

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE SANTA CATARINA - CAMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

DJULIAN ASSUNÇÃO

POWERTRAIN DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

**Um estudo prático utilizando a bancada de
treinamentos do BYD Qin EV**

FLORIANÓPOLIS, 2025.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE SANTA CATARINA - CAMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

DJULIAN ASSUNÇÃO

POWERTRAIN DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

**Um estudo prático utilizando a bancada de
treinamentos do BYD Qin EV**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Santa Catarina como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Engenheiro(a) Eletricista.

Orientador:
Prof. Adriano de Andrade Bresolin, D.Eng.

FLORIANÓPOLIS, 2025.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Assunção, Djulian
POWERTRAIN DE VEÍCULOS ELÉTRICOS: um estudo prático
utilizando a bancada de treinamentos do BYD Qin EV / Djulian
Assunção; orientação de Adriano de Andrade Bresolin.
- Florianópolis, SC, 2025.
80 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado
em Engenharia Elétrica. Departamento Acadêmico
de Eletrotécnica.
Inclui Referências.

1. BYD Qin EV. 2. Híbridos. 3. Mobilidade Urbana.
4. Veículos Elétricos. I. Bresolin, Adriano de Andrade.
II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. POWERTRAIN
DE VEÍCULOS ELÉTRICOS.

**POWERTRAIN DE VEÍCULOS ELÉTRICOS
UM ESTUDO PRÁTICO UTILIZANDO A BANCADA DE
TREINAMENTOS DO BYD QIN EV**

DJULIAN ASSUNÇÃO

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheira Eletricista e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 21 de fevereiro de 2025

Banca Examinadora:



Prof. Adriano de Andrade Bresolin, Dr. Eng.



Daniel Gódy Costa, M. Sc.



Edson Sorato, M. Sc.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, em particular à Cristiane, Sidnei e Luiz Eduardo, que estiveram comigo ao longo do curso, me motivando e oferecendo amor e suporte nos momentos em que precisei. Também agradeço ao meu namorado pelo carinho e companheirismo.

Ao meu orientador, Adriano Bresolin, pelo apoio durante o desenvolvimento deste trabalho. Sua dedicação e atenção foram essenciais. Gostaria de agradecer de forma especial ao professor Edson Sorato pelo auxílio durante a realização dos experimentos práticos.

RESUMO

O presente trabalho aborda os principais tipos de *powertrain* utilizados em veículos elétricos, destacando suas características e oportunidades de melhorias, tendo por objetivo realizar uma revisão bibliográfica explorando conceitos atrelados ao *powertrain* de um VE (veículo elétrico) e complementá-lo com um estudo prático utilizando a bancada que simula o sistema de acionamento do motor do BYD Qin EV. Inicialmente, é feita uma breve contextualização histórica dos VEs, partindo de 1800 com o desenvolvimento da primeira bateria, passando pelo período entre 1880 e 1900 em que houve um forte crescimento da indústria dos veículos elétricos até o momento atual do mercado automotivo. Em seguida, são apresentadas as topologias de VEs comumente utilizadas, discutindo os aspectos do veículo elétrico a bateria, híbrido e plug-in, e a célula de combustível. Em relação aos VEHs (Veículos Elétricos Híbridos), abordou-se apenas as arquiteturas clássicas que o automóvel pode ter, sendo elas: série, paralelo, série- paralelo e complexo. A fim de introduzir o objetivo principal do trabalho, estudo sobre o *powertrain* de VEs, são discutidos os conceitos únicos sobre motor centralizado, tração próxima às rodas e tração no cubo das rodas, que são configurações utilizadas para confecção do trem de força. Os componentes fundamentais do *powertrain* elétrico foram estudados, incluindo motor, inversor e caixa de redução. O objetivo final é atendido pela execução de uma série de testes práticos, que envolvem o sistema de aceleração, frenagem, carregamento CA e comunicação CAN (*Controller Area Network*) do VE BYD Qin, nos quais foi possível verificar o comportamento dos sistemas e os impactos que algumas falhas específicas podem causar no funcionamento do veículo. A realização de experimentos utilizando as bancadas didáticas da Beifang adquiridas através do projeto P&D ANEEL-CELESC denominado por projeto Converte. Além de proporcionar conhecimento técnico, a utilização das bancadas didáticas contribui significativamente na questão educacional, auxiliando na capacitação de estudantes e profissionais na área de manutenção de sistemas automotivos, mais especificamente nos componentes e sistemas que constituem um VE, mostrando a sua relevância no cenário atual, em que a busca por soluções mais sustentáveis para a mobilidade urbana tem impulsionado o interesse na área.

Palavras-chave: BYD Qin EV. Híbridos. Mobilidade Urbana. Veículos Elétricos.

ABSTRACT

The present work addresses the main types of powertrains used in electric vehicles, highlighting their characteristics and opportunities for improvement, aiming to carry out a bibliographical review exploring concepts linked to the powertrain of an EV (electric vehicle) and complementing them. o with a practical study using a bench that simulates the BYD Qin EV engine drive system. Initially, a brief historical contextualization of EVs is given, starting from 1800 with the development of the first battery, going through the period between 1880 and 1900 in which there was strong growth in the electric vehicle industry until the current moment in the automotive market. Next, commonly used EV topologies are presented, discussing aspects of battery, hybrid and plug-in electric vehicles, and fuel cells. In relation to VEHs (Hybrid Electric Vehicles), only the classic architectures that the automobile can have been embroidered, namely: series, parallel, series-parallel and complex. In order to introduce the main objective of the work, a study on the powertrain of EVs, the unique concepts of centralized engine, traction close to the wheels and traction at the wheel hub are considered, which are configurations used to make the powertrain. The fundamental components of the electric powertrain have been trained, including the motor, inverter and reduction box. The final objective is met by carrying out a series of practical tests, which involve the acceleration, braking, AC charging and CAN (Controller Area Network) communication system of the VE BYD Qin, in which it was possible to verify the behavior of the systems and the impacts that some specific faults can cause in the vehicle's operation. Carrying out experiments using Beifang teaching benches acquired through the ANEEL-CELESC R&D project called the Converte project. In addition to providing technical knowledge, the use of teaching benches contributes significantly to the educational issue, helping to train students and professionals in the area of automotive systems maintenance, more specifically in the components and systems that make up an EV, showing its relevance in the current scenario, in which the search for more sustainable solutions for urban mobility has driven interest in the area.

Keywords: BYD Qin EV. Hybrid. Urban Mobility. Electric Vehicles.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Categorização dos VEs.....	19
Figura 2 - Veículo Elétrico Híbrido.....	21
Figura 3 - Configuração série - VEH	22
Figura 4 - Configuração paralelo - VEH	22
Figura 5 - Configuração série-paralelo - VEH.....	23
Figura 6 - Configuração complexa - VEH.....	24
Figura 7 - Veículo Elétrico Híbrido plug-in.....	24
Figura 8 - Veículo Elétrico a célula de combustível.....	25
Figura 9 - Veículo Elétrico a Bateria.....	26
Figura 10 - Configuração Único motor centralizado	29
Figura 11 - Configuração Tração próxima às rodas	30
Figura 12 - Configuração Tração no cubo das rodas	31
Figura 13 - Exemplo de <i>powertrain</i>	32
Figura 14 - Corte de um motor de indução trifásico	33
Figura 15 - Motor de Indução	34
Figura 16 - Corte Motor de Relutância	35
Figura 17 - MRV modelo IE5 SynRM	36
Figura 18 - Constituição de um motor CC	37
Figura 19 - Motor de Corrente Contínua	38
Figura 20 - Partes constituintes do motor de ímã permanente.....	39
Figura 21 - Relação Torque-Velocidade do PMSM	40
Figura 22 - Motor síncrono de ímã permanente MG2	40
Figura 23 - Topologia de um inversor de frequência.....	43
Figura 24 - Inversor de frequência utilizado em VEs.....	43
Figura 25 - Caixa de redução do BYD Qin EV	44
Figura 26 - Bancada de ar-condicionado	46
Figura 27 - Bancada de iluminação e conforto	47
Figura 28 - Bancada de gerenciamento da bateria	48
Figura 29 - Bancada de direção	49
Figura 30 - Bancada sistema de acionamento do motor	49
Figura 31 - Multímetro digital TY720	51
Figura 32 - Pedal do acelerador	52
Figura 33 - Estrutura do pedal de aceleração	52

Figura 34 - Diagrama esquemático do pedal de aceleração	53
Figura 35 - Medição entre pino 62 e GND - Potenciômetro 01.....	54
Figura 36 - Medição entre pino 62 e 37 - Potenciômetro 01	54
Figura 37 - Medição entre pino 62 e 23 - Potenciômetro 01	55
Figura 38 - Medição entre pino 48 e GND - Potenciômetro 02.....	56
Figura 39 - Medição entre pino 48 e 38 - Potenciômetro 02	56
Figura 40 - Medição entre pino 48 e 24 - Potenciômetro 02	57
Figura 41 - Medição do Acelerador - Caixa de Falhas	58
Figura 42 - Estrutura do sistema de freio	58
Figura 43 - Sensor de vácuo	59
Figura 44 - Composição do sensor de vácuo.....	59
Figura 45 - Composição do sensor de vácuo	60
Figura 46 - Medição entre pino 11 e GND.....	61
Figura 47 - Medição entre pino 46 e GND.....	61
Figura 48 - Medição do sensor de pressão - Caixa de Falhas	62
Figura 49 - Carregador conectado à bancada do <i>Powertrain</i>	63
Figura 50 - Medição de resistência entre os pinos BK46/4 e KB53 B/2	64
Figura 51 - Medição de tensão entre pinos 4 e GND	65
Figura 52 - Medição do Pino 4 - Caixa de Falhas	66
Figura 53 - Medição de tensão entre pinos 6 e GND	66
Figura 54 - Medição do Pino 6 - Caixa de Falhas	67
Figura 55 - Níveis de tensão CAN_H e CAN_L.....	69
Figura 56 - Exemplo rede CAN automotiva.....	69
Figura 57 - Medição de tensão entre pinos 9 e GND	70
Figura 58 - Medição do Pino 9 - Caixa de Falhas	71
Figura 59 - Medição de tensão entre pinos 14 e GND	71
Figura 60 - Medição do Pino 14 - Caixa de Falhas	72
Figura 61 - Medição de tensão entre pinos 10 e GND	73
Figura 62 - Medição do Pino 10 - Caixa de Falhas	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre configurações de VEs.....	27
Tabela 2 - Comparativo entre motores elétricos.....	41
Tabela 3 - Comparativo em percentual da eficiência dos MEs.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BLDC	<i>Brushless DC</i>
CA	Corrente Alternada
CAN	<i>Controller Area Network</i>
CELESC	Centrais elétricas de Santa Catarina
CC	Corrente Contínua
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
FCEV	<i>Fuel Cell Electric Vehicle</i>
MCI	Motor de Combustão Interna
MES	Máquinas Elétricas
MRV	Motor de Relutância Variável
PHEVs	Veículos Elétricos Híbridos Plug-in
PMSM	<i>Permanent Magnet Synchronous Motor</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
SOC	<i>State of charge</i>
VEBs	Veículos Elétricos a Bateria
VEHs	Veículos Elétricos Híbridos
VER	Veículos Eletricamente Recarregável
VEs	Veículos Elétricos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	15
1.2	Definição do Problema	16
1.3	Objetivo Geral.....	16
1.4	Objetivos Específicos	17
1.5	Estrutura do Trabalho.....	17
2	TOPOLOGIAS E COMPONENTES DE UM VE.....	19
2.1	Topologias empregadas em veículos elétricos	19
2.2	Veículos elétricos híbridos (VEHs).....	19
2.2.1	Veículo elétrico híbrido em série	21
2.2.2	Veículo elétrico híbrido em paralelo	22
2.2.3	Veículo elétrico híbrido em série-paralelo	23
2.2.4	Veículo elétrico híbrido complexo	23
2.2.5	Veículos elétricos híbridos plug-in (PHEVs).....	24
2.3	Veículos elétricos a célula de combustível (FCEV).....	25
2.4	Veículos elétricos a bateria (VEBs)	25
2.5	Comparação entre VEs	26
2.6	Principais componentes de um VE	27
3.	CONFIGURAÇÕES E COMPONENTES DO POWERTRAIN	29
3.1.	Único motor centralizado	29
3.2	Tração próxima às rodas	30
3.3	Tração no cubo das rodas.....	31
3.4	Principais componentes do <i>powertrain</i>	32
3.4.1	Motor de indução.....	32
3.4.2	Motor de relutância.....	34
3.4.3	Motor de corrente contínua	37
3.4.4	Motor de ímã permanente	38
3.5	O Inversor de Frequência	41
3.6	Caixa de redução – Gearbox	43
4.	BANCADAS DE TREINAMENTO BEIFANG.....	46
4.1	Bancada do ar-condicionado	46
4.2	Bancada de aplicações elétricas	47
4.3	Bancada da bateria	47
4.4	Sistema de direção.....	48
4.5	Sistema de acionamento do motor	49
5.	DESCRIÇÃO E RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS REALIZADOS.....	51
5.1	Experimento 1 - Sensor de posição do acelerador	51
5.1.1	Medições do Sensor - Potenciômetro 01:.....	53
5.1.2	Medições do Sensor - Potenciômetro 02:.....	55
5.1.3	Medições do Sensor do Acelerador - Caixa de Falhas:	57
5.2	Experimento 2 – Sensor de pressão de vácuo	58
5.2.1	Medições do Sensor – Pino 11:.....	61
5.2.2	Medições do Sensor – Pino 46:.....	61
5.2.3	Medições do Sensor de Pressão - Caixa de Falhas:.....	62
5.3	Experimento 3 - Teste de carregamento lento CA.....	62
5.3.1	Medição de Resistência – BK46/4 e KB53 B/2:.....	64
5.3.2	Medições de Tensão – BK46/4:	64

5.3.3 Medições no Pino 4 - Caixa de Falhas:	65
5.3.4 Medições de Tensão – BK46/6:	66
5.3.5 Medições no Pino 6 - Caixa de Falhas:	67
5.4 Experimento 4 - Sistema de comunicação CAN	67
5.4.1 Medição de Tensão – B30/9.....	70
5.4.2 Medições no Pino 9 – Caixa de Falhas	70
5.4.3 Medição de Tensão – B30/14.....	71
5.4.4 Medições no Pino 14 – Caixa de Falhas	72
5.4.5 Medição de Tensão – B30/10.....	72
5.4.6 Medições no Pino 10 – Caixa de Falhas	73
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
REFERÊNCIAS.....	76

1 INTRODUÇÃO

Diferente do que possa ser imaginado pelo senso comum, os veículos elétricos e híbridos não são uma inovação tecnológica recente no mercado automotivo. Ocorreram alguns avanços tecnológicos importantes nos veículos elétricos, VEs, atuais, principalmente relacionados ao desenvolvimento e aprimoramento das baterias, entretanto os conceitos básicos se mantiveram (Ferreira; Dias, 2020).

A história dos carros elétricos está diretamente relacionada com a história das baterias. Em 1800, o italiano Alessandro Volta comprovou que a energia elétrica pode ser armazenada quimicamente. Já em 1821, o britânico Michael Faraday demonstrou os princípios da geração de motores elétricos ao aplicar a pilha química de Volta como um componente de seus experimentos e em 1831, Faraday apresentou os princípios da indução eletromagnética com a estreita relação entre correntes elétricas e magnetismo estabelecendo assim a base para os motores elétricos e geradores que são necessários para carros elétricos (Ferreira; Dias, 2020).

Dos anos de 1880 a 1900, ocorreu um período de grande desenvolvimento da indústria dos veículos elétricos, sendo conhecido como começo da idade de ouro, terminando no início dos anos 1920. Desde então, não houve um período tão próspero para avanços e implantação tecnológica (Anderson; Anderson, 2010). Nos anos que se seguiram, os VEs perderam espaço para os veículos a combustão até meados de 1970, quando as questões ambientais se tornaram parte integrante do debate sobre os problemas relacionados à geração e consumo de energia (Ferreira; Dias, 2020). Em 1992, ocorreu no Rio de Janeiro a Rio-92, conferência que resultou na Agenda 21, que sinalizou os problemas socioambientais decorrentes do uso excessivo e a longo prazo de combustíveis fósseis, e mostrou a necessidade de redução do consumo de energia nos países desenvolvidos e a busca de uma possível transição para fontes renováveis de energia. Ainda no ano de 1992, a União Europeia trouxe a política pública que ficou conhecida pela expressão “uma estratégia para a mobilidade sustentável”, em que os carros elétricos como substitutos dos veículos a combustão era uma das propostas para um desenvolvimento urbano mais sustentável (Baran, 2012). Do começo dos anos 2000 até a década atual, houve grande esforço por parte das montadoras de automóveis para desenvolver seus próprios modelos de veículos elétricos e híbridos.

A constituição básica dos veículos elétricos sofreu pouca alteração no decorrer do tempo. Um veículo elétrico possui, dessa forma, um motor elétrico que tem como função tracionar o veículo. Esse motor elétrico também pode funcionar como um gerador, recuperando energia em momentos de frenagem e desaceleração. O VE também possui uma bateria ou um conjunto delas para armazenar a energia que será utilizada no funcionamento do motor elétrico. A autonomia do carro está diretamente ligada a capacidade de armazenamento da bateria. Além disso, há um inversor que transforma uma corrente contínua em corrente alternada. Isso porque a bateria dos veículos elétricos é de corrente contínua, e seus motores, são de na grande maioria de corrente alternada, o que torna necessário um inversor entre esses dois dispositivos. Ainda há o conversor que é um dispositivo cuja função é de elevar ou reduzir a tensão utilizada. Já o sistema de frenagem regenerativa recupera uma parcela da energia cinética durante a desaceleração ou frenagem do veículo para gerar energia e armazenar esse potencial em um banco de baterias. Essa energia acumulada será utilizada posteriormente para propulsão do motor elétrico (Santos, 2020). A partir disso, busca-se componentes e topologias que aumentem a eficiência e tornem os veículos elétricos economicamente mais atraentes.

1.1 Justificativa

As máquinas a combustão interna movidas por combustíveis fósseis contribuem de forma expressiva para a poluição atmosférica (Braun; Appel; Schmal, 2004). Em razão das consequências nocivas à saúde humana, metas para a redução das emissões de gases como o monóxido e dióxido de carbono, que são liberados dos escapamentos dos carros a combustão, são fixadas por diversos países. O Brasil, por exemplo, determinou a diminuição das emissões de gases do efeito estufa em 48% até 2025 (Agência Brasil, 2023).

Dessa forma, o veículo elétrico é uma possibilidade para tornar o trânsito mais sustentável e menos poluente. Considerando que a matriz elétrica brasileira é predominantemente constituída por fontes limpas de energia e aliada à alta eficiência dos motores elétricos, veículos elétricos a bateria (VEBs) comercializados em 2023 têm emissões 65% a 67% mais baixas que os veículos movidos a combustão interna flex utilizando o consumo médio de gasolina C e etanol (Mera; Rebouças; Cieplinski,

2023). Mostrando a relevância do estudo de veículos elétricos como uma alternativa para o desenvolvimento de um futuro ambientalmente mais sustentável.

1.2 Definição do Problema

Tendo em vista a preocupação crescente com as mudanças climáticas, mostra-se pertinente a busca por alternativas para a mobilidade urbana que causem menos impactos ambientais. Os veículos elétricos, sejam eles puramente elétricos com bateria ou os modelos híbridos, podem ser uma saída para alcançar o equilíbrio entre a preservação do meio ambiente e o crescimento dos centros urbanos.

O presente trabalho tem por finalidade apresentar uma revisão bibliográfica sobre os veículos elétricos e suas topologias mais comuns, expondo os tipos e as principais características construtivas, com foco no *powertrain* elétrico. Também é feito um estudo acerca das configurações de *powertrain* encontrados em VEs, explorando os principais componentes que o constituem, sendo eles: motor elétrico, inversor de frequência e caixa de redução. Em relação aos motores elétricos, são apresentados os principais modelos empregados, que são: motor de indução, de ímã permanente, de corrente contínua e de relutância.

Buscando trazer uma experimentação prática, com o intuito de entender melhor a dinâmica de funcionamento do sistema de acionamento do motor em um veículo elétrico, mais especificamente os sistemas de aceleração, frenagem, carregamento CA e comunicação CAN, utiliza-se a bancada intitulada como *Motor Drive Training Platform* do conjunto de treinamento que representa o veículo elétrico BYD Qin EV, cujo motor elétrico empregado na sua construção é uma máquina síncrona de ímã permanente. Esta bancada foi adquirida através do projeto P&D ANEEL-CELESC denominado projeto Converte.

1.3 Objetivo Geral

Contribuir com uma análise sobre as principais características do *powertrain* de um veículo elétrico por meio de uma revisão bibliográfica e experimentação prática para verificação do comportamento de alguns sistemas que integram o BYD Qin EV ao serem expostos a falhas de funcionamento.

1.4 Objetivos Específicos

Visando especificar um pouco mais o intuito desse trabalho e os processos para alcançar seus fins, os objetivos específicos são os seguintes:

- a) realizar uma revisão bibliográfica referente às principais topologias de veículos elétricos disponíveis no mercado automobilístico atual, elucidando as partes constituintes de um VE;
- b) descrever as configurações de *powertrain* usualmente aplicadas em VEs, expondo os sistemas e atributos fundamentais para a composição do trem de força;
- c) apresentar as cinco bancadas didáticas que compõe o sistema de treinamento que simula o BYD Qin EV;
- d) desenvolver testes práticos, utilizando a bancada de treinamento *Motor Drive Training Platform*, afim de verificar o funcionamento dos sistemas de aceleração, frenagem, carregamento CA e comunicação CAN nos cenários em que falhas de são detectadas.

1.5 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está organizado em seis capítulos. O capítulo inicial tem como finalidade ser um tópico introdutório, em que são apresentadas as justificativas, definido o problema abordado e elencados os objetivos.

No segundo capítulo são apresentados os conceitos referentes às topologias de veículos elétricos e os principais componentes empregados nesse tipo de automóvel. Vale salientar que o objetivo principal deste trabalho é o estudo do *powertrain* de veículos elétricos, no entanto, para uma melhor compreensão do universo dos veículos elétricos, que incluem os híbridos, neste capítulo foi adicionado a descrição das topologias de *powertrain* dos veículos híbridos.

O terceiro capítulo busca apresentar as configurações de VEs mais comuns no mercado automobilístico. Também expõe as funções e tipos de motores elétricos que podem ser empregados em VEs, além de relatar as características construtivas e técnicas do inversor de frequência e da caixa de redução.

No quarto capítulo é feita a descrição das cinco bancadas que constituem o sistema de treinamento desenvolvido pela Beifang e que simula o funcionamento de um veículo elétrico.

Já o quinto capítulo traz os experimentos práticos executados, bem como uma breve contextualização sobre os sistemas que foram estudados, os resultados esperados de acordo com a literatura e os que foram obtidos na prática.

Já as considerações finais do trabalho e as suas perspectivas futuras estão no sexto capítulo. Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas.

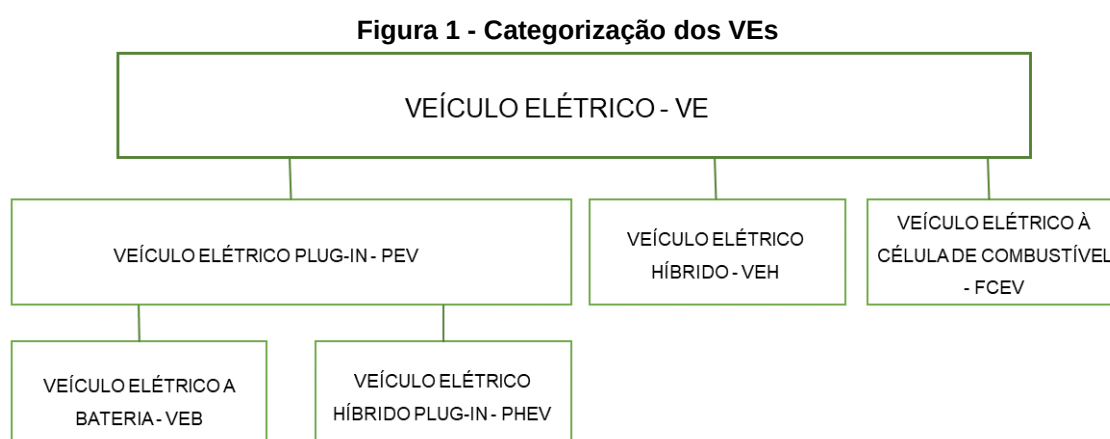
2 TOPOLOGIAS E COMPONENTES DE UM VE

Neste capítulo serão apresentados conceitos relevantes para a compreensão do estudo proposto, como as principais topologias de veículos elétricos e os componentes e sistemas básicos de um VE.

2.1 Topologias empregadas em veículos elétricos

De forma geral, um veículo elétrico ou veículo eletricamente recarregável (VER) é um veículo alimentado, parcialmente ou completamente, por uma bateria que pode ser ligada à rede de energia elétrica ou não. O termo VE é uma descrição genérica que engloba as diversas topologias de veículos eletrificados (Denton, 2018).

Os veículos elétricos podem ser categorizados, tradicionalmente, como: Veículos elétricos híbridos (VEHs), Veículos elétricos híbridos plug-in (PHEVs), Veículos elétricos a célula de combustível (FCEV) e Veículos elétricos a bateria ou puramente elétricos (VEBs). Os estudos e análises discutidos nos subitens que se seguem envolvem as quatro designações citadas. A Figura 1 ilustra a categorização dos VEs. Nessa abordagem, o termo plug-in se refere aos veículos que podem ser plugados a rede de energia elétrica para o carregamento das baterias.



Fonte: Elaboração própria (2024)

2.2 Veículos elétricos híbridos (VEHs)

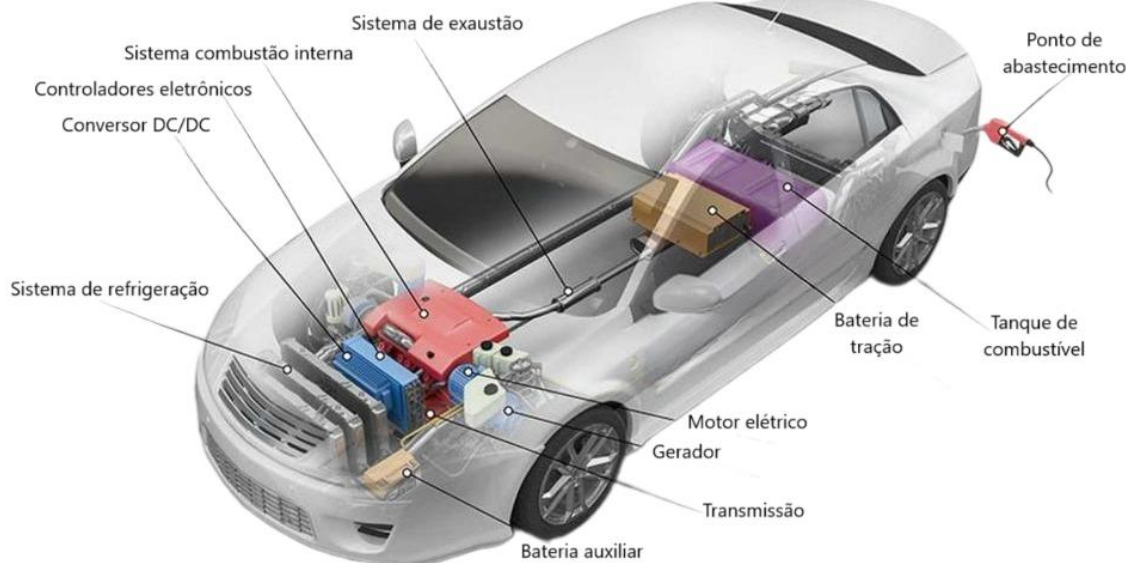
Os veículos elétricos híbridos, são constituídos por um motor movido a combustão interna e um motor elétrico, ou seja, possuem dois *powertrains*. A energia que recarrega a bateria é obtida por meio da frenagem regenerativa e do motor de

combustão interna (MCI). A frenagem regenerativa recupera parte da energia perdida durante a utilização dos freios para auxiliar o motor a combustão durante a aceleração. Essa energia, em um veículo convencional, é geralmente perdida sob a forma de calor (EVGO, 2023). Sistemas desse tipo, que proporcionam a recuperação e reutilização da energia, auxiliam no aumento da eficiência energética e autonomia do veículo (Santos, 2020).

Nos VEHs, o motor elétrico (ME) tem como função alimentar as baterias e reduzir o consumo de combustível. Além disso, o ME pode atuar junto ao motor à combustão, aumentando a potência de aceleração, e, as baterias fornecem energia para os componentes eletroeletrônicos do carro, como ar-condicionado, faróis, setas, etc (Diniz, 2022).

Um veículo híbrido exerce tração por uma bateria e/ou por um MCI. A fonte de potência é selecionada de forma automática pelo automóvel, considerando parâmetros como velocidade, carga do motor a combustão e a carga da bateria. Diferentemente de outros tipos de veículos elétricos, no caso dos modelos híbridos, a bateria não pode ser conectada à rede elétrica, no entanto, existem os veículos híbridos plug-in (item 2.2.5) que podem carregar a bateria tanto através da regeneração, alternador (combustão) quanto pela rede elétrica.

No caso dos veículos híbridos não plug-in a recarga da bateria é feita pelo sistema de frenagem regenerativa, suprida por um gerador acoplado ao MCI (Denton, 2018). A Figura 2 mostra de forma simplificada os principais sistemas que compõem um VEH. Percebe-se a presença da bateria, inversor, motor elétrico e também de componentes ligados ao motor de combustão interna.

Figura 2 - Veículo Elétrico Híbrido

Fonte: Adaptado InsideEVs (2022)

Os VEHs podem ser classificados de acordo com a arquitetura do *powertrain*. Essa classificação se dá pelo tipo de conexão entre os componentes que definem as rotas de fluxo de energia e as portas de controle. Inicialmente, os VEHs eram definidos como série ou paralelo. Após o ano 2000, veículos híbridos recém introduzidos ao mercado automobilístico não se encaixavam nesses dois tipos de arquitetura. Dessa forma, atualmente os VEHs podem ter suas configurações em série, paralelo, série-paralelo ou híbrido complexo (Ebrahimi; Ehsani; Gao; Longo, 2018).

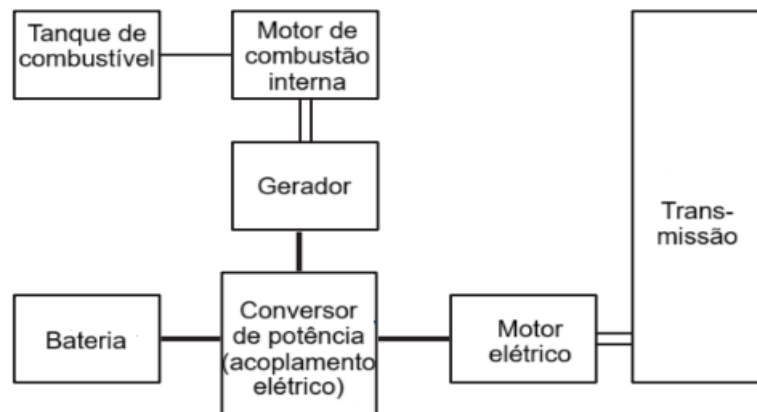
2.2.1 Veículo elétrico híbrido em série

A Figura 3 abaixo mostra a topologia que tradicionalmente representa o *powertrain* em série de um VEH. A característica principal é que duas fontes de energia são acopladas eletricamente através de um conversor de potência (Santos, 2020). Assim, a energia flui das baterias e do gerador para o motor elétrico, ou vice-versa.

Nessa configuração, a saída mecânica proveniente do motor de combustão interna é convertida em energia elétrica pelo gerador. Essa energia pode carregar a bateria ou alimentar o motor elétrico e tracionar as rodas por meio da transmissão mecânica. Apesar de possuir a vantagem da simplicidade, a topologia em série

necessita de três máquinas para propulsão do VEH: um motor à combustão, um gerador e um motor elétrico (Bartsch; Lescowicz, 2022).

Figura 3 - Configuração série - VEH

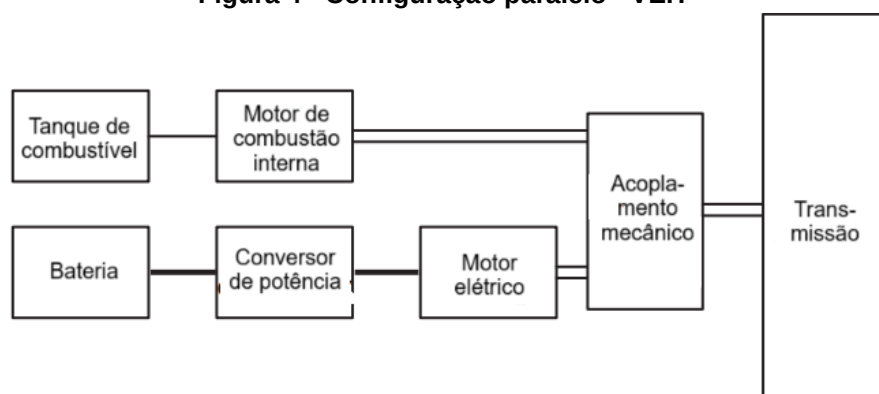


Fonte: Adaptado Ebrahimi; Ehsani; Gao; Longo (2018)

2.2.2 Veículo elétrico híbrido em paralelo

A Figura 4 ilustra a configuração clássica do *powertrain* em paralelo de um VEH. Destaca-se que nesta topologia são duas potências mecânicas que se somam em um acoplador mecânico, sendo o motor de combustão interna a principal fonte de energia (Ebrahimi; Ehsani; Gao; Longo, 2018).

Figura 4 - Configuração paralelo - VEH



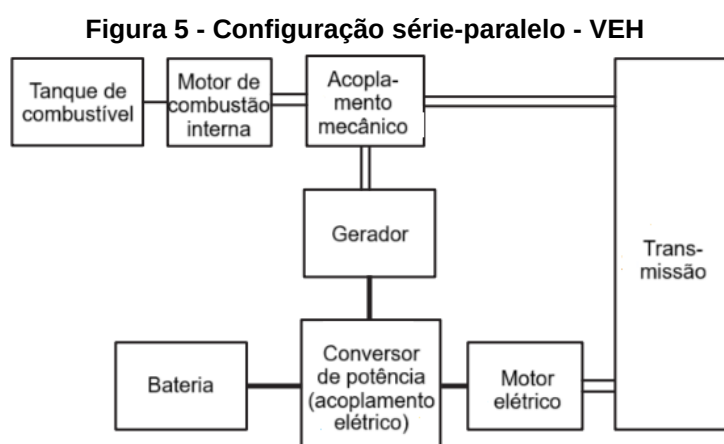
Fonte: Adaptado Ebrahimi; Ehsani; Gao; Longo (2018)

Nessa arquitetura, o motor à combustão e o elétrico são acoplados ao eixo principal do automóvel por meio de duas embreagens. Assim, a energia para tracionar as rodas pode ser fornecida apenas pelo MCI, pelo ME ou por ambos. Diferente da topologia série, não se faz necessário o uso de um gerador, pois o ME pode atuar

como tal. Outra vantagem é que as máquinas podem ter um dimensionamento menor, uma vez que a topologia em paralelo permite que as duas potências sejam somadas (Bartsch; Lescowicz, 2022).

2.2.3 Veículo elétrico híbrido em série-paralelo

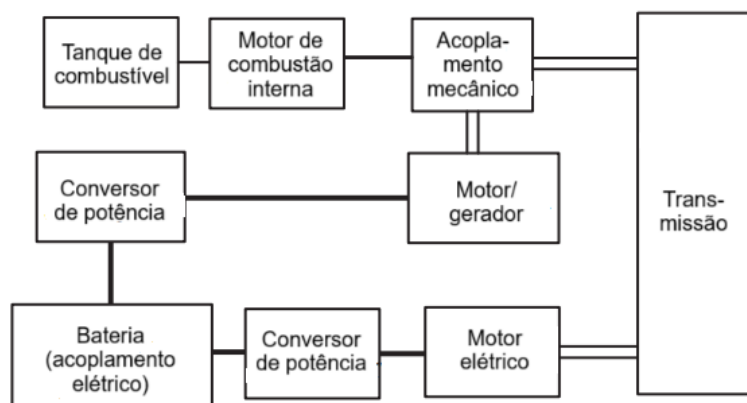
A Figura 5 apresenta a topologia do *powertrain* em série-paralelo de um VEH. A característica que a diferencia é a presença de dois acopladores de potência – elétrica e mecânica. Essa configuração possui as características da série e paralelo, resultando em mais modos de operação. Porém, é mais complexa e pode possuir um custo mais elevado (Ebrahimi; Ehsani; Gao; Longo, 2018). Tem a vantagem de um menor tamanho de ME comparado a série e menor MCI quando comparado ao paralelo. Além disso, possui maior eficiência em baixas e altas rotações (Bartsch; Lescowicz, 2022).



Fonte: Adaptado Ebrahimi; Ehsani; Gao; Longo (2018)

2.2.4 Veículo elétrico híbrido complexo

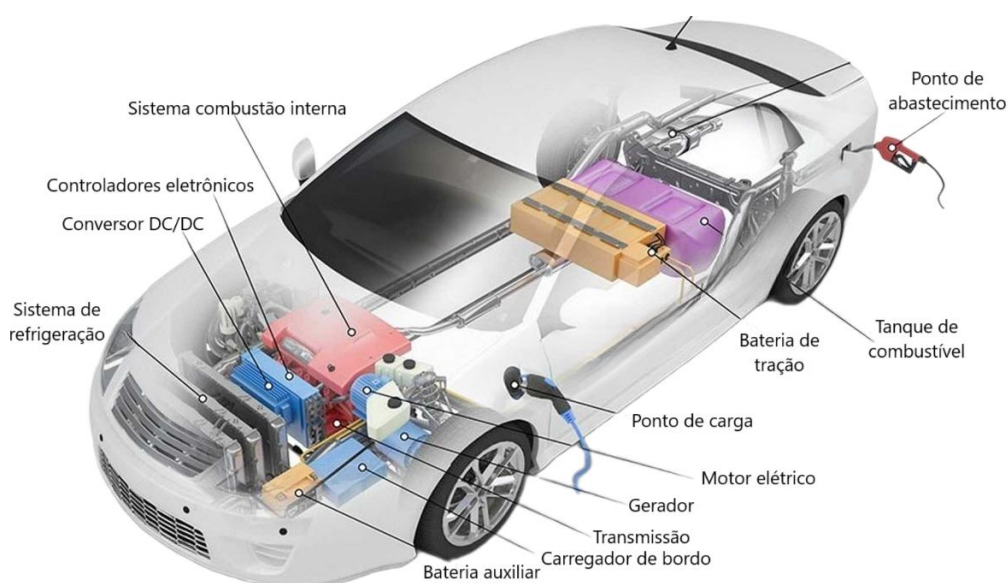
A Figura 6 ilustra a configuração complexa do *powertrain* de um VEH, que é semelhante a estrutura série-paralelo. A maior diferença é que a função de acoplamento elétrico é transferida do conversor de potência para as baterias, e é adicionado um segundo conversor de potência entre o motor/gerador e as baterias (Ebrahimi; Ehsani; Gao; Longo, 2018). É a topologia mais complexa e, por consequência, possui custos mais elevados.

Figura 6 - Configuração complexa - VEH

Fonte: Adaptado Ebrahimi; Ehsani; Gao; Longo (2018)

2.2.5 Veículos elétricos híbridos plug-in (PHEVs)

Os Veículos Elétricos Híbridos Plug-in, PHEVs, possuem um motor a combustão interna e um motor elétrico. Assim como os híbridos convencionais, podem recarregar a bateria por meio de sistemas de recuperação e reutilização de energia, como a frenagem regenerativa. A diferença entre as duas classificações é que os modelos plug-in possuem uma bateria maior e podem se conectar à rede elétrica para recarregá-la. Quando as baterias estão descarregadas, o motor a combustão é requisitado. Por este fato, possuem uma eficiência melhor que a dos VEHs (EVGO, 2023). A Figura 7 mostra a configuração interna de um PHEVs.

Figura 7 - Veículo Elétrico Híbrido plug-in

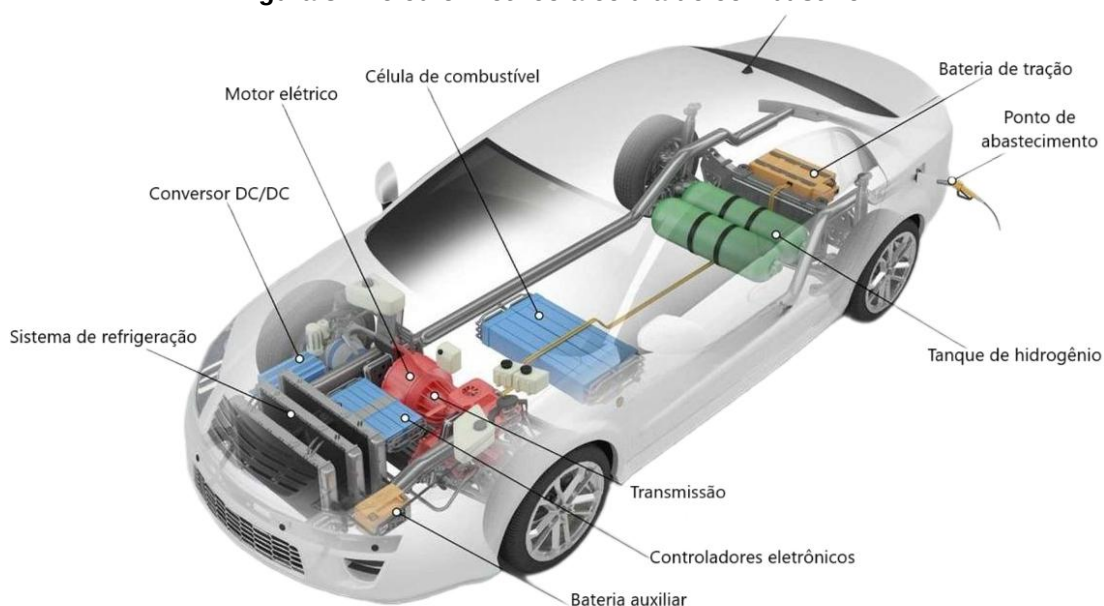
Fonte: Adaptado InsideEVs (2022)

2.3 Veículos elétricos a célula de combustível (FCEV)

Os Veículos Elétricos a Célula de Combustível, da sigla em inglês FCEV (*Fuel Cell Electric Vehicle*), são automóveis puramente elétricos abastecidos com hidrogênio e que extraem energia elétrica deste elemento por meio das células de combustível, que geram energia através de uma reação química ocasionada pelo contato entre o hidrogênio e o oxigênio, resultando como subproduto do processo apenas água. A energia é utilizada para alimentar o motor elétrico e para carregar as baterias. Nos FCEVs, a geração de energia não é originada pela queima de combustível, como ocorre tradicionalmente em um MCI, logo, não há liberação de gases poluentes (Bartsch; Lescowicz, 2022).

A Figura 8 apresenta a configuração interna de um FCEV. Nota-se a presença do tanque de combustível para armazenamento do hidrogênio e célula de combustível.

Figura 8 - Veículo Elétrico a célula de combustível



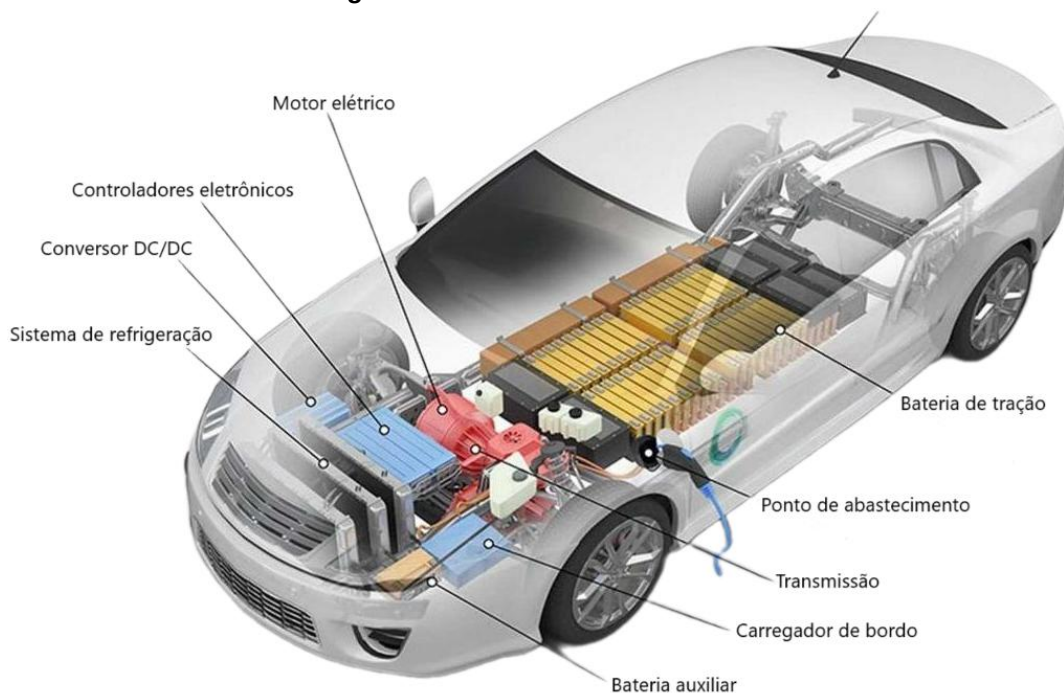
Fonte: Adaptado InsideEVs (2022)

2.4 Veículos elétricos a bateria (VEBs)

Os veículos elétricos a bateria, VEBs, também denominado como puramente elétrico ou simplesmente veículos elétricos, são totalmente elétricos com baterias recarregáveis e sem a presença do motor a combustão interna. Toda a energia para

operar o veículo vem da bateria que é recarregada pelo mecanismo de frenagem regenerativa ou ao ser conectada à rede elétrica (EVGO, 2023). Na Figura 9 está a configuração dessa classificação de veículo elétrico. Nota-se que o sistema de armazenamento de energia ocupa espaço considerável na estrutura do veículo.

Figura 9 - Veículo Elétrico a Bateria



Fonte: Adaptado InsideEVs (2022)

2.5 Comparação entre VEs

Considerando as informações expostas sobre os tipos de veículos elétricos e suas principais características, a Tabela 1 traz uma síntese para comparação de alguns pontos fundamentais na construção de um automóvel.

Observa-se que os veículos a bateria e a célula de combustível possuem características em comum como a emissão praticamente nula de gases poluentes, alta eficiência energética que está atrelada ao uso exclusivo do motor elétrico e a não dependência de combustíveis fósseis. Já os modelos híbridos, VEH e PHEV, compartilham aspectos como a baixa, porém existente, emissão de gases poluentes, dependência de combustíveis fósseis e tecnologia conhecida, acarretando um menor custo de aquisição.

Tabela 1 - Comparação entre configurações de VEs

Tipo de VE	VEB	VEH e PHEV	FCEV
Tração	Motor elétrico	Motor elétrico e motor à combustão interna	Motor elétrico
Sistema de energia	Bateria e supercapacitor	Bateria, supercapacitor e unidade de geração do MCI	Célula de combustível, bateria e supercapacitor
Fonte de energia	Rede de energia elétrica e sistemas de armazenamento de energia	Rede de energia elétrica, sistemas de armazenamento de energia e combustíveis fósseis	Hidrogênio
Características	Zero emissão de gases poluentes, alta eficiência energética, elevado custo de aquisição, independente de combustíveis fósseis, tecnologia conhecida	Baixa emissão de gases poluentes, economia de combustíveis, dependente de combustíveis fósseis, tecnologia conhecida	Zero emissão de gases poluentes, alta eficiência energética, elevado custo de aquisição, independente de combustíveis fósseis, tecnologia em desenvolvimento
Desafios	Bateria e gestão de carga, pontos de recarga (eletropostos)	Gestão, otimização e controle das múltiplas fontes de energia	Custo da célula de combustível

Fonte: Adaptado Bartsch; Lescowicz (2022)

2.6 Principais componentes de um VE

De forma geral, os principais componentes de um veículo eletrificado são: máquina elétrica (motor e gerador), armazenador de energia (bateria), eletrônica de potência (inversor) para realizar o processamento da energia e motor de combustão interna (MCI) para os modelos híbridos (Santos, 2020).

As máquinas elétricas (MEs) são dispositivos que fazem a conversão eletromecânica de energia. O equipamento que converte energia elétrica em energia mecânica, gerando torque e rotação, é denominado motor elétrico.

Já a máquina que converte energia mecânica em energia elétrica é chamada de gerador elétrico. Seu funcionamento se baseia nos princípios da indução eletromagnética e são compostos, basicamente, por um rotor, um estator e a carcaça. O rotor é a parte girante da máquina e é constituído por um eixo, por um circuito magnético e por um ou mais enrolamentos. O estator, por sua vez, é a parte estática que se mantém fixa a carcaça e é composto por um circuito magnético e um ou mais

enrolamentos. A carcaça tem função de suporte para o rotor e o estator, servindo como uma proteção mecânica (Fernandes; Seixas, 2016).

Os armazenadores de energia, geralmente baterias, tem como função acumular a energia elétrica produzida para que seja disponibilizada posteriormente para propulsão do VE (Santos, 2020). Uma bateria é um dispositivo que armazena energia química e a converte em energia elétrica. As reações químicas no dispositivo envolvem o fluxo de elétrons de um material para outro por meio de um circuito externo. O fluxo de elétrons fornece uma corrente elétrica que é usada para gerar trabalho (Batista; Faesarella; Moraes; Sablón, 2020).

O processamento de energia em VEs é o sistema responsável pela transmissão de energia entre a máquina elétrica e os armazenadores de energia (Santos, 2020). Para isso, pode-se utilizar diversas estratégias e configurações com auxílio da eletrônica de potência. Dos dispositivos advindos da eletrônica de potência aplicados em VEs, destacam-se os inversores.

Os inversores de potência são dispositivos que têm a capacidade de converter corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA), podendo ser exclusivamente eletrônicos ou ainda combinar partes mecânicas e eletrônicas (Cabral; Catalani; Germanos; Menegatti, 2020).

Os inversores de frequência são responsáveis pelo controle do fluxo de energia proveniente do banco de baterias, que é em corrente contínua, para os motores alimentados em corrente alternada. O fluxo no sentido inverso, denominado frenagem regenerativa, é possível em algumas topologias de inversores (Fernandes, 2015).

O motor de combustão interna transforma a energia química do combustível em energia mecânica que serve para movimentar o veículo. Em VEHs, o MCI também possui a função de acionamento de um alternador que tem a finalidade de recarregar o conjunto de baterias (Pita, 2011).

3. CONFIGURAÇÕES E COMPONENTES DO POWERTRAIN

O presente capítulo tem por objetivo apresentar as principais configurações e componentes que o *powertrain* de um veículo elétrico ou híbrido pode possuir.

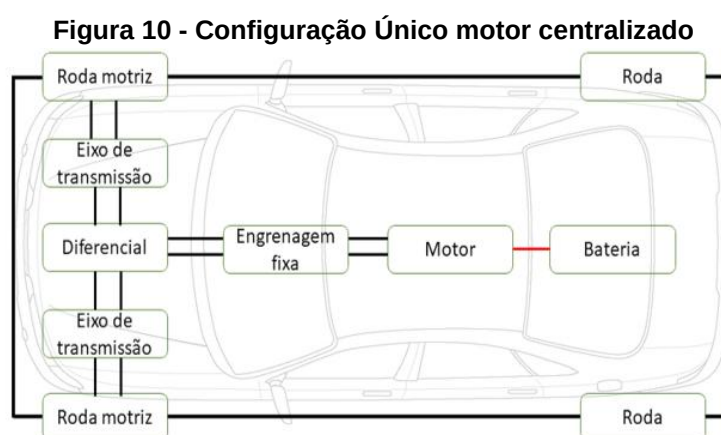
O *powertrain* de um VE pode ser definido como o conjunto de tecnologias e componentes que estão acoplados entre si e possuem a responsabilidade de gerar a força que é transmitida para as rodas, que resulta na tração veicular (PNME, 2022).

Quanto às topologias dos VEs, considerando a disposição dos motores para propulsão do automóvel, tem-se três modelos clássicos: único motor centralizado (*Central drive powertrain*), tração próxima às rodas (*Close-wheel drive powertrain*) e tração no cubo das rodas (*Wheel-hub drive powertrain*).

3.1. Único motor centralizado

É a topologia mais comum e que mais se assemelha aos veículos convencionais à combustão. Os VEs com um único motor central possuem menor complexidade quando comparado às outras configurações e por isso é a disposição mais utilizada (Serafim, 2024).

Essa topologia permite adoção direta da maioria dos componentes do *powertrain* tradicional movido por um MCI, incluindo a transmissão mecânica, diferencial, eixos de transmissão e chassi. A Figura 10 apresenta, de forma simplificada, a disposição os componentes que constituem a configuração motor centralizado.



Fonte: Adaptado de Hung; Teh; Wang; Zhong (2018)

Portanto, o modelo com motor único centralizado tem a sua implementação mais rápida, com menor grau de dificuldade, maior confiabilidade, e com um custo menor.

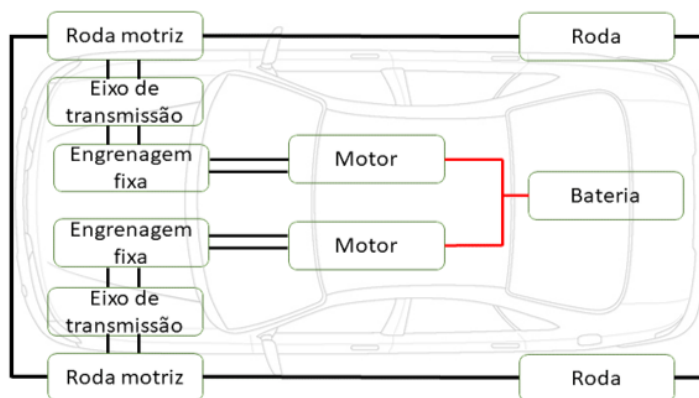
Alguns dos pontos de desvantagem são: estrutura mecânica pesada, menor eficiência energética quando comparada às demais topologias e pouco espaço dentro do VE para a inserção de uma bateria de maior porte. Essa configuração é utilizada no Nissan Leaf (Hung; Teh; Wang; Zhong, 2018).

3.2 Tração próxima às rodas

Nessa topologia, um motor elétrico e um redutor com relação de transmissão fixa (engrenagem fixa) são integrados em um único agrupamento, que se conecta a uma roda motriz através de um conjunto de eixo de transmissão.

A Figura 11 ilustra a topologia em que há dois motores elétricos próximos às rodas, observa-se que não se faz necessário o uso do diferencial.

Figura 11 - Configuração Tração próxima às rodas



Fonte: Adaptado de Hung; Teh; Wang; Zhong (2018)

Essa é a topologia utilizada pela Mercedes-Benz no SLS AMG versão elétrica (Hung; Teh; Wang; Zhong, 2018). A transmissão é gerada perto das rodas, que podem ser controladas individualmente quando se opta por motores duplos sem diferencial. Como consequência, são melhoradas características de condução e eficiência energética. Porém, pode trazer a desvantagem do controle diferencial das rodas.

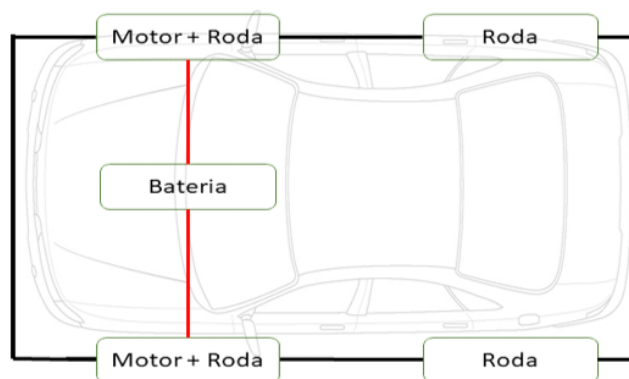
Além disso, outra vantagem é que, comparada à transmissão no cubo da roda, a massa do veículo tende a ser menor (Gomez; Malatyali; Kampker; Pandey; Treichel; Wessel, 2019).

3.3 Tração no cubo das rodas

Para essa configuração, os motores de acionamento são posicionados diretamente no cubo da roda. A divisão de um motor central em dois ou quatro com acionamentos diretos, torna dispensável o uso do diferencial e do sistema de transmissão e engrenagens. Dessa forma, o VE torna-se mais eficiente e compacto, já que muitos os itens mecânicos requeridos nas outras configurações de *powertrain* não são necessários.

Como principal característica, tem-se a eliminação da transmissão mecânica, como a caixa de velocidades, diferencial mecânico e eixos de transmissão redundantes, conforme a Figura 12, acarretando na redução de peso e economia de custos.

Figura 12 - Configuração Tração no cubo das rodas



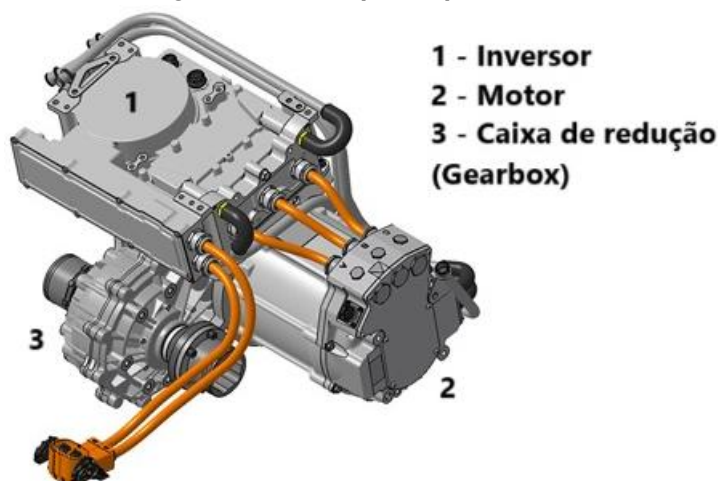
Fonte: Adaptado Hung; Teh; Wang; Zhong (2018)

Entretanto, algumas desvantagens são: sistema de controle do veículo deve ser mais robusto, ocorrem altas cargas térmicas devido à proximidade do motor ao freio e o espaço estreito de instalação em o cubo da roda. (Gomez; Malatyali; Kampker; Pandey; Treichel; Wessel, 2019). Dessa maneira, essa topologia não é empregada de forma ostensiva no mercado automobilístico, pois apresenta alguns desafios para aprimoramento de sua engenharia. Como vantagem, há melhoria nas características de direção, aumentando a dinâmica e possibilitando que os sistemas de assistência ao motorista sejam mais precisos (Hung; Teh; Wang; Zhong, 2018).

3.4 Principais componentes do *powertrain*

Os principais componentes do *powertrain*, ou sistema de tração elétrica, de um VE são: motor, inversor e caixa de redução. A Figura 13 mostra um sistema completo de *powertrain*. Nos subtópicos a seguir, os componentes citados serão descritos, destacando-se suas funções e principais características.

Figura 13 - Exemplo de *powertrain*



Fonte: Adaptado Petters (2019)

A seguir, serão expostos de forma breve e por meio de uma revisão bibliográfica, as características e modo de funcionamento dos motores de indução, relutância, de corrente contínua e de ímã permanente.

Importante considerar que os seguintes aspectos são desejáveis em um motor usado para a propulsão de um veículo elétrico: alta potência instantânea e alta densidade de potência, alto torque em baixas velocidades para partida do veículo, ampla faixa de velocidades, incluindo torque constante e regiões de potência constante, rápida resposta de torque, alta eficiência em amplas faixas de velocidade e torque, alta eficiência em caso de frenagem regenerativa, alta confiabilidade e robustez para as diversas condições de operação e custo razoável (Chan, 2002).

3.4.1 Motor de indução

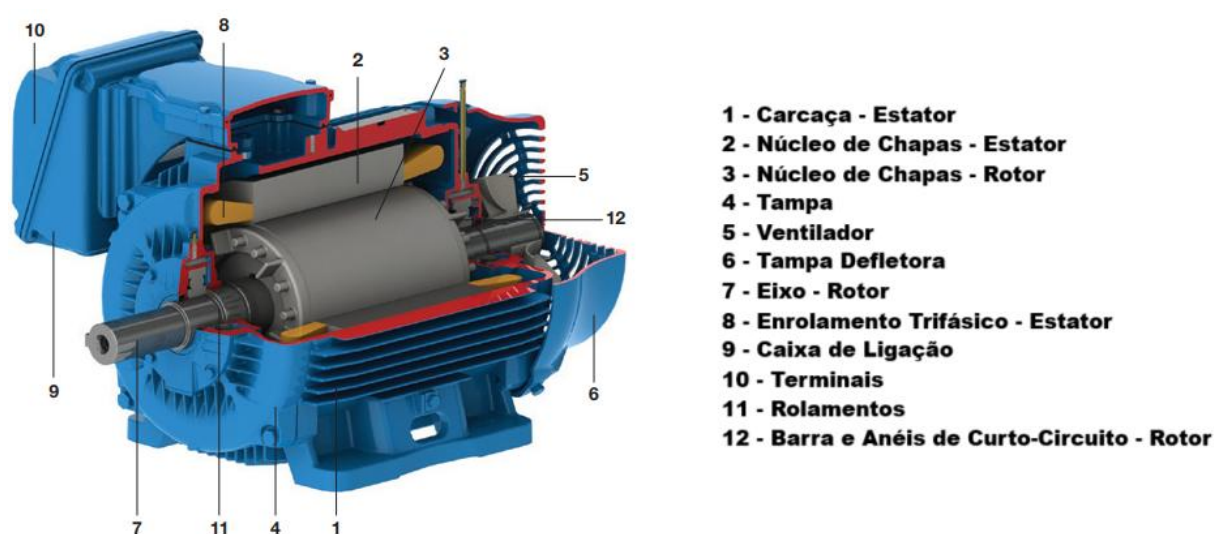
Nas máquinas de indução a corrente alternada é fornecida diretamente ao estator, ao passo que o rotor recebe a corrente por indução, a partir do estator. Quando a excitação é feita por uma fonte polifásica equilibrada, um campo magnético

é gerado no entreferro girando na velocidade síncrona. Essa velocidade é dependente do número de polos e da frequência aplicada ao estator (Umans, 2014).

O motor de indução opera, portanto, com dois campos magnéticos girantes. O campo magnético do rotor tende a se alinhar ao do estator, induzindo uma força eletromotriz que produz o movimento de rotação do rotor. A velocidade de rotação do rotor possui um atraso em relação ao campo magnético girante devido à carga aplicada ao motor, por isso é conhecido como motor assíncrono.

O rotor em gaiola de esquilo é utilizado em veículos elétricos por não conter escovas, sendo mais barato e exigindo menos manutenção. Entretanto, o torque de arranque não é muito alto, o que resulta em uma rotação inicial menor (Azevedo, 2018). A Figura 14 apresenta as principais partes que constituem um motor de indução trifásico.

Figura 14 - Corte de um motor de indução trifásico



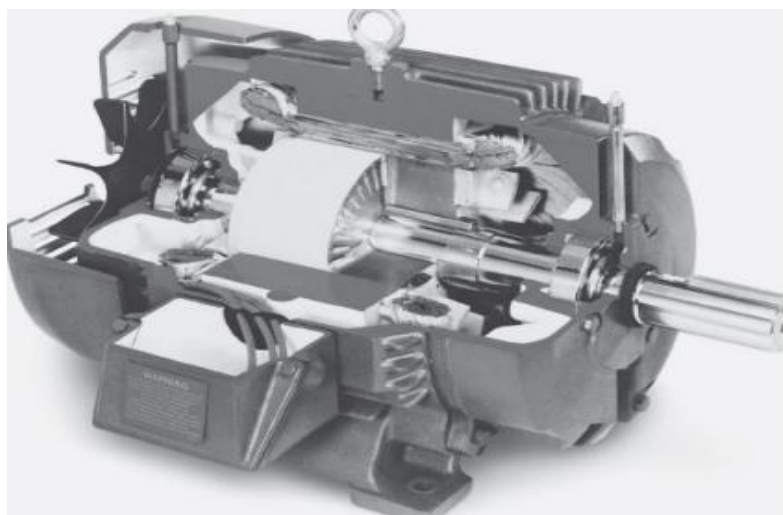
Fonte: Adaptado Weg (2023)

O item (1) se refere à carcaça que é a estrutura de suporte, possui construção robusta em ferro fundido, aço ou alumínio injetado, resistente à corrosão e normalmente com aletas. Já o (2) é o núcleo de chapas que são em aço magnético. (8) é o enrolamento trifásico, composto por três conjuntos iguais de bobinas, uma para cada fase, resultando num sistema trifásico equilibrado ligado à rede trifásica de alimentação. Os itens (1), (2) e (8) constituem o estator da máquina elétrica. O item (7) é o eixo, que transmite a potência mecânica gerada pelo motor. (3) é o núcleo de chapas, que possui as mesmas características das que estão no estator. (12) são as

barras e anéis de curto-circuito, fabricados em alumínio injetado sob pressão numa única peça. Os itens (7), (3) e (12) correspondem ao rotor do motor de indução. As outras partes que constituem motor são listadas a seguir: (4) tampa, (5) ventilador, (6) tampa defletora, (9) caixa de ligação, (10) terminais e (11) rolamentos (Weg, 2023).

Uma vantagem é que o motor de indução não precisa de ímãs permanentes, ao invés disso, o campo magnético é gerado pela corrente elétrica que passa pelas bobinas fixadas no estator. Além disso, possui construção simples, baixo custo de fabricação e excelentes características de torque-velocidade (Chan, 2002). A Figura 15 ilustra um motor de indução. Alguns modelos de carros que utilizam o motor de indução são: Volkswagen ID.3 e ID.4 e o Tesla Model X (Tupi, 2022).

Figura 15 - Motor de Indução



Fonte: Umans (2014)

3.4.2 Motor de relutância

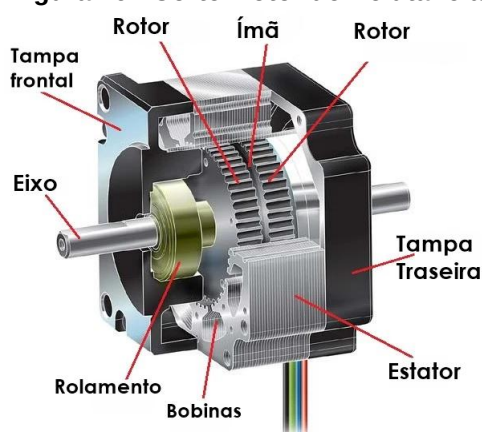
Em um motor de relutância, a produção de conjugado se relaciona com a tendência do rotor de se alinhar à uma posição de relutância mínima, associada ao trajeto das linhas de força do campo magnético criado. O princípio de funcionamento é diferente de outras máquinas como a de corrente contínua, indução e ímã permanente, uma vez que nestas, o conjugado criado é resultado da combinação de dois campos magnéticos distintos, um proveniente do estator e o outro do rotor. Já na máquina de relutância, existe apenas campo magnético no estator que ao atravessar o rotor, origina um conjugado eletromagnético que força a máquina a alcançar uma

posição de maior estabilidade. Sendo assim, quando uma fase é excitada surge um conjugado que tende a mover a máquina para uma posição em que a relutância do respectivo circuito magnético é mínima (Melo, 2021; Gonçalves, 2013).

Geralmente, existem apenas enrolamentos no estator, concentrados ou distribuídos pelas suas ranhuras, formando vários enrolamentos de fase que são independentes entre si e que podem ser alimentados separadamente, como é o caso do motor de relutância comutada e do motor de passo de relutância variável, ou em simultâneo que são os casos do motor de relutância síncrona e comutada (Melo, 2021).

O rotor é formado por chapas de material ferromagnético e são eletricamente isoladas entre si. A geometria das chapas tem como objetivo maximizar a variação do coeficiente de auto indução das fases do estator, em função da posição do rotor. A simplicidade do rotor é a grande vantagem, que gera um menor custo, elevada robustez e confiabilidade. Uma vez que as perdas ocorrem principalmente no estator, o resfriamento do motor é mais fácil. Dessa forma, são indicados para ambientes agressivos e com temperaturas elevadas (Melo, 2021). A Figura 16 mostra os principais componentes de um motor de relutância.

Figura 16 - Corte Motor de Relutância



Fonte: Locatelli (2021)

Algumas das vantagens referentes ao uso do motor de relutância variável (MRV) estão relacionadas à tolerância a falhas, uma vez que um sistema fiável deve proporcionar uma operação contínua, mesmo no caso de erros ou falhas nos enrolamentos de fase, conversores ou sensores. O MRV tem a capacidade de operar mesmo quando perde uma ou mais fases elétricas embora, apresente um

desempenho limitado e degradado. Além do mais, o MRV consegue operar em situações de elevadas acelerações e velocidades, tornando-o adequado para aplicações em veículos elétricos. Esse tipo de motor também apresenta desempenho robusto em elevadas temperaturas, uma vez que não possui enrolamentos no rotor, e também apresenta a capacidade de resfriamento bastante rápido. Outro ponto positivo é o rendimento, devido à simplicidade na geometria, o MRV pode alcançar valores elevados de rendimento uma vez que as perdas rotóricas baseiam-se em perdas por histerese e correntes de Foucault que são devidamente minimizadas através do material ferromagnético laminado. Assim, o MRV possui uma série de vantagens no que diz respeito à análise dos fluxos de perdas (Marques, 2012). A Figura 17 exemplifica um modelo comercial de MRV, o IE5 SynRM.

Figura 17 - MRV modelo IE5 SynRM



Fonte: ABB (2021)

Porém, existem algumas desvantagens, como a presença de ruídos e oscilações no conjugado. Também há a necessidade de codificar posições, para determinar parâmetros de atuação sobre a máquina é preciso ter a informação da posição angular do rotor para calcular com precisão os instantes adequados para a excitação e desmagnetização das diferentes fases, implicando no uso de sensores ópticos. Outro ponto negativo é que esse tipo de motor precisa de um controlador avançado e um elevado número de dispositivos de eletrônica de potência que garantem o controle da máquina (Marques, 2012). Um modelo de carro que utiliza o motor de relutância é o BMW i3 (Neocharge, 2023).

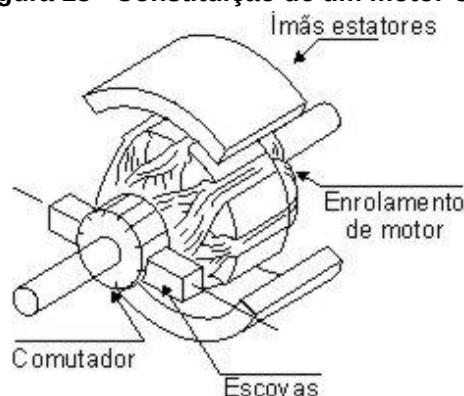
3.4.3 Motor de corrente contínua

Em uma máquina de corrente contínua o estator possui polos salientes e a sua excitação é feita por uma ou mais bobinas de campo. A distribuição do fluxo criado pelos enrolamentos de campo no entreferro é simétrica em relação à linha central dos polos de campo. Esse eixo é denominado eixo de campo ou eixo direto (Umans, 2014).

A comutação, troca de energia entre rotor e estator, pode ser feita utilizando escovas ou sem escovas (*brushless*) e com relação a velocidade, pode ser controlado apenas variando a tensão, o que difere de um motor alimentado por corrente alternada em que a velocidade é variada pela frequência. Os motores de corrente contínua possuem dois tipos de configuração. A configuração shunt, com os enrolamentos do indutor e do induzido ligados em paralelo, permitindo operar em velocidade constante. E a configuração em série, com potência constante. A configuração em série e com escovas é a mais utilizada em veículos elétricos, e possui características como ampla variação de velocidade e controle mais fácil (Azevedo, 2018).

No entanto, os acionamentos de motores CC têm uma construção volumosa, baixa eficiência, baixa confiabilidade e maior necessidade de manutenção, principalmente devido à presença das escovas (Zeraoulia; Benbouzid; Diallo, 2006). Por conta das desvantagens elucidadas, o motor CC já não é mais frequentemente empregado em VEs que possuem modelos mais novos e modernos. A Figura 18 mostra um corte de um motor CC com escovas, onde pode-se verificar as principais partes constituintes da máquina elétrica, como os ímãs do estator, os enrolamentos do rotor, o comutador e as escovas (Instituto, 2024).

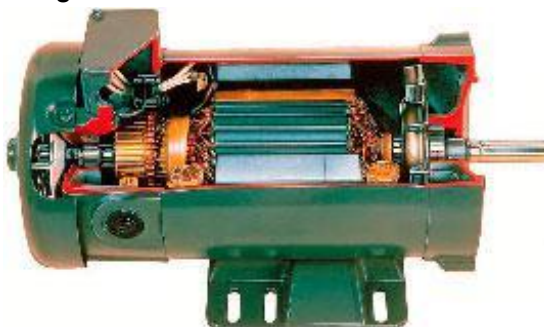
Figura 18 - Constituição de um motor CC



Fonte: Neocharge (2023)

Na Figura 19 está ilustrado o motor de corrente contínua. Alguns modelos de carros que utilizam o motor de corrente contínua são: Peugeot Partner e Chrysler TEVan (Santiago; Bernhoff; Ekergard; Eriksson; Ferhatovic; Watersleijon, 2012).

Figura 19 - Motor de Corrente Contínua



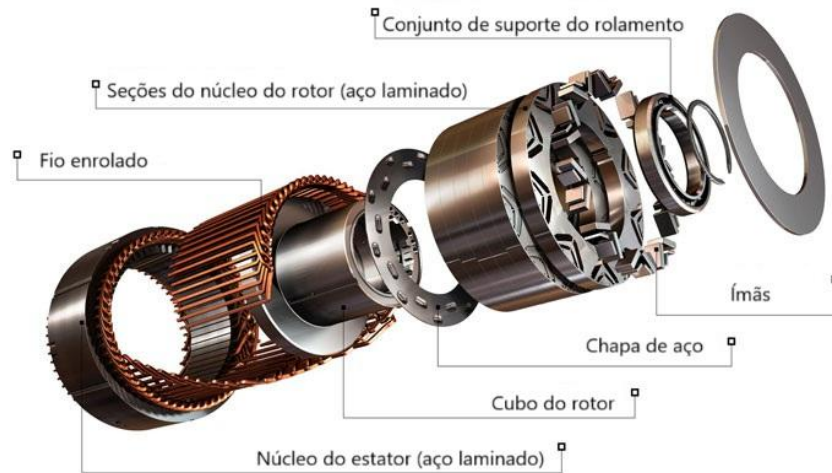
Fonte: Eletroval (2024)

3.4.4 Motor de ímã permanente

O princípio de funcionamento dos motores de ímã permanente, ou motores síncronos pois o rotor gira na mesma velocidade que o campo magnético rotativo, é que a corrente de campo produz um campo magnético estacionário. Da mesma forma, as correntes circulantes no estator do motor síncrono produzirão um campo magnético girante. Então, há dois campos no motor, sendo que o campo do rotor tende a se alinhar com o campo do estator à medida em que este gira. Podem ser do tipo BLDC (*Brushless DC*) ou PMSM (*Permanent Magnet Synchronous Motor*). O motor BLDC não possui escovas, sendo a comutação feita eletronicamente. Já os motores PMSM requerem uma alimentação com onda senoidal, podem ter os ímãs montados à superfície do rotor ou em posição interior, tem um controle mais complexo do que os BLDC, e necessitam de um sensor de corrente para cada fase (caso sejam trifásicos) (Azevedo, 2018). Na atualidade, O PMSM é o mais utilizado em VEs e está presente na bancada de estudos que simula o sedã BYD Qin EV. Portanto, esse tópico se aprofundará nas características e funcionamento do PMSM.

A Figura 20 ilustra a composição de um PMSM. Pode-se observar a presença dos principais componentes, que são: ímãs, enrolamento, estator e rotor.

Figura 20 - Partes constituintes do motor de ímã permanente

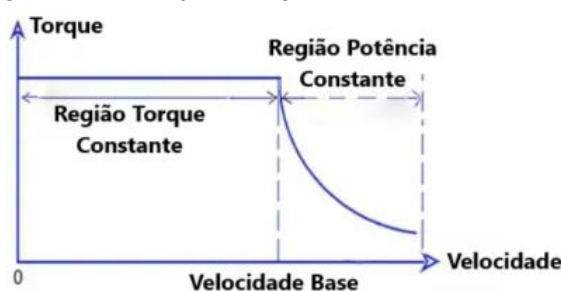


Fonte: Adaptado About motors (2023)

As máquinas com ímãs permanentes são de grande aplicação nos VEs e em geradores de turbinas eólicas de grande porte. Apesar de que as harmônicas espaciais e temporais de fluxos produzidos pelo estator possam induzir perdas na estrutura do rotor de uma máquina PMSM, os rotores são relativamente livres de perdas porque os ímãs produzem fluxo sem dissipação. Essa característica do motor gera aumento da eficiência energética (Umans, 2014).

Alguns dos pontos positivos relacionados ao motor de ímã permanente são peso e volume reduzidos (mais compacto), alto torque em baixa velocidade e menor emissão de ruídos (Zeraoulia; Benbouzid; Diallo, 2006). Além disso, o PMSM possui estrutura simples, boa capacidade de dissipação de calor, alta eficiência, alto fator de potência e ampla faixa de velocidades (Ibrahim; Rjabtšikov, 2023). Outra característica que deve ser ressaltada é que os motores síncronos de ímã permanente operam numa região de torque constante em velocidade média e em região de potência constante para alta velocidade, conforme a Figura 21, ponto importante para o pleno funcionamento de um VE (Manisha; Yadav, 2022).

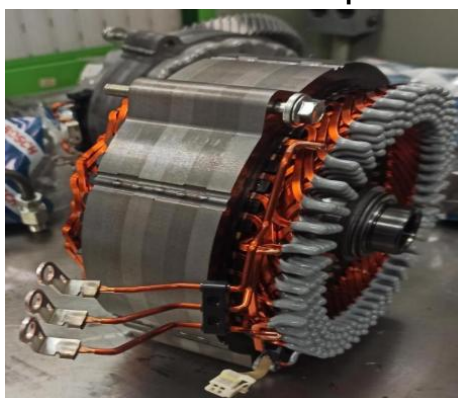
Figura 21 - Relação Torque-Velocidade do PMSM



Fonte: Adaptado Manisha e Yadav (2022)

A Figura 22 mostra um exemplo de motor de ímã permanente, trata-se de um motor MG2 de um Toyota Corolla modelo híbrido. Alguns modelos de carros que utilizam o motor de ímã permanente são: Nissan Leaf e Toyota Prius (Tupi, 2022). O motor presente na bancada de treinamentos, e que simula o veículo BYD Qin EV, é um motor síncrono de ímã permanente.

Figura 22 - Motor síncrono de ímã permanente MG2



Fonte: Junior (2024)

As Tabelas 2 e 3 trazem os resultados de um estudo feito considerando os principais motores utilizados em VEs e os seus desempenhos em alguns dos quesitos mais importantes para o pleno funcionamento de um automóvel. Na Tabela 2, os parâmetros estudados foram: densidade de potência, eficiência, facilidade de implementação do sistema de controle, confiabilidade, custo, grau de desenvolvimento da tecnologia, níveis de ruído e manutenção. Pode-se verificar que os motores de indução e de ímã permanente se destacam. Percebe-se que o motor de indução possui maior simplicidade no sistema de controle, confiabilidade, além de possuir tecnologia amplamente conhecida, baixo custo e pouca emissão de ruídos. Já o motor de ímã permanente apresentou ótima eficiência, devido à ausência de perdas no enrolamento do motor, e densidade de potência. Além disso, possui baixíssimos

níveis de ruído e requer pouca manutenção. Observa-se ainda que o PMSM foi classificado como custo médio, enquanto que os outros motores apresentaram custos baixos ou muito baixos. Entretanto, considerando as características que fazem esse motor se sobressair em comparação aos outros e a utilização em larga escala pela indústria automobilística, o PMSM tem se tornado mais atrativo economicamente.

Tabela 2 - Comparativo entre motores elétricos

Motores elétricos e Características	Motor de Corrente Contínua	Motor de Ímã Permanente	Motor de Relutância	Motor de Indução
Densidade de potência	baixo	muito alto	médio	médio
Eficiência	baixo	muito alto	médio	médio
Controle	muito fácil	fácil	médio	muito fácil
Confiabilidade	médio	alto	muito alto	muito alto
Custo	baixo	médio	baixo	muito baixo
Grau de desenvolvimento da tecnologia	alto	alto	alto	muito alto
Níveis de ruído	médio	muito baixo	alto	muito baixo
Manutenção	alto	baixo	baixo	baixo

Fonte: Adaptado Fernando, Mahmoudi e Tahir (2021)

A Tabela 3 compara eficiência apenas dos motores, apenas dos componentes eletrônicos e do conjunto. O PMSM apresenta um ótimo resultado, possuindo as maiores eficiências quando se considera apenas o motor e quando é analisado o conjunto completo do sistema de acionamento (motor e componentes da eletrônica de potência). Pode-se também verificar a baixa eficiência do motor de corrente contínua, característica que contribui para a pouca aplicação desse motor em VEs.

Tabela 3 - Comparativo em percentual da eficiência dos MEs

Motor Elétrico	Apenas motor	Apenas componentes eletrônica de potência	Motor e componentes eletrônica de potência
Motor de Corrente Contínua	80	98	78
Motor de Indução	90	93	84
Motor de ímã Permanente	97	93	90
Motor de Relutância	94	90	85

Fonte: Adaptado Manisha e Yadav (2022)

3.5 O Inversor de Frequência

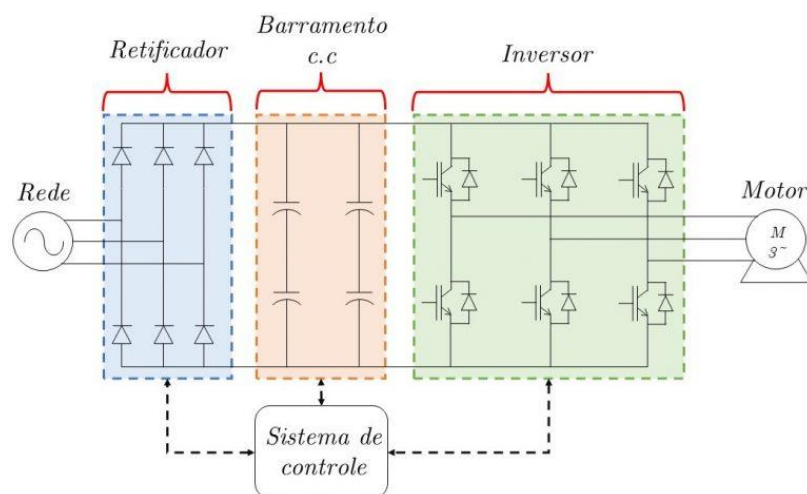
A função de um inversor de frequência é converter uma tensão contínua em alternada, dessa forma, transformando a energia disponível, por exemplo, numa

bateria (tensão contínua) para uma tensão alternada com valores eficazes de tensão e frequência para que trabalhos específicos possam ser executados. Além disso, por exemplo, quando o VE é carregado por meio da rede de distribuição de energia elétrica, o inversor converte a corrente alternada em contínua para alimentação da bateria por meio da etapa de retificação (Bresolin, 2023).

A propulsão de um VE se dá, normalmente, pelo uso de um motor CA e é alimentado com uma fonte CC, por meio de bateria ou célula de combustível, que tem tensão terminal constante. Assim, um inversor CC/CA de frequência e tensão variáveis é necessário para alimentar o motor CA. Um inversor CC/CA geralmente é constituído por chaves eletrônicas e diodos de potência (Ebrahimi; Ehsani; Gao; Longo, 2018). A Figura 23 traz o esquemático de um conversor, que possui o estágio inicial CA/CC e final CC/CA. O inversor de frequência é composto por quatro subsistemas: retificador (conversor CA/CC), barramento CC, inversor (conversor CC/CA) e sistema de controle.

Na etapa inicial, retificador, tem-se a tensão sinusoidal que é retificada através de uma ponte de diodos, convertendo a tensão alternada da rede de energia em contínua. Em seguida, no barramento CC, a tensão resultante da etapa anterior, que é contínua e pulsante é filtrada por um banco de capacitores. No terceiro estágio, inversor, há a conversão da tensão contínua entregue pelo barramento CC em alternada para alimentação do motor. Durante todo o processo, o sistema de controle é requerido para gerenciar o funcionamento do inversor. O sistema de controle, geralmente é microcontrolado, e monitora variáveis de interesse, como tensão, corrente e velocidade do motor, produzindo sinais de referência no interior do microcontrolador, que são convertidos em pulsos para chaveamento dos componentes eletrônicos do inversor. Também são implementadas proteções para o motor nos sistemas de controle, como: sobrecargas, curto-circuito e rotor travado. Além de proteções para o inversor, como: fuga à terra, sobrecorrentes, sobretensões da rede e sobretensões do barramento CC (Soares, 2023).

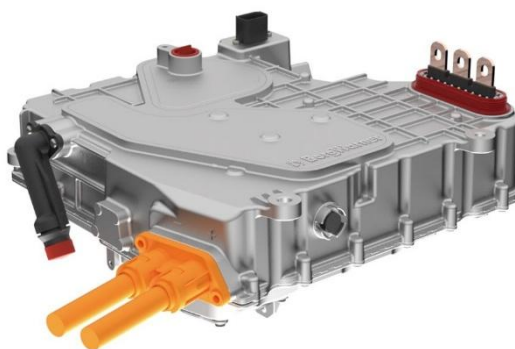
Figura 23 - Topologia de um inversor de frequência



Fonte: Soares (2023)

Ainda, a tensão CA resultante é controlada por um estágio PWM (Pulse Width Modulation), ou Modulação por Largura de Pulso, que faz com que a corrente aplicada ao motor se comporte como uma onda senoidal praticamente perfeita (Bresolin, 2023). A Figura 24 ilustra um exemplo de inversor de frequência empregado em VEs.

Figura 24 - Inversor de frequência utilizado em VEs



Fonte: Borgwarner (2022)

3.6 Caixa de redução – Gearbox

A caixa de redução tem a função de fornecer algumas relações de transmissão do eixo de entrada ao eixo de saída de um *powertrain* para criar um perfil de torque-velocidade que atenda aos requisitos da carga. O comando final geralmente é um par de engrenagens que fornece uma redução adicional de velocidade e distribui o torque para cada roda através do diferencial (Ebrahimi; Ehsani; Gao; Longo, 2018).

Os carros com motor de combustão interna necessitam de um valor inicial de rotação (rotação mínima) para atingir o torque nominal, em seguida, conforme a rotação (velocidade) aumenta, o torque diminui. Assim, torna-se essencial a presença de uma caixa de câmbio. Veículos movidos a MCI possuem sistemas de transmissão com diversas marchas para permitir que o motor atinja uma variedade de velocidades em faixas de potência ideais, melhorando a eficiência do veículo.

Esse processo pode ocorrer por meio da transmissão manual com até 7 marchas, em que o motorista usa o pedal da embreagem e a alavanca de câmbio para alterar as marchas. Ou através da transmissão automática em que a caixa de câmbio altera as marchas conforme a velocidade e rotação do motor, sem interferência do condutor.

A Figura 25 mostra a caixa de redução, gearbox, presente na banca de treinamentos que simula o BYD Qin EV.

Figura 25 - Caixa de redução do BYD Qin EV



Fonte: Elaboração própria (2024)

Os VEs também têm um tipo de transmissão, mas não necessitam de uma caixa de câmbio, utilizando apenas engrenagens de redução, o que significa que não são necessárias mudanças de marcha. A grande diferença entre a transmissão

presente nos veículos convencionais à combustão interna e os VEs é que o motor elétrico entrega o torque nominal, mesmo em baixas rotações, dispensando o uso de uma caixa de câmbio, requerendo apenas uma caixa de redução acoplada ao eixo que adequa as diversas faixas de rotação disponíveis (Ebrahimi; Ehsani; Gao; Longo, 2018).

4. BANCADAS DE TREINAMENTO BEIFANG

A fim de trazer uma experimentação prática, utilizou-se uma das bancadas do conjunto que compõe o conjunto do veículo elétrico BYD Qin EV. Essas bancadas de treinamento são feitas a partir do sedã BYD Qin EV original após desmontagem e adaptação para tornar a plataforma de estudos mais didática. O conjunto é composto por cinco plataformas: bateria, acionamento do motor, sistema de direção, sistema de ar-condicionado e a bancada das aplicações elétricas (sistema de luzes, áudio e itens relacionados ao conforto dos passageiros).

Esse equipamento de testes suporta a detecção da estática original do veículo, fluxo de dados dinâmico, leitura e eliminação de códigos de falha e simulação de configuração de falhas (Beifang, 2023). As bancadas foram especialmente desenvolvidas para o ensino, aprendizagem, pesquisa, reparo, operação, controle, manutenção e treinamento de estudante na área de mobilidade elétrica e foram adquiridas no projeto de pesquisa e desenvolvimento – Converte I (ANEEL-CELESC-IFSC).

4.1 Bancada do ar-condicionado

A Figura 26 ilustra a bancada referente ao sistema de ar-condicionado. O equipamento é composto por um sistema automático de ar-condicionado e aquecimento original do BYD Qin EV.

Figura 26 - Bancada de ar-condicionado



Fonte: Elaboração própria (2024)

Alguns dos principais componentes da bancada são: condensador, motor, ventilador, painel de medição e reservatório do fluido refrigerante para o condensador. Através da operação da plataforma, é apresentada de forma intuitiva, a relação entre o sistema de controle e os componentes principais do ar-condicionado, sendo possível obter informações como as posições dos dispositivos instalados e parâmetros operacionais.

4.2 Bancada de aplicações elétricas

Na Figura 27 está a bancada que é equipada com os principais itens dos módulos de iluminação e conforto do automóvel. O sistema é composto pelos retrovisores, faróis, limpadores de vidros elétricos, travas para as portas, vidros elétricos e sistema sonoro. A plataforma é fácil de operar e extremamente interativa, fazendo com que os estudantes possam verificar visualmente o funcionamento dos sistemas que o constituem.

Figura 27 - Bancada de iluminação e conforto



Fonte: Elaboração própria (2024)

4.3 Bancada da bateria

Na Figura 28 é apresentada a bancada do sistema de gerenciamento da bateria. A plataforma é composta pela bateria de lítio, fiação para conexão de alta tensão e o painel de testes. O banco de baterias possui tensão nominal de 408,8 V

em corrente contínua, energia de 53,1 kWh e ciclos completos de carga e descarga de mais de 2.000 vezes. O sistema de gerenciamento da bateria tem a função de equalização e proteção contra curto-circuito, sobretensão, subtensão, sobrecarga e superaquecimento. Além de possuir um módulo de comunicação CAN com o carregador. Possui ainda um sistema que monitora o carregamento e estima o estado de carga, SOC (state of charge).

Figura 28 - Bancada de gerenciamento da bateria



Fonte: Elaboração própria (2024)

4.4 Sistema de direção

A Figura 29 traz o sistema de direção do BYD Qin EV. O conjunto é formado pelo eixo e suspensão dianteira, volante, mecanismo de transmissão e conjunto de rodas, que tornam a bancada mais realista. Além disso, há um painel de medições para verificar a operação da bancada.

Figura 29 - Bancada de direção



Fonte: Elaboração própria (2024)

4.5 Sistema de acionamento do motor

Como mencionado, a bancada que serviu como base para este trabalho foi a que se refere ao sistema de acionamento do motor, conforme apresentada na Figura 30.

Figura 30 - Bancada sistema de acionamento do motor



Fonte: Elaboração própria (2024)

A bancada de treinamento do sistema de acionamento do motor inclui um motor síncrono de ímã permanente, eixo de transmissão de potência, conjunto da junta de

direção, sistema eletrônico de estacionamento, sistema de refrigeração, pedal de freio, pedal do acelerador, mecanismo de marchas, painel de instrumentos e, portanto, pode simular aceleração, desaceleração, frenagem, carregamento, estacionamento e outras funções através do caixa de câmbio (*drive e park*) e do mecanismo de transmissão.

As características de sinal do circuito, do inversor e do motor que sejam relevantes podem ser medidos através do painel de teste, demonstrando completamente a composição, estrutura e processo de funcionamento do sistema de controle do motor. A plataforma de treinamento é fácil de operar, segura e confiável para a realização de testes práticos (Beifang, 2023).

A seguir, algumas especificações técnicas dos componentes que integram esse equipamento:

- a) modelo da bancada: BF-WJT-Qin-002;
- b) especificação da bancada: 1950×1310×1100 mm;
- c) temperatura de armazenamento: -40°~+50°;
- d) tipo de motor: Motor síncrono de ímã permanente;
- e) torque nominal: 160 N.M;
- f) torque máximo: 310 N.M;
- g) potência nominal: 80 kW;
- h) potência máxima: 160 kW;

A estrutura do equipamento é composta de um painel de moldagem integral feita de folha metal. O painel de medição possui placa de alumínio-plástico de 4 mm, que nunca desbota graças ao processo de pulverização UV, e o painel de operação do equipamento está alinhado com o conceito de design de ergonomia e conveniência para que os alunos façam seus estudos utilizando a bancada. Para as medições e análises de sinais, multímetros e osciloscópios podem ser utilizados na bancada. Também é possível ler os códigos de falhas do sistema de controle do motor e ler o fluxo de dados dinâmico, configurar parâmetros e outras funções de diagnóstico através do decodificador especial para veículos de novas energias (Beifang, 2023).

5. DESCRIÇÃO E RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS REALIZADOS

Os experimentos práticos descritos neste capítulo são referentes aos testes que podem ser executados na bancada de acionamento do motor do veículo elétrico BYD Qin EV adquirida pelo laboratório Emol do IFSC através do projeto Converte I.

As medidas de resistência e tensão foram feitas utilizando um multímetro digital modelo TY720 fabricado pela Yokogawa (Figura 31), que possui as funções de medição de tensão alternada e contínua, corrente alternada e contínua, resistência, frequência, temperatura, capacitância, além de realizar teste de continuidade e outros. O multímetro tem a capacidade de reter dados e calcular o valor relativo e percentual, e ainda o aparelho possui uma precisão de 0,020%.

Figura 31 - Multímetro digital TY720



Fonte: Yokogawa (2024)

Os roteiros seguem a seguinte estrutura: primeiro é apresentada uma breve descrição teórica sobre o sistema do veículo e os componentes envolvidos na atividade em questão, depois tem-se o objetivo do teste, o seu passo a passo e os resultados obtidos.

5.1 Experimento 1 - Sensor de posição do acelerador

O objetivo da atividade prática é verificar os valores de tensão entre os terminais do acelerador do veículo elétrico BYD Qin EV. Inicialmente, é necessário

compreender o funcionamento do sistema que envolve a aceleração do automóvel. A Figura 32 apresenta o pedal do acelerador na bancada.

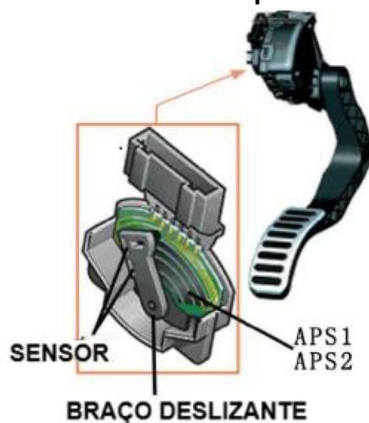
Figura 32 - Pedal do acelerador



Fonte: Elaboração própria (2024)

Já a Figura 33 mostra a composição do pedal do acelerador e do sensor de posição.

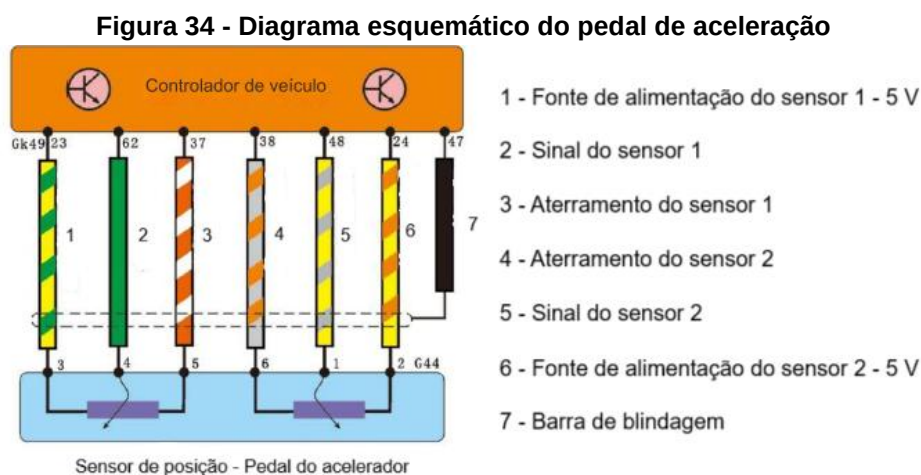
Figura 33 - Estrutura do pedal de aceleração



Fonte: Adaptado Beifang (2024)

A fim de tornar o sistema mais seguro, o sensor de posição do pedal do acelerador é projetado com sensores de saída dupla, que são compostos por dois potenciômetros, APS 1 e APS 2. Os dois sensores operam na mesma tensão de referência, que é fornecida pela VCU (unidade de controle do veículo).

A Figura 34 traz um diagrama esquemático das ligações dos sensores do pedal de aceleração. O potenciômetro 01 refere-se aos pinos [23, 62, 37], já o potenciômetro 2 refere-se aos pinos [48, 24, 47] da bancada.



Fonte: Adaptado Beifang (2024)

Quanto ao princípio de funcionamento do sensor presente no pedal de aceleração, à medida que a posição do pedal é alterada, o valor da resistência entre o contato deslizante do potenciômetro e outros terminais também sofre uma alteração linear, ocasionando um sinal de tensão que reflete o quanto e em que taxa o pedal do acelerador foi pressionado. Os dois sensores são integrados ao pedal do acelerador.

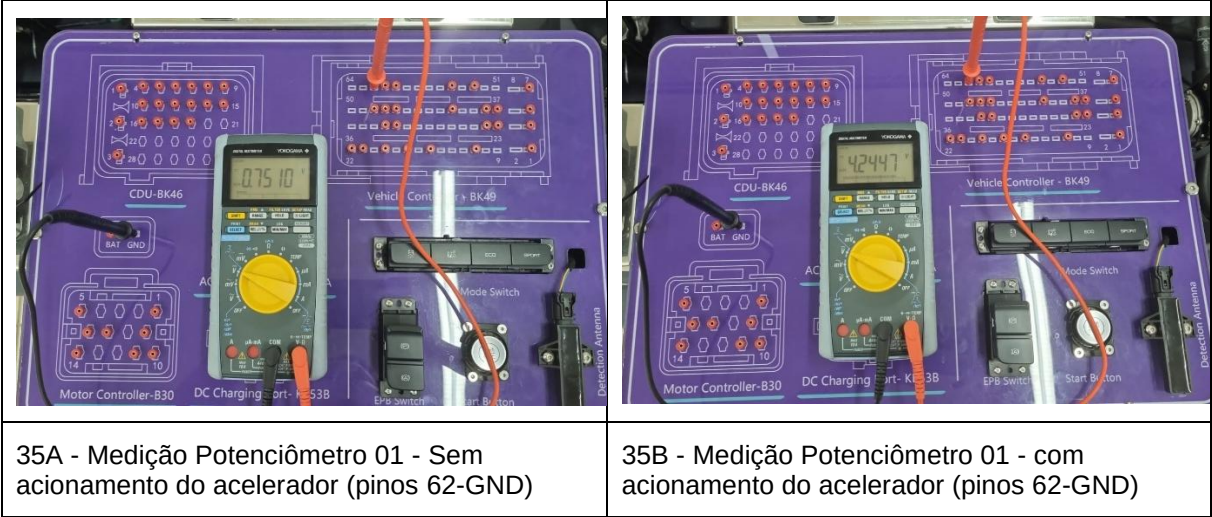
Esse potenciômetro funciona pelo princípio de linha de derivação, e a VCU fornece 5 V ao sensor. O potenciômetro é conectado à escova deslizante do sensor dentro do eixo. Quando a posição do sensor de posição muda, a escova altera a tensão entre a linha de sinal e o terminal de aterramento, e a linha de compressão dentro da VCU altera a tensão para o sinal de posição do pedal do acelerador, conforme a intenção do motorista de controlar o veículo (Beifang, 2024). A atividade prática proposta busca detectar os circuitos do sensor de posição do pedal do acelerador. Logo, foram realizadas medições de tensão entre terminais dos sensores.

5.1.1 Medições do Sensor - Potenciômetro 01:

Para o potenciômetro 01, inicialmente foi medida a tensão de alimentação do sensor 1. A Figura 35A mostra o valor inicial (0,7510 V) e a Figura 35B apresenta o valor final (4,2447 V). Conforme o manual do fabricante o valor mínimo deve ser de 0

V e o máximo de 5 V, valores que não são alcançados na prática, esse comportamento garante a segurança do sistema.

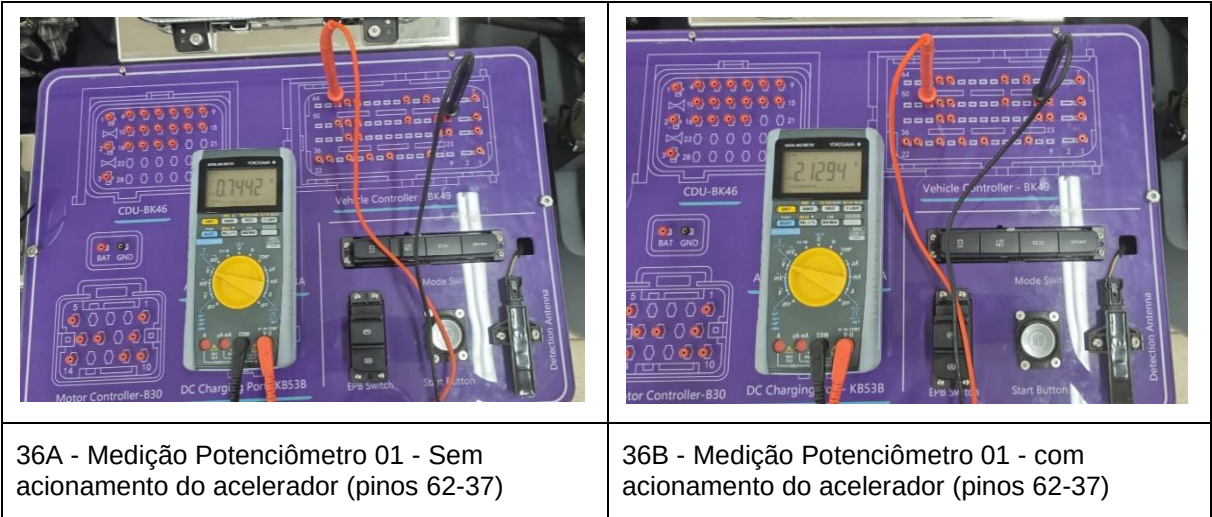
Figura 35 - Medição entre pino 62 e GND - Potenciômetro 01



Fonte: Elaboração própria (2024)

Em seguida, foram realizadas as medições entre os pinos 62 e 37. A Figura 36A traz o valor de tensão obtido para o instante inicial, sem o acionamento do acelerador (0,7442 V). Já a Figura 36B retrata o momento final, indicando a máxima aceleração (2,1294 V), ou seja, o fim de curso do acelerador. É importante salientar que a princípio o valor inicial do acelerador deveria ser 0 V (zero volts), portanto, o valor de 0,7442 V indica um valor de *offset* (valor base inicial) para a posição do acelerador sem ser pressionado, isto é feito para que o sistema entenda que existe uma pequena aceleração, mesmo sem que o pedal esteja pressionado.

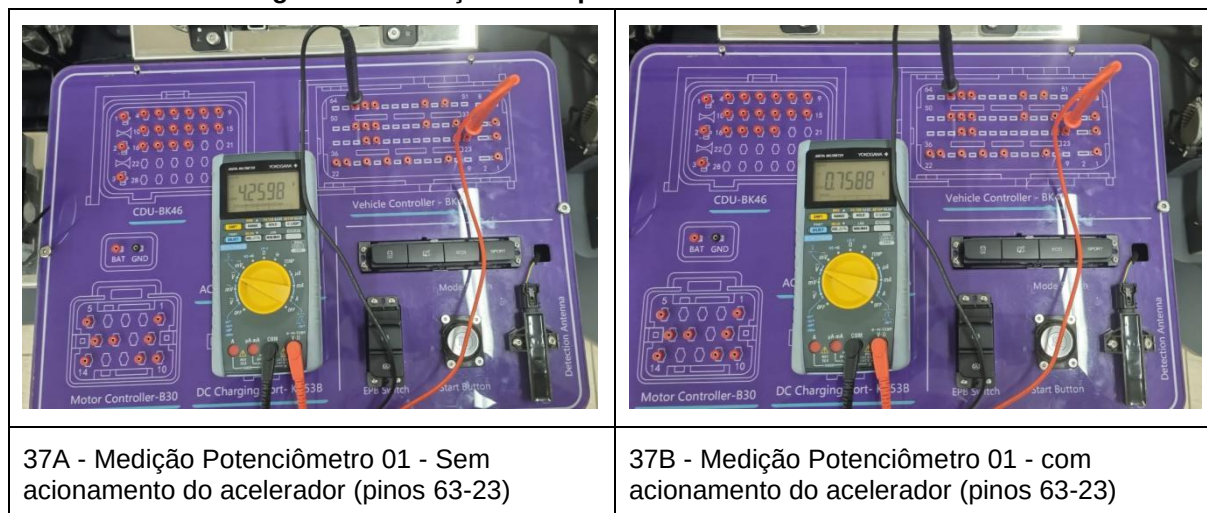
Figura 36 - Medição entre pino 62 e 37 - Potenciômetro 01



Fonte: Elaboração própria (2024)

Por fim, para o primeiro sensor - potenciômetro 01, foram feitas as medições entre os pinos 62 e 23. A Figura 37A apresenta a medição feita no instante inicial, com o pedal de aceleração em repouso (4,2598 V). Na Figura 37B está o resultado obtido no momento final, com o acelerador totalmente pressionado (0,7588 V).

Figura 37 - Medição entre pino 62 e 23 - Potenciômetro 01



Fonte: Elaboração própria (2024)

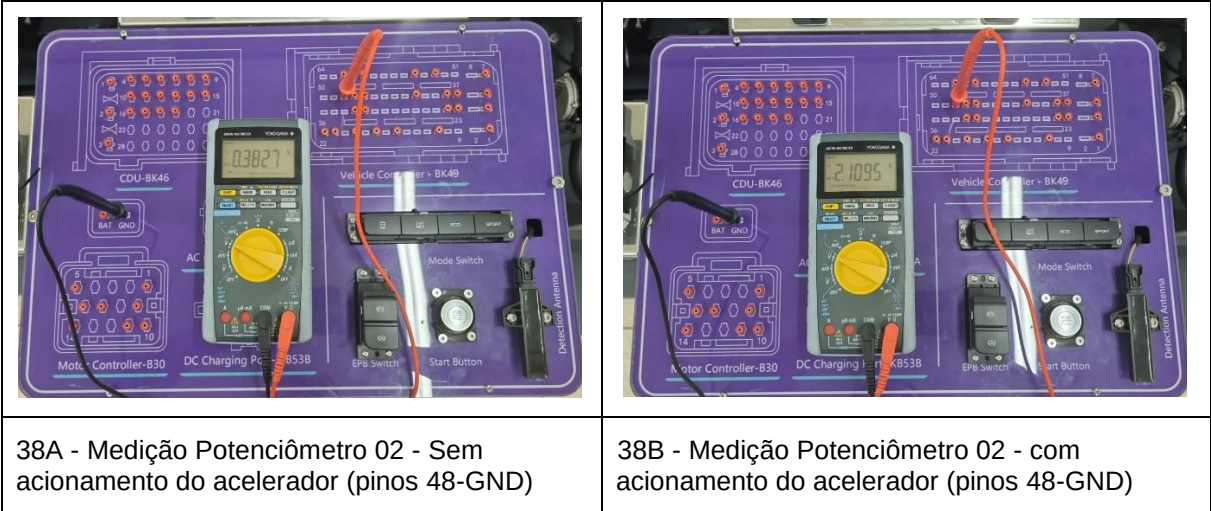
Analisando as Figuras 36A, 36B, 37A e 37B, constatou-se que para as medições entre os pinos 62 e 37, a evolução da tensão é crescente, ou seja, quanto maior a aceleração, maior a tensão entre os terminais.

Já os resultados obtidos durante as aferições feitas entre os pinos 62 e 23, mostrou um comportamento inverso, quanto maior a aceleração, menor a diferença de potencial entre os dois pontos do circuito. Indicando que, apesar dos valores numéricos não serem exatamente os esperados, o comportamento do sistema é condizente com a operação do acelerador.

5.1.2 Medições do Sensor - Potenciômetro 02:

Para o potenciômetro 02, inicialmente foi medida a tensão de alimentação do sensor 2. A Figura 38A mostra o valor inicial (0,3827 V) e a Figura 38B apresenta o valor final (2,1095 V). Novamente, os valores máximos e mínimos vistos no manual do fabricante não são obtidos no experimento prático, esse comportamento garante a segurança do sistema.

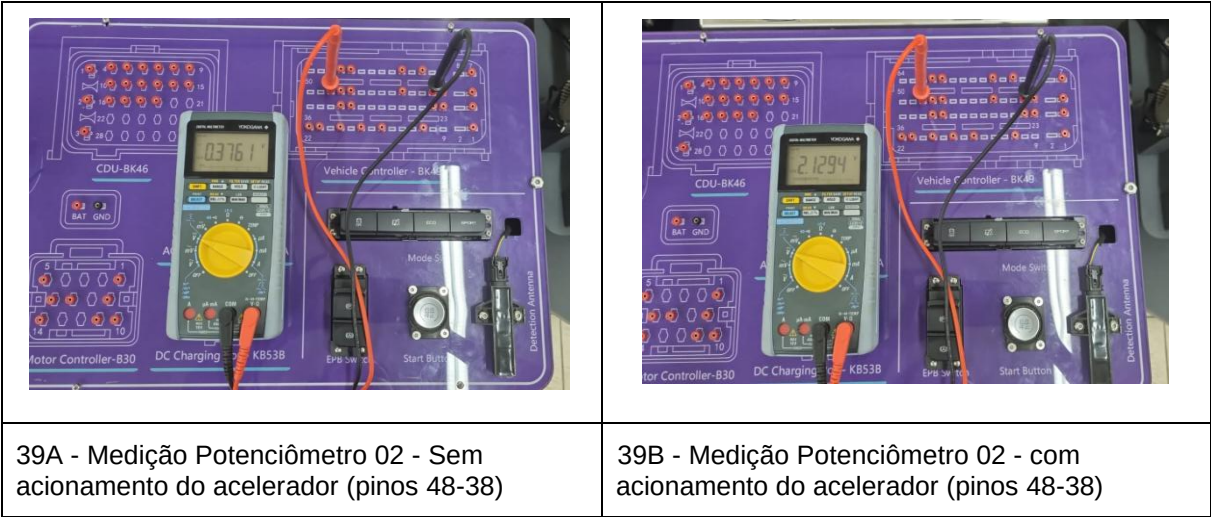
Figura 38 - Medição entre pino 48 e GND - Potenciômetro 02



Fonte: Elaboração própria (2024)

Na sequência, para o potenciômetro 2, foram realizadas as medições entre os pinos 48 e 38. A Figura 39A expõe o valor de tensão obtido para o instante inicial (0,376 V), sem o acionamento de pedal de aceleração. Na Figura 39B está o resultado final, com a máxima aceleração (2,1294 V). No passo seguinte, para o segundo sensor do pedal de aceleração, foram feitas as aferições entre os pinos 48 e 24.

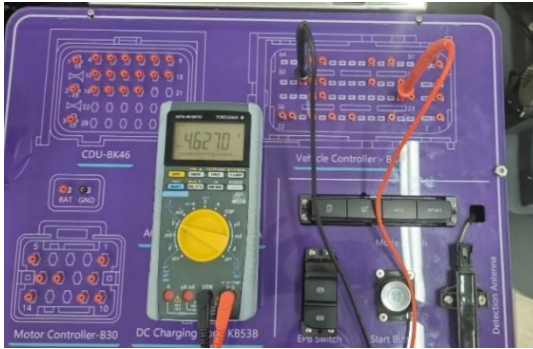
Figura 39 - Medição entre pino 48 e 38 - Potenciômetro 02



Fonte: Elaboração própria (2024)

A Figura 40A apresenta a medição feita no instante inicial (4,6270 V), com o pedal de aceleração em repouso. Na Figura 40B está o resultado obtido no momento final (2,8832 V), com o acelerador totalmente pressionado.

Figura 40 - Medição entre pino 48 e 24 - Potenciômetro 02

	
40A - Medição Potenciômetro 02 - Sem acionamento do acelerador (pinos 48-24)	40B - Medição Potenciômetro 02 - com acionamento do acelerador (pinos 48-24)

Fonte: Elaboração própria (2024)

Assim como foi analisado para o sensor 1, constatou-se através das Figuras 39A, 39B, 40A e 40B, que para as medições entre os pinos 48 e 38, a evolução da tensão é crescente, ou seja, quanto maior a aceleração, maior a tensão entre os terminais. Por outro lado, os resultados obtidos durante as aferições feitas entre os pinos 48 e 24, mostraram um comportamento inverso, quanto maior a aceleração, menor a diferença de potencial entre os dois pontos do circuito. Visto então que, apesar dos valores numéricos não serem exatamente os esperados, o comportamento do sistema está de acordo com o funcionamento do potenciômetro.

5.1.3 Medições do Sensor do Acelerador - Caixa de Falhas:

Com o intuito de finalizar a primeira atividade prática, foi feita a medição do sinal de tensão para a situação em que o pino presente na caixa de falhas é desconectado. Dessa forma, o borne VCU-BK49/48 foi retirado (Figura 41A), simulando a falha no sensor do pedal de aceleração.

De acordo com a manual do fabricante das bancadas, espera-se que a medição entre o pino 48 e o GND seja de 0 V, confirmando que o sinal do sensor 2 foi perdido. A Figura 41B apresenta a medição realizada. Além disso, ao pressionar o pedal do acelerador, não há alteração no valor de tensão. Ou seja, com a perda do sinal, também é perdida a aceleração. Não foi possível perceber aviso ou alerta de não conformidade do sistema no painel interativo.

Figura 41 - Medição do Acelerador - Caixa de Falhas

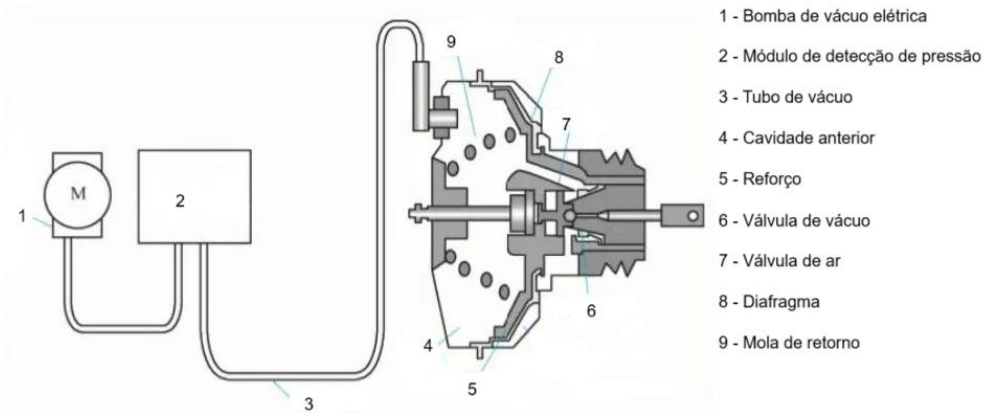
	
41A - Caixa de Falhas da bancada <i>Powertrain</i> - Pino VCU-BK49/48 retirado (Falha)	41B - Valor medido no acelerador com a falha presente

Fonte: Elaboração própria (2024)

5.2 Experimento 2 – Sensor de pressão de vácuo

O objetivo da atividade prática 2 é verificar o funcionamento do sensor de pressão de vácuo do BYD Qin EV, o qual pertence a bancada de *powertrain* Beifang. Para melhor descrever o experimento, é importante compreender o funcionamento do sistema que envolve o sensor e a frenagem do veículo. O reforço de vácuo do sistema de freio no VE é acionado pelo sistema de vácuo, que é composto pela bomba de vácuo elétrica, o módulo de detecção de pressão, a válvula de vácuo e de ar, o diafragma e outros componentes, conforme a Figura 42.

Figura 42 - Estrutura do sistema de freio



Fonte: Adaptado Beifang (2024)

Quando o motorista pressiona o freio, primeiramente a válvula de vácuo é fechada e as câmaras dianteira e traseira são fechadas na sequência; então a válvula

de ar é aberta e a câmara traseira é conectada com a atmosfera. Sob a diferença de pressão, o diafragma é empurrado aumentando a força da mola de retorno e, então, pode-se perceber a potência do efeito (Beifang, 2024).

Já os sensores de pressão de vácuo (Figura 43) são usados para detectar mudanças na pressão do vácuo no sistema de frenagem e converter em sinais elétricos para realimentar o sistema de controle do veículo. A Figura 42 mostra o sensor de vácuo presente na bancada de treinamentos (*powertrain* - Beifang).

Figura 43 - Sensor de vácuo

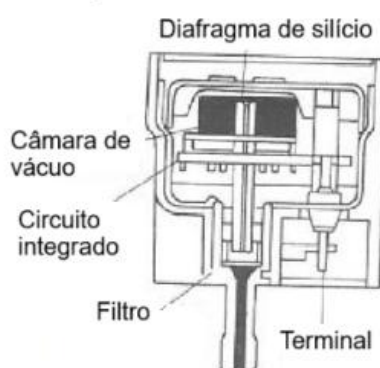


Fonte: Adaptado Beifang (2024)

Estes sensores auxiliam o sistema de controle a calcular com precisão a força do pedal de freio e garantir a estabilidade e confiabilidade durante a frenagem. E ainda, este sensor pode ajustar a força de frenagem para que o veículo se adapte a diferentes superfícies de estradas e condições de direção.

Quanto à estrutura do sensor de pressão, as partes que constituem o dispositivo estão indicadas na Figura 44.

Figura 44 - Composição do sensor de vácuo



Fonte: Adaptado Beifang (2024)

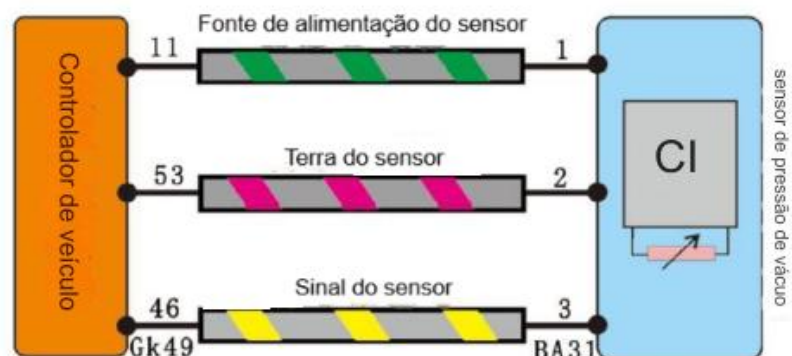
Pode-se destacar os seguintes elementos:

- Diafragma de silício: fabricado utilizando o semicondutor silício, é um elemento de conversão de pressão que tem sua funcionalidade atrelada ao efeito da piezo-elétrico (capacidade de alguns cristais gerarem tensão elétrica por resposta a uma pressão mecânica) do semicondutor;
- Câmara de vácuo: fornece a pressão absoluta de referência;
- CI: circuito integrado do sensor;
- Filtro: filtra as impurezas do tubo para evitar corrosão e acúmulo de sujeira;
- Terminal: se conecta a outros componentes através do plugue conector.

No que diz respeito ao princípio de funcionamento do sensor de pressão de vácuo, o diafragma de silício passa através da câmara de vácuo de um lado e introduz a pressão de linha de vácuo no outro lado. Sob a ação da diferença de pressão, o diafragma de silício produz tensão e deformação mecânica, e o valor da resistência se altera sob a ação do estresse, resultando na mudança do valor da tensão de saída.

Como esse valor de tensão é muito pequeno, o circuito integrado híbrido é amplificado do terminal de sinal da ECU para o circuito do microcomputador (Beifang, 2024). A Figura 45 mostra o diagrama de linha que representa o funcionamento do circuito referente ao sensor de pressão de vácuo do veículo. O experimento busca detectar os circuitos do sensor de pressão de vácuo. Para isso, foram realizadas medições de tensão entre os terminais do sensor.

Figura 45 - Composição do sensor de vácuo

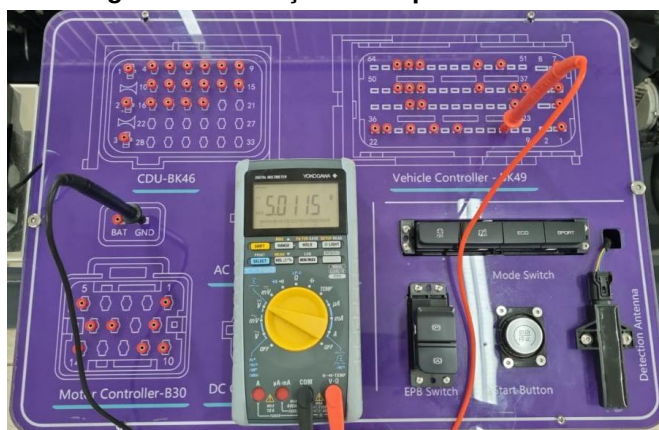


Fonte: Adaptado Beifang (2024)

5.2.1 Medições do Sensor – Pino 11:

Primeiramente, foi realizada a medição de tensão entre o pino 11, que representa a fonte de alimentação do sensor de pressão, e o GND. A Figura 46 traz o valor de tensão obtido (5,0115 V). O resultado esperado, de acordo com o manual de práticas do fabricante da bancada, é de 4,95 V.

Figura 46 - Medição entre pino 11 e GND

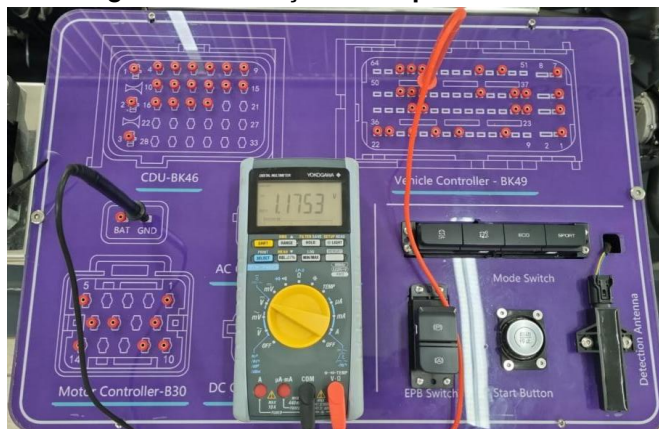


Fonte: Elaboração própria (2024)

5.2.2 Medições do Sensor – Pino 46:

Em seguida, verificou-se o valor de tensão entre o pino 46, que representa o sinal do sensor de pressão, e o GND. A Figura 47 ilustra o procedimento feito e o valor de tensão medido (1,1753 V). Novamente, o resultado obtido ficou próximo ao descrito na literatura, que seria de 1,2 V.

Figura 47 - Medição entre pino 46 e GND



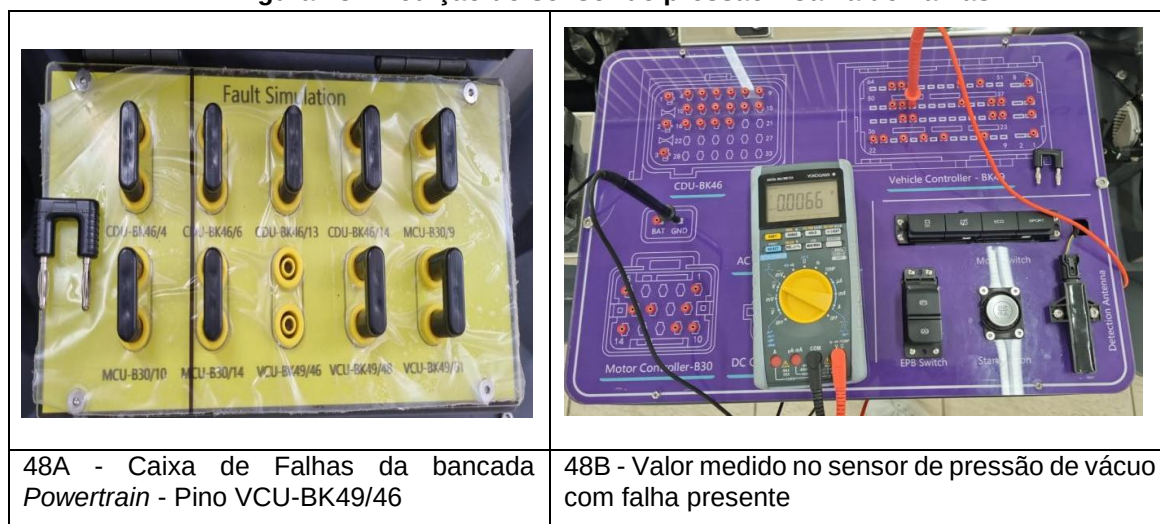
Fonte: Elaboração própria (2024)

5.2.3 Medições do Sensor de Pressão - Caixa de Falhas:

Para finalizar a segunda atividade prática, foi feita a medição do sinal de tensão para a situação em que o pino presente na caixa de falhas é desconectado. Dessa forma, o borne VCU-BK49/46 foi retirado (Figura 48A), simulando a falha no sinal do sensor de pressão de vácuo.

Considerando as informações que constam no manual do fabricante, espera-se que a medição entre o pino 46 e o GND seja de 0 V, confirmando que o sinal do sensor em questão foi perdido. A Figura 48B apresenta a medição realizada. O único indicativo da falha foi o sinal de tensão, não foi possível verificar avisos ou alertas no painel interativo.

Figura 48 - Medição do sensor de pressão - Caixa de Falhas



Fonte: Elaboração própria (2024)

5.3 Experimento 3 - Teste de carregamento lento CA

A atividade prática 3 tem como intuito verificar o funcionamento do sistema de carregamento lento CA do veículo elétrico BYD Qin EV. Portanto, é necessário compreender o funcionamento e composição do sistema. No modo de carregamento lento, o sistema é composto principalmente pelos equipamentos de fornecimento de energia, interface de carregamento lento, carregador de bordo, caixa de controle de alta tensão, bateria, controlador do veículo, fiação de alta e baixa tensão. O conjunto de alta tensão inclui: carregador de bordo e caixa de conversão DC/DC de alta tensão.

Os requisitos necessários para o processo de carregamento lento estão listados abaixo (Beifang, 2024):

- a) A conexão do cabo de carregamento confirma que o sinal está normal;
- b) A alimentação do carregador está normal (incluindo 220 V e 12 V) e o carregador está funcionando normalmente;
- c) A saída do sinal de carregamento está normal;
- d) A comunicação entre o carregador, a VCU e o BMS estão normais (relé principal fechado);
- e) Temperatura da célula da bateria de energia está entre os limites definidos $0^{\circ}\text{C} < T < 45^{\circ}\text{C}$;
- f) A diferença entre a tensão mais alta e mais baixa da bateria é $< 0,3 \text{ V}$;
- g) A diferença entre a temperatura mais alta e a mínima temperatura da célula única é $< 15^{\circ}\text{C}$;
- h) O desempenho do isolamento é $> 20 \text{ M}\Omega$;
- i) A tensão máxima atual do sistema não é maior que a sua tensão nominal (0,4 V);
- j) Os circuitos de alta e baixa tensão são conectados normalmente (o interruptor do controle remoto está desligado).

A Figura 49 abaixo ilustra o carregador, utilizado para realização da atividade prática, conectado à bancada de treinamentos.

Figura 49 - Carregador conectado à bancada do Powertrain



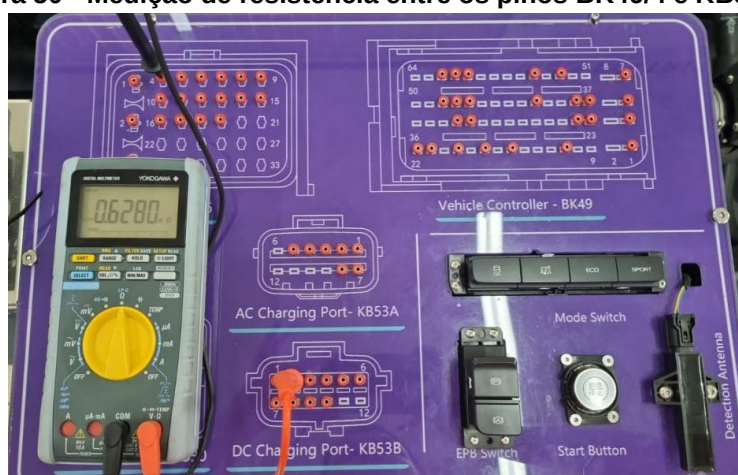
Fonte: Elaboração própria (2024)

O experimento prático proposto visa compreender o funcionamento do processo de carregamento da plataforma referente ao *powertrain* do veículo elétrico. Para isso, foram realizadas medições de resistência e tensão entre os terminais dos componentes.

5.3.1 Medição de Resistência – BK46/4 e KB53 B/2:

De acordo com o manual do fabricante, quando o carregador está conectado à bancada, ao plugar a ponteira preta do multímetro no conector representante do sistema de distribuição e carregamento BK46/4, e a ponteira vermelha no conector referente à porta CA de carregamento CA KB53 B/2, o valor de resistência medido deve ser de $0,5 \Omega$, indicando que a resistência é mínima durante o carregamento do VE. A Figura 50 apresenta a medição feita ($0,6280 \Omega$).

Figura 50 - Medição de resistência entre os pinos BK46/4 e KB53 B/2



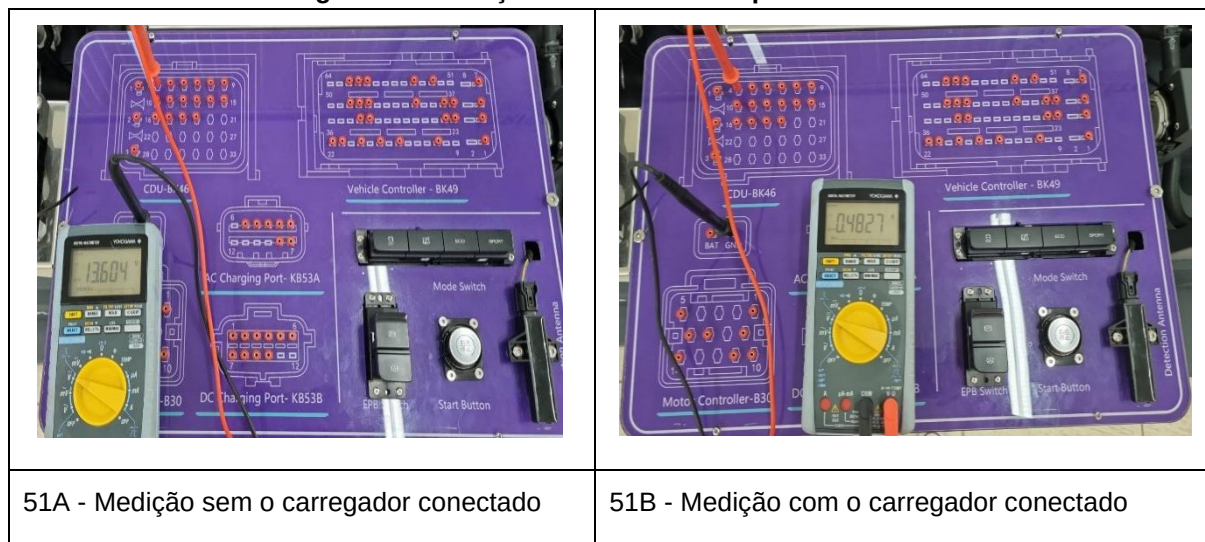
Fonte: Elaboração própria (2024)

5.3.2 Medições de Tensão – BK46/4:

Inicialmente, foram realizadas as medições entre os pinos 4 e GND. A Figura 51A expõe o valor de tensão obtido para o instante inicial, sem a conexão do carregador na bancada. O valor de referência esperado é de $13,5 \text{ V}$ e o valor aferido durante o experimento foi de $13,604 \text{ V}$. Já a Figura 51B apresenta o sinal de tensão medido ao conectar o carregador à bancada, observa-se que o valor de tensão diminui consideravelmente, estabilizando em $0,4827 \text{ V}$. O pino 4 está relacionado com o

reconhecimento do carregador pela bancada, ou ainda, confirma que o carregador está conectado à plataforma de treinamentos.

Figura 51 - Medição de tensão entre pinos 4 e GND



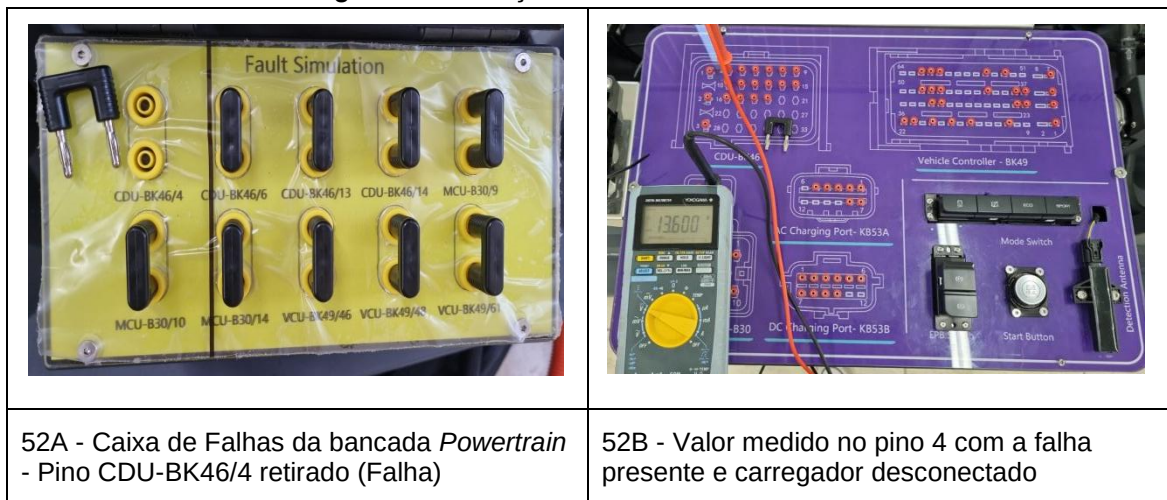
Fonte: Elaboração própria (2024)

5.3.3 Medições no Pino 4 - Caixa de Falhas:

Para finalizar a primeira etapa da atividade prática 3, foi feita a medição do sinal de tensão para a situação em que o pino presente na caixa de falhas é desconectado. Dessa forma, o borne CDU-BK46/4 foi retirado (Figura 52A), simulando a falha no sinal de confirmação de conexão do carregador.

Durante essa etapa de teste, notou-se que ao retirar o pino da caixa de falhas, não é possível conectar o carregador à bancada, indicando que o erro simulado se relaciona com o reconhecimento do carregador, confirmando que o borne CDU-BK46/4 é responsável por detectar se o carregador está ou não conectado. Além disso, ao desconectar o carregador da plataforma de simulações e retirar pino da caixa, observou-se a tensão medida se manteve em 13,600 V (Figura 52B).

Figura 52 - Medição do Pino 4 - Caixa de Falhas

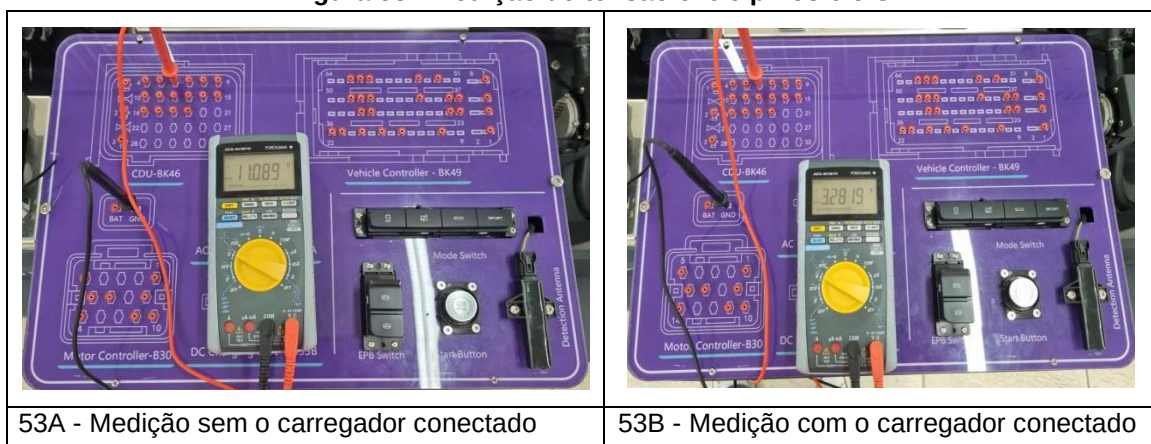


Fonte: Elaboração própria (2024)

5.3.4 Medições de Tensão – BK46/6:

Para a segunda parte da atividade prática 3, foi feito o estudo do pino 6 que também possui uma falha de funcionamento vinculada a bancada e ao funcionamento do processo de carregamento. O pino 6 é responsável pelo sinal que confirma a conexão da carga. Primeiramente, foi feita a medição do sinal de tensão entre o pino 6 e GND. A Figura 53A ilustra o valor de tensão para o instante inicial, sem a conexão do carregador na bancada. O valor de referência é de 12 V e o valor obtido na prática foi de 11,089 V. A Figura 53B apresenta o valor de tensão medido ao conectar o carregador, percebe-se novamente que o valor de tensão diminui até estabilizar em 3,2819 V.

Figura 53 - Medição de tensão entre pinos 6 e GND



Fonte: Elaboração própria (2024)

5.3.5 Medições no Pino 6 - Caixa de Falhas:

Por fim, foi realizada a medição do sinal de tensão para a situação em que o pino presente na caixa de falhas é desconectado. A Figura 54B traz a medição feita (0,0027 V).

Figura 54 - Medição do Pino 6 - Caixa de Falhas

	
54A - Caixa de Falhas da bancada <i>Powertrain</i> - Pino CDU-BK46/6 retirado (Falha)	54B - Valor medido no pino 6 com a falha presente

Fonte: Elaboração própria (2024)

Dessa forma, o borne CDU-BK46/6 foi retirado (Figura 54A), simulando a falha no sinal de conexão de carga. Considerando o manual do fabricante, espera-se que a medição entre o pino 6 e o GND, com o carregador conectado, seja de 0 V, comprovando que o sinal de conexão de carga foi perdido.

5.4 Experimento 4 - Sistema de comunicação CAN

A atividade prática 4 tem por objetivo analisar o funcionamento do sistema de comunicação CAN do veículo elétrico BYD Qín EV. Primeiramente, é feita uma breve revisão bibliográfica afim de introduzir alguns conceitos relacionados a comunicação CAN.

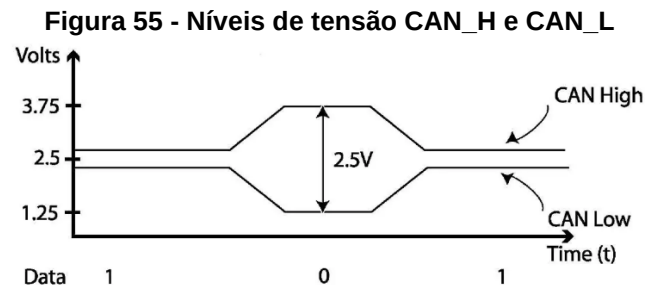
O protocolo de comunicação CAN Bus, do inglês *Controller Area Network*, é um barramento serial utilizado para interligar dispositivos em rede. Atualmente, este barramento é aplicado principalmente em sistemas embarcados por possuir características desejadas na área da comunicação de dados, como tolerância a interferência eletromagnética, prioridade de mensagens, recuperação de falhas, e outras. Uma rede CAN pode interligar até 2032 dispositivos, porém o limite prático é

de aproximadamente 110 dispositivos, em que cada dispositivo é tratado como um nó da rede. No nível físico, o link serial mais usado é composto por dois fios, o sinal tem característica diferencial, é capaz de operar até 1 Mbps, com restrições de velocidade devido a distância entre os nós. Para uma rede com extensão de 1 km, a velocidade por ser reduzida até 50 Kbps. Cada nó ligado a este link serial é capaz de perceber simultaneamente outros nós e os dados transmitidos na rede (Guimarães, 2024). A rede CAN é utilizada principalmente para a comunicação entre componentes de controle de um veículo, como é o caso do BYD Qin EV.

O CAN é um protocolo de comunicação serial síncrono. Esse sincronismo entre os módulos conectados à rede é feito em relação ao início de cada mensagem lançada ao barramento. Utiliza o conceito multi-mestre, em que todos os módulos podem se tornar mestre em determinado momento e escravo em outro, e as mensagens são enviadas em regime multicast, caracterizado pelo envio de toda e qualquer mensagem para todos os módulos que compõe a rede. Além disso, todos os módulos verificam o estado do barramento, analisando se outro módulo está ou não enviando mensagens com maior grau de prioridade. Caso isto seja percebido, o módulo com a mensagem de menor prioridade cessa a sua transmissão e o de maior prioridade segue com o envio da mensagem, sem ter que reiniciá-la (Guimarães, 2024).

Quanto a constituição do barramento CAN, existem três formas de constituí-lo, dependentes diretamente da quantidade de fios utilizada. Existem redes de 1, 2 e 4 fios. As redes com 2 e 4 fios trabalham com os sinais de dados CAN_H (*CAN High*) e CAN_L (*CAN Low*). No caso dos barramentos com 4 fios, são adicionados um fio com o VCC (alimentação) e outro com o GND (referência). As redes com apenas 1 fio, têm apenas o fio de dados, chamado de linha CAN. Considerando o CAN com 2 e 4 fios, seus condutores elétricos devem ser trançados e não blindados, os dados são enviados através da rede e devem ser interpretados pela análise da diferença de potencial entre os fios CAN_H e CAN_L. Assim, os efeitos causados por interferências eletromagnéticas são atenuados, uma vez que qualquer ação sobre um dos fios será sentida também pelo outro, causando flutuação em ambos os sinais para o mesmo sentido e com a mesma intensidade. Como o que vale para os módulos que recebem as mensagens é a diferença de potencial entre os condutores CAN_H e CAN_L, a comunicação não é prejudicada (González, 2022).

Na rede CAN, os dados são representados por bits Dominantes (nível lógico 1) e bits Recessivos (nível lógico 0), criados em função da condição presente nos fios CAN_H e CAN_L. A Figura 55 ilustra os níveis de tensão em uma rede CAN.

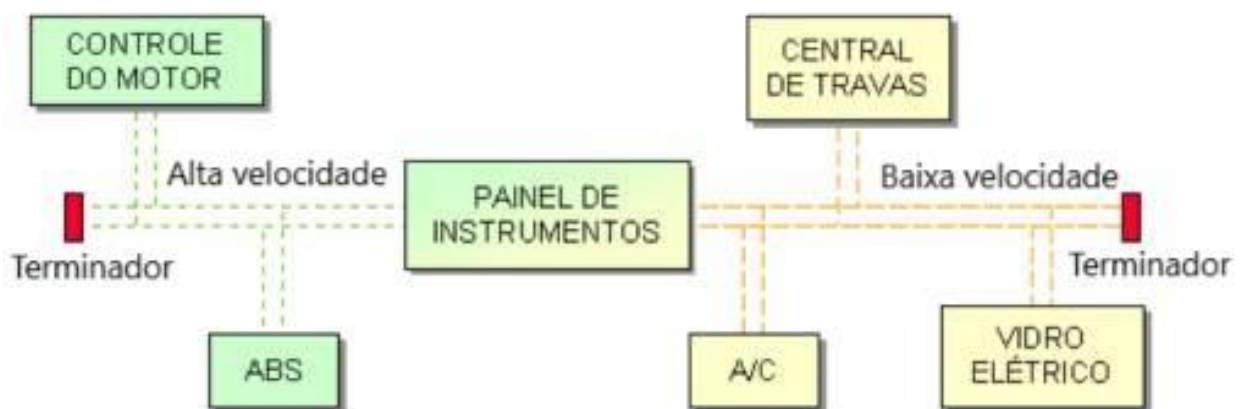


Fonte: Hertz; Maliniak (2019)

Toda rede CAN possui 2 Terminadores, que são resistores com valores entre 120 e 124 ohms, conectados à rede para garantir a propagação dos sinais elétricos pelos fios que constituem a rede. Esses resistores, um em cada ponta da rede, garantem a reflexão dos sinais no barramento e o correto funcionamento da rede CAN.

Ainda, em algumas aplicações do protocolo CAN, pode haver duas ou mais sub-redes em funcionamento, cada qual, em uma velocidade diferente. Os dados são transferidos de uma sub-rede para a outra por meio de módulos que atuam nas duas sub-redes. Estes módulos são chamados de Gateways. A Figura 56 mostra um exemplo de rede CAN de um automóvel, com duas sub-redes e dois terminadores. O Gateway desta aplicação é o Painel de Instrumentos.

Figura 56 - Exemplo rede CAN automotiva



Fonte: Adaptado Guimarães (2024)

O teste prático realizado busca verificar o processo de comunicação interna do veículo através da aplicação de uns experimentos utilizando a plataforma de treinamentos que simula o *powertrain* do veículo elétrico. Portanto, foram realizadas medições de tensão entre os terminais dos componentes e análises das falhas.

5.4.1 Medição de Tensão – B30/9

Inicialmente, foram realizadas as medições entre os pinos 9 e GND. De acordo com os documentos disponibilizados pelo fabricante, esse componente é referente ao sinal alto da CAN. A Figura 57 expõe o valor de tensão obtido para o instante inicial. O valor de referência esperado é de 2,5 V e o valor medido experimentalmente foi de 2,7153 V.

Figura 57 - Medição de tensão entre pinos 9 e GND

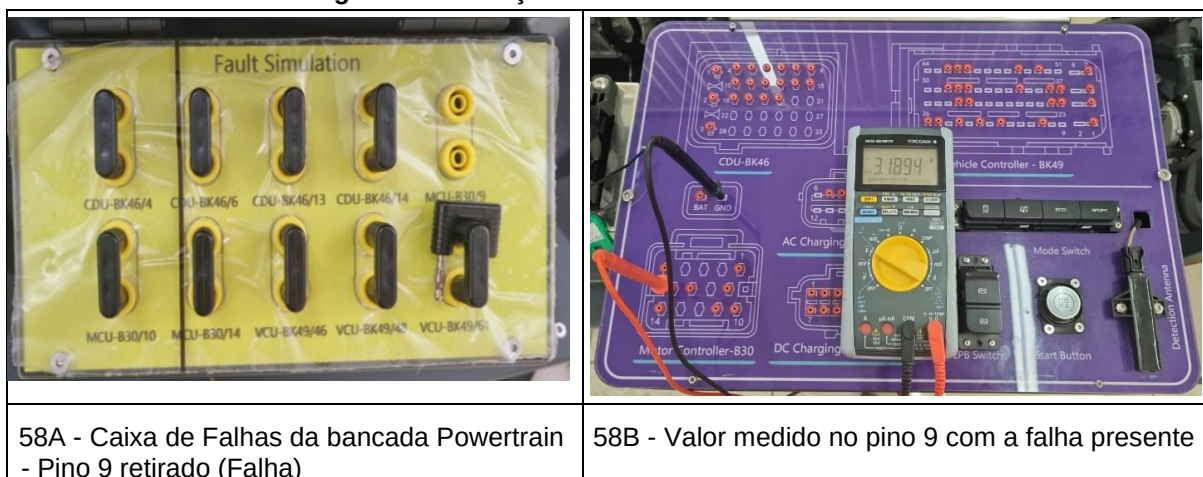


Fonte: Elaboração própria (2024)

5.4.2 Medições no Pino 9 – Caixa de Falhas

Em seguida, foi feita a medição do sinal de tensão para a situação em que o pino presente na caixa de falhas é desconectado. Dessa forma, o borne B30/9 foi retirado (Figura 58A), simulando um erro relacionado a perda do sinal de comunicação. Durante essa etapa do teste, notou-se que o sistema de ar condicionado é acionado e entra em funcionamento. Além disso, observou-se o valor de tensão medido passou a ser de 3,1894 V (Figura 58B).

Figura 58 - Medição do Pino 9 - Caixa de Falhas



58A - Caixa de Falhas da bancada Powertrain - Pino 9 retirado (Falha)

58B - Valor medido no pino 9 com a falha presente

Fonte: Elaboração própria (2024)

5.4.3 Medição de Tensão – B30/14

Para a segunda etapa da atividade prática 4, foi feito o estudo do pino 14, que representa o sinal baixo, e que também possui uma falha de funcional vinculada a bancada e ao funcionamento do processo de comunicação CAN. Assim, foi feita a medição do sinal de tensão entre o pino 14 e GND. A Figura 59 ilustra o valor de tensão para o instante inicial. O valor de referência é de 2,5 V e o obtido na prática foi de 2,3540 V.

Figura 59 - Medição de tensão entre pinos 14 e GND

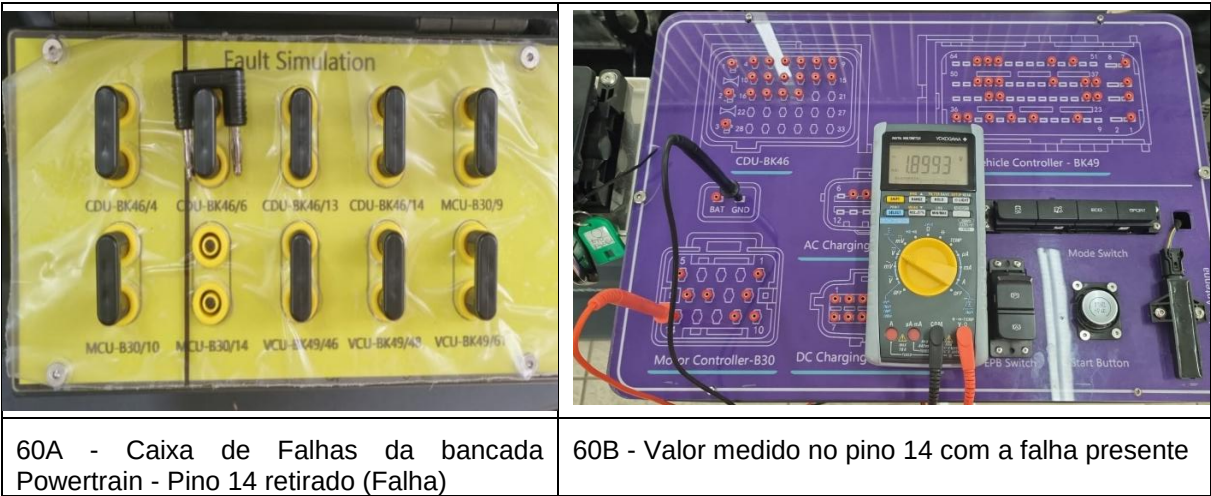


Fonte: Elaboração própria (2024)

5.4.4 Medições no Pino 14 – Caixa de Falhas

Para o próximo passo, foi feita a medição do sinal de tensão no momento em que o pino presente na caixa de falhas é desconectado. Dessa forma, o borne B30/14 foi retirado (Figura 60A), simulando o erro. Foi possível verificar que o sistema de ar condicionado novamente entra em operação. E ainda, o valor de tensão medido passou a ser de 1,8993 V (Figura 60B).

Figura 60 - Medição do Pino 14 - Caixa de Falhas



Fonte: Elaboração própria (2024)

5.4.5 Medição de Tensão – B30/10

Na sequência, foi feito o estudo do pino 10 que, considerando as informações dispostas nos manuais do fabricante, é o componente responsável pela alimentação do circuito em questão. O primeiro passo foi realizar a medição do sinal de tensão entre o pino 10 e GND. A Figura 61 mostra o valor de tensão para o momento inicial. O valor de referência é de 12 V e o medido foi de 13,656 V, que é corresponde ao valor medido diretamente nos terminais da bateria.

Figura 61 - Medição de tensão entre pinos 10 e GND



Fonte: Elaboração própria (2024)

5.4.6 Medições no Pino 10 – Caixa de Falhas

Para concluir a atividade prática 4, foi medido o sinal de tensão para o instante em que o pino presente na caixa de falhas é desconectado. Dessa forma, o borne B30/10 foi retirado (Figura 62A), simulando a falha na alimentação da bateria. Percebeu-se que, assim como nos itens anteriores, o sistema de ar condicionado passa a funcionar. E ainda, o valor de tensão medido passou a ser de 0,4577 V (Figura 62B). Considerando o comportamento visto durante as etapas do experimento 4, é possível que ao detectar a falha de comunicação, o sistema emite um sinal para que o sistema de ar condicionado entre em operação afim de refrigerar a bateria.

Figura 62 - Medição do Pino 10 - Caixa de Falhas

62A - Caixa de Falhas da bancada Powertrain – Pino 10 retirado (Falha)	62B - Valor medido no pino 10 com a falha presente

Fonte: Elaboração própria (2024)

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como pode ser visto, os veículos puramente elétricos e híbridos têm ocupado um papel de destaque na busca por alternativas que resultem na redução das emissões de gases poluentes. Dessa forma, estudos voltados para o aprimoramento dessa área da indústria automotiva ganham grande importância. Considerando o crescimento exponencial das vendas de VEs, a demanda por profissionais aptos que tenham capacidade de entender o comportamento do automóvel e realizar manutenções aumenta na mesma proporção.

Sendo assim, deve-se conhecer o funcionamento completo do veículo e, para esse trabalho, o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis, proporcionou através da implantação das cinco bancadas didáticas que em conjunto simulam o BYD Qin EV, da Beifang, um grande aprendizado prático que contribuiu significativamente para formação acadêmica.

Pela revisão bibliográfica realizada, concluiu-se que cada topologia de VE possui características próprias que devem ser consideradas durante a aplicação de uma manutenção. Além disso, em relação as arquiteturas de *powertrain*, verifica-se que ainda há oportunidades de estudos e melhorias para aumentar a eficiência e desempenho dos veículos, por exemplo, os aprimoramentos técnicos necessários para que a configuração tração no cubo das rodas se torne mais atrativa.

É relevante ressaltar que durante a execução dos experimentos práticos surgiram dificuldades. Alguns dos manuais e documentos enviados pela Beifang estavam em inglês, enquanto outros estavam em chinês, sendo preciso traduzir os documentos para poder utilizá-los. Essas sucessivas traduções resultaram em textos confusos e até certo ponto desconexos, resultando numa maior dedicação para compreender os manuais.

Como sugestão para futuros estudos, aponta-se a possibilidade de ampliar o número de testes práticos, explorando as demais bancadas. Voltado para a área de manutenção, também se mostra pertinente o aprofundamento no entendimento das falhas detectadas e propor alternativas para que os defeitos sejam sanados.

Por fim, agradecimentos a CELESC (Centrais elétricas de Santa Catarina) e a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) pelo suporte ao projeto de pesquisa e

desenvolvimento “Converte” o qual proporcionou a compra destas bancadas didáticas utilizadas neste trabalho. A

REFERÊNCIAS

ABB. **IE5 synchronous reluctance motors**. 2021. Disponível em: <https://new.abb.com/news/detail/80775/ie5-synchronous-reluctance-motors>. Acesso em: 11 nov. 2024.

ABOUT MOTORS. **Permanent magnet synchronous motor**. 2023. Disponível em: <https://about-motors.com/motorcontrol/pmsm/>. Acesso em: 11 nov. 2024.

AGÊNCIABRASIL. **Brasil amplia meta de redução de emissão de gases de efeito estufa**. 2023. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/internacional/noticia/2023-09/brasil-amplia-meta-de-reducao-de-emissao-de-gases-de-efeito-estufa>. Acesso em: 23 set. 2023.

ANDERSON, Curtis D.; ANDERSON, Judy. **Electric and Hybrid Cars: a history**. 2. ed. Jefferson: McFarland & Company, Inc., Publishers, 2010.

AZEVEDO, Marcelo Henrique de. **Carros elétricos: viabilidade econômica e ambiental de inserção competitiva no mercado brasileiro**. 2018. 54 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Controle e Automação, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

BARAN, Renato. **A INTRODUÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NO BRASIL: avaliação do impacto no consumo de gasolina e eletricidade**. 2012. 139 f. Tese (Doutorado) - Curso de Planejamento Energético, Ufrj, Rio de Janeiro, 2012.

BARTSCH, Arthur G.; LESCOWICZ, Jean. **ESTUDO DO MOTOR DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL DE ESTATOR COMPARTILHADO E DUPLO ROTOR SEGMENTADO PARA APLICAÇÃO EM CARROS ELÉTRICOS**. 2022. 22 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior em Engenharia Elétrica), Instituto Federal de Santa Catarina, Jaraguá do Sul, 2022.

BATISTA, Danilo S.; FAESARELLA, Annete S.; MORAES, Vinícius C. L.; SABLÓN, Vicente I. B. Veículos elétricos e híbridos: Estudo da eficiência energética-perspectiva no cenário nacional. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Ano 05, Ed. 10, Vol. 10, pp. 91-120. 2020. ISSN: 2448-0959. DOI: 10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/veiculos-eletricos. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/veiculos-eletricos>. Acesso em: 23 maio 2024.

BEIFANG. **BYD Qin EV Electric Vehicle Training Guidebook**. Beijing. Beijing Zhiyang Beifang International Education Technology Co. Ltd, 2023.

BORGWARNER. **Power Electronics**. 2022. Disponível em: <https://www.borgwarner.com/technologies/power-electronics>. Acesso em: 10 nov. 2024.

BRAUN, Silvana; APPEL, Lucia Gorenstin; SCHMAL, Martin. A poluição gerada por máquinas de combustão interna movidas à diesel - a questão dos particulados. Estratégias atuais para a redução e controle das emissões e tendências futuras.

Química Nova, [S.L.], v. 27, n. 3, p. 472-482, jun. 2004. FapUNIFESP (SciELO). DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422004000300018>.

BRESOLIN, Adriano de Andrade. **Eletromobilidade**. Florianópolis: ENBPar, 2023.

CABRAL, Jader S.; CATALANI, Fernando; GERMANOS, Ricardo A. C.; MENEGATTI, Carlos R. Inversores de Potência: Conceitos teóricos e demonstração experimental. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [S.L.], vol. 42, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2020-0113>.

CHAN, C. C. The State of the Art of Electric and Hybrid Vehicles. **IEEE**, [S.L.], p. 247-275, 2 fev. 2002.

DENTON, Tom. **Veículos Elétricos e híbridos**. São Paulo: Edgar Blucher, 2018.

DINIZ, Brunno Maykel F. G. **MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SISTEMA CONVERSOR PARA CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS BASEANDO-SE NO CONVERSOR BOOST PFC DE 3 CÉLULAS**. 22. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2022.

ELETROVAL. **MANUTENÇÃO DE MOTOR CORRENTE CONTÍNUA**. Disponível em: <https://www.eleetrovalmotores.com.br/manutencao-motor-corrente-continua>. Acesso em: 2 out. 2024.

EBRAHIMI, Kambiz; EHSANI, Mehrdad; GAO, Yimin; LONGO, Stefano. **Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles**. [S.L.]: CRC press, 2018.

EVGO. **Types of Electric Vehicles**: a brief overview of ev options. A brief overview of EV options. Disponível em: <https://www.evgo.com/ev-drivers/types-of-evs/>. Acesso em: 6 maio 2024.

FERNANDES, Camila B. **INVERSORES PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS: APLICAÇÃO DO CONTROLE VETORIAL SEM SENSOR PARA UM MOTOR DE INDUÇÃO**. 2015. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

FERNANDES, Rodolfo C.; SEIXAS, Falcondes J. M. **Máquinas Elétricas II**. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista – Campus de Ilha Solteira, 2016.

FERNANDO, N.; MAHMOUDI, A.; TAHIR, A. Propulsion System of Electric Vehicles: Review. **IEEE 31st Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)**, [S.L.], 2021. DOI: 10.1109/AUPEC52110.2021.9597828

FERREIRA, José P.; DIAS, Márcio J. Veículos Elétricos e Híbridos: história e perspectivas para o brasil. **Revista Processos Químicos**, Anápolis, v. 1, n. 1, p. 139-147, dez. 2020. Disponível em: https://ojs.rpqsenai.org.br/index.php/rpq_n1/article/view/610/526. Acesso em: 5 abr. 2024.

GOMEZ, J. G. D.; MALATYALI, I.; KAMPKER, A.; PANDEY, R.; TREICHEL P. E.; WESSEL, S. Cost optimal design strategy of electric drivetrains for medium heavy-duty vehicles based on product development and production costs. **IEEE**, [S.L.], 2019. DOI: 10.1109/EDPC48408.2019.9011844

GONÇALVES, Natália dos Santos Gameiro. **Tolerância a Falhas em Motores de Relutância Variável Comutados**. 2013. 203 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Electrotécnica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2013.

GONZÁLEZ, Víctor. CAN BUS Diagnosis, Step by Step. 2022. Disponível em: <https://www.diagnosistips.com/automotiveacademy/can-bus/>. Acesso em: 19 nov. 2024.

GUIMARÃES, Alexandre A. **CAN BUS: BARRAMENTO CONTROLLER AREA NETWORK - “CONCEITUAÇÃO”**. 2024. Disponível em: http://www.alexag.com.br/CAN_Bus_Parte_2.html. Acesso em: 19 nov. 2024.

HERTZ, Mike; MALINIAK, David. **Debug CAN/CAN FD buses with an oscilloscope**. 2019. Disponível em: <https://www.ednasia.com/debug-can-can-fd-buses-with-an-oscilloscope/>. Acesso em: 19 nov. 2024.

HUNG, D. L. S.; TEH, K. Y.; WANG, B.; ZHONG, J. ENERGY CONSUMPTION ANALYSIS OF DIFFERENT BEV POWERTRAIN TOPOLOGIES BY DESIGN OPTIMIZATION. **International Journal of Automotive Technology**, [S.L.], p. 907-914, 2018. DOI: 10.1007/s12239-018-0087-z.

INSIDEEVS. **Carro elétrico, híbrido e híbrido plug-in: veja quais são as diferenças**. 2022. Disponível em: <https://insideevs.uol.com.br/features/593771/carro-eletrico-hibrido-vantagens-duvidas/>. Acesso em: 23 maio 2024.

JUNIOR, Lourenço Knopik. **ESTUDO DAS PERSPECTIVAS FUTURAS DA MOBILIDADE ELÉTRICA POR MEIO DE UMA ABORDAGEM PRÁTICA UTILIZANDO A BANCADA DIDÁTICA DO TOYOTA COROLLA HÍBRIDO**. 2024. 81 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior em Engenharia Elétrica), Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2024.

IBRAHIM, Mahmoud; RJABTSIKOV, Viktor. EV-Permanent Magnet Synchronous Motor Control Strategy Evaluation Based on Digital Twin Concept. **IEEE 17th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering**, [S.L.], 2023. DOI: 10.1109/CPE-POWERENG58103.2023.10227410.

LOCATELLI, Caroline. **Introdução ao Motor de Passo**. 2021. Disponível em: <https://curtocircuito.com.br/blog/motor-de-passo/introducao-ao-motor-de-passo>. Acesso em: 11 nov. 2024.

MANISHA; YADAV, D. S. Electric Propulsion Motors: A Comparative Review for Electric and Hybrid Electric Vehicles. **IEEE International Conference on Distributed Computing and Electrical Circuits and Electronics**, [S.L.], 2022. DOI: 10.1109/ICDCECE53908.2022.9793099.

MARQUES, Jorge Filipe Santos. **ACCIONAMENTOS BASEADOS EM MOTORES DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL COMUTADOS COM CAPACIDADE DE REGENERAÇÃO DE ENERGIA PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS/HÍBRIDOS**. 2012. 98 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2012.

MELO, Pedro Miguel Azevedo de Sousa. Características básicas do motor de relutância comutado. **Neutro À Terra**, [S.L.], p. 27-36, 10 nov. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.34630/NEUTROATERRA.VI22.4398>.

MERA, Zamir; BIEKER, Georg; REBOUÇAS, Ana Beatriz; CIEPLINSKI, André. **COMPARAÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO CICLO DE VIDA DE CARROS DE PASSEIO A COMBUSTÃO E ELÉTRICOS NO BRASIL**. Washington: International Council On Clean Transportation, 2023. Disponível em: <https://theicct.org/publication/comparacao-das-emissoes-de-gee-ao-longo-do-ciclo-de-vida-de-motores-de-combustao-flex-e-eletricos-veiculos-de-passageiros-brasil-oct23/>. Acesso em: 6 abr. 2024.

NEOCHARGE. **CONHEÇA OS TIPOS DE CARROS ELÉTRICOS**. 2023. Disponível em: <https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/tipos-veiculos-eletricos>. Acesso em: 6 maio 2024.

PETTERS, Sam. **High-power crate electric vehicle system from Swindon Powertrain**. 2019. Disponível em: <https://www.automotivepowertraintechnologyinternational.com/features/high-power-crate-electric-vehicle-system-from-swindon-powertrain.html>. Acesso em: 4 nov. 2024.

PITA, Hernâni J. T. **Projecto de Um Motor de Combustão Interna para Um Veículo Automóvel Utilitário**. 2011. 56 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Automóvel) – Universidade de Coimbra, Coimbra, 2011.

PNME. **3º ANUÁRIO BRASILEIRO DE DA MOBILIDADE ELÉTRICA**: Rumo à expansão do mercado, políticas e tecnologias no Brasil. 2022. Disponível em: <https://pnme.org.br/wp-content/uploads/2023/12/3o-Anuario-Brasileiro-de-Mobilidade-Eletrica.pdf>. Acesso em: 4 nov. 2024.

SANTIAGO, J. de; BERNHOFF, H.; EKERGÅRD, B.; ERIKSSON, S.; FERHATOVIC, S.; WATERS, R.; LEIJON, M. Electrical Motor Drivelines in Commercial All-Electric Vehicles: a review. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, [S.L.], v. 61, n. 2, p. 475-484, fev. 2012. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/tvt.2011.2177873>.

SANTOS, Max M. D. **Veículos elétricos e híbridos: fundamentos, características e aplicações**. São Paulo: Érica, 2020.

SERAFIM, Gustavo. **ESTUDO DE DIMENSIONAMENTO DE UM POWERTRAIN ELÉTRICO WEG APLICADO A UM VEÍCULO BAJA SAE**. 2024. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior em Engenharia Mecatrônica), Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2024.

SOARES, Luccas. **Como funciona um inversor de frequência?** 2023. Disponível em: <https://termoblog.com.br/como-funciona-um-inversor-de-frequencia/>. Acesso em: 10 nov. 2024.

TUPI. **Motor elétrico para carros:** modelos, vantagens e características. 2022. Disponível em: <https://tupimob.com/motor-carro-eletrico/>. Acesso em: 13 maio 2024.

UMANS, Stephen D. **MÁQUINAS ELÉTRICAS**. 7. ed. New York: Amgh Editora Ltda, 2014.

WEG. **W22 Motor Elétrico Trifásico**. 2023. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hbf/h54/WEG-w22-motor-eletrico-trifasico-de-inducao-tecnico-mercado-africano-50058213-brochure-portuguese-web.pdf>. Acesso em: 20 set. 2024.

YOKOGAWA. **Multímetro digital TY720**. 2024. Disponível em: <https://tmi.yokogawa.com/solutions/products/portable-and-bench-instruments/digital-multimeters/ty720-digital-multimeter/>. Acesso em: 01 mar. 2025.

ZERAOULIA, Mounir; BENBOUZID, Mohamed El Hachemi; DIALLO, Demba. Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: a comparative study. **IEEE Transactions On Vehicular Technology**, [S.L.], v. 55, n. 6, p. 1756-1764, nov. 2006. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/tvt.2006.878719>.