motores, mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Sistema para aplicação da carga.



Fonte: A Autora (2021)

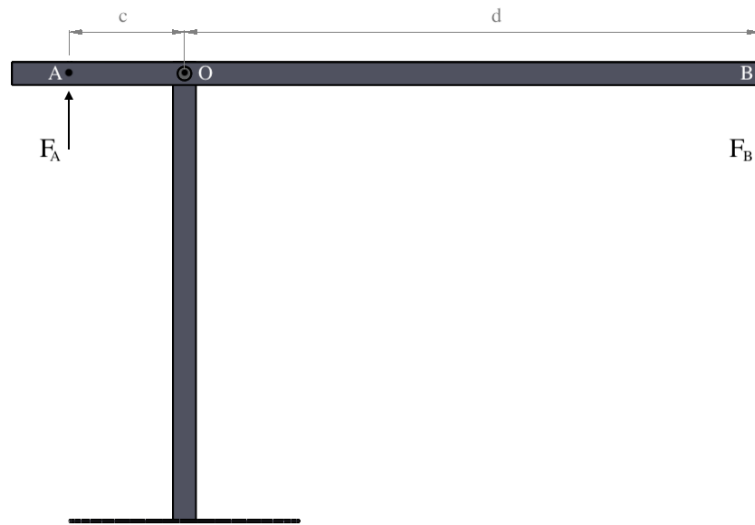
Buscando utilizar o suporte já existente disponibilizado pela equipe Eficem, acoplou-se a este um par de roletes de aço, de com raio de 50,8 mm e 10 cm de comprimento, sobre os quais o motor em teste pode ser apoiado. Este suporte possibilita que a altura da fixação do eixo seja regulada devido a existência da fenda permitindo que o motor se aproxime mais ou se afaste dos roletes, conforme a necessidade.

Considerando o motor fixado em uma posição de contato com os roletes suficiente para que não haja escorregamento entre eles, o sistema utilizado se baseia em aplicar uma força que imponha certa resistência ao movimento rotativo de um dos roletes, similar ao princípio de funcionamento de freios automotivos, se diferenciando principalmente pelo fato de que a força é aplicada tangente à circunferência do rolete, e não axialmente ou radialmente como nos sistemas de freio a disco e a tambor, respectivamente.

Como forma de acionamento do freio, utilizou-se um braço de alavanca, apresentado na Figura 24. A alavanca é posicionada de modo que esteja em contato tangencialmente com um dos roletes. No ponto A (contato entre a alavanca e o rolete), foi fixado um elemento de atrito, e no ponto B, pesos podem ser acoplados. Esse sistema, por possibilitar a utilização de pesos padrões para acionamento da alavanca, permite que seja feita uma estimativa da carga que está sendo aplicada no motor. Foram utilizados pesos padrões de 1, 2 e 5 kg, isolados ou associados, mostrados na

Figura 25.

Figura 24 – Representação braço de alavanca.



Fonte: A Autora (2021)

Figura 25 – Pesos padrões utilizados para a simulação da carga.



Fonte: A Autora (2021)

A força aplicada no ponto B (F_B) pode ser calculada a partir da Equação 5, onde g é a aceleração da gravidade, considerada igual a $9,81 \text{ m/s}^2$, e m é a massa do peso utilizado.

$$F_B = m \cdot g \quad (5)$$

Considerando a alavanca em equilíbrio estático, a força resultante no ponto A (F_A) pode ser calculada a partir do equilíbrio de momento em relação ao eixo de rotação O.

$$\Sigma M_O = 0 \quad (6)$$

$$F_A \cdot c - F_B \cdot d = 0 \quad (7)$$

$$F_A = \frac{d}{c} \cdot F_B \quad (8)$$

A alavanca utilizada possui as dimensões c e d iguais a 10 cm e 50 cm, respectivamente, de modo que a razão de alavanca é 5, ou seja, a força resultante no ponto A é igual a 5 vezes a força aplicada em B, em sentido oposto.

O elemento de atrito utilizado foi uma sapata de borracha de freio de bicicletas, apresentada na Figura 26. Segundo Feier, Way e Redfield (2020), existem dados limitados a respeito do coeficiente de atrito dos freios de bicicletas, entretanto o valor sugerido nas literaturas existentes é de 0,4. Além disso, segundo Caetano (201-) o coeficiente de atrito cinético entre borracha e aço fica entre 0,3 e 0,6, e conforme Fuller (19-) tal valor deve ser considerado igual a 0,4. Assim, neste trabalho o valor fixado para o coeficiente de atrito entre a sapata de borracha e o rolete de aço foi de 0,4.

Figura 26 – Sapata de freio utilizada como elemento de atrito.

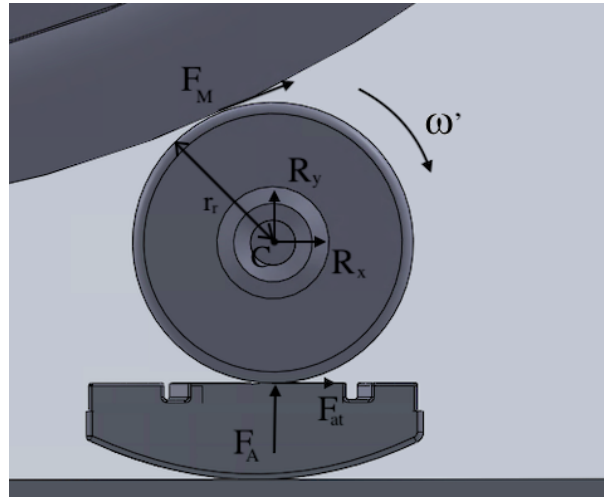


Fonte: A Autora (2021)

Para estimar a força que o motor está impondo para vencer a resistência ao movimento provocada pela fricção, considera-se que a força em A seja transferida em sua totalidade ao rolete no ponto de contato com o elemento de atrito, e que não haja escorregamento entre o pneu acoplado no motor e o rolete. As forças atuantes no rolete, quando sobre ação da alavanca, são apresentadas no diagrama de corpo livre da Figura 27, onde F_M é a força realizada pelo motor no ponto de contato entre o pneu e o rolete, F_{at} é a força de atrito entre o rolete e o elemento de fricção, ω' é a velocidade angular do rolete, R_x e R_y são as forças de reação que surgem nos eixos horizontal e vertical, respectivamente.

A força de atrito cinética, resultante da interação entre um objeto com a superfície sobre a qual este está deslizando, é paralela e se opõe ao movimento (RESNICK; HALLIDAY; WALKER, 2016), sendo calculada pela Equação 9, sendo μ_k o

Figura 27 – Diagrama de corpo livre rolete.



Fonte: A Autora (2021)

coeficiente de atrito cinético entre o objeto e a superfície e N a força normal.

$$F_{at} = N \cdot \mu_k \quad (9)$$

Para a sistema apresentado acima, a Equação 9 pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$F_{at} = F_A \cdot \mu \quad (10)$$

Sendo μ o coeficiente de atrito cinético entre o elemento de fricção e o rolete.

Considerando que a velocidade angular ω do rolete se mantenha constante, ou seja, com aceleração igual a zero, é possível aplicar a condição de equilíbrio de torque ao rolete em relação ao ponto C da Figura 27, conforme Equações 11 e 12, sendo o r_r o raio do rolete.

$$\Sigma T_C = 0 \quad (11)$$

$$F_M \cdot r_m - F_{at} \cdot r_r = 0 \quad (12)$$

Assim sendo, tem-se que a força aplicada pelo motor no rolete deve ser igual a força de atrito que surge entre o rolete e o elemento de fricção.

$$F_M = F_{at} \quad (13)$$

Ou então, pode-se encontrar o torque mecânico disponibilizado no eixo do motor (T_{eixo}) por meio da Equação 14, sendo r_m o raio do motor.

$$T_{eixo} = F_{at} \cdot r_m \quad (14)$$

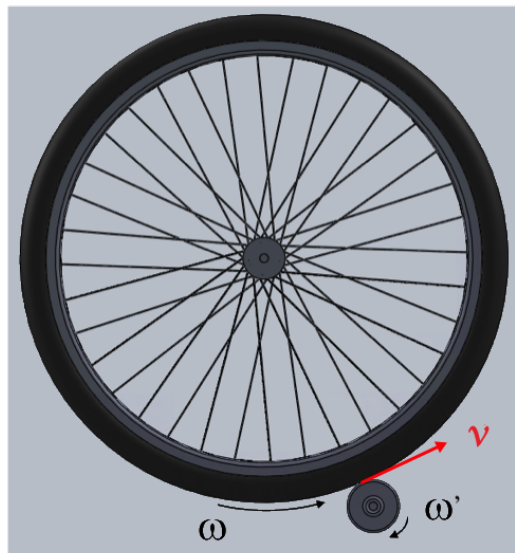
A partir do torque do motor, é possível calcular a potência mecânica de saída fornecida (P_{out}) pelo motor através da Equação 15.

$$P_{out} = T_{eixo} \cdot \omega \quad (15)$$

A Figura 28 permite observar ainda a relação entre a velocidade de rotação do motor e a do rolete. No ponto de contato desses dois componentes, ambos apresentam velocidade linear (v) tangente ao movimento, iguais em intensidade, direção e sentido, ou seja, sendo v_m a velocidade linear do motor e v_r a velocidade linear do rolete no ponto de contato:

$$v = v_m = v_r \quad (16)$$

Figura 28 – Representação das velocidades no pneu e no rolete.



Fonte: A Autora (2021)

Sendo a intensidade da velocidade linear (m/s) dada pelo produto entre a velocidade angular (rad/s) e o raio do eixo de rotação (m), tem-se que a relação entre as velocidades angulares do motor (ω) e do rolete (ω') é dada pela Equação 17.

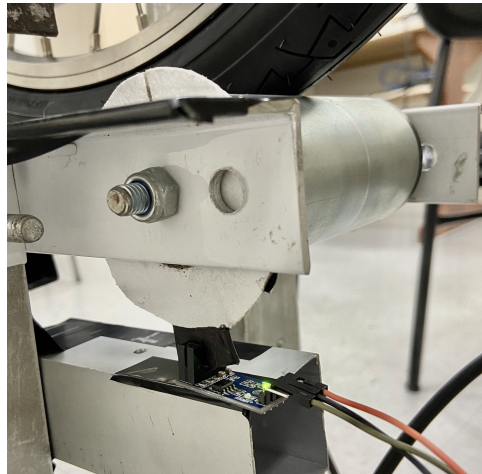
$$\omega \cdot r_m = \omega' \cdot r_r \quad (17)$$

O raio de giro do motor, r_m , é o raio do pneu aro 20 utilizado, de 25,4 cm, e o raio de giro do rolete, fornecido pelo fabricante IPC Comercial (2021), é de 2,54 cm. Logo:

$$\omega' = 10 \cdot \omega \quad (18)$$

Buscando verificar se a condição estabelecida na Equação 18 se aplica ao sistema, foi proposto um teste inicial, que consistiu em medir a velocidade de giro do rolete e a velocidade de giro do pneu após a fixação motor na posição de contato entre eles. A medição da velocidade do rolete foi feita utilizando outro sensor de velocidade como o apresentado na Figura 20. Ao rolete, foi acoplado um disco, similar ao utilizado nos motores, conforme Figura 29.

Figura 29 – Medição de velocidade do rolete.



Fonte: A Autora (2021)

3.5 EFICIÊNCIA DOS MOTORES

A partir dos valores de potência elétrica sendo consumida pelo motor, obtidos através das medições de tensão e corrente, e a potência sendo entregue pelo motor, obtida a partir do cálculo da força empregada pelo motor, obtidos pelas Equações 4 e 15, respectivamente, é possível estimar a eficiência elétrica (η) dos motores a partir da Equação 19.

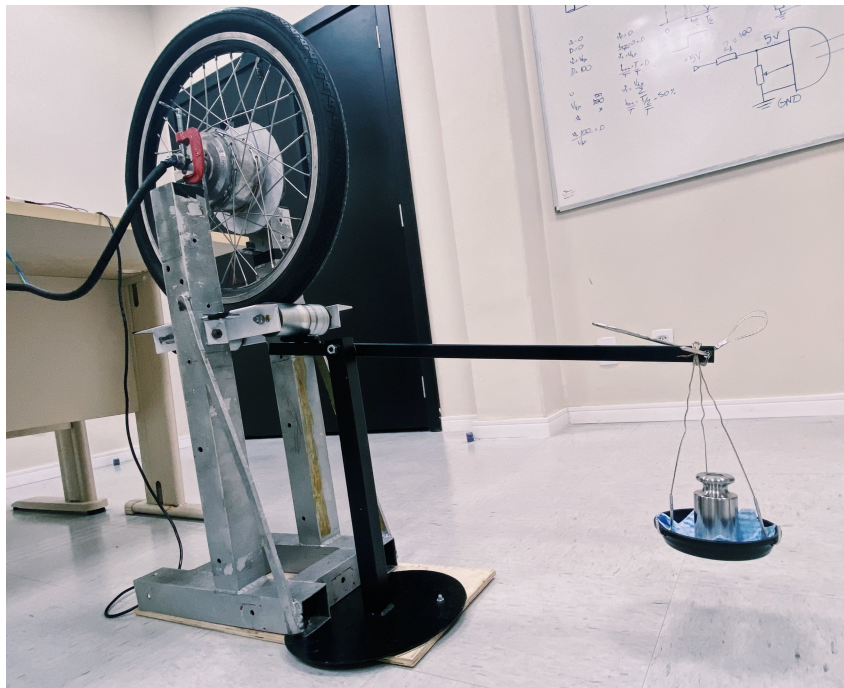
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (19)$$

Ao realizar este cálculo, estão sendo desconsideradas eventuais perdas de energia, como por exemplo a dissipação de energia térmica devido a resistência de componentes no caso a potência de entrada, e devido ao atrito no caso da potência de saída. Ainda assim, apesar do valor de eficiência calculado ser uma aproximação com diversas fontes de imprecisões, possibilitou uma comparação entre os motores testados nesse trabalho.

3.6 MONTAGEM DA BANCADA

Para garantir que a alavanca de freio e o suporte do motor se mantivessem na mesma posição durante a realização dos testes, e também garantir maior estabilidade ao sistema, tanto o suporte como a alavanca foram parafusados em uma base de madeira, que, também devido a estabilidade, foi mantida no chão durante os testes. O conjunto completo após a montagem, já com um dos motores fixado e peso acoplado a alavanca, é mostrado na Figura 30.

Figura 30 – Suporte, motor 2 e alavanca de frenagem montados em conjunto.



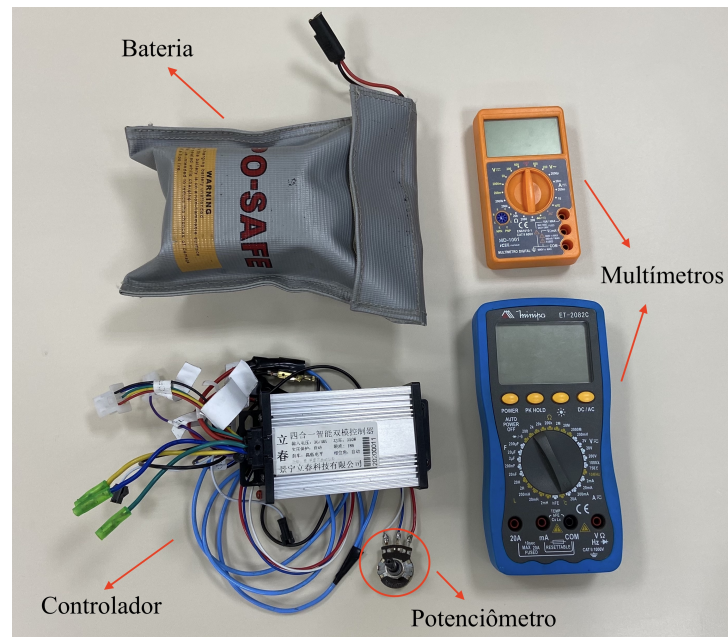
Fonte: A Autora (2021)

Em um sistema de freio por atrito, grande parte da energia cinética é convertida em energia térmica durante a fricção do componente de atrito com o componente girante, desse modo, já era esperado que houvesse um aquecimento da sapata de freio e do rolete. Buscando dissipar parte deste calor, para evitar as perdas das propriedades atritantes e o aquecimento do pneu em contato com o rolete, garantindo o funcionamento do sistema por um maior período de tempo, um ventilador de chão foi posicionado em direção ao rolete sob frenagem. Apesar do arranjo empregado não garantir a total dissipação do calor gerado, foi a solução de baixo custo e maior simplicidade encontrada.

Para a realização dos testes, ambos os motores usaram pneus de mesmas especificações e marca, e foram calibrados com a mesma pressão de 40 psi.

Os demais componentes utilizados para alimentação do sistema e medição dos parâmetros são apresentados na Figura 31.

Figura 31 – Componentes de alimentação e medição de tensão e corrente.



Fonte: A Autora (2021)

3.7 CONDUÇÃO DOS TESTES

A metodologia para condução dos testes pode ser dividida nas seguintes etapas:

- Etapa 1: Fixação do motor no suporte, sem contato com os roletes, e obtenção dos dados de corrente e tensão de entrada no motor em vazio, em diferentes velocidades;
- Etapa 2: Fixação do motor no suporte, na posição que garanta contato suficiente entre pneu e rolete, para que não haja escorregamento;
- Etapa 3: Medição da velocidade do motor e o do rolete em uma velocidade em baixa e outra em alta rotação;
- Etapa 4: Análise dos dados obtidos na 3ª etapa, e possível repetição dos passos 2 e 3, caso a condição de não escorregamento não tenha sido atingida;
- Etapa 5: Obtenção dos dados de corrente e tensão de entrada do motor na condição de carga zero, ou seja, sem acionamento do freio, em diferentes velocidades;
- Etapa 6: Obtenção dos dados de corrente e tensão de entrada no motor, com diferentes condições de carga impostas pela aplicação de cargas na alavanca de freio, em diferentes velocidades;

As etapas descritas acima foram realizadas consecutivamente, com os motores 1 e 2. Entre as etapas 4 e 6 não houve reajuste no posicionamento do motor.

Durante a aquisição de dados de tensão e corrente nas diversas condições de carga testadas, os motores foram ligados e acelerados até a velocidade de 50

rpm, na qual foram realizadas as medições com o auxílio dos multímetros. O mesmo procedimento foi aplicado para as demais velocidades múltiplas de 50, até a velocidade máxima atingida por cada máquina. Dado o grau de sensibilidade do potenciômetro, muitas vezes não foi possível estabilizar a velocidade em um valor exato múltiplo de 50, de modo que valores próximos foram utilizados para a obtenção de dados.

Para cada velocidade configurada, devido à variação nos parâmetros de corrente e tensão, mesmo quando não estavam sendo realizadas alterações no restante do sistema, os dados coletados foram os valores máximos e mínimos de tensão e corrente lidos nos multímetros, permitindo o cálculo de valores médios. Essas variações podem ser justificadas por diversos fatores, tais quais:

- A qualidade e precisão das medições dos aparelhos utilizados;
- Variações no controlador;
- A vibração que surge no conjunto devido a rotação do motor e, principalmente, em virtude do atrito gerado no contato entre o elemento de atrito e o rolete;
- Possíveis variações na superfície do pneu;
- Possível excentricidade das rodas.

4 RESULTADOS

Nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos neste trabalho. Os primeiros testes buscaram comprovar a possibilidade de adotar a hipótese de escorregamento nulo entre pneu e roletes. Em seguida, o sistema foi testado para estimar a carga gerada pela própria montagem do conjunto. Por fim, são apresentados os dados adquiridos nos testes com diferentes cargas em determinadas rotações.

4.1 VERIFICAÇÃO DA AUSÊNCIA DE ESCORREGAMENTO ENTRE O PNEU E OS ROLETES

Buscando validar a hipótese de que havia contato o suficiente entre o motor e os roletes para que fosse possível considerar a ausência de escorregamento, o primeiro teste realizado com cada motor foi para verificar a relação fornecida pela Equação 18, através da medição de velocidade rotacional do pneu e dos roletes simultaneamente.

Com o motor MXUS já fixado no suporte, este foi ligado e acelerado até uma velocidade específica, porém primeiramente foi mantido em baixa rotação, e as velocidades do motor e do rolete foram adquiridas. O mesmo teste foi repetido em seguida a uma alta rotação, e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3. Durante a execução desse procedimento, a alavanca desenvolvida para frenagem foi mantida fora de contato com o rolete, para que não houvesse simulação de carga por esse conjunto.

Tabela 3 – Verificação da relação entre as velocidades do motor MXUS e dos roletes.

ω [RPM]	ω' [RPM]	ω'/ω
58	556	9,58
251	2401	9,56

Fonte: A Autora (2021).

A partir dos dados apresentados na Tabela 3, é possível averiguar que a diferença entre o valor teórico da velocidade angular do rolete, dado pela Equação 18, e a velocidade real medida foi inferior a 4,5%. Esse resultado foi observado tanto na velocidade de baixa rotação do motor, 58 RPM, quanto para a alta velocidade de rotação, de 251 RPM, e foi considerado aceitável para que se adotasse a condição de não escorregamento, pois, além de serem valores relativamente baixos, deve se considerar ainda que o sensor utilizado pode apresentar imprecisões de resultados.

O mesmo procedimento de teste foi reproduzido com o motor OutRider, e os dados obtidos estão apresentados na Tabela 4.

Verifica-se que a diferença entre a razão das velocidades teórica e real com o

Tabela 4 – Verificação da relação entre as velocidades do motor OutRider e dos roletes.

ω [rpm]	ω' [rpm]	ω'/ω
41	399	9,73
253	2460	9,74

Fonte: A Autora (2021).

motor OutRider foi inferior a 3% para ambas velocidades de rotação testadas, permitindo que desconsiderasse o escorregamento entre o pneu e o rolete, sendo possível adotar a hipótese da relação de forças apresentadas na Seção 3.4. Da mesma maneira que se procedeu com o motor MXUS, o motor OutRider não foi reposicionado durante os testes que foram realizados em seguida.

Comparando os resultados do motor MXUS e do motor OutRider, é possível perceber que a máquina OutRider se aproximou mais da condição ideal de escorregamento nulo ($\omega = \omega'$) do que a MXUS. A explicação para essa diferença se dá pelo fato que, durante a montagem, o motor OutRider necessitou ser posicionado em um altura mais próxima aos roletes do que o motor MXUS, devido às excentricidades observadas em sua roda. Esse posicionamento garantiu melhor contato entre o pneu e os roletes, para que essas pequenas variações do raio da roda não causassem variações nas medições, entretanto, o maior aperto gerado entre os componentes gerou uma situação de pré carga maior do que a observada no motor MXUS, conforme será apresentado na Seção 4.2.

4.2 ESTIMATIVA DA FORÇA IMPOSTA AO MOTOR PELA MONTAGEM DO CONJUNTO

Conforme descrito na Seção 4.1, a própria fixação do eixo do motor no suporte apresentou a desvantagem de que o aperto do pneu contra os roletes gerou uma resistência ao movimento rotativo. Sendo assim, o objetivo das medições apresentadas nessa seção foi quantificar essa resistência extra, buscando encontrar um valor aplicável de correção a carga agindo no sistema.

Para isso, cada motor foi submetido a dois testes sem carga (elemento de freio sem contato com o rolete) em duas condições distintas descritas a seguir:

- A: teste em vazio, ou seja, com o motor posicionado e fixado no suporte sem contato algum entre o pneu e os roletes;
- B: motor posicionado e fixado no suporte, pressionado contra os roletes, mantido na mesma posição em que foram realizados os testes descritos na Seção 4.1.

A partir dos valores de tensão e corrente obtidos nas medições, calculou-se a potência elétrica de entrada em cada um dos motores em cada condição através das Equação 4, e os resultados dos motores MXUS e OutRider são apresentados

nas Tabelas 5 e 6, respectivamente. Devido à sensibilidade do potenciômetro, não foi possível estabilizar a velocidade em valores idênticos durante as medições em cada condição. Assim, para que fosse possível realizar as comparações dos valores de torque obtidos em cada situação para uma dada velocidade, utilizou-se a ferramenta de interpolação linear.

Tabela 5 – Potência elétrica de entrada nas condições A e B no motor MXUS.

Rotação [rpm]	P_{in} A [W]	P_{in} B [W]	ΔP_{in}
50	6,7	11,1	4,4
77	12,1	16,2	4,1
102	12,6	21,1	8,5
151	18,7	31,8	13,2
154	19,1	32,5	13,4
200	25,7	42,1	16,4
204	26,3	43,2	16,9
247	33,6	54,5	20,9
251	34,6	56,1	21,5
297	43,4	69,2	25,7

Fonte: A Autora (2021).

Tabela 6 – Potência elétrica de entrada nas condições A e B no motor OutRider.

Rotação [rpm]	P_{in} A [W]	P_{in} B [W]	ΔP_{in}
54	4,6	33,3	28,7
60	5,4	36,9	31,6
99	10,0	60,2	50,1
102	10,3	62,0	51,6
150	14,8	104,4	89,6
160	15,8	107,9	92,2
198	20,1	121,4	101,3
250	25,9	144,3	118,4
300	33,0	166,4	133,4

Fonte: A Autora (2021).

A última coluna de cada tabela mostra a diferença entre a potência obtida em carga zero (condição B), e em vazio (condição A). Como essa variação na potência é causada pela resistência ao movimento extra imposta ao sistema pelo contato do pneu com o rolete, optou-se por calcular a carga equivalente à potência adicional observado, e aplicar uma correção à carga simulada nos demais testes.

Para isso, calculou-se a média dos valores de potência extra encontrados, e, realizando o caminho inverso do que foi descrito por meio das Equações 5, 8, 10, 14 e 15, encontrou-se a carga equivalente a este valor. Apesar dos valores de i_{in} aumentarem com a velocidade, quando convertidos para massa o resultado foi similar em todas as velocidades de rotação, por isso foi utilizado o valor médio. O resultado obtido apresentado na Tabela 7, que representa a massa extra que deveria ser acrescentada

no acionamento da alavanca (ponto B da Figura 24 na Seção 3.4), foi somado aos valores de carga utilizados nos demais testes descritos na Seção 4.3.

Tabela 7 – Valores de carga extra obtidos.

Motor	Potência adicional [W]	Carga extra equivalente [kg]
MXUS	15,5	0,16
OutRider	77,7	1,0

Fonte: A Autora (2021).

Conforme citado na Seção 4.1, durante a montagem do motor OutRider, este necessitou ser posicionado com menor distância (altura) entre o apoio do eixo e os rolete para garantir contato com os roletes durante toda a revolução, devido às excentricidades observadas na roda, o que explica a diferença encontrada entre a carga estimada para o sistema no motor MXUS e no motor OutRider.

A metodologia descrita acima para estimar a carga que a própria montagem do sistema impõe sobre o motor apresenta grande imprecisão, pois consiste em transformar toda a potência elétrica adicional verificada, entre o teste em vazio e o teste após a montagem completa do conjunto sem aplicação de carga, em torque no eixo, o que não ocorre na situação real devido às diversas perdas do sistema. Além disso, como foi usada apenas uma medição em cada condição, desconsidera variações e erros nas medições.

Entretanto, devido a falta de alternativas para garantir que ambos os motores estivessem sobre exatamente as mesmas condições de carga com os aparatos disponíveis, essa foi a solução adotada para permitir a comparação entre as máquinas.

4.3 RESULTADOS OBTIDOS NOS TESTES

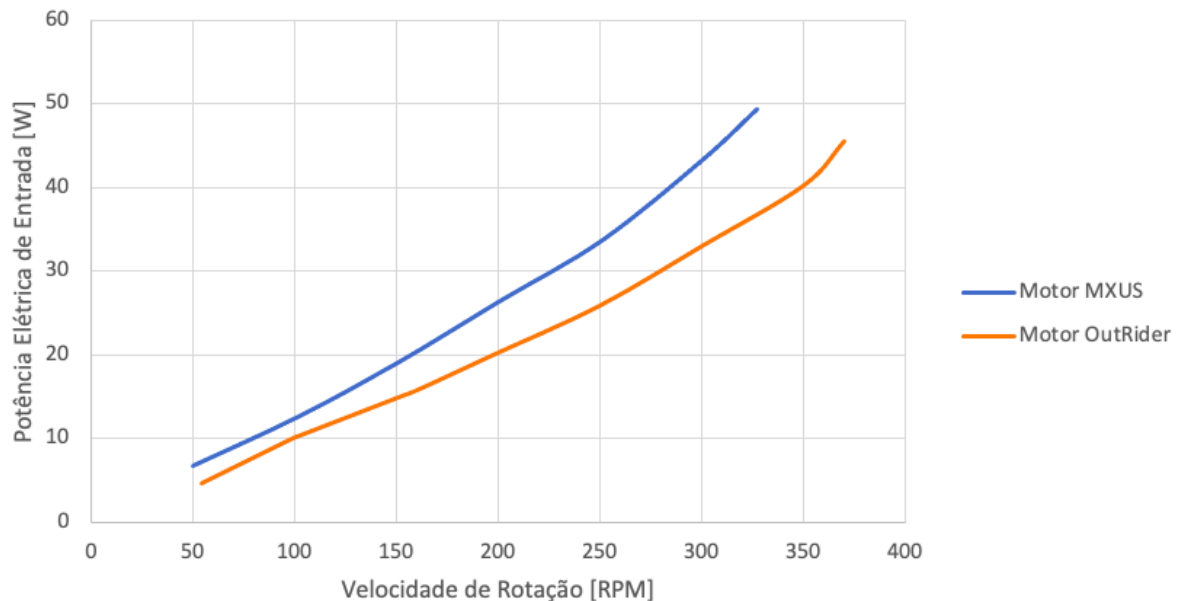
Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos durante os testes utilizando a simulação de cargas por meio do sistema de frenagem. Para cada motor, o correspondente valor de carga extra encontrado na Tabela 7 da Seção 4.2 foi somado ao valor de carga aplicada na alavanca de frenagem, e os valores apresentados a seguir já estão considerando essa correção. Deve-se ainda considerar que os valores obtidos possuem diversas fontes de imprecisão, e não devem ser considerados como absolutos, e sim como uma base para fins comparativos.

4.3.1 Testes em vazio

Na Figura 32 são apresentados os valores obtidos de potência elétrica de entrada para cada motor em vazio, ou seja, a taxa de energia que está sendo entregue ao controlador para o funcionamento do motor suspenso, sem carga alguma sendo aplicada. Observa-se que o motor MXUS teve uma maior demanda de potência do que

o motor OutRider para as mesmas velocidades nas condições específicas.

Figura 32 – Valores obtidos de potência elétrica de entrada para os motores a vazio.



Fonte: A Autora (2021)

Para rotações intermediárias, entre 100 e 250 RPM, a potência elétrica de entrada do motor 1 resultou valores entre 20% e 30% maiores que a mesma no motor 2. Para baixas e altas rotações, abaixo de 100 RPM e acima de 250 RPM, essa diferença foi ainda mais relevante, variando de 44% a 54% dependendo da velocidade.

A hipótese levantada para justificar essa diferença é que o motor 1 possua uma corrente mínima de funcionamento maior do que o motor OutRider, de modo que, levando em conta que os testes em vazio de ambos os motores foram realizados com a bateria carregada em níveis similares (entre 38V e 39V), o motor MXUS apresentaria um maior consumo de potência do que o motor OutRider, mesmo operando em vazio.

Outro aspecto a ser observado, é que apesar da faixa de velocidades sugerida nas especificações pelo fabricante CHANGZHOU MXUS IMPEXP (2016) (340 a 440 RPM) ser superior do que a mesma sugerida pelo Grin Technologies (20–) (160 a 300 RPM), referentes aos modelos dos motores MXUS e OutRider, respectivamente, conforme apresentado na Tabela 1, a rotação máxima atingida no motor MXUS foi de 340 RPM, enquanto a do motor OutRider ultrapassou esse valor e chegou a 370 RPM.

4.3.2 Torque no eixo e potência mecânica

Neste trabalho, o torque no eixo de cada motor foi encontrado a partir do peso padrão que foi utilizado para o acionamento do freio, conforme descrito na Seção 3.4. Devido aos diferentes valores de carga extra que a própria montagem apresentou no sistema para cada motor, estes não estão sendo submetidos aos

mesmos carregamentos nos testes. Entretanto, como o motor MXUS apresentou um valor de correção que representa menos de 10% da menor carga aplicada (2 kgf), essa diferença foi desconsiderada para a comparação. As Tabelas 8 e 9 indicam, para os motores MXUS e OutRider respectivamente, os pesos que foram utilizados em cada teste e a referente carga aplicada no acionamento da alavanca (F_B), o valor de carga na alavanca com a correção aplicada (F_B corrigida), a força aplicada pela alavanca no rolete considerando a correção (F_A corrigida) e por fim o torque no eixo do motor (T_{eixo}).

Tabela 8 – Carga nos testes com o motor MXUS.

Rótulo teste	Peso padrão utilizado	F_B		F_B corrigida		F_A corrigida		T_{eixo} [N.m]
		[kgf]	[N]	[kgf]	[N]	[kgf]	[N]	
2 kgf	2 kg	2	19,62	2,16	21,1896	10,8	105,948	10,8
3 kgf	2 kg + 1 kg	3	29,43	3,16	30,9996	15,8	154,998	15,7
4 kgf	2 kg + 2 kg	4	39,24	4,16	40,8096	20,8	204,048	20,7
5 kgf	5 kg	5	49,05	5,16	50,6196	25,8	253,098	25,7

Fonte: A Autora (2021).

Tabela 9 – Carga nos testes com o motor OutRider.

Rótulo teste	Peso padrão utilizado	F_B		F_B corrigida		F_A corrigida		T_{eixo} [N.m]
		[kgf]	[N]	[kgf]	[N]	[kgf]	[N]	
2 kgf	1 kg	1	9,81	2	19,62	10	98,1	10,0
3 kgf	2 kg	2	19,62	3	29,43	15	147,15	15,0
4 kgf	2 kg + 1 kg	3	29,43	4	39,24	20	196,2	19,9
5 kgf	2 kg + 2 kg	4	39,24	5	49,05	25	245,25	24,9

Fonte: A Autora (2021).

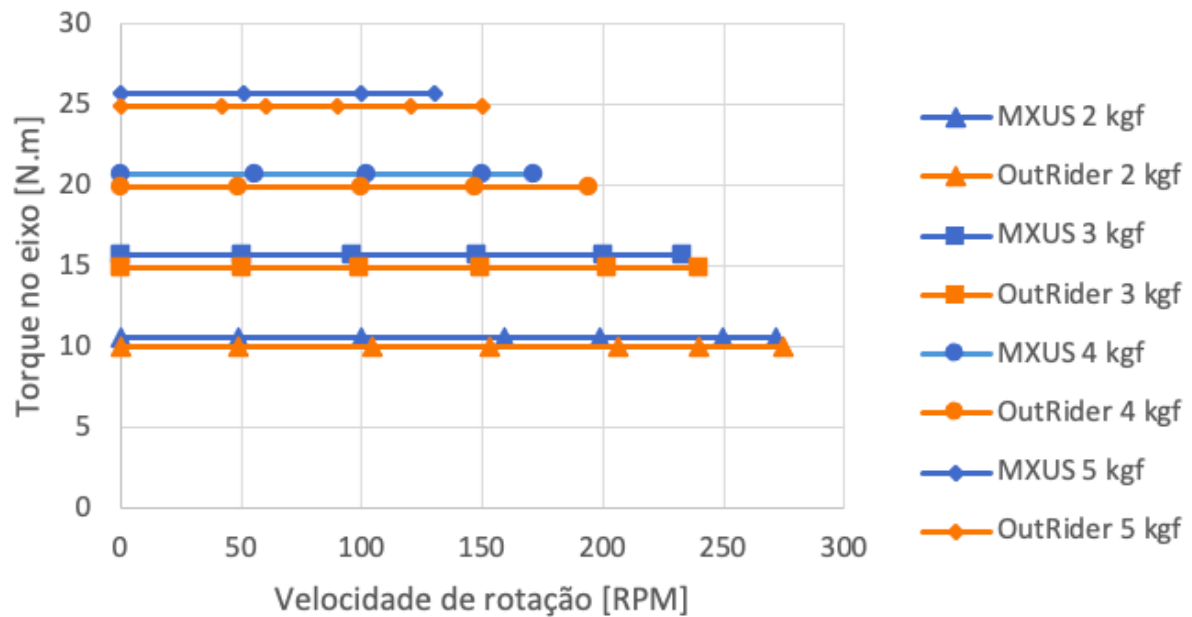
Assim, as curvas de torque por velocidade de cada motor para os testes de 2 kgf, 3 kgf, 4 kgf e 5 kgf são apresentadas na Figura 33.

Na Figura 34 são apresentados os valores de potência mecânica obtidos em ambas as máquinas testadas em cada condição de carga a qual foram submetidas. Esses valores foram encontrados a partir das velocidades aferidas e do torque no eixo do motor (Equação 15), considerando a hipótese de que este se mantém constante e varia apenas com a alteração do peso aplicado na alavanca.

Observa-se que, aumentando a carga, há uma tendência de redução da velocidade máxima alcançada pelos motores, pois esta é limitada pela potência máxima da máquina. Contudo, de acordo com os dados adquiridos, com a aplicação da carga de 5 kgf, o motor OutRider chegou a rotação de 188 RPM, atingindo um valor de potência incoerente, não só em relação ao comportamento das demais curvas do gráfico, mas também em relação a potência máxima de operação fornecida pelo fornecedor Grin Technologies (20–), conforme foi apresentado anteriormente na Tabela 1.

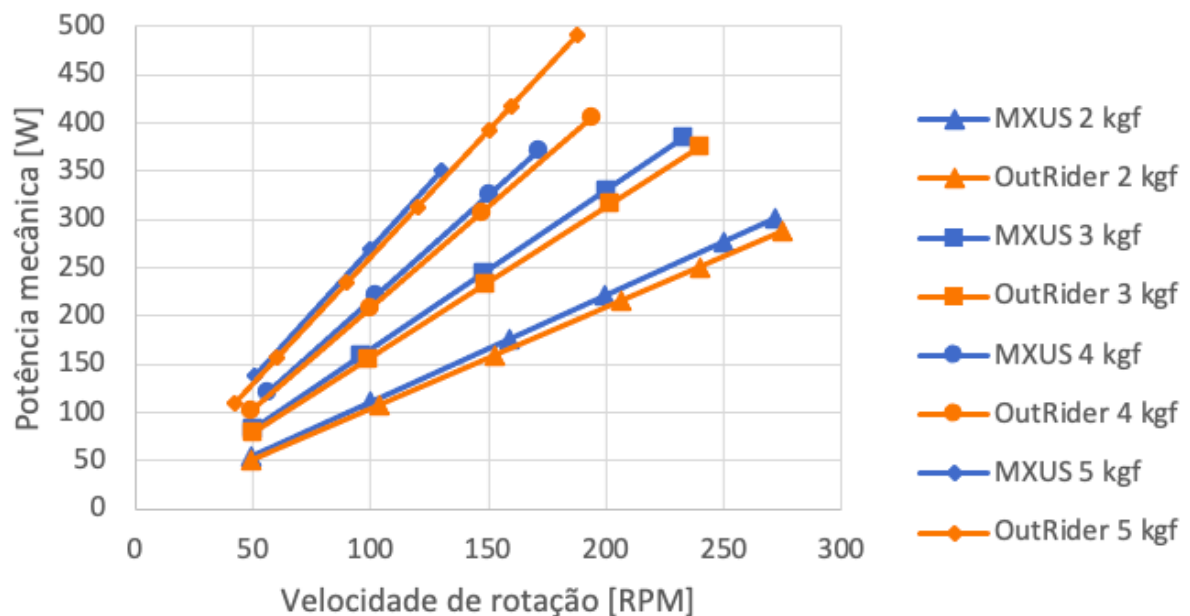
Este resultado indica que o teste de 5 kgf possa ter sido corrompido por

Figura 33 – Torque no eixo.



Fonte: A Autora (2021)

Figura 34 – Potência mecânica.



Fonte: A Autora (2021)

alguma falha, seja ela no aparato mecânico usado para aplicação da força ou nos equipamentos utilizados para as medições. Entretanto, os valores de potência mecânica obtidos nesse mesmo teste, para velocidades inferiores a 150 RPM, são coerentes com o comportamento observado nas demais curvas de potência de ambos os motores.

Assim, optou-se por desconsiderar apenas as últimas medições realizadas para a carga de 5 kgf, usando como velocidade máxima o valor de 150 RPM, relativo a potência de 391 W.

Ainda assim, considerando que a potência máxima indicada pelo fornecedor foi de 250 W para o motor OutRider, o valor atingido foi 60% superior ao esperado. Buscando justificar essa diferença encontrada, três hipóteses foram construídas:

- 1º: o motor OutRider de fato possui potência superior ao indicado pelo fornecedor;
- 2º: a correção de carga aplicada foi superdimensionada, levando a resultados muito superiores ao valor correto;
- 3º: a tensão nominal do motor OutRider é de 24 V, e os testes foram realizados a 36 V.

Levando em conta que o motor OutRider apresentou velocidade em vazio também superior ao valor esperado, optou-se por adotar a princípio a 1ª hipótese (o que não invalida a 3ª hipótese) e prosseguir com a análise dos dados adquiridos para que melhores conclusões possam ser obtidas.

Além disso, para ambos os motores, as potência mecânica encontrada está desconsiderando as perdas existentes no mecanismo de aplicação e transferência de carga, de modo que há uma imprecisão nos resultados.

Em relação ao motor MXUS, os valores de potência máxima ficaram próximos ao valor indicado pelo fornecedor, de 350 W, apresentando uma diferença máxima de apenas 10%, que pode ser justificada pela imprecisão da carga que de fato está chegando ao motor.

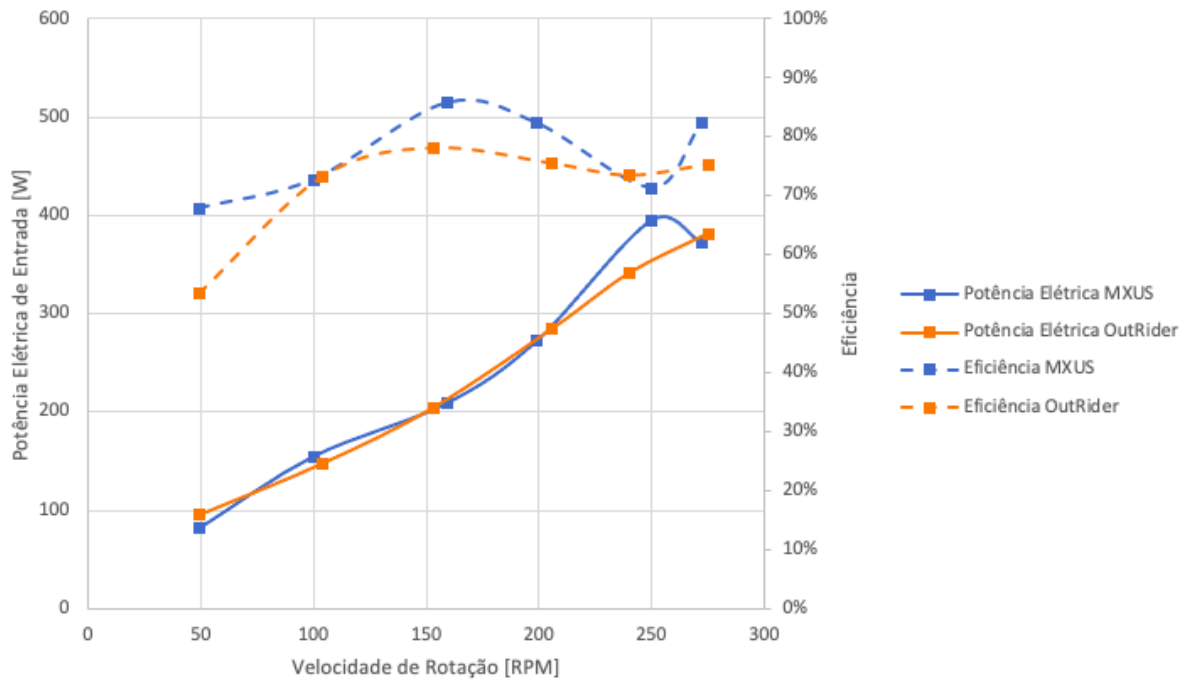
Um último ponto relevante que pode ser observado na Figura 34, é que a máquina elétrica OutRider atingiu seu valor máximo de potência com a aplicação de 4 kgf de força, enquanto a máquina MXUS atingiu seu máximo com a carga de 3 kgf.

4.3.3 Potência elétrica de entrada e eficiência energética

Em seguida, foram analisados os resultados obtidos no que diz respeito a potência elétrica de entrada e a eficiência dos motores, de acordo com a força aplicada. É possível observar na Figura 35 que, quando adicionada a carga de 2kgf, para velocidades de até 200 RPM, as curvas de potência elétrica, embora se cruzem repetidas vezes, mantêm-se próximas. Observando agora as curvas de eficiência ainda na Figura 35, nota-se que o motor MXUS apresentou rendimento superior ao OutRider, exceto entre as velocidades de 100 RPM e 130 RPM, nas quais o motor 2 se mostrou levemente mais eficiente que o motor 1.

No funcionamento em altas rotações, ao redor da velocidade de 250 RPM, nota-se que a máquina MXUS apresentou um pico no consumo de energia, se afastando do valor de potência elétrica obtida para o motor OutRider na mesma velocidade e carga,

Figura 35 – Potência elétrica de entrada e eficiência com 2 kgf.



Fonte: A Autora (2021)

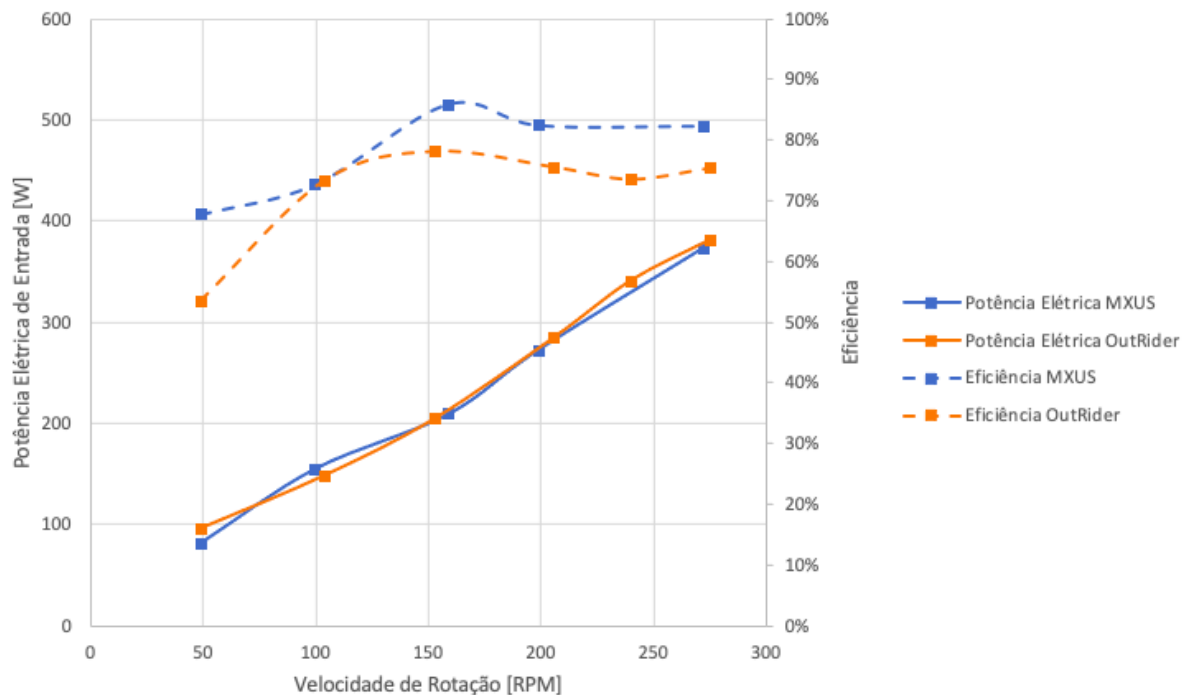
o que refletiu também em uma queda na curva de eficiência do primeiro. Entretanto, na velocidade máxima de funcionamento atingida, que foi bastante similar para os dois modelos, o motor 1 apresentou novamente uma queda na potência elétrica de entrada, coincidindo novamente com a potência elétrica de entrada na máquina 2, o que consequentemente apresentou uma melhora em seu nível de eficiência.

Embora seja possível que, devido a alguma característica própria e desconhecida pela autora, o motor MXUS apresente maior consumo de energia elétrica e menor eficiência quando funciona em rotações próximas de 250 RPM para a carga especificada, a hipótese levantada e considerada mais provável pela autora é que tal variação brusca foi causada por imprecisões no método do levantamento de dados e nos aparelhos utilizados.

Assim, foi construído um segundo gráfico para a carga de 2 kgf, desconsiderando a medição a 250 RPM, mostrado na Figura 36. Nesta versão, o comportamento das curvas de potência elétrica se mantém aproximadamente constante para toda a faixa de velocidades, assim como as eficiências obtidas acima de 200 RPM, nas quais o motor 1 se mantém com eficiência superior ao motor 2. Sendo assim, considerando as características esperadas para o funcionamento do tipo dos motores testados, esse segundo gráfico para a carga de 2 kgf foi considerado mais provável de se aproximar do comportamento real das máquinas.

Os resultados obtidos com a carga de 3 kgf são apresentados na Figura

Figura 36 – Potência elétrica de entrada e eficiência com 2 kgf desconsiderando medição na rotação de 250 RPM.



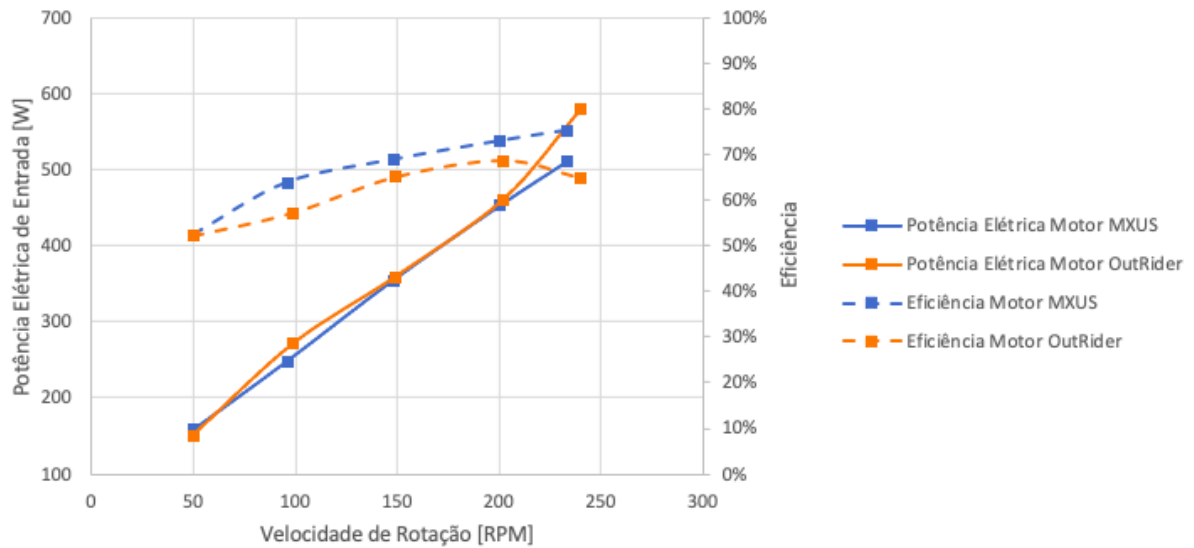
Fonte: A Autora (2021)

37, e o comportamento verificado foi similar aos encontrados com a carga de 2 kgf. Novamente os valores de potência elétrica consumida foram bastante próximos, ou ainda coincidentes (nas velocidades entre 150 RPM e 200 RPM) nos dois motores, se afastando apenas em rotações superiores a 200 RPM, nas quais o motor OutRider apresentou maior consumo de energia. Nessa condição de carga, as máquinas elétricas apresentaram a mesma eficiência apenas a 50 RPM; no restante da faixa de velocidades testada, o motor MXUS apresentou rendimento elevado em relação ao OutRider.

Nos testes com as cargas de 4 kgf e 5 kgf, os resultados encontrados e apresentados nas Figuras 38 e 39, respectivamente, se diferenciaram dos apresentados anteriormente tanto no comportamento das curvas de potência elétrica quanto de eficiência energética. Em ambas as condições de carga, o motor MXUS apresentou maior consumo de potência elétrica e menor eficiência em comparação a máquina OutRider.

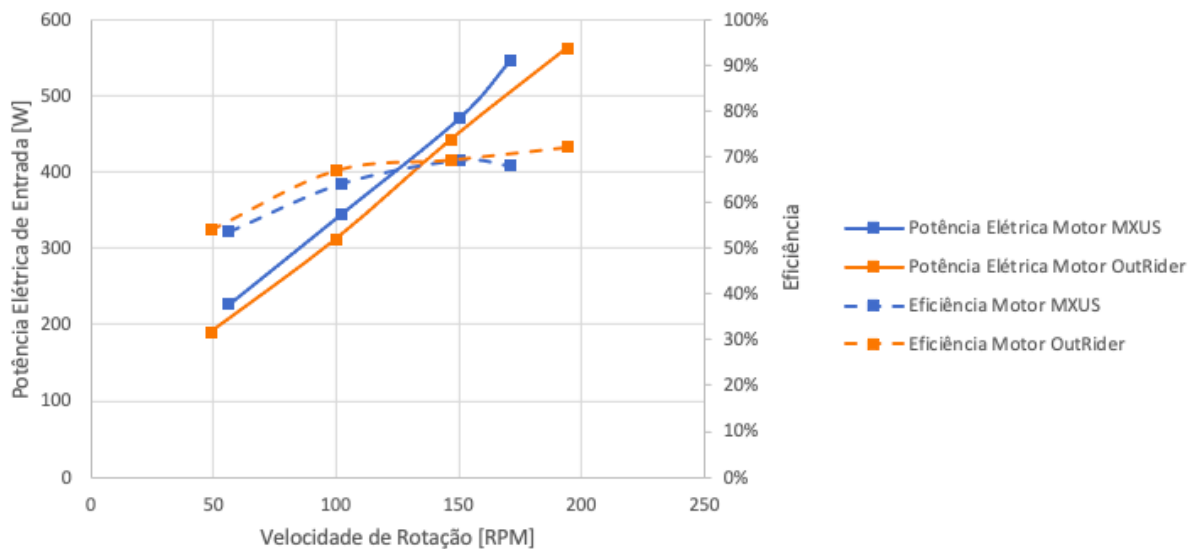
As Figuras 40, 41 e ?? reúnem os dados obtidos de eficiência dos motores em cada condição de carga, já apresentados nas Figuras de 36 a 39, mas agora com o objetivo de possibilitar uma comparação da influência do aumento do torque requerido pelos motores no rendimento energético destes. As curvas de 2 kgf e 3 kgf foram mostradas separadas das de 4 kgf e 5 kgf apenas para facilitar a leitura dos dados, visto que as curvas muitas vezes se sobrepõem.

Figura 37 – Potência elétrica de entrada e eficiência com 3 kgf.



Fonte: A Autora (2021)

Figura 38 – Potência elétrica de entrada e eficiência com 4 kgf.

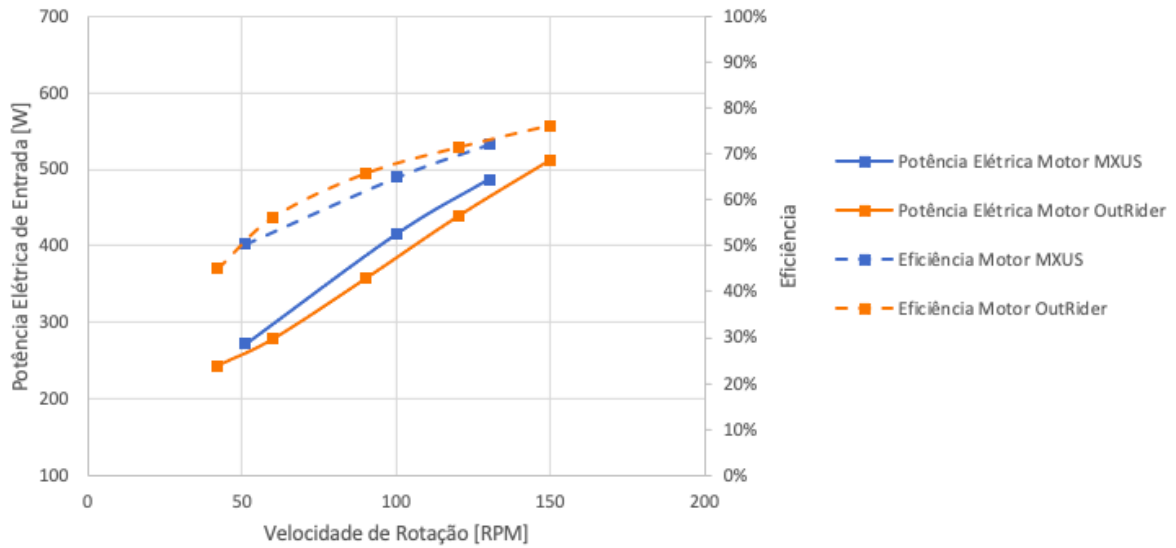


Fonte: A Autora (2021)

A Figura 40 evidencia que, para as cargas mais baixas, de 2 kgf e 3 kgf, o motor 1 apresentou melhor rendimento em relação ao motor 2, sendo esta diferença entre 4% e 10%, dependendo da velocidade de funcionamento. Observa-se também, que o aumento da força aplicada de 2 kgf para 3 kgf culminou em uma redução dos níveis de rendimento de ambos os motores, entre 7% e 15%, de modo que, o motor OutRider com 2 kgf ainda se mostrou mais eficiente do que o motor MXUS com 3 kgf.

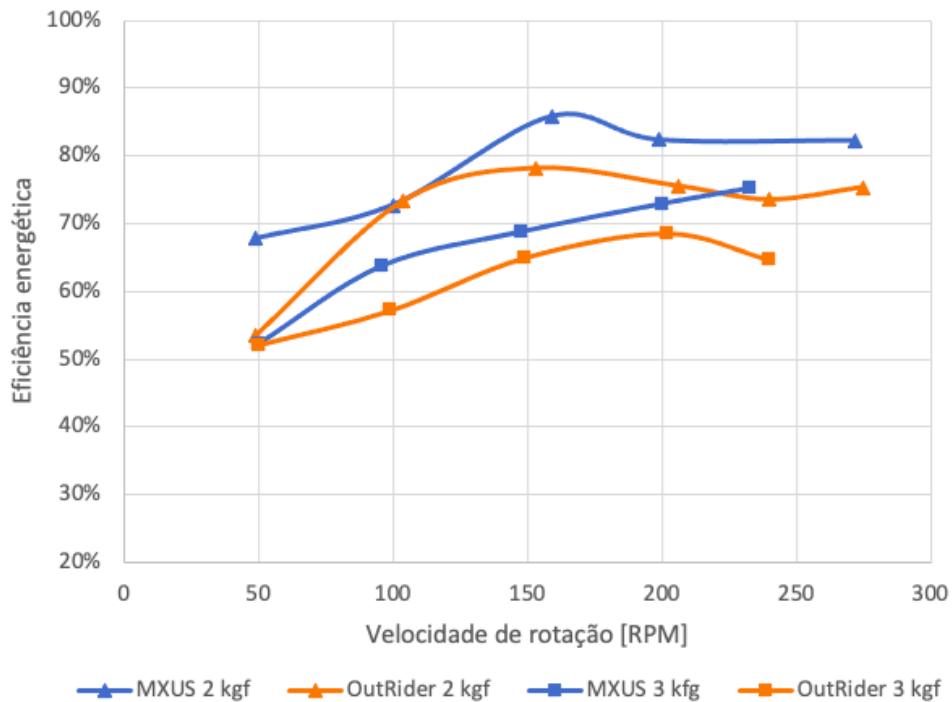
Entretanto, o comportamento descrito não se repete com as cargas de 4 kgf e

Figura 39 – Potência elétrica de entrada e eficiência com 5 kgf.



Fonte: A Autora (2021)

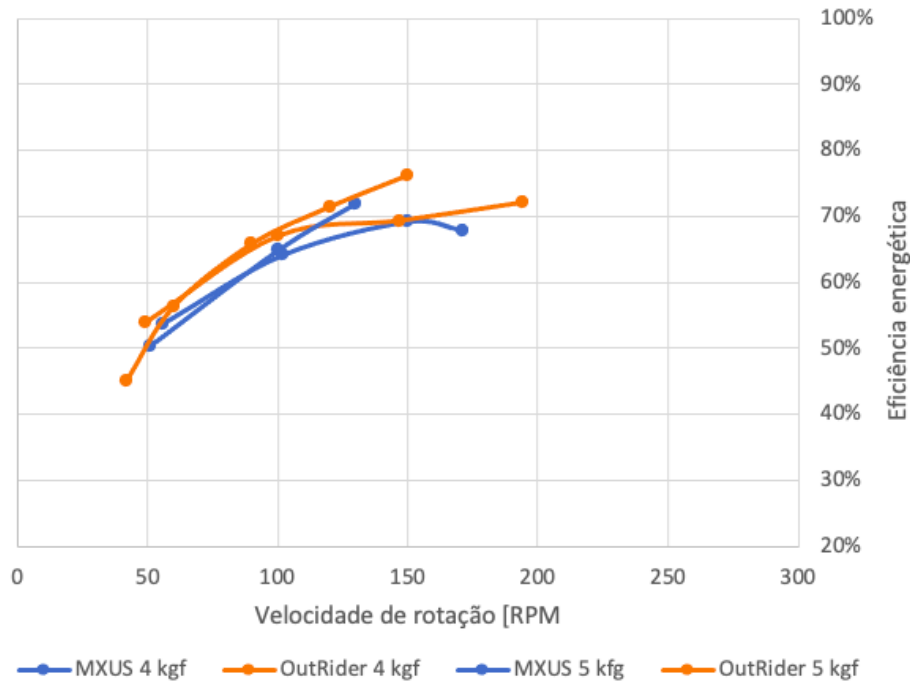
Figura 40 – Eficiência energética dos motores com 2 kgf e 3 kgf.



Fonte: A Autora (2021)

5 kgf (Figura 41), nas quais não apenas houve uma inversão nos resultados obtidos e o motor 2 apresentou maiores níveis de eficiência em relação ao motor 1 na mesma carga, como também verificou-se que a máquina OutRider, sob ação do sistema acionado com 5 kgf, se apresentou mais eficiente que a MXUS, com 4kgf e 5 kgf, em quase todas

Figura 41 – Eficiência energética dos motores com 4 kgf e 5 kgf.



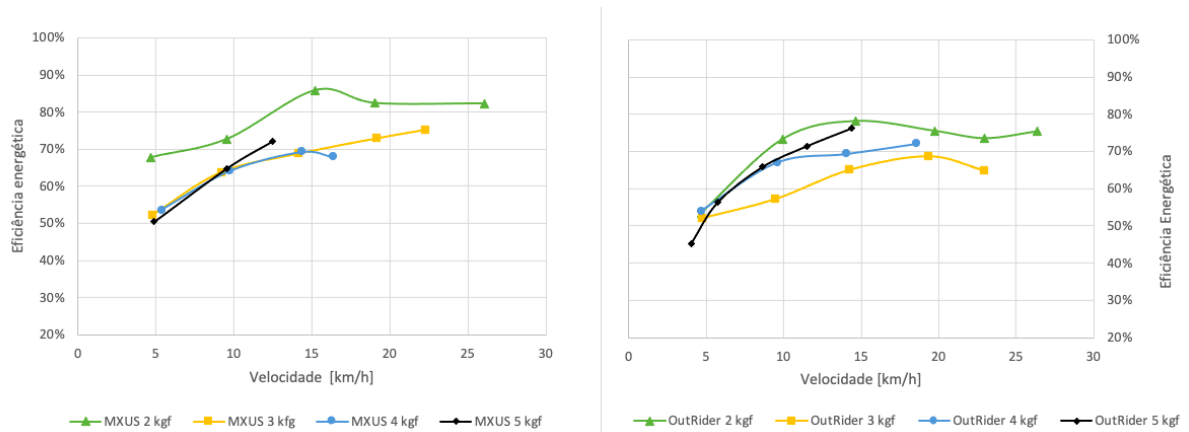
Fonte: A Autora (2021)

as velocidades da faixa testada.

Outra maneira de observar os dados adquiridos a respeito das eficiências é apresentada na Figura 42, que traz os dados de eficiência por velocidade linear desenvolvida pelo pneu utilizado pela equipe Eficem em km/h de acordo com a rotação do motor. Nesta, é possível observar que ambos os motores apresentaram os melhores resultados de rendimento com a aplicação da força mais baixa, de 2 kgf, no sistema, e em velocidades próximas a 14,4 RPM (aproximadamente 150 RPM). Na faixa de velocidades de 4,8 a 9,6 km/h (50 a 100 RPM), o motor MXUS apresentou níveis de eficiência muito similares com as cargas de 3, 4 e 5 kgf; comportamento esse que se repetiu no OutRider, exceto para a força de 3 kgf, com a qual essa máquina apresentou eficiência entre 5 e 10% menor do que com demais carregamentos.

Em velocidades de 9,6 a 14,4 km/h (100 a 150 RPM), os valores de rendimento se mantiveram próximos nas cargas de 3 e 4 kgf, já carga de 5 kgf refletiu em uma melhora no rendimento do motor 1. O aumento da eficiência com a utilização da carga de 5 kgf, em relação as forças de 3 e 4 kgf, também foi observado na máquina 1, os níveis de eficiência com a força de 3 kgf aplicada se mantiveram inferiores em relação as demais. Nas velocidades superiores a 14,4 km/h (150 RPM), o motor MXUS manteve crescimento linear em sua eficiência com a força de 3 kgf, e apresentou uma leve redução no rendimento com a carga de 4 kgf. Já na máquina OutRider, observou-se crescimento linear da eficiência com a carga de 4 kgf até sua velocidade máxima

Figura 42 – Eficiência energética por velocidade em km/h.



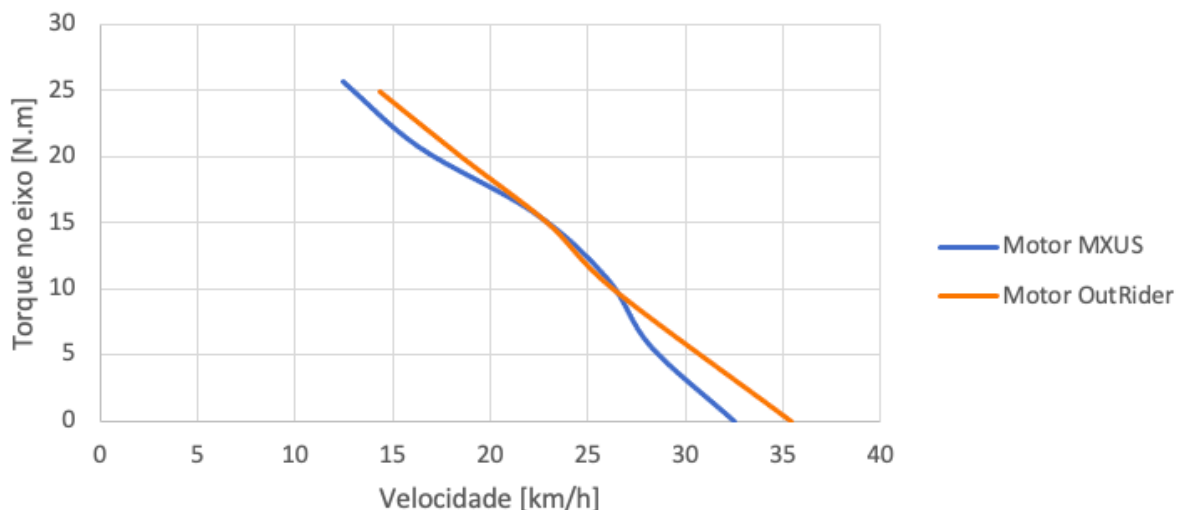
Fonte: A Autora (2021)

atingida, enquanto com 3 kgf a eficiência apresentou ponto máximo em 19,1 km/h (200 RPM) e em seguida teve uma queda.

4.3.4 Torque máximo atingido

A Figura 43 apresenta os valores máximos de torque que se atingiu pela velocidade linear do pneu acoplado ao motor em km/h. Esses valores foram obtidos a partir da velocidade de rotação máxima que o motor alcançou em cada condição de carga aplicada.

Figura 43 – Torque máximo atingido.



Fonte: A Autora (2021)

Observa-se que, para velocidades entre 21 km/h e 27 km/h, aproximadamente, ambas as máquinas foram capazes de realizar torques similares. Para o restante da

faixa de velocidades, o motor OutRider demonstrou chegar a torques maiores que o motor MXUS.

Conforme levantado na Seção 4.3.2, é possível que a tensão nominal do motor OutRider seja na verdade de 24 V, e por isso este estaria apresentando resultados acima do esperado. Do mesmo modo, existe a possibilidade de que a tensão nominal do motor MXUS seja de 48 V, fazendo com este tenha entregue a níveis inferiores de torque e potência em relação ao que era expectável.

Buscando submeter os motores a maiores níveis de torque e averiguar a velocidade máxima que seria atingida, foram realizadas tentativas de aumentar a carga para 6 kgf. Entretanto, devido a estrutura física utilizada, não foi possível estabilizar o sistema para a condução desse teste, de modo que optou-se por utilizar a carga máxima de 5 kgf.

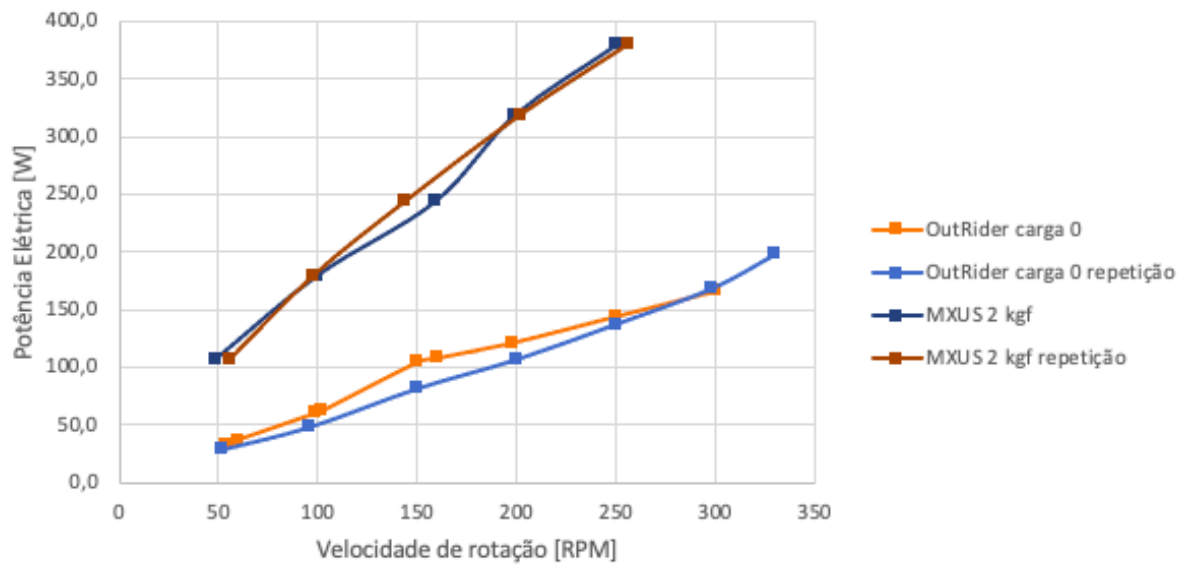
4.3.5 Repetibilidade dos testes

Buscando averiguar a possibilidade de reprodução dos testes com o sistema construído, foi realizado um teste extra com cada motor. Optou-se por não conduzir a repetição do teste com ambos os motores na mesma condição de carga, com a finalidade de verificar a repetibilidade do experimento em situações distintas.

O motor 1 foi imposto novamente ao teste de 2 kgf. Já o experimento adicional com o Motor 2 foi conduzido com carga 0, sem contato entre o elemento de atrito e o rolete. O sistema foi desmontando e em seguida a fixação de cada motor foi feita novamente buscando reproduzir as mesmas condições de pré carga obtidas nos testes apresentados anteriormente. A Figura 44 apresenta os resultados obtidos na repetição dos testes, comparados ao que foi encontrado anteriormente na referente condição de carga para o respectivo motor.

Apesar dos dados apresentados não possibilitarem uma análise estatística mais complexa, verifica-se que o sistema foi capaz de oferecer valores similares ao que havia sido adquirido anteriormente, servindo de base para validação dos resultados expostos no decorrer deste trabalho.

Figura 44 – Repetibilidade dos testes.



Fonte: A Autora (2021)

5 CONCLUSÕES

Contrariamente ao que se esperava, com base nas informações existentes previamente acerca dos motores testados, o motor OutRider não somente foi capaz de fornecer níveis superiores de torque e potência em relação ao que era indicado pelo fornecedor, mas também à máquina MXUS.

Tais comportamento sugerem a possibilidade que as tensões nominais do motor MXUS e OutRider sejam, respectivamente, 48 V e 24V, fazendo com que o primeiro tenha entregue resultados inferiores ao que deveria fornecer, e o segundo tenha entregue um desempenho superior aos seus valores nominais. Contudo, é possível afirmar que, com ambos os motores funcionando com tensão de entrada próxima de 36 V, o motor OutRider apresentou melhores resultados no que se refere a torque disponível no eixo.

Em relação as eficiências energéticas obtidas, o motor MXUS se mostrou mais eficiente que o OutRider quando aplicado a cargas mais baixas (torque entre 10 e 15 N.m). Já para maiores níveis de exigência de torque (entre 20 e 25 N.m), o motor 2 ultrapassou a eficiência obtida no motor 2. Assim, para níveis de carga leve a moderada, é indicada a utilização do motor MXUS, enquanto para cargas mais intensas, recomenda-se a aplicação do motor OutRider.

Ambas as máquinas apresentaram maior nível de eficiência quando submetidos a menor carga, de 2 kg. Entretanto, com 4 kgf e 5 kgf, os níveis de eficiência encontrados apresentaram pouca variação, principalmente em rotações inferiores a 100 RPM

Entretanto, esse trabalho não deve ser considerado como base para os valores absolutos de torque, potência e eficiência dos motores, devido ao elevado nível de imprecisão dos testes realizados, que contém diversas simplificações e perdas desprezadas, tanto elétricas como mecânicas.

Ainda assim, como o objetivo era realizar uma comparação entre as máquinas, os resultados obtidos foram considerados razoáveis, levando em conta a falta de equipamentos para experimentos e medições mais precisas.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a condução de testes utilizando aparatos como: fonte de alimentação de 36V com capacidade de fornecer correntes de até 20 A; equipamentos de medição da corrente e tensão de maior precisão, sejam eles multímetros ou sensores; fixar o sistema construído sobre uma bancada plana e aumentar a rigidez da alavanca buscando diminuir as vibrações do conjunto; utilizar elemento de atrito com maior coeficiente de atrito, permitindo simular maiores torques no motor.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, L. E. N. d. Automatização de um dinamômetro hidráulico para ensaios de motores de combustão interna. 2015.
- ANTUNES, P. I. T. d. C. **Medição de posição de rotor em mancal magnético através de sensor Hall**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2012.
- ARDUINO E CIA. **Como medir a rotação de um motor com o sensor de velocidade LM393**. 2016. Disponível em: <https://www.arduinoecia.com.br/sensor-de-velocidade-lm393-arduino/>. Acesso em: 21 nov. 2020.
- BARAN, R. A introdução de veículos elétricos no brasil: Avaliação do impacto no consumo de gasolina e eletricidade. 2012.
- BARATIERI, C. L. et al. Controle de velocidade sensorless de motores brushless dc submetidos a variações periódicas de carga. Universidade Federal de Santa Maria, 2011.
- BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Protocolo de Quioto**. 20—a. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/protocolo-de-quioto.html>. Acesso em: 07 nov. 2020.
- BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Acordo de Paris**. 20—b. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html>. Acesso em: 07 nov. 2020.
- CAETANO, M. J. L. **Propriedades Tribológicas**. 201—. Disponível em: <https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/propriedades-das-borrachas-vulcanizadas/propriedades-tribologicas/>. Acesso em: 10 abr. 2021.
- CASTRO, B. H. R. d.; FERREIRA, T. T. Veículos elétricos: aspectos básicos, perspectivas e oportunidades. **BNDES Setorial**, n. 32, set. 2010, p. 267-310, Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2010.
- CHANGZHOU MXUS IMPEXP. **Motor XF15F**. 2016. Disponível em: <http://www.mxusebikekit.com/proshow.aspx?cateid=67&productsid=213>. Acesso em: 20 nov. 2020.
- CORRÊA, F. C. et al. Desenvolvimento e análise de estratégias de gerenciamento de potência em veículo elétrico híbrido de configuração paralela. [sn], 2013.
- DREHER, J. R.; ZAVASKI, F. Controlador de velocidade micro controlado para veículos elétricos com motor bldc. In: **Seminário de Pesquisa, Extensão e Inovação do IFSC-2013**. [S.l.: s.n.], 2013.
- FEIER, I.; WAY, J.; REDFIELD, R. Bicycle disc brake thermal performance: Combining dynamometer tests, bicycle experiments, and modeling. In: **Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings**. [S.l.: s.n.], 2020. v. 49, n. 1, p. 100.

FULLER, D. D. **Coefficientes of Friction**. 19—. Disponível em: <https://web.mit.edu/8.13/8.13c/references-fall/aip/aip-handbook-section2d.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2021.

GRIN TECHNOLOGIES. **Motor Outrider**. 20—. Disponível em: <https://ebikes.ca/moutrider-fst.html>. Acesso em: 20 nov. 2020.

ICEL MANAUS. **MANUAL DE INSTRUÇÕES DO MULTÍMETRO DIGITAL MODELO MD-1001**. 2019. Disponível em: <http://www.icel-manaus.com.br/manual/MD-1001\%20manual%20de\%20instru~oes.pdf>. Acesso em: 8 abr. 2021.

IPC COMERCIAL. **Rolete de Aço**. 2021. Disponível em: <https://www.ipccomercial.com.br/rolete-de-aco/rolete-de-aco-50/rolete-de-aco-diametro-50-8-mm-comprimento-util-de-100-mm--p>. Acesso em: 13 abr. 2021.

JULIANI, A. D. P. **Análise do campo magnético de um motor de ímã permanente no rotor utilizando o método dos elementos finitos**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2007.

KOLLROSS, A. et al. Construção de dinamômetro para medição de torque e potência de mci de pequeno porte. 2016.

MACROTRENDS. **Crude Oil Prices - 70 Year Historical Chart**. 2020. Disponível em: <https://www.macrotrends.net/1369/crude-oil-price-history-chart>. Acesso em: 04 nov. 2020.

MARTINS, J. **Motores de Combustão Interna-4ª edição Revista e Aumentada**. [S.l.: s.n.], 2006.

MAYER, R.; PÉRES, A.; OLIVEIRA, S. V. G. Conversor cc-cc multifásico bidirecional em corrente não isolado aplicado a sistemas elétricos de tração de veículos elétricos e híbridos. **Eletrônica de Potência-SOBRAEP**, v. 20, n. 3, p. 311–321, 2015.

MINIPA. **Digital Multimeter ET-2082C Instruction Manual**. 2009. Disponível em: <https://portal.if.usp.br/labdid/sites/portal.if.usp.br/labdid/files/ET-2082C\%20\%28Manual\%29.pdf>. Acesso em: 8 abr. 2021.

NERY, E. **Tesla Model 3 é o elétrico mais vendido no mundo**. *Jornal do Carro*, 2020. Disponível em: <https://jornaldocarro.estadao.com.br/carros/tesla-model-3-e-o-eletrico-mais-vendido-no-mundo/>. Acesso em: 24 out. 2020.

MATTOS PEREIRA, A. de. **Sistema de tração de um ônibus elétrico híbrido com pilhas a combustível e baterias**. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2007.

REIS, F. d. **Como funciona um Potenciômetro**. 2018. Disponível em: <http://www.bosontreinamentos.com.br/eletronica/curso-de-eletronica/como-funciona-um-potenciometro/>. Acesso em: 26 mar. 2021.

RESNICK, R.; HALLIDAY, D.; WALKER, J. **Fundamentos De Física - Volume 1 - Mecânica**. LTC, 2016. ISBN 9788521630357. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=KG9PvgAAGAAJ>.

RODRIGUES, J. A. C. **Armazenamento de energia e uso de supercondensadores em sistema de mobilidade eléctrica**. Tese (Doutorado) — Instituto Politécnico de Viseu. Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, 2013.

RODRIGUES, J. C. B. **Dimensionamento do sistema de tração para veículos eléctricos-tração dianteira in-wheel**. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

ROITMAN, T. Evitar, mudar e melhorar: estratégias para aumentar a eficiência energética dos transportes. 2018.

SÁNCHEZ, F. Z. Eficiência energética de veículos eléctricos híbridos em série. **Rio de Janeiro: Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-RIO**, 2012.

SHELL BRASIL. **Shell Eco-marathon Americas**. 2020. Disponível em: <https://www.shell.com.br/energia-e-inovacao/ecomarathon/shell-eco-marathon-americas.html>. Acesso em: 07 nov. 2020.

SILVA, P. C. G. d. et al. Análise de perdas do motor de indução submetido ao ensaio de dupla frequência. 2013.

SILVEIRA, C. B. **Motor CC: Saiba como Funciona e de que forma Especificar**. 2017. Disponível em: <https://www.citisystems.com.br/motor-cc/>. Acesso em: 12 nov. 2020.

TANAKA, C. N. Metodologia de dimensionamento do sistema de tração para veículos eléctricos. **Universidade de São Paulo**, p. 49–50, 2013.

TARGA, M. S.; SILVA, M. C.; CEZAR, V. R. S. Uso de microcontrolador arduino para a determinação da permeabilidade do solo. **Revista Técnica Ciências Ambientais**, v. 1, n. 1, p. 1–14, 2019.

TRINDADE, I. M. **Modelagem, controle e otimização de consumo de combustível para um veículo híbrido eléctrico série-paralelo**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2016.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **U.S. HEV Sales by Model**. 2020. Disponível em: <https://afdc.energy.gov/data/10301>. Acesso em: 20 out. 2020.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **U.S. Plug-in Electric Vehicle Sales by Model**. 2020. Disponível em: <https://afdc.energy.gov/data/10567>. Acesso em: 20 out. 2020.

XU, W. et al. Survey on electrical machines in electrical vehicles. In: IEEE. **2009 International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices**. [S.l.], 2009. p. 167–170.

APÊNDICE A - VEÍCULOS ELÉTRICOS HÍBRIDOS

Os veículos elétricos híbridos utilizam, além de um ou mais motores elétricos, um motor a combustão interna para tração. Segundo Baran (2012), a combinação entre o MCI e o motor elétrico é responsável pela maior parte da eficiência energética dos híbridos. Os motores a gasolina apresentam eficiência de 5% a 10% em baixas rotações, mas em altas rotações podem chegar a eficiência em torno de 28%, já os motores elétricos possuem curva de eficiência aproximadamente constante até chegarem a alta rotação. Como no meio urbano os automóveis não costumam trabalhar em altas rotações, ao combinar o MCI com o motor elétrico, o primeiro pode trabalhar com menor variação em sua operação, permitindo níveis mais altos de eficiência (BARAN, 2012; CASTRO; FERREIRA, 2010).

Os veículos híbridos permitem combinar eficiência energética, diminuição das emissões de poluentes e autonomia do veículo, e podem ser separados de acordo com o grau de hibridização (RODRIGUES, 2013). O primeiro nível de hibridização é o *micro hybrid*, que consiste no sistema *StopStart*, no qual o motor de arranque funciona também como um alternador, e o motor a combustão é desligado quando o veículo para, e reiniciado quando o motorista aciona o pedal do acelerador. *Mild hybrid* é o segundo nível de hibridização, no qual, além do sistema *StopStart*, o motor de arranque irá auxiliar o MCI no arranque, quando existe maior inércia, melhorando o desempenho e melhorando a eficiência de energia. *Full hybrid* é nível mais conhecido e utilizado, onde a tração pode ser proveniente do motor elétrico e do motor a combustão, funcionando separadamente ou em conjunto. *Hybrid rechargeable* é o híbrido que pode ser carregado diretamente através da rede elétrica, também chamado de híbrido *plug-in* (RODRIGUES, 2013).

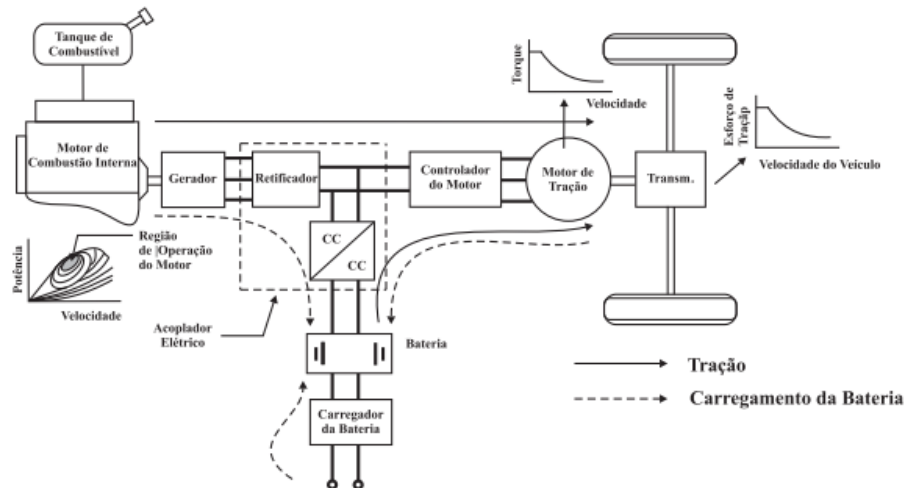
Os VEHs *ful hybrid e rechargeable* podem apresentar três arquiteturas principais: série, paralelo e série-paralelo ou mista, que diferem entre si no arranjo dos componentes do sistema (CASTRO; FERREIRA, 2010; MAYER; PÉRES; OLIVEIRA, 2015).

.1 ARQUITETURA EM SÉRIE

Nos híbridos em série, a tração do veículo é toda proveniente de um ou mais motores elétricos, enquanto o motor a combustão é usado para geração de energia elétrica. Essa arquitetura, representada na Figura 45, possui um tanque de combustível que armazena a energia química que irá alimentar o MCI. O motor a combustão por sua vez aciona o gerador de energia elétrica. A energia elétrica produzida pode então ser armazenada nas baterias, ou alimentar diretamente o motor elétrico. Em uma situação

onde seja requerida maior potência de aceleração, a bateria e o MCI irão alimentar o motor elétrico em simultaneamente (SÁNCHEZ, 2012).

Figura 45 – Arquitetura em série.



Fonte: Sánchez (2012, p. 33)

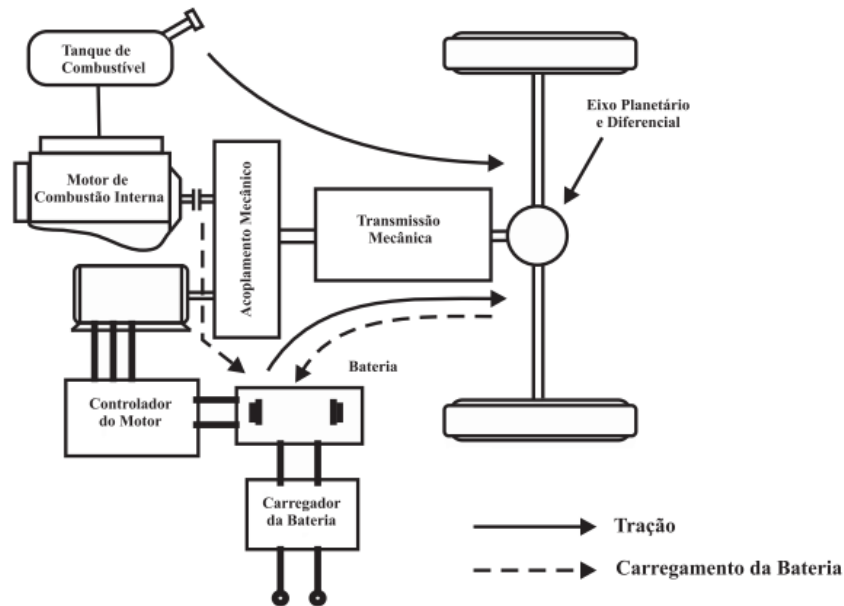
Rodrigues (2013) afirma que o veículo híbrido em série irá operar como um veículo elétrico puro quando as baterias estiverem totalmente carregadas, e abaixo de um determinado estado de carga, ou quando for requerida maior potência de aceleração, o MCI irá entrar em operação. Se o veículo estiver utilizando potência abaixo do que o MCI estiver gerando, o excesso será aproveitado para o recarregamento das baterias.

.2 ARQUITETURA EM PARALELO

Na arquitetura em paralelo, o veículo pode ser tracionado apenas pelo motor elétrico, apenas pelo motor a combustão interna, ou então pelos dois simultaneamente atuando em conjunto através de acoplamentos mecânicos. É possível que o fluxo de potência seja invertido, de modo que o motor elétrico opere como um gerador, utilizando sistema de frenagem regenerativa (SÁNCHEZ, 2012; MAYER; PÉRES; OLIVEIRA, 2015). A representação deste tipo de configuração é apresentada na Figura 46.

Rodrigues (2013) apresenta como vantagens dessa arquitetura, em relação a opção em série, ambos motores fornecerem tração às rodas, aumentando a potência final, e apresenta ganhos em termo de massa e custo, por não possuir um gerador. Por outro lado, o acoplamento mecânico existente entre o motor a combustão e a transmissão não permite que o MCI trabalhe em regime de rendimento ótimo, além de maior complexidade na estrutura.

Figura 46 – Arquitetura em paralelo.



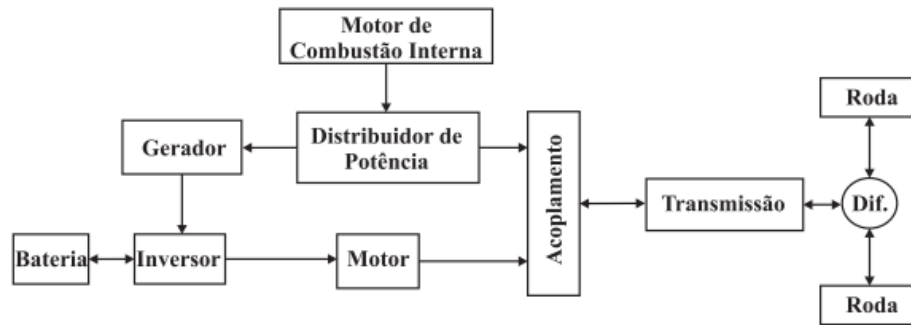
Fonte: Sánchez (2012, p. 34)

.3 ARQUITETURA EM SÉRIE-PARALELO

Também chamada de arquitetura mista, combina características e vantagens da arquitetura série com a paralela, de modo que o motor a combustão está ligado tanto ao eixo de transmissão, quanto ao gerador. Entretanto, isso também torna essa opção mais cara e complexa (RODRIGUES, 2013).

Na arquitetura série-paralelo, de acordo com a velocidade e outros parâmetros, o sistema poderá funcionar como série ou paralelo, ou com os dois sistemas de forma complementar, buscando obter o máximo de autonomia e rendimento (MAYER; PÉRES; OLIVEIRA, 2015; TRINDADE, 2016). Nesses sistemas, um dispositivo de distribuição de potência de potência irá alocar a potência do MCI entre as rodas e o gerador, dependendo das condições de condução, de modo que é possível que o MCI seja utilizado para carregar a bateria e conservar a estrutura em paralelo, como mostrado na Figura 47 (SÁNCHEZ, 2012).

Figura 47 – Arquitetura em Série-Paralelo.



Fonte: Sánchez (2012, p. 35)

APÊNDICE B - MEDIÇÕES REALIZADAS NOS TESTES COM O MOTOR MXUS

Nas Tabelas 10 a 16 são apresentados os valores das medições de tensão e corrente realizados nos experimentos com o motor MXUS.

Tabela 10 – Tensão e corrente teste em vazio motor MXUS.

ω [RPM]	ω [rad/s]	U_{minima} [V]	U_{maxima} [V]	i_{minima} [A]	i_{maxima} [A]
50	5,24	39,4	39,4	0,17	0,17
102	10,68	39,4	39,3	0,32	0,32
154	16,13	39,3	39,3	0,48	0,49
204	21,36	39,2	39,2	0,67	0,67
247	25,87	39,1	39,1	0,86	0,86
295	30,89	38,9	38,9	1,1	1,12
340	35,60	38,8	38,8	1,26	1,28

Fonte: A Autora (2021).

Tabela 11 – Tensão e corrente teste carga 0 motor MXUS.

ω [RPM]	ω [rad/s]	U_{minima} [V]	U_{maxima} [V]	i_{minima} [A]	i_{maxima} [A]
50	5,24	39,2	39,1	0,261	0,307
102	10,68	38,9	38,9	0,539	0,546
151	15,81	38,6	38,6	0,818	0,832
200	20,94	38,3	38,2	1,089	1,114
251	26,28	37,8	37,7	1,39	1,5
300	31,42	38,5	38,5	1,773	1,821
327	34,24	38,2	38,2	2,098	2,198

Fonte: A Autora (2021).

Tabela 12 – Tensão e corrente teste carga 2 kgf motor MXUS.

ω [RPM]	ω [rad/s]	U_{minima} [V]	U_{maxima} [V]	i_{minima} [A]	i_{maxima} [A]
49	5,13	36,9	37	2,16	2,25
100	10,47	36,2	36,3	4,19	4,36
159	16,65	36	35,7	5,73	5,92
199	20,84	35,2	35,3	7,63	7,82
250	26,18	34	34,1	11,3	11,9
272	28,48	35,1	35	10,35	10,92

Fonte: A Autora (2021).

Tabela 13 – Tensão e corrente repetição teste carga 2 kgf motor MXUS.

ω [RPM]	ω [rad/s]	U_{minima} [V]	U_{maxima} [V]	i_{minima} [A]	i_{maxima} [A]
56	5,86	36,6	36,6	2,91	2,94
98	10,26	36,1	36	4,87	5,1
144	15,08	35,3	35,4	6,77	7,03
202	21,15	34,3	34,3	9,2	9,44
256	26,81	33,9	34	11,16	11,24

Fonte: A Autora (2021).

Tabela 14 – Tensão e corrente teste carga 3 kgf motor MXUS.

ω [RPM]	ω [rad/s]	U_{minima} [V]	U_{maxima} [V]	i_{minima} [A]	i_{maxima} [A]
50	5,24	36,1	36,2	4,18	4,55
96	10,05	35,2	35,3	6,83	7,25
148	15,50	34,2	34,2	10,21	10,53
200	20,94	33,5	33,6	13,1	13,9
233	24,40	33,1	33,2	15,19	15,61

Fonte: A Autora (2021).

Tabela 15 – Tensão e corrente teste carga 4 kgf motor MXUS.

ω [RPM]	ω [rad/s]	U_{minima} [V]	U_{maxima} [V]	i_{minima} [A]	i_{maxima} [A]
56	5,86	35,3	35,3	6,3	6,53
102	10,68	34,1	34,2	9,99	10,21
150	15,71	33	33	14,1	14,42
171	17,91	32,5	32,6	16,51	17,06

Fonte: A Autora (2021).

Tabela 16 – Tensão e corrente teste carga 5 kgf motor MXUS.

ω [RPM]	ω [rad/s]	U_{minima} [V]	U_{maxima} [V]	i_{minima} [A]	i_{maxima} [A]
51	5,34	35,7	35,6	7,47	7,81
100	10,47	33,2	33,4	12,4	12,55
130	13,61	31,6	31,6	15,19	15,57

Fonte: A Autora (2021).

APÊNDICE C - MEDIÇÕES REALIZADAS NOS TESTES COM O MOTOR OUTRIDER

Nas Tabelas 17 a 23 são apresentados os valores das medições de tensão e corrente realizados nos experimentos com o motor OutRider.

Tabela 17 – Tensão e corrente teste em vazio motor OutRider.

ω [RPM]	ω [rad/s]	U_{minima} [V]	U_{maxima} [V]	i_{minima} [A]	i_{maxima} [A]
54	5,65	38,6	38,6	0,12	0,12
99	10,37	38,6	38,6	0,17	0,2
160	16,76	38,5	38,5	0,39	0,43
250	26,18	38,4	38,4	0,67	0,68
300	31,42	38,4	38,4	0,84	0,88
350	36,65	38,3	38,4	1,03	1,07
370	38,75	38,3	38,3	1,18	1,2

Fonte: A Autora (2021).

Tabela 18 – Tensão e corrente teste carga 0 motor OutRider.

ω [RPM]	ω [rad/s]	U_{minima} [V]	U_{maxima} [V]	i_{minima} [A]	i_{maxima} [A]
60	6,283185307	38,4	38,5	0,81	1,11
102	10,68141502	38,3	38,2	1,42	1,82
150	15,70796327	37,9	37,9	2,53	2,98
198	20,73451151	37,8	37,7	3,09	3,34
250	26,17993878	37,2	37,2	3,91	3,85
300	31,41592654	34,92	35,3	7,026	5,788

Fonte: A Autora (2021).

Tabela 19 – Tensão e corrente repetição teste carga 0 motor OutRider.

ω [RPM]	ω [rad/s]	U_{minima} [V]	U_{maxima} [V]	i_{minima} [A]	i_{maxima} [A]
52	5,45	38,7	38,7	0,7	0,79
96	10,05	38,5	38,6	1,21	1,3
150	15,71	38,2	38,3	2,12	2,15
200	20,94	37,9	37,9	2,78	2,86
250	26,18	37,6	37,6	3,6	3,71
298	31,21	37,3	37,2	4,5	4,53
330	34,56	37,1	37,2	5,28	5,37

Fonte: A Autora (2021).

Tabela 20 – Tensão e corrente teste carga 2 kgf motor OutRider.

ω [RPM]	ω [rad/s]	U_{minima} [V]	U_{maxima} [V]	i_{minima} [A]	i_{maxima} [A]
49	5,131268001	36,6	36,7	2,93	2,29
104	10,89085453	35,9	35,8	3,86	4,4
153	16,02212253	35,3	35,3	5,35	6,23
206	21,57226955	34,6	34,6	7,99	8,47
240	25,13274123	34,2	34,1	9,68	10,28
275	28,79793266	34,3	34,2	10,96	11,29

Fonte: A Autora (2021).

Tabela 21 – Tensão e corrente teste carga 3 kgf motor OutRider.

ω [RPM]	ω [rad/s]	U_{minima} [V]	U_{maxima} [V]	i_{minima} [A]	i_{maxima} [A]
50	5,24	36,4	36,3	3,81	4,45
99	10,37	35,3	35,3	7,37	7,98
149	15,60	34,2	34,2	10,26	10,73
202	21,15	33	33	13,61	14,33
240	25,13	32,4	32,5	17,13	18,65

Fonte: A Autora (2021).

Tabela 22 – Tensão e corrente teste carga 4 kgf motor OutRider.

ω [RPM]	ω [rad/s]	U_{minima} [V]	U_{maxima} [V]	i_{minima} [A]	i_{maxima} [A]
49	5,13	35,5	35,4	4,98	5,71
100	10,47	34,1	34,2	8,9	9,33
147	15,39	32,7	32,8	13,13	13,88
194	20,32	31,9	31,9	17,31	17,89

Fonte: A Autora (2021).

Tabela 23 – Tensão e corrente teste carga 5 kgf motor OutRider.

ω [RPM]	ω [rad/s]	U_{minima} [V]	U_{maxima} [V]	i_{minima} [A]	i_{maxima} [A]
42	4,398229715	37,2	37,3	6,16	6,89
60	6,283185307	36,4	36,3	7,48	7,82
90	9,424777961	35,5	35,4	9,86	10,27
120	12,56637061	34,1	34,2	12,58	13,09
160	16,75516082	32,4	32,4	16,14	16,98
188	19,68731396	31,7	31,6	17,18	18,68

Fonte: A Autora (2021).

ANEXO A - PROGRAMA PARA MEDIÇÃO DE VELOCIDADES COM SENSOR E PLACA ARDUINO.

```
const byte pino_contador = 11;
const byte pino_contador_2 = 7;
unsigned int RPM = 0;
unsigned int RPM2 = 0;
unsigned long t1;
unsigned long t2;
unsigned long t3;
unsigned long t4;
unsigned long tempo;
unsigned long tempo2;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(pino_contador, INPUT);
  pinMode(pino_contador_2, INPUT);
}
void loop() {
  if(digitalRead(pino_contador))
  {
    readFirst();
    while(digitalRead(pino_contador)){
      if
      {
        readSecond(); while(digitalRead(pino_contador_2))
        {
          delay(1);
        }
      }else{
        delay(1);
      }
    }
  }
  if(digitalRead(pino_contador_2))
  {
    readSecond();
```

```
while(digitalRead(pino_contador_2)){
  if(digitalRead(pino_contador))
  {
    readFirst();
    while(digitalRead(pino_contador))
    {
      delay(1);
    }
  }else{
    delay(1);
  }
}
}
}
}

void readFirst()
{
  if (t1 == 0){
    t1 = millis();
  } else {
    t2 = millis();
    tempo = t2 - t1;
    t1 = t2;
    //Serial.print("tempo..: ");
    //Serial.println(tempo, DEC);
    RPM = 60000 / tempo;
    Serial.print("RPM..: ");
    Serial.println(RPM, DEC);
  }
}

void readSecond()
{
  if (t3 == 0){
    t3 = millis();
  } else {
    t4 = millis();
    tempo2 = t4 - t3;
    t3 = t4;
    //Serial.print("tempo..: ");
    //Serial.println(tempo, DEC);
    RPM2 = 60000 / tempo2;
```

```
Serial.print("RPM2..: ");  
Serial.println(RPM2, DEC);  
}  
}
```