

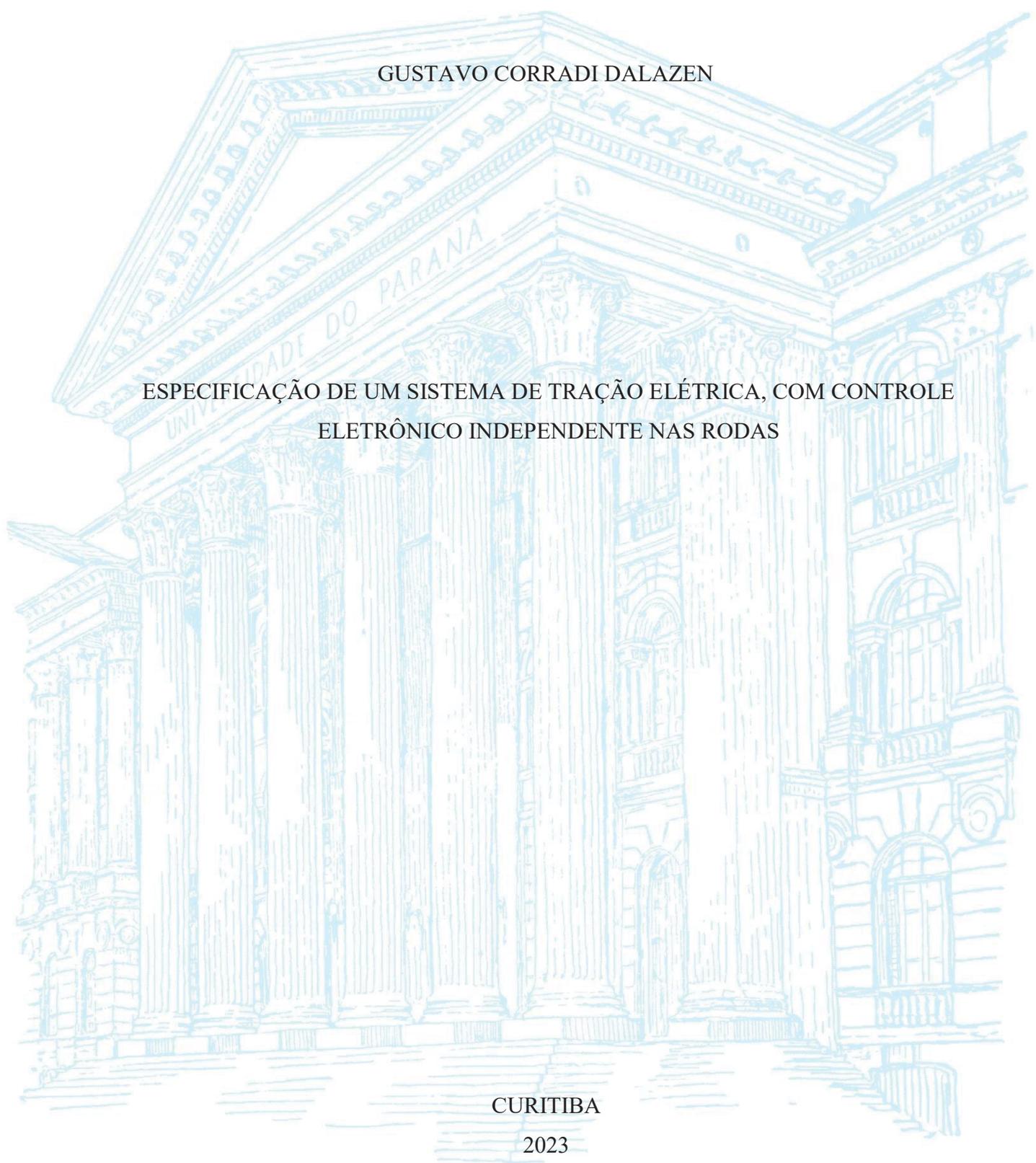
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GUSTAVO CORRADI DALAZEN

ESPECIFICAÇÃO DE UM SISTEMA DE TRAÇÃO ELÉTRICA, COM CONTROLE
ELETRÔNICO INDEPENDENTE NAS RODAS

CURITIBA

2023



Gustavo Corradi Dalazen

ESPECIFICAÇÃO DE UM SISTEMA DE TRAÇÃO ELÉTRICA, COM CONTROLE
ELETRÔNICO INDEPENDENTE NAS RODAS

TCC apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Automotiva, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Engenharia Automotiva.

Orientador: Prof. André Augusto Mariano

CURITIBA

2023

ESPECIFICAÇÃO DE UM SISTEMA DE TRAÇÃO ELÉTRICA, COM CONTROLE ELETRÔNICO INDEPENDENTE NAS RODAS¹.

Gustavo Corradi Dalazen²
André Augusto Mariano³

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo especificar um sistema de tração elétrica, com controle eletrônico independente nas rodas. Nesse sistema avançado, cada roda é equipada com um motor elétrico individual, permitindo o ajuste independente do torque e da velocidade em cada uma delas. Uma Unidade de Controle Eletrônico (ECU) central coordena o funcionamento desses motores, processando dados de sensores de posição, velocidade e aderência para aperfeiçoar a tração, estabilidade e eficiência do veículo. Através de uma descrição técnica e um comparativo entre as opções disponíveis no mercado, cujos valores e marcas dos produtos variam muito, foi elaborado um esquemático do sistema, mostrando a interface entre cada um dos elementos abordados e realizado um levantamento de custos mínimos de alguns componentes necessários para a implantação desse sistema. Para especificar o sistema utilizaram-se artigos científicos, livros e pesquisas de mercado. Como resultado, a especificação desse sistema não está isenta de desafios. A complexidade técnica é um ponto crucial, demandando de controles sofisticados e uma integração cuidadosa de componentes. Ademais, os custos para integrar esse sistema em um veículo elétrico são elevados devido à tecnologia avançada envolvida, porém é possível especificar um sistema de tração elétrica, com controle eletrônico independente nas rodas.

Palavras-chave: Controle. Sistema. Tração elétrica.

Abstract

The present work aims to specify an electric traction system with independent electronic control at the wheels. In this advanced system, each wheel is equipped with an individual electric motor, allowing for independent adjustment of torque and speed on each of them. A Central Electronic Control Unit (ECU) coordinates the operation of these motors, processing data from position, speed, and grip sensors to optimize the traction, stability, and efficiency of the vehicle. Through a technical description and a comparison between the available options in the market, whose product values and brands vary widely, a schematic of the system was developed, showing the interface between each of the elements discussed, and a minimum cost estimate of some necessary components for the implementation of this system was made. Scientific articles, books, and market research were used to specify the system. As a result, specifying this system is not without challenges. Technical complexity is a crucial point, requiring sophisticated controls and careful integration of components. Furthermore, the costs to integrate this system into an electric vehicle are high due to the advanced technology involved, but it was possible to specify an electric traction system with independent wheel electronic control.

¹ Pré-requisito para obtenção da especialização em Engenharia Automotiva

² Acadêmico do Curso de Engenharia Automotiva da Universidade Federal do Paraná (UFPR): E-mail: engenheirogustavodalazen@gmail.com

³ Docente do curso de Engenharia Universidade Federal do Paraná (UFPR): E-mail: mariano@ufpr.br

Keywords: Electric Traction, Control, System.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a FGV Energia (2017), o mundo está disposto a transformar sua maneira de gerar e consumir energia, investindo em fontes renováveis e em tecnologia para que sua geração e consumo se tornem cada vez mais sustentáveis. Desta maneira, descarbonizar o setor de transportes pode ser uma alternativa relevante para uma economia de baixa emissão de carbono.

Neste contexto, a substituição dos veículos equipados com motores a combustão interna por veículos puramente elétricos, reduzirá a emissão de CO₂ e conseqüentemente limitará o aumento da temperatura média global. Por isso, trocar a frota de veículos movidos a combustíveis fósseis pela tecnologia de bateria tem sido um desafio tanto para as empresas fabricantes desse modelo, quanto para os consumidores que desejam adquirir esse tipo de veículo (SANTOS, 2022).

É indispensável o desenvolvimento e buscas de novas tecnologias em veículos elétricos, pois a autonomia, tempo de recarga, vida útil da bateria, infraestrutura de recarga e alto preço, acaba fazendo com que os consumidores evitem os veículos elétricos.

Todo o veículo elétrico praticamente tem como fonte principal de energia, a eletricidade, armazenada em um banco de baterias internamente que alimenta um motor elétrico e propulsiona as rodas. Porém devido ao alto custo de fabricação das baterias e sua baixa autonomia, tem levado empresas e consumidores a buscarem novas tecnologias principalmente nos veículos utilizados para mobilidade urbana.

Diante desses motivos, forma-se a seguinte questão: **Qual é a estimativa de custo total para a implementação de um sistema de controle de tração independente nas quatro rodas, com base nos componentes e cálculos apresentados no projeto?**

O objetivo geral deste estudo é encontrar por meio de um estudo a especificação de um sistema de tração elétrica, com controle eletrônico independente nas rodas para um veículo elétrico. Em virtude disso, devem-se seguir os objetivos específicos definidos como: Identificar um modelo de motor elétrico ideal para o sistema, baseando-se em literatura. Realizar um levantamento e comparar entre os produtos utilizados nesse sistema; Especificar o investimento mínimo necessário pra implantar esse sistema.

Partindo do princípio de um veículo elétrico, busca-se encontrar um sistema que possa ser instalado em veículos como quadrículos, cadeira de rodas, ou seja, em veículos de

pequeno porte que fornecem mobilidade de pessoas. Desta forma, identificaremos se os motores elétricos acoplado nas rodas podem possuir um controle eletrônico independente através de uma rede de comunicação, sensores, inversores e um controlador.

O estudo de dimensionamento desse sistema de tração nas quatro rodas é altamente relevante devido à transição para a mobilidade elétrica e à busca por veículos mais eficientes e sustentáveis. Ele se destaca ao abordar aspectos críticos da engenharia automotiva, como a escolha do motor elétrico, da bateria e do inversor, fornecendo uma estimativa inicial dos custos envolvidos. Essas informações são essenciais para impulsionar a adoção de veículos elétricos e contribuir para um futuro mais sustentável na indústria automobilística.

A necessidade de aproximar os estudos de veículos elétricos com a realidade mundial foi um dos desafios encontrados neste projeto de pesquisa, pois se buscou explorar resultados positivos, satisfatórios para os consumidores que desejam adquirir esse modelo de veículo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 FUNCIONAMENTOS DO MOTOR ELÉTRICO

De acordo com Tanaka (2013), o sistema de tração em um veículo elétrico pode variar de acordo com a configuração de construção e sua fonte de energia. Entretanto, todo motor elétrico tem um princípio de funcionamento, que é converter energia elétrica em energia mecânica a fim de gerar movimento e tracionar o veículo.

Os veículos elétricos geralmente possuem motores de corrente contínua (CC), de indução, motor de relutância comutado (SRM), os síncronos de ímãs permanentes (PMCA) e motor CC sem escovas (BLDC) (FIGUEIROA, 2021).

2.1.1 Motores de corrente contínua (CC)

O clássico motor elétrico CC pode ser comutado através de escovas ou sem escovas que segundo Larminie e Lowry (2012), devido sua fabricação ser simples, a sua fonte de alimentação pode ser por meio de corrente continua proveniente de bateria ou outra fonte de alimentação CC, tornando assim a construção mais barata comparado com os demais modelos. No entanto, esse modelo de motor conforme a Figura 1 pode ser configurado “shunt” na qual os enrolamentos do indutor e do induzido estão ligados em paralelo e também

à configuração em série, mais utilizada em veículos elétricos devido sua variação de velocidade e controle relativamente fácil.

Figura 1 - Motor de corrente contínua (CC)



Fonte: Engelmann (1995).

A aplicação desses modelos de motor se deu a vários protótipos de veículos elétricos na década de 1980 devido à sua facilidade de controle e ótima relação com algumas características da época, também muito utilizado em empilhadeiras. Mas o elevado índice de manutenção acabou tornando um motor ultrapassado tanto na indústria automotiva, como em outras áreas de utilização (HUSAIN, 2011).

2.1.2 Motor de indução

Esse tipo de motor ilustrado na Figura 2 pode ser caracterizado de duas formas: com rotor enrolado e a gaiola do esquilo. Segundo Chau (2015), o enrolado é menos atraente especialmente quando se trata de propulsão elétrica em veículos elétricos (EV's). Portanto, o motor que possui o rotor em gaiola de esquilo é vagamente nomeado como o motor de indução para propulsão de veículos elétricos, por, sendo mais barato e exigindo menos manutenções.

Figura 2 - Motor de indução com rotor gaiola de esquilo



Fonte: Freitas (2012).

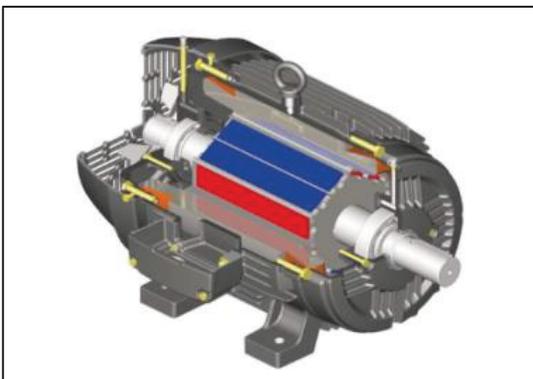
Para Denton (2004), esse modelo de motor funciona por uma corrente alternada ao contrário do motor CC. Ele é construído com um enrolamento trifásico e distribuído em torno de um estator laminado, de tal maneira que o campo magnético do rotor tende a alinhar-se com o campo do estator produzindo, portanto movimento de rotação.

O aperfeiçoamento e desenvolvimento de novas tecnologias nesses motores têm levado algumas marcas de veículo elétrico a se atentarem a esse modelo (FREITAS, 2012).

2.1.3 Motor síncrono de ímã permanente (PMAC)

No motor síncrono conforme a Figura 3, o seu rotor gira na mesma velocidade que o campo magnético rotativo, ele também é conhecido como motor CA sem escovas. Um motor projetado para situações que demandam uma regulação mais precisa da velocidade em operações individuais ou múltiplas interconectadas (RAMOS, 2005).

Figura 3 - Motor de ímã permanente



Fonte: Freitas (2012).

Os motores síncronos podem ser do tipo BLDC (Brushless DC) ou PMSM (Permanent

Magnet Synchronous Motor). De acordo com Larminie e Lowry (2012), o motor BLDC é na verdade um motor CA, chama-se Brushless DC porque foi desenvolvido a partir do motor DC com escovas, já o motor PMSM necessitam de uma alimentação com onda senoidal, podem ter os ímãs montados à superfície do rotor ou em posição interior e possuem um sensor de corrente em cada uma das fases se forem trifásicos.

Os motores de ímã permanentes são indicados para projetos que necessitam um elevado desempenho, pois são altamente eficientes e tende a substituir motores de indução em muitas aplicações, devidos sua relação torque-volume ser mais alta comparada aos de indução (LARMINIE E LOWRY, 2012).

2.1.4 Motor de relutância comutado (SRM)

Segundo Husain (2011), estes motores têm excelentes características de tolerância a falhas e sua construção é bastante simples. Os motores SRM ilustrado na Figura 4, não têm enrolamentos, ímãs ou gaiolas no rotor, o que ajuda a aumentar a relação torque/inércia e permite maior temperatura de operação do rotor. A faixa de velocidade de potência constante é a mais ampla possível em motores SRM em comparação com outras tecnologias, o que a torna ideal para aplicações de tração.

Figura 4 - Motor de relutância comutado



Fonte: Automation (2020).

O moderno acionamento do motor SRM está se tornando atraente para a propulsão de veículos elétricos (EV) devido ao seu baixo custo do sistema, estrutura robusta da máquina, topologia confiável do conversor, simplicidade de controle e alta eficiência. Por outro lado, sofrem das desvantagens de grandes oscilações de torque, altas não linearidades da máquina e ruído acústico irritante (CHAU, 2015).

2.2 COMPARAÇÕES DAS SOLUÇÕES ENCONTRADAS

Para Azevedo (2012), o motor elétrico ideal para cada projeto de veículo vai depender das diversas características como potência, custo, rendimento, controlabilidade e tração. Além disso, deve ser levada em consideração a velocidade de operação e sua manutenção.

Diante destes fatos, podemos fazer a comparação dos modelos de motores descritos na Tabela 1, que podem ser equipados em veículos elétricos. A avaliação ocorre entre as quatro tecnologias de motores, na qual são atribuídos valores de um a cinco, sendo zero muito ruim e cinco muito bom (ZERAOUlia, 2006).

Tabela 1- Comparação dos motores

Modelo	CC	Indução	Ímãs Permanentes	Relutância Comutada
Rendimento	2,5	3,5	5	4
Densidade de potência	2,5	3,5	5	3,5
Controlabilidade	5	4	4	4
Fiabilidade	3	5	4	5
Maturidade tecnológica	5	5	4	4
Custo	4	5	3	4
Total	22	26	25	24,5

Fonte: Adaptado de Zeraoulia (2006).

Em decorrência dos valores apresentados na tabela, entendemos que o motor de indução se mostrou mais propenso para se utilizar em veículos elétricos comparado com os demais (ZERAOUlia, 2006).

É possível perceber que se deixarmos de lado o custo, todos os demais pontos apresentados têm relação com a eficiência energética, de modo que essa está fortemente relacionada com o máximo aproveitamento de energia (AZEVEDO, 2018).

Segundo Noce (2009), o rendimento de um motor elétrico é uma constante que varia de acordo com a rotação e da carga à qual é submetido. Deste modo, um motor elétrico quando exposto em alto torque e baixa rotação em geral tem uma eficiência mínima entre 65 e 70%. Portanto a sua eficiência na conversão de energia é bastante elevada quando comparado com motores de combustão interna.

A densidade de potência é a quantidade e a taxa em que essa energia pode ser entregue por unidade de volume. Motores de tração elétricos são desejados para serem projetados com maior potência por unidade de peso (potência específica, kW / kg), maior potência por unidade de volume (densidade de potência, kW / L), menor custo (\$/kW) e maior eficiência (EMADI, 2015).

2.3 VANTAGENS E DESEVANTAGENS TÉCNICAS DE CADA SISTEMA

Todo o produto desenvolvido e comercializado possui vantagens e desvantagens com relação a sua aplicação. No caso dos veículos elétricos várias tecnologias estão envolvidas, por exemplo, tecnologia de motores, eletrônica de potência, cabos e interferência eletromagnética. Neste caso, no Quadro 1 discutiremos as vantagens e desvantagens tecnológicas dos motores aplicados em veículos elétricos (MI; MASRUR; GAO, 2011).

Quadro 1 - Vantagens e Desvantagens dos motores elétricos

Modelo	Vantagens	Desvantagens	Aplicação em Veículos
CC	Baixo Custo; Fácil controle;	Baixa eficiência; Alto peso; Baixa confiabilidade;	Honda Insight;
Indução	Simples construção; Baixa manutenção; Baixo custo;	Alto custo do controle;	Tesla Model 3; (apenas dianteiro)
Ímãs Permanentes	Alta eficiência; Boa confiabilidade; Fácil controle;	Alto custo; Alto peso;	Toyota Prius;
Relutância Comutada	Baixo peso; Fácil refrigeração; Alta confiabilidade; Construção simples e robusta;	Alto custo; Ruído;	N.A;

Fonte: Adaptado de Batista (2005).

Diante disso, vemos que existem vantagens e desvantagens de cada modelo de motor, e é preciso contar com elas. Tal qual Mi, Masrur e Gao (2011), descrevem que isso é muito importante para que indústrias desenvolvam uma nova tecnologia que atenda as variáveis dos projetos. Portanto, o custo, desempenho, controle, confiabilidade, viabilidade e construção são algumas variáveis que estão atreladas no desenvolvimento de motores elétricos.

2.4 ARMAZENADORES DE ENERGIA

Os armazenadores de energia em um carro elétrico desempenham um papel fundamental na viabilização da mobilidade elétrica. Geralmente, esses armazenadores são baterias de alta capacidade, predominantemente baseadas em tecnologias de íons de lítio devido à sua densidade energética e eficiência. Essas baterias consistem em células interconectadas para formar módulos, que por sua vez são agrupados em pacotes maiores (RAMALHO, 2022).

Segundo Santos (2020), as células de bateria possuem uma configuração química específica que permite armazenar e liberar energia por meio de reações eletroquímicas. Os armazenadores de energia são projetados para serem seguros, duráveis e capazes de suportar múltiplos ciclos de carga e descarga. A gestão térmica é crucial para prevenir superaquecimento, garantindo o funcionamento otimizado e a vida útil das baterias.

A capacidade de armazenamento dos sistemas de bateria varia em diferentes veículos elétricos, influenciando diretamente a autonomia e o desempenho. De acordo com Ramalho (2022), o desenvolvimento contínuo de tecnologias, como baterias de estado sólido e químicas avançadas, busca aumentar a densidade energética e a vida útil das baterias, melhorando ainda mais a eficiência e o alcance dos carros elétricos. Portanto, os armazenadores de energia representam um dos aspectos mais cruciais para a evolução e aceitação em massa dos veículos elétricos, tornando-os viáveis, confiáveis e ecologicamente sustentáveis.

2.5 INVERSOR

O inversor para carro elétrico é um componente essencial que converte a corrente contínua (DC) proveniente das baterias em corrente alternada (AC) utilizável pelos motores elétricos. Segundo Helmers (2012), este dispositivo desempenha um papel crucial na eficiência e no desempenho do veículo elétrico.

O inversor recebe a energia da bateria em forma de corrente contínua de alta tensão e a converte em corrente alternada de frequência e tensão controladas, proporcionando um controle preciso da velocidade e do torque dos motores elétricos. Além disso, o inversor também é responsável por regenerar a energia durante a desaceleração, convertendo a energia cinética de volta em eletricidade e recarregando a bateria (FREITAS, 2012).

De acordo com Noce (2009), a tecnologia utilizada no inversor é avançada, com semicondutores de potência, como transistores de alta tensão, desempenhando um papel fundamental na conversão eficiente de energia. Os inversores modernos também incorporam sistemas de resfriamento e controle térmico para manter a temperatura ideal de funcionamento, garantindo a confiabilidade e a longevidade do componente.

A otimização do design e a escolha adequada de materiais são cruciais para garantir o desempenho, a eficiência e a segurança do inversor. Com o aumento da demanda por veículos elétricos, a pesquisa e o desenvolvimento contínuos estão aprimorando os inversores, tornando-os mais compactos, eficientes e capazes de suportar as demandas crescentes dos sistemas de propulsão elétrica (SERRA, 2016).

2.6 CONTROLADORES DE UM MOTOR ELÉTRICO

Segundo Brito (2007), o controlador do motor de um carro elétrico é um componente vital que gerencia a potência fornecida às unidades de tração. Ele regula a velocidade, o torque e outras características de desempenho do motor elétrico. Usando algoritmos de controle sofisticados, o controlador ajusta a corrente e a tensão entregues ao motor para otimizar a eficiência e a resposta do veículo.

O controlador do motor interpreta os comandos do pedal do acelerador e outros sinais do veículo para determinar a quantidade de energia necessária. Ele também monitora a temperatura e outros parâmetros do motor para evitar sobrecargas e garantir operações seguras. Tecnologias de regeneração de energia são incorporadas, permitindo que o motor funcione como gerador durante a desaceleração, recuperando energia para a bateria (DHAMEJA, 2012).

Os controladores modernos utilizam eletrônica avançada, como microcontroladores e circuitos de potência de alta frequência, para garantir respostas rápidas e eficiência energética. De acordo com Zeraoulia (2006), com interfaces digitais e recursos de conectividade, eles também permitem a personalização das características de condução. Em constante evolução, os controladores de motor são cruciais para maximizar o desempenho, a autonomia e a eficiência dos carros elétricos.

2.7 REDES DE COMUNICAÇÃO

A Rede de Área de Controle (CAN, Controller Area Network) desempenha um papel crucial na gestão dos sistemas eletrônicos em um veículo elétrico. Trata-se de um protocolo de comunicação altamente confiável e eficiente, projetado para permitir a troca de informações entre os diversos componentes do veículo de forma rápida e coordenada (KHAN, 2018).

Segundo Hanifah (2015), a rede CAN conecta os principais sistemas do veículo elétrico, como motor, bateria, inversor, freios regenerativos, sistemas de segurança e controle de chassi. Através dela, esses sistemas podem compartilhar informações vitais, como velocidade, temperatura, carga da bateria e status do motorista, possibilitando uma operação integrada e harmoniosa.

Uma das maiores vantagens do protocolo CAN é sua imunidade a interferências eletromagnéticas, garantindo a confiabilidade das comunicações em ambientes elétricos complexos. Além disso, a rede CAN permite a rápida detecção de falhas e problemas, facilitando diagnósticos e manutenção (KHAN, 2018).

Através da rede CAN, a Unidade de Controle Eletrônico (ECU) central pode tomar decisões informadas com base nas informações compartilhadas pelos diversos sistemas. Para Pazul (1999), isso é crucial para otimizar a eficiência, segurança e desempenho do veículo elétrico, contribuindo para uma experiência de condução confiável e confortável.

Em resumo, a rede CAN é o sistema nervoso central que permite a comunicação entre os sistemas eletrônicos de um veículo elétrico. Sua capacidade de conectar e sincronizar esses componentes são fundamentais para a mobilidade elétrica moderna e a evolução contínua da indústria automotiva (PAZUL, 1999).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A origem deste projeto partiu da necessidade de promover avanços significativos na eficiência, desempenho e segurança dos veículos elétricos. Desta forma, foi proposta uma nova metodologia a fim de oferecer uma distribuição precisa de torque para cada roda, permitindo um controle mais refinado da tração, estabilidade e capacidade de resposta do veículo em diversas condições de estrada.

Sendo que primeiramente foi elaborado um estudo em artigos, livros e sites, visando identificar qual modelo de motor elétrico se destacam para a aplicação em veículos elétricos.

O estudo tomou como referência os conteúdos abordados em sala de aula, aos quais, foram repassados os requisitos de projeto.

Para esse estudo, foram desenvolvidas tabelas, onde estão anexados todos os dados que precisam ser verificados durante o desenvolvimento de um controle de tração independente.

Com os itens definidos, foi realizada uma comparação entre os modelos, a fim de identificar qual seria o mais ideal para o projeto. Diante disso, realizamos um levantamento de custos com uma pesquisa de mercado entre fornecedores.

Analisando o desenvolvimento e a finalidade desta pesquisa, a técnica de análise e interpretação de dados é de forma quantitativa, primeiramente, foram realizadas as coletas de dados da quantidade de itens necessários, em seguida, montado um esquema funcional. Dessa forma, foi realizado o somatório dos itens, ao ponto de saber quantidade necessária.

A análise qualitativa corresponde às características dos componentes e na comparação entre os modelos escolhidos de cada item. Por fim, visando comprovar identificar todos os itens e o custo total para a implantação de um sistema de tração elétrica, com controle independente nas rodas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo é apresentado o dimensionamento de um sistema, os parâmetros principais a serem dimensionados no estudo são a potência do motor elétrico e capacidade energética da bateria.

O dimensionamento irá considerar um veículo SWINCAR e-Spider L6e-A conforme a Figura 5, um quadriciclo elétrico com tração nas quatro rodas fornecida por quatro motores de rodas individuais.

Figura 5 – Quadriciclo

Fonte: Swincar (2023)

São consideradas como parâmetros principais desse modelo de veículo as informações contidas na Tabela 2, com isso possuímos o embasamento necessário para dimensionarmos o nosso sistema.

Tabela 2- Parâmetros do veículo

Parâmetro	Valor	Unidade
Massa do veículo	230	kg
Comprimento	2,05	m
Largura	1,37	m
Altura	1,35	m
Distância entre eixos	1,5	m
Distância ao solo	0,26	m
Aceleração da gravidade	230	m/s ²
Coefficiente de resistência ao rolamento	0,01	-
Coefficiente de arrasto	0,296	-
Densidade do ar	1,205	Kg/m ³
Eficiência do motor	85	%
Fator de massa	1,05	-
Tempo de aceleração	12	s

Velocidade final	13,89	m/s
Velocidade inicial	0	m/s
Área frontal	2,33	m ²
Velocidade Final do Motor sem decaimento de esforço Trativo (m/s)	11,11	m/s

Fonte: Autor (2023).

A primeira etapa foi dimensionar o motor elétrico para a aplicação que estamos visando. Desta forma optamos pelo motor elétrico de ímã permanente que é aplicado diretamente na roda conforme a Figura 6, diferente da maioria dos motores de tração elétrica com os quais estamos familiarizados. A diferença mais óbvia entre eles é que esse motor é aplicado nas rodas, ou seja, ocupa o espaço morto atualmente usado pelos freios de um veículo convencional.

Figura 6 – Motor Elétrico



Fonte: Protean (2023)

Este modelo possui características de uma máquina elétrica com construção baseada em projeto padrão de motores de indução, magnetização do rotor por ímãs permanentes, construção totalmente fechada e pode ser refrigerado com ar ou líquido.

Com as características adotadas a partir da Tabela 2, podemos encontrar a potência do motor elétrico. Para realizar os cálculos utilizaremos a equação demonstrada por Vasconcelos (2011), na qual substituímos os valores das incógnitas.

$$P_{elétrico} = \frac{\delta_m \cdot M_v}{2 \cdot t_a} \cdot (V_f^2 + V_b^2) + \frac{2}{3} M_v \cdot g \cdot fr \cdot V_{f^2} + \frac{1}{5} \rho_a \cdot C_D \cdot A_f \cdot V_{f^2}^3$$

Onde:

- M_v é a massa total do veículo (kg);
- δ_m é o fator de massa, considerando a massa equivalente adicionada pelos momentos angulares dos componentes rotativos (adimensional);
- t_a é o tempo esperado de aceleração (s);
- V_f^2 é a velocidade final esperada (m/s);
- V_{f^2} é a velocidade até onde o motor elétrico trabalha sem decaimento de esforço trativo (m/s);
- V_b^2 é a velocidade inicial do motor (m/s);
- fr é a resistência ao rolamento (adimensional);
- ρ_a é a densidade do ar (kg/m³);
- C_D é o coeficiente aerodinâmico (adimensional);
- A_f é a área frontal (m²);
- g é a gravidade (m/s²).

$$P_e = \frac{1,05 \cdot 230}{2 \cdot 12} \cdot (13,89^2 + 0^2) + \frac{2}{3} \cdot 230 \cdot 9,81 \cdot 0,01 \cdot 11,11 + \frac{1}{5} \cdot 1,205 \cdot 0,296 \cdot 2,33 \cdot 11,11^3$$

$$P_e = 2,33 \text{ kW}$$

Logo, tem-se que a potência do motor elétrico é de 2,33 kW. Para nosso projeto utilizaremos motores nas rodas, ou seja, será quatro motores totalizando aproximadamente 9,32 kW de potência para nosso projeto.

A segunda etapa foi identificar dentro de um universo de baterias qual é o modelo de armazenador de energia mais ideal. Diante disso comparamos na Tabela 2, os modelos de baterias mais conhecidos no mercado.

Tabela 2- Comparação de baterias

Modelo	Chumbo ácido	Níquel cádmio	Níquel metal hidreto	Íons de lítio
Descritor da química do catodo	PbA/LAB	NiCd	NiMh	LCO
Energia específica (Wh/kg)	30-40	40-60	30-80	120-150
Densidade de energia (Wh/L)	60-70	50-150	140-300	250-450
Potência específica (W/kg)	60-180	150	250-1000	600
Densidade de potência (W/L)	100	210	400	1200-3000
Tensão nominal (V)	2,0	1,2	1,2	3,6-3,8
Ciclos	300-800	1000-2000	500-1500	>700
Auto descarga (% por mês)	3-5	20	30	1-5
Temperatura de operação (°C)	-20 a 60	-40 a 60	-20 a 60	-20 a 60

Fonte: Warner (2015).

Como é possível observar, a bateria de íons de lítio se destacam por possui algumas características como relação peso e energia muito grande, por ter uma energia muito maior com um volume menor e também por entrega uma elevada potência com um volume menor.

Para dimensionamento deve ser levado como base um tempo de descarga e uma capacidade de carga de referência. Suponhamos que a bateria possua capacidade nominal de 49 A.h especificada para um tempo de 10 horas de descarga a corrente na bateria é:

$$I_{bat} = \frac{49}{10} = 4,9 A$$

Considerando $k = 1,2$, obtêm-se a capacidade de Peukert através da seguinte equação:

$$C_p = (I_{bat})^k \cdot t$$

Sendo:

- C_p é a Capacidade de Peukert (A.h);
- I_{bat} é a corrente solicitada à bateria (A);
- k é uma constante denominada Coeficiente de Peukert (adimensional);
- t é o tempo de descarga associado à corrente (horas).

$$C_p = (4,9)^{1,2} \cdot 10 = 67,33 A.h$$

A Capacidade de Peukert é uma métrica que permite determinar quanto tempo uma bateria vai durar quando submetida a uma corrente elétrica constante e ininterrupta, isolando a influência do tempo em relação à corrente elétrica.

No contexto em que a potência do motor elétrico foi calculada e sua eficiência foi previamente definida, é possível estimar a potência da bateria.

$$P_{maxbateria} = \frac{P_{motor}}{\eta_{motor}}$$

Sendo:

- $P_{maxbateria}$ é a potência máxima da bateria (kW);
- P_{motor} é a potência do motor elétrico (kW);
- η_{motor} é o rendimento do motor elétrico (%).

$$P_{maxbateria} = \frac{9,32}{0,85}$$

$$P_{maxbateria} = 10,96 \text{ kW}$$

Isso resultou em uma potência máxima da bateria de 10,96 kW, considerando uma eficiência de 85%.

A seguir, ao inserir esse valor de potência da bateria na equação a seguir, podemos determinar a tensão da bateria necessária para a corrente elétrica especificada. É importante notar que, embora a corrente possa variar em diferentes situações, neste caso, estamos calculando a tensão para a corrente de 4,9 A.

$$P_{bat} = V_{bat} \cdot I_{bat}$$

$$10,96 \text{ kW} = V_{bat} \cdot 4,9 \text{ A}$$

$$V_{bat} = 2,23 \text{ KV}$$

Em que:

- P_{bat} é a potência da bateria (kW);
- V_{bat} é a voltagem da bateria (kV);
- I_{bat} é a corrente (A).

O resultado desse cálculo é uma tensão da bateria de 2,23 kV.

A terceira etapa foi escolher um modelo de inversor em relação às necessidades do motor elétrico, a compatibilidade de tensão e corrente com a bateria e o motor, além da

eficiência energética. Desta maneira, na Tabela 3, comparamos as principais características de um inversor utilizado em veículos elétricos.

Tabela 3- Comparação de inversores

Modelo	SIEMENS	BOSH	SEVCON
Tensão (V)	180 a 450	100 a 450	96 A 120
Potência máxima(kW)	170	100	150
Eficiência	94%	92%	95 %
Número de motores suportados	4	4	4
Interface de Comunicação	MODBUS	FLEXRAY	CAN

Fonte: Autor (2023).

Para dimensionar o controlador/conversor de potência, você pode usar as seguintes fórmulas:

$$P_{cc} = \frac{P_m}{\eta_m}$$

Onde:

- P_{cc} é a potência necessária para o controlador/conversor; (kW);
- P_m é a potência do motor (kW);
- η_m é a eficiência do motor;

$$P_{cc} = \frac{P_t}{\eta_m \cdot \eta_c}$$

Onde:

- P_{cc} é a potência necessária para o controlador/conversor; (kW);
- P_t é a potência total necessária (kW);
- η_m é a eficiência do motor;
- η_c é a eficiência do conversor de potência;

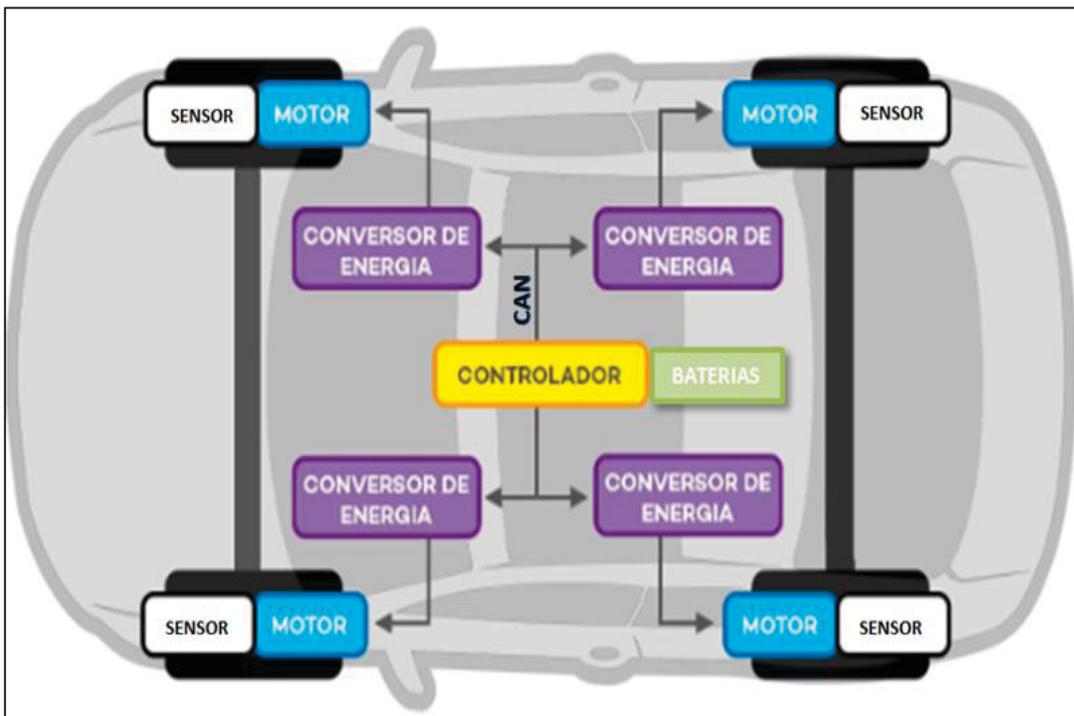
$$P_{cc} = \frac{9,36}{0,85 \cdot 0,95} = 11,59 \text{ kW}$$

Com base nos cálculos de dimensionamento, a potência necessária para o controlador/conversor é de 11,59 kW. O inversor SEVCON é capaz de fornecer essa potência

e, com sua alta eficiência, pode ser uma escolha eficaz para maximizar a eficiência energética do sistema.

Após identificar e adquirir os componentes essenciais chegou à quarta etapa, onde montamos um esquema funcional do sistema conforme a Figura 7, de tal forma que essa tecnologia pode ser adaptada para atender às demandas específicas do veículo.

Figura 7- Esquema do sistema



Fonte: Autor (2023)

Esse sistema menciona a presença de sensores de velocidade e aderência em cada roda, que coletam dados sobre a rotação das rodas e as condições da superfície. Esses dados são processados por uma Unidade de Controle Eletrônico (ECU) central, que calcula a quantidade ideal de torque para cada roda individualmente. Cada roda possui um motor elétrico de aproximadamente 2,5 kW associado, controlado por um inversor independente com quatro saídas, onde permite o controle independente de cada roda. As baterias fornecem a energia de 10,96 kW para os motores elétricos, e uma rede de comunicação, como o CAN bus, é utilizada para transmitir dados entre a ECU, os inversores e os sensores. Esse conjunto de componentes trabalha em conjunto para otimizar a tração e a estabilidade do veículo em diferentes condições de condução.

A quinta etapa realizamos uma previsão de custos para montar o sistema que pode variar significativamente com base em vários fatores, incluindo a complexidade do sistema, a

escolha dos componentes, a tecnologia envolvida e o escopo do projeto. Diante desses fatores, realizamos um levantamento dos componentes listados na Tabela 5, desconsiderando a hora de engenharia, desenvolvimento de software e tempo de teste e validação.

Tabela 5- Previsão de custos

Modelo	Custo Médio (R\$)	Quantidade	Total (R\$)
Sensor	125	4	500
Inversor SECVON	6000	1	6000
Unidade de Controle Eletrônico	1000	1	1000
Motor Elétrico(3kW)	1000	4	4000
Bateria (kWh)	623	10,96kw	6828,10
Rede CAN	700	1	700
Total			19.028,10

Fonte: Autor (2023).

Os valores estimados podem variar amplamente com base na localização geográfica, fornecedores específicos, tecnologia e outros fatores. Desta forma, recomenda-se atualizar os valores para obter uma estimativa precisa dos custos para o seu projeto específico.

O somatório total dos custos dos produtos levados em consideração nesse projeto pode chegar a um valor de R\$ 19.028,10 reais. Essa estimativa serve apenas como uma referência geral para entender o potencial intervalo de custos envolvidos na implementação de um sistema de controle de tração independente nas quatro rodas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Portanto, o estudo abordou diversos aspectos relacionados aos motores elétricos e sistemas de propulsão utilizados em veículos elétricos. A fundamentação teórica destacou diferentes tipos de motores, como os motores de corrente contínua, motores de indução, motores síncronos de ímã permanente e motores de relutância comutada. Cada um desses motores possui vantagens e desvantagens específicas, abordando critérios como eficiência, potência, controle e custo.

A escolha dos componentes, como motores, baterias e inversores, é crucial para o desenvolvimento de um sistema de tração elétrica, com controle independente nas rodas. A seleção do motor de ímã permanente foi justificada devido à sua aplicação direta nas rodas e à sua capacidade de oferecer alta densidade de torque e eficiência. Além disso, a escolha das baterias de íons de lítio foi apoiada por sua alta energia específica, densidade de energia e potência específica, tornando-as ideais para fornecer energia aos motores elétricos.

A importância dos inversores também foi ressaltada, já que eles desempenham papéis fundamentais na conversão de energia e controle preciso dos motores elétricos. A escolha adequada desses componentes é essencial para otimizar a eficiência e a resposta do veículo.

O uso da Rede de Área de Controle (CAN) foi destacado como um protocolo de comunicação essencial para conectar e coordenar os diversos sistemas eletrônicos de um veículo elétrico, permitindo uma operação integrada e eficiente.

Finalmente, o estudo incluiu uma análise de custos estimados R\$ 19.028,10 reais para a implementação do sistema de controle de tração independente nas quatro rodas. Embora os valores possam variar dependendo de vários fatores, essa estimativa serve como um guia para compreender o intervalo de custos envolvidos na implementação desse sistema.

No geral, a pesquisa abordou aspectos cruciais relacionados aos componentes e sistemas envolvidos na propulsão de veículos elétricos, destacando a importância da escolha adequada dos componentes para garantir a eficiência, desempenho e viabilidade econômica dos veículos elétricos.

REFERÊNCIAS

ANDRE, J. **Modular battery management system interface to integrated vehicle control unit** : Creating a bms playground using arduino. 2020

ANTUNES, Paulo Donizete Ribeiro. **Veículos Elétricos, Funcionamento E Seus Benefícios**. 2018. 73 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro Universitário Unifacvest, Lages, 2018.

A. Gupta, R. Ayyanar and S. Chakraborty, "Novel Electric Vehicle Traction Architecture With 48 V Battery and Multi-Input, High Conversion Ratio Converter for High and Variable DC-Link Voltage," in *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, vol. 2, pp. 448-470, 2021, doi: 10.1109/OJVT.2021.3132281.

AUTOMATION. **ABB introduces IE5 level synchronous reluctance (SynRM)** 2020. Disponível em: <<https://www.automation.com/en-us/products/may-2020/abb-introduces-ie5-level-synchronous-reluctance-sy>>. Acesso em: 04 abril 2023.

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.

BATISTA, Danilo da Silva. Et al. 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. Outubro de 2020. ISSN: 2448-0959, Link de acesso: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenhariaeletrica/veiculos-eletricos>.

BRITO, Jorge Miguel Oliveira. **Modelo de Gestão de Energia de um Veículo**. Guimarães : Universidade do Minho, 2007.

BRUNETTI, Franco. **Motores de Combustão Interna**. São Paulo: Blucher, 2012.

CHAU, K. T.. **Electric Vehicle Machines And Drives: design, analysis and application**. Chennai, India: Wiley, 2015.

DENTON, Tom. **Automobile electrical and electronic systems**. 3. ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004.

DENTON, Tom. **Automobile Mechanical and Electrical Systems: Automotive Technology: Vehicle Maintenance and Repair**. Waltham: Elsevier, 2012.

DHAMEJA, Sandeep. **Electric Vehicle Battery Systems**. s.l. : Newnes, 2002.

Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study. Zeraoulia, M., Mohamed, E. H. B. e Diallo, D. s.l. : IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. 55, NO. 6, 2006.

ENGELMANN, E. b. W. H. M. R. H. **Handbook of Electric Motors**. [S.l.: s.n.], 1995.

FGV ENERGIA. **Carros elétricos**. Cadernos Fgv Energia, Rio de Janeiro, v. 1, n. 7, p.1-99, maio 2017.

FIGUEIROA, Júlia Pazian. **Comparação Experimental Entre Motores Blde Para Aplicação Em Tração Elétrica De Veículos De Competição Em Eficiência Energética**. 2021. 75 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Automotiva, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2021.

FREITAS, J. C. N. d. **Projeto e análise ao funcionamento de carros elétricos**. Tese (Doutorado), 2012.

HANIFAH, R. **Electric vehicle battery modelling and performance comparison in relation to range anxiety**. Procedia Computer Science, v. 76, p. 250–256, 2015.

HASHEMNIA, N.; ASAEI, B. **Comparative study of using different electric motors in the electric vehicles**. In: IEEE. Electrical Machines, 2008. ICEM 2008. 18th International Conference on. [S.l.], 2008.

HELMERS, Eckard; MARX, Patrick. **Electric cars: technical characteristics and environmental impacts**. Environmental Sciences Europe, v. 24, n. 1, p. 14, 2012.

HEYWOOD, John B. **Internal combustion engine fundamentals**. New York; St. Louis: McGraw-Hill, 1988.

HUSAIN, Iqbal. **Electric and hybrid vehicles: design fundamentals**. 2. ed. Boca Raton: Crc Press, 2011.

KHAN, M. K. M. and Rahim, M. S. (2018). **Performance analysis of social-aware routing protocols in delay tolerant networks**. International Conference on Computer, Communication, Chemical, Materials and Electronic Engineering.

LARMINIE, James; LOWRY, John. **Electric Vehicle Technology Explained**. 2. ed. Chennai: John Wiley & Sons Ltd, 2012.

MI, Chris; MASRUR, M. Abul; GAO, David Wenzhong. **Hybrid Electric Vehicles: principles and applications with practical perspectives**. Chennai: John Wiley & Sons, Ltd, 2011.

M. L. De Klerk and A. K. Saha, "A Comprehensive Review of Advanced Traction Motor Control Techniques Suitable for Electric Vehicle Applications," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 125080-125108, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3110736.

NOCE, Toshizaemom. **Estudo de funcionamento de veículos elétricos e contribuições ao seu aperfeiçoamento**. Pontifícia Universidade Católica De Minas Gerais, 2009.

PAZUL, K. et al. **Controller area network (can) basics**. Microchip Technology Inc., 1999.

Protean, ProteanDrive , 2023, Disponível em: < <https://www.proteanelectric.com/>>

RAMALHO, Marcela Labadessa. **Análise Quantitativa E Qualitativa Sobre Armazenadores De Energia: Supercapacitores**. 2022. 43 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Química, Centro Universitário Sagrado Coração, Bauru, 2022.

RAMOS, Mário Cesar do Espírito Santo. **Implementação de motores de alto rendimento em uma indústria de alimentos: Estudo de Caso**. 2005. 115 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Mestre em Energia, Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

S. J. Rind, Y. Ren, Y. Hu, J. Wang and L. Jiang, "Configurations and control of traction motors for electric vehicles: A review," in *Chinese Journal of Electrical Engineering*, vol. 3, no. 3, pp. 1-17, December 2017, doi: 10.23919/CJEE.2017.8250419.

SANTOS, Max Mauro Dias. **Veículos elétricos e Híbridos: Fundamentos, Características e Aplicações**. Saraiva Educação SA, 2020.

SANTOS, Jackson da Silva. **Análise Técnica E Econômica Da Conversão De Um Veículo De Combustão Interna Para Um Veículo Elétrico**. 2022. 67 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

SERRA, E. T. et al. **Armazenamento De Energia: Situação Atual, Perspectivas e Recomendações**. Comitê De Energia Da Academia Nacional De Engenharia, p. 1- 46, 2016.

SWINCAR, Products. Allan- França 2023. Disponível no site: <https://www.swincar.net/>. Acesso em 20 agosto de 2023.

TANAKA, Carlos Naomi. **Metodologia de dimensionamento do sistema de tração para veículos elétricos**. 2013. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2013. Citado 20 vezes nas páginas 38, 39, 41, 43, 54, 57, 64, 65, 72, 73, 76, 77, 78, 80, 81, 83, 84, 85, 86 e 87.

TILLMANN, Carlos Antônio da Costa. **Motores de Combustão Interna e Seus Sistemas**. Pelotas-RS 2013. 165p. Disponível no site: http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos/ifsul/tecnico_biocombustivel/motores_combustao_interna_e_seus_sistemas.pdf . Acesso em 10 agosto de 2018.

VASCONCELLOS, Raphael Halfeld. **Projeto De Um Veículo Híbrido Para Uso Urbano**. Monografia – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica. São Paulo, 2011.

WARNER, John. **Lithium-Ion and Other Cell Chemistries**. In: WARNER, John. The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design: Chemistry, Components, Types and Terminology. Waltham, Eua: Elsevier, 2015.