



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO, DE CIÊNCIAS EXATAS E EDUCAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENG. DE CONTROLE, AUTOMAÇÃO E COMPUTAÇÃO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Leonardo Henrique da Rosa

Desafios e Perspectivas da Conversão Elétrica do Ford Cargo C816 usando
um motor WEG Tração: Uma Análise para o Futuro da Mobilidade Elétrica.

Blumenau

2024

Leonardo Henrique da Rosa

Desafios e Perspectivas da Conversão Elétrica do Ford Cargo C816 usando um motor WEG Tração: Uma Análise para o Futuro da Mobilidade Elétrica.

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação do Centro Tecnológico, de Ciências Exatas e Educação da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação

Orientador: Prof. Tiago Davi Curi Busarello

Blumenau

2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

da Rosa, Leonardo Henrique

Desafios e Perspectivas da Conversão Elétrica do Ford Cargo C816 usando um motor WEG Tração : Uma Análise para o Futuro da Mobilidade Elétrica. / Leonardo Henrique da Rosa ; orientador, Tiago Davi Curi Busarello, 2024.

54 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau,
Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Blumenau,
2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Controle e Automação. 2. Mobilidade Elétrica. 3. Conversão de Veículos. 4. Simulação MATLAB. I. Busarello, Tiago Davi Curi . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Controle e Automação. III. Título.

Leonardo Henrique da Rosa

Desafios e Perspectivas da Conversão Elétrica do Ford Cargo C816 usando um motor WEG Tração: Uma Análise para o Futuro da Mobilidade Elétrica.

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheiro de Controle e Automação” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação.

Blumenau, 22/12/2024.

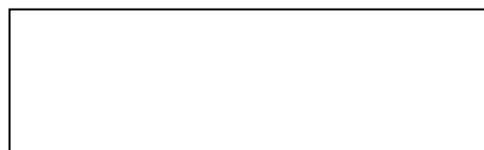
Banca Examinadora:



Prof. Tiago Davi Curi Busarello
Orientador



Prof.(a) Ana Julia Dal Forno
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Carlos Roberto Moratelli

Universidade Federal de Santa Catarina
Blumenau, 2024.

Este trabalho é dedicado à minha namorada, colegas de classe e principalmente a
minha família.

RESUMO

A transição para a mobilidade elétrica é uma resposta crucial às crescentes preocupações ambientais e à busca por alternativas sustentáveis no setor de transportes. Neste estudo, são explorados os desafios e as perspectivas associados à conversão do Ford Cargo C816 para um veículo elétrico, utilizando um motor WEG Tração. Realiza-se uma simulação detalhada no MATLAB, considerando os parâmetros físicos e técnicos do veículo e da bateria, com o objetivo de avaliar o desempenho do veículo elétrico convertido durante o ciclo de condução urbana. A análise dos resultados da simulação mostra detalhes sobre a eficiência energética, a autonomia da bateria e as dinâmicas de aceleração e frenagem do veículo. Com base nesses resultados, fica evidente os desafios técnicos, como a gestão da energia da bateria e a infraestrutura de recarga, além de considerações econômicas da conversão. O estudo discute, ainda, as tendências futuras e as tecnologias emergentes no campo da mobilidade elétrica, como os avanços na densidade energética das baterias e nos sistemas de carregamento rápido. As conclusões destacam a viabilidade da conversão de veículos comerciais para elétricos como uma estratégia promissora para a redução das emissões de carbono e a economia de combustível, enfatizando as melhorias necessárias para a integração efetiva desses veículos na frota de transporte atual. Este estudo contribui para o campo da engenharia de controle e automação e pode servir de modelo para futuras iniciativas de conversão e desenvolvimento de veículos elétricos.

Palavras-chave: Mobilidade Elétrica, Conversão de Veículos, Veículo Elétrico, Simulação MATLAB, Motor WEG Tração.

ABSTRACT

The transition to electric mobility is a crucial response to growing environmental concerns and the search for sustainable alternatives in the transportation sector. This study explores the challenges and perspectives associated with converting the Ford Cargo C816 into an electric vehicle, using a WEG Traction motor. A detailed simulation is conducted in MATLAB, considering the vehicle's and battery's physical and technical parameters, in order to evaluate the performance of the converted electric vehicle during an urban driving cycle. The analysis of the simulation results highlighted key aspects of energy efficiency, battery autonomy, and the vehicle's acceleration and braking dynamics. Based on these results, technical challenges were identified, such as battery energy management and charging infrastructure, in addition to economic considerations of the conversion. The study also discusses future trends and emerging technologies in the field of electric mobility, such as advancements in battery energy density and fast charging systems. The conclusions highlight the feasibility of converting commercial vehicles to electric as a promising strategy for reducing carbon emissions and fuel costs, emphasizing the necessary improvements for effectively integrating these vehicles into the current transportation fleet. This study contributes to the field of automotive engineering and may serve as a model for future conversion initiatives and electric vehicle development.

Keywords: Electric Mobility, Vehicle Conversion, Electric Vehicle, MATLAB Simulation, WEG Traction Engine.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Emissões de CO ₂ por setor.....	11
Figura 2 – Ford Cargo C816.....	11
Figura 3 – Localização dos Imãs permanentes em 2 tipos de rotores.....	20
Figura 4 – Motor WEG Tração.....	20
Figura 5 – Soluções WEG Tração.....	21
Figura 6 – Representação da Força de Arrasto Aerodinâmico.....	30
Figura 7 – Ilustração de um pack de 4 células das baterias escolhidas.....	32
Figura 8 – Comportamento da velocidade do veículo durante a simulação.....	36
Figura 9 – Comportamento da força de tração pelo tempo para um padrão de funcionamento do veículo.....	36
Figura 10 – Gráfico de Potência do Motor em Condições de Aceleração e Desaceleração.....	37
Figura 11 – Gráfico de Torque do Motor Durante o Ciclo de Operação Urbana.....	38
Figura 12 – Gráfico da Corrente da Bateria Durante o Ciclo de Operação.....	39
Figura 13 – Gráfico da Profundidade de Descarga da Bateria Durante o Ciclo de Operação.....	39
Figura 14 – Gráfico de comparações de emissões durante o ciclo de autonomia (3 horas)	41
Figura 15 – Exemplo de Smart Grid.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANFAVEA Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores

BMS Battery Management System

SFUDS Simplified Federal Urban Driving Schedule

PMSMs Permanent Magnet Synchronous Motors

VEs Veículos Elétricos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	CONTEXTO	10
1.2	JUSTIFICATIVA.....	13
1.3	OBJETIVOS	13
1.4	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	MOBILIDADE ELÉTRICA	16
2.2	VEÍCULOS COMERCIAIS E ELETRIFICAÇÃO.....	17
2.3	ÍMÃS PERMANENTES E TECNOLOGIAS DE MOTORES ELÉTRICOS... 18	
2.4	BATERIAS E GERENCIAMENTO DE ENERGIA	22
2.4.1	Sistema de Gerenciamento de Baterias	23
2.4.2	Inversores de alta frequência	24
2.4.3	Produção e Uso de Baterias	24
2.4.4	Transição Energética em veículos pesados	25
2.5	DESAFIOS DA MOBILIDADE ELÉTRICA	26
2.5.1	Infraestrutura de Recarga	26
2.5.2	Custos Associados	26
2.5.3	Aceitação do Mercado	27
2.5.4	Desafios Técnicos e Tecnológicos	27
3	METODOLOGIA	28
3.1	PARÂMETROS E CONFIGURAÇÕES DO VEÍCULO	28
3.2	PARÂMETROS DA BATERIA.....	32
3.3	MODELAGEM E SIMULAÇÃO	33
4	RESULTADOS	35
4.1	ANÁLISE DOS RESULTADOS DE VELOCIDADE E ACELERAÇÃO.....	35
4.1.1	Comportamento de Velocidade e tração	35
4.2	COMPORTAMENTO DA POTÊNCIA E ACELERAÇÃO DO MOTOR.....	36
4.3	CONSUMO E EFICIÊNCIA DA BATERIA.....	38
4.3.1	Eficiência Energética e Regeneração	38
4.3.2	Autonomia e consumo	39
4.4	CONSIDERAÇÃO SOBRE EMISSÕES DE CO ₂	40

4.4.1	Veículo Diesel	40
4.4.2	Veículo Elétrico	41
4.4.3	Comparação	41
4.5	CUSTO-BENEFÍCIO DA CONVERSÃO	42
4.5.1	Cálculos Iniciais de Consumo e Custo	42
4.5.2	Comparação com o Modelo a Diesel	42
4.5.3	Projeção Anual e de Longo Prazo	43
4.5.4	Discussão sobre Custo-Benefício	43
4.6	DESAFIOS E OPORTUNIDADES	43
5	CONCLUSÃO	46
	REFERÊNCIAS	47
	ANEXOS	51

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

A mobilidade elétrica emergiu como uma resposta crítica às questões de sustentabilidade, especialmente na redução de emissões de gases de efeito estufa e outros poluentes atmosféricos provenientes do setor de transporte. No Brasil, o impacto ambiental do setor de transportes é significativo, representando cerca de 13% das emissões nacionais de poluentes, sendo este quase todo referente ao setor rodoviário, conforme dados mostrados na Figura 1 da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA). A eletrificação de veículos comerciais, como o Ford Cargo C816 descrito na Figura 2, representa uma oportunidade significativa de mitigar o impacto ambiental dos transportes, um setor notoriamente difícil de descarbonizar devido à sua dependência de combustíveis fósseis e à alta intensidade de uso (BARASSA et al., 2022). Esta transição não apenas contribui para a diminuição dos poluentes atmosféricos, mas também abre caminho para a melhoria da eficiência operacional e a redução de custos a longo prazo, redefinindo a dinâmica econômica do setor de transportes, um dos maiores emissores de gases do efeito estufa no mundo.

Em termos globais, o setor de mobilidade elétrica está em rápida evolução, impulsionado por uma série de fatores que incluem a crescente conscientização ambiental, o avanço das tecnologias de baterias e motores elétricos, e o apoio crescente das políticas públicas. A eletrificação de veículos pesados, como caminhões, não apenas reduz as emissões diretas de CO₂, mas também contribui para a redução da dependência de combustíveis fósseis, um objetivo de políticas energéticas internacionais, como o Acordo de Paris. No Brasil, este movimento é ainda mais relevante, dado o perfil de transporte nacional fortemente dependente de combustíveis fósseis, como o diesel, especialmente no transporte rodoviário, que continua a ser o principal modal de transporte no país. A eletrificação do Ford Cargo C816 é um exemplo de como a transição para veículos elétricos pode ser aplicada de forma prática e escalável, trazendo benefícios não apenas ambientais, mas

também operacionais, ao substituir a necessidade de combustíveis fósseis por eletricidade.

Figura 1 – Emissões de CO2 por setor

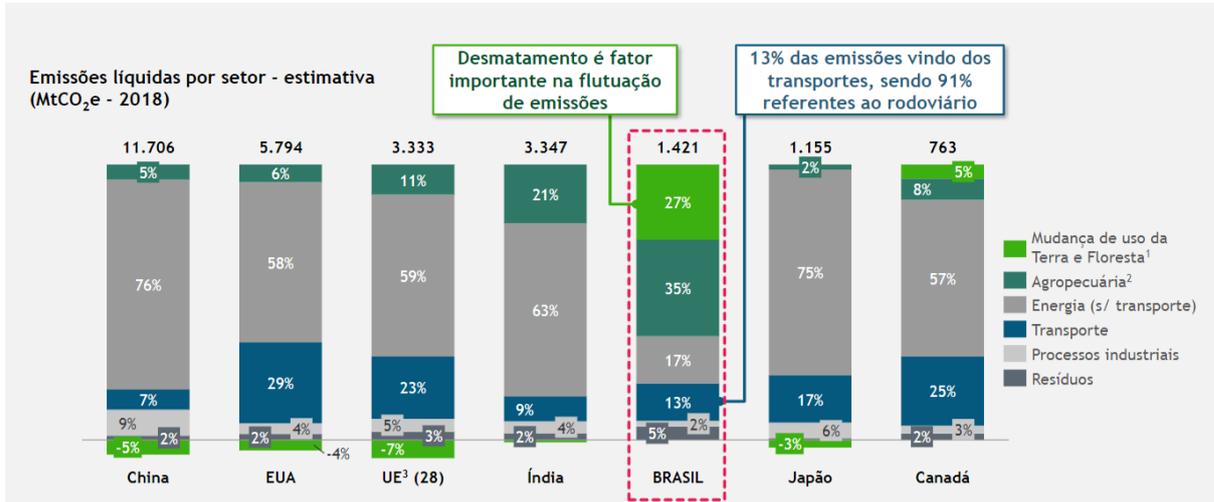


Figura 2 – Ford Cargo C816



Fonte: (Ford Motors)

A viabilidade tecnológica dos veículos elétricos, incluindo caminhões pesados, tem se expandido consideravelmente devido aos avanços nas baterias de íon-lítio, motores elétricos mais eficientes e sistemas de gerenciamento de energia. Esses avanços, aliados ao crescente desenvolvimento da infraestrutura de recarga e a redução nos custos de produção de baterias, têm impulsionado o aumento da

adoção de veículos elétricos em diversas regiões do mundo. No Brasil, o cenário é favorável à expansão da mobilidade elétrica, com o governo federal e outras entidades públicas promovendo incentivos fiscais e regulamentações que visam acelerar a transição para um transporte mais sustentável. Este compromisso com a sustentabilidade e a redução da pegada de carbono se reflete também em uma visão estratégica para o setor de transporte, cuja modernização passa pela substituição progressiva dos motores a combustão por motores elétricos.

Além dos benefícios ambientais e operacionais, a mobilidade elétrica também traz desafios tecnológicos que devem ser superados para garantir sua plena adoção. O design e a integração de sistemas de tração elétrica eficientes, como o motor WEG Tração utilizado no Ford Cargo C816, requerem uma adaptação tanto no processo de fabricação quanto na infraestrutura de apoio. A capacidade de carga, a autonomia dos veículos elétricos, o tempo de recarga e a eficiência energética são questões centrais no desenvolvimento de caminhões elétricos que possam competir com os tradicionais movidos a diesel. No entanto, a crescente pesquisa e desenvolvimento nesses campos promete soluções inovadoras que podem superar essas barreiras. O uso de sistemas de regeneração de energia e o desenvolvimento de baterias com maior densidade energética são exemplos de como a tecnologia está evoluindo para atender a essas necessidades.

Dessa forma, a eletrificação do setor de transportes no Brasil não é apenas uma necessidade ambiental, mas também uma oportunidade de inovação tecnológica e transformação econômica. A transição para veículos elétricos pode se tornar um motor de mudança para a economia, criando novas oportunidades de negócios, gerando empregos qualificados e tornando o Brasil mais competitivo no mercado global de mobilidade sustentável. Este movimento vai além da simples substituição de combustíveis fósseis por eletricidade; ele reflete uma reconfiguração do setor de transportes, alinhando-o às necessidades globais de mitigação de mudanças climáticas e desenvolvimento de tecnologias limpas.

1.2 JUSTIFICATIVA

A escolha do motor WEG Tração para a conversão do Ford Cargo C816 em um veículo elétrico é fundamentada pela sua reconhecida eficiência e qualidade de construção, aspectos cruciais para garantir a viabilidade e a sustentabilidade de veículos comerciais elétricos. O motor Tração da WEG é projetado para oferecer não apenas alta eficiência energética, mas também robustez e confiabilidade, características essenciais para o uso intensivo no transporte comercial. Esses motores são especialmente valorizados por sua capacidade de operar sob diversas condições ambientais sem degradação significativa de performance, um fator decisivo para a escolha neste projeto de conversão (WEG, 2021).

Além disso, a eletrificação de veículos comerciais como o Ford Cargo C816 contribui significativamente para a redução do consumo de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, para a diminuição das emissões de poluentes. O motor elétrico destaca-se no mercado por sua inovação tecnológica que alia economia de energia com redução de emissões, alinhando-se com as diretrizes globais para a redução da pegada carbônica e com as políticas nacionais de incentivo à mobilidade elétrica (STOPFER et al., 2021). Este projeto de conversão não só responde às necessidades ambientais urgentes, mas também serve como um estudo de caso valioso para futuras iniciativas de eletrificação em veículos pesados, proporcionando dados críticos e insights operacionais.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é investigar a viabilidade técnica e ambiental da conversão do Ford Cargo C816 para o uso de um motor elétrico WEG Tração, considerando-o como um estudo de caso para a eletrificação de veículos comerciais pesados urbanos. Especificamente, o estudo busca demonstrar o impacto da conversão na eficiência operacional do veículo e sua contribuição para a redução das emissões de gases de efeito estufa, alinhando-se às metas de sustentabilidade e redução da poluição urbana. A análise pretende fornecer dados valiosos para

fabricantes de veículos, operadores de frotas e formuladores de políticas sobre os benefícios e desafios da transição para a mobilidade elétrica no setor de transporte comercial.

Em termos específicos, o estudo tem como objetivo: (1) Modelar e simular o desempenho do Ford Cargo C816 com o motor WEG Tração em ciclos operacionais variados, utilizando o software MATLAB/Simulink versão 2022b; (2) Avaliar a eficiência energética do motor elétrico e seu impacto na autonomia do veículo; (3) Analisar a redução potencial de emissões de CO₂ e outros poluentes em comparação com a configuração original do veículo a diesel; e (4) Identificar os principais desafios técnicos, econômicos e logísticos associados à conversão de veículos comerciais para elétricos. Este estudo busca não apenas explorar as possibilidades técnicas da eletrificação de veículos pesados, mas também destacar as implicações práticas e a escalabilidade de tais iniciativas, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes e sustentáveis no setor de transportes.

1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Capítulo 1: Introdução

Este capítulo estabelece o contexto do estudo, delineando a importância da mobilidade elétrica e especificamente a conversão de veículos comerciais como o Ford Cargo C816. A justificativa para escolha do motor WEG Tração é apresentada, bem como os objetivos gerais e específicos do trabalho. A estrutura do documento também é detalhada aqui para orientar o leitor sobre o que esperar nos capítulos subsequentes.

Capítulo 2: Referencial Teórico

O segundo capítulo aborda uma ampla revisão de literatura sobre mobilidade elétrica, focando em tecnologias de motorização elétrica, desafios da eletrificação de veículos pesados, e estudos de caso relevantes que fornecem insights sobre as tendências atuais e futuras no campo. Este capítulo serve como base teórica para compreender os desafios técnicos e as soluções inovadoras aplicáveis ao caso.

Capítulo 3: Metodologia

Este capítulo descreve a metodologia utilizada no estudo, incluindo a modelagem e simulação no software MATLAB/Simulink, os parâmetros e configurações do veículo e os parâmetros da bateria. Detalha-se cada etapa da simulação, explicando como os dados foram coletados e analisados para garantir resultados precisos e confiáveis.

Capítulo 4: Resultados da Simulação

Aqui, os resultados obtidos das simulações são apresentados e discutidos. Este capítulo detalha como o veículo respondeu às alterações, incluindo análises sobre velocidade, aceleração, eficiência energética, e impactos ambientais da conversão. Gráficos são utilizados para ilustrar os resultados de maneira clara e compreensível.

Capítulo 5: Conclusão

Neste capítulo, os resultados são comparados com as expectativas baseadas na revisão de literatura e na experiência prática de outros estudos similares. Discutem-se as implicações dos resultados, desafios enfrentados durante a conversão, e as perspectivas futuras para a eletrificação de veículos comerciais pesados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MOBILIDADE ELÉTRICA

A mobilidade elétrica, conforme destacada nas últimas décadas, é cada vez mais reconhecida como uma solução fundamental para os desafios de sustentabilidade e eficiência energética no setor de transportes. A evolução dos veículos elétricos (VEs) é marcada por avanços tecnológicos significativos em baterias e motores elétricos, juntamente com o aumento do suporte de políticas governamentais que incentivam a adoção de alternativas mais limpas. Segundo Silva (2021), a transição para veículos elétricos é impulsionada pela necessidade urgente de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e outros poluentes, alinhando-se assim às metas globais como as estabelecidas pelo Acordo de Paris. Além disso, a União Europeia aprovou uma lei que proíbe a venda de veículos novos a gasolina e diesel a partir de 2035, estabelecendo também uma redução de 55% nas emissões de CO₂ para carros novos vendidos a partir de 2030, em comparação com os níveis de 2021 (Abnett, 2023). Este cenário é reforçado por Barbosa et al. (2022), que projetam um aumento substancial na proporção de veículos elétricos nas vendas globais, evidenciando a tendência crescente de eletrificação como um elemento chave na transformação dos padrões de mobilidade urbana.

Os benefícios ambientais da mobilidade elétrica são amplamente documentados, incluindo a redução de emissões de poluentes locais e de carbono, melhorias significativas na qualidade do ar em centros urbanos e a consequente diminuição dos problemas de saúde pública associados à poluição atmosférica. Além disso, veículos elétricos oferecem vantagens econômicas, como custos operacionais e de manutenção reduzidos em comparação com veículos a combustão, devido à maior eficiência energética dos motores elétricos e ao menor número de peças móveis. Todeschini e Souza (2022) enfatizam que, para maximizar esses benefícios, é essencial avançar no desenvolvimento de infraestrutura de carregamento e na integração dos VEs com redes de energia, especialmente aquelas que incorporam uma alta parcela de energia renovável.

Contudo, a adoção em massa da mobilidade elétrica enfrenta desafios significativos, que incluem a necessidade de investimentos substanciais em infraestrutura de carregamento, o alto custo inicial de aquisição de VEs e a gestão da demanda energética na rede elétrica. Estudos referentes a cidades inteligentes indicam que a superação desses obstáculos requer não apenas inovações tecnológicas, mas também um forte apoio regulatório e incentivos financeiros que possam facilitar a transição para um sistema de transporte mais sustentável. Além disso, a educação do consumidor e a garantia de uma experiência positiva de usuário são cruciais para aumentar a aceitação dos veículos elétricos, conforme os consumidores tendem a avaliar a viabilidade e os benefícios práticos dessas tecnologias em suas vidas diárias.

2.2 VEÍCULOS COMERCIAIS E ELETRIFICAÇÃO

A conversão do Ford Cargo C816 para um motor elétrico, com o modelo Tração da WEG, exemplifica de forma prática a transição para a mobilidade elétrica no segmento de veículos comerciais pesados. Caminhões e ônibus, que compõem essa categoria, são amplamente reconhecidos por seu elevado consumo de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, por serem grandes responsáveis pelas emissões de poluentes atmosféricos.

A eletrificação de veículos comerciais apresenta desafios únicos em comparação com veículos menores ou de passageiros. Dentre estes, a necessidade de baterias com maior densidade energética e sistemas de gerenciamento de energia mais eficazes é crucial, visto que estes veículos precisam garantir não apenas a mobilidade urbana, mas também o transporte de carga por longas distâncias. De acordo com Silva (2021), a integração de veículos elétricos pesados na rede de distribuição elétrica pode representar um desafio significativo devido à sua alta demanda por energia durante os períodos de recarga, o que exige uma infraestrutura robusta e bem planejada para evitar sobrecargas no sistema elétrico.

Por outro lado, as vantagens da eletrificação em veículos comerciais são inúmeras e atraentes para operadores econômicos e ambientalmente conscientes. Estudos indicam que, apesar do custo inicial mais elevado, os custos operacionais e de

manutenção de veículos elétricos são significativamente menores em comparação com seus equivalentes a diesel. Isso se deve à menor quantidade de partes móveis e ao desgaste reduzido em sistemas elétricos em comparação com sistemas mecânicos complexos de veículos tradicionais. Além disso, a adesão a padrões de emissões cada vez mais rigorosos pode ser mais facilmente alcançada através da eletrificação.

Ademais, a infraestrutura de recarga permanece como um dos grandes desafios para a adoção ampla de veículos comerciais elétricos. A capacidade de realizar recargas rápidas ou a disponibilidade de sistemas de troca de bateria podem ser essenciais para a viabilidade operacional desses veículos, especialmente em rotas fixas e regulares. O artigo de Todeschini e Souza (2022) aponta para a crescente inovação em tecnologias de recarga que poderiam mitigar essas barreiras, oferecendo soluções mais práticas e eficientes para a operação contínua desses veículos sem comprometer significativamente o tempo de atividade, essencial para o setor de transporte de cargas.

2.3 ÍMÃS PERMANENTES E TECNOLOGIAS DE MOTORES ELÉTRICOS

A tecnologia de motores elétricos desempenha um papel crucial na transformação da mobilidade elétrica, especialmente no setor de veículos pesados, como caminhões, ônibus e veículos comerciais. A evolução desses motores, com foco em eficiência energética e sustentabilidade, é essencial para garantir a viabilidade econômica e ambiental desses veículos.

Entre os principais tipos de motores elétricos utilizados em veículos pesados, destacam-se os motores de indução (assíncronos) e os motores de ímã permanente. Os motores de indução são conhecidos por sua robustez, custo acessível e ampla utilização em aplicações como ônibus elétricos e caminhões de carga. No entanto, os motores de ímã permanente, como o modelo WEG Tração, oferecem vantagens significativas em termos de eficiência energética, desempenho em diferentes faixas de velocidade. Esses aspectos são cruciais para veículos de carga pesada e longa distância, onde a redução de peso e o aumento da autonomia são prioritários (WEG, 2021). A combinação de eficiência e menor perda de energia posiciona os motores

de ímã permanente como uma solução altamente eficiente para o transporte sustentável.

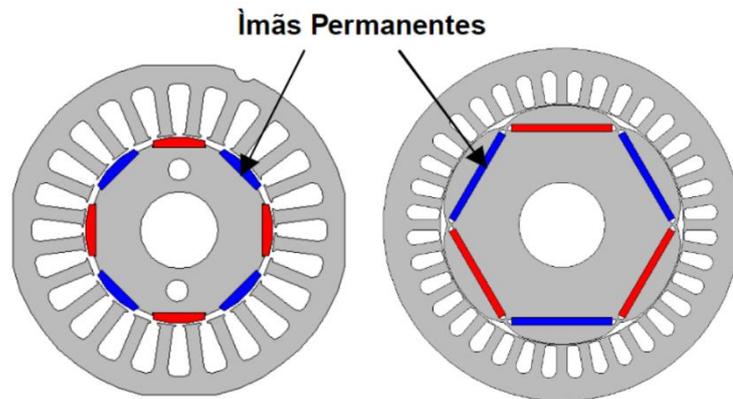
Os motores síncronos de ímã permanente (PMSMs, do inglês Permanent Magnet Synchronous Motors) utilizam ímãs fixos no rotor para criar o campo magnético necessário ao funcionamento. Diferentemente dos motores de indução, que dependem de correntes induzidas no rotor, os PMSMs geram o campo magnético de forma direta, eliminando perdas por calor associadas às bobinas de excitação. Essa característica resulta em maior densidade de torque e melhor eficiência, fatores críticos para veículos pesados que operam sob condições de carga elevadas. Além disso, esses motores possuem design mais compacto, o que facilita sua integração em veículos onde o espaço é limitado, contribuindo para maior flexibilidade no design do veículo (Krishnan, 2010).

Os ímãs permanentes podem ser dispostos no rotor de duas formas principais: na parte externa ou embutidos no interior como descrito na Figura 3. Na montagem superficial (parte externa), os ímãs são fixados diretamente na superfície do rotor, criando um campo magnético mais eficiente e simétrico, ideal para aplicações que demandam alta velocidade de rotação. Contudo, essa configuração apresenta menor resistência a esforços mecânicos, sendo mais indicada para situações onde o torque não é o principal requisito. Por outro lado, na montagem interior, os ímãs são embutidos dentro do rotor, o que aumenta a resistência mecânica e permite que o motor opere sob torques elevados sem comprometer a integridade estrutural. Essa configuração também proporciona maior capacidade de enfraquecimento de campo, tornando-a vantajosa em aplicações que exigem eficiência em velocidades variáveis e alto torque, como no transporte de carga pesada (Krishnan, 2010).

A aplicação de ímãs permanentes em motores elétricos está diretamente relacionada às propriedades magnéticas dos materiais utilizados. Ímãs de terras raras, como neodímio-ferro-boro (NdFeB) e samário-cobalto (SmCo), proporcionam alta densidade magnética, permitindo o desenvolvimento de motores menores e mais potentes. No entanto, o uso desses materiais apresenta desafios econômicos e ambientais devido à extração e processamento de elementos raros. Para mitigar esses problemas, pesquisas estão sendo realizadas em busca de alternativas mais sustentáveis, incluindo novos compostos magnéticos e tecnologias de reciclagem de

ímãs. A evolução desses materiais é essencial para viabilizar uma produção mais ampla e acessível de motores de ímã permanente (Krishnan, 2010).

Figura 3 – Localização dos Ímãs permanentes em 2 tipos de rotores.



Fonte: PIRES,WL – WEG Equipamentos Elétricos.

Além disso, os sistemas de resfriamento de alta eficiência são fundamentais para garantir que os motores operem dentro da faixa ideal de temperatura, mesmo em condições de alta carga, como é o caso de caminhões de grande porte ou ônibus urbanos. As inovações no design de sistemas de resfriamento, como o uso de fluido de arrefecimento de alta capacidade e circuitos de resfriamento diretamente integrados ao motor, permitem que esses motores trabalhem com alta performance por longos períodos sem sobreaquecimento, contribuindo para a longevidade e manutenção reduzida dos veículos.

Figura 4 – Motor WEG Tração



Fonte: Catálogo WEG – Soluções em Propulsão & Tração Elétrica.

O motor WEG Tração exemplifica essas inovações, destacando-se por sua alta eficiência, controle térmico superior e a capacidade de operar em uma ampla variedade de condições de carga e ambientais. Esse tipo de motor é fundamental para garantir que os veículos pesados operem com máxima eficiência energética, reduzindo custos operacionais e aumentando a vida útil do motor.

Além disso, a linha de motores WEG Tração é projetada para ser extremamente versátil, sendo adequado tanto para veículos leves quanto pesados, como exemplificado na Figura 5. A flexibilidade do design permite que esse motor seja aplicado em diferentes tipos de veículos, sem comprometer o desempenho ou a eficiência energética. Isso torna o motor WEG Tração uma escolha ideal para operações de transporte pesado, em que a demanda por confiabilidade e sustentabilidade é elevada.

Figura 5 – Soluções WEG Tração

SOLUÇÕES WEG EM MOBILIDADE ELÉTRICA

PARA VEÍCULOS LEVES



PARA VEÍCULOS UTILITÁRIOS



PARA VEÍCULOS PESADOS



Esta solução apresenta projeto otimizado e interface dedicada às principais transmissões aplicadas nestes segmentos. Também é apta a operar com freio eletromagnético, garantindo a segurança na operação dos veículos.






Produto beneficiado pela Lei de Incentivos

Parâmetros elétricos	CVW300 – 01	CVW300 – 02
Tensão nominal	24 - 72 V cc	24 - 48 V cc
Corrente nominal	60 A 120 A 200 A	160 A 200 A
Corrente máxima de saída (2min)	100 A 200 A 400 A	320 A 400 A
Refrigeração e características ambientais		
Faixa de temperatura	-25 - 50 °C	
Base de fixação do tipo colábilite, com opções de montagem em sistemas com refrigeração e ar (ventilação forçada), e água ou chapa condutiva (furo de ar mínimo 1,6 mil)		
Parâmetros mecânicos		
Grau de proteção	IP66	

Esta linha apresenta uma solução dedicada para transporte de carga e transporte público, como micro-ônibus. A solução apresenta alta densidade de potência, elevada eficiência, reduzido nível de ruído e mecânica projetada para fácil instalação no veículo.






Produto beneficiado pela Lei de Incentivos

Parâmetros elétricos	120 - 400 V cc
Tensão nominal	120 - 400 V cc
Corrente nominal	275 Arms
Corrente de sobrecarga (1 min)	550 Arms
Refrigeração e características ambientais	
Fluido de refrigeração	20% glicol + 80% água
Faixa de temperatura	-25 a 65 °C
Parâmetros mecânicos	
Grau de proteção	IP00 e IP66

A WEG possui uma solução completa para a movimentação de veículos elétricos de grande porte. O inversor de mobilidade de alta eficiência, baixo peso e volume reduzido, foi especialmente projetado para minimizar o espaço necessário para a sua instalação.







Produto beneficiado pela Lei de Incentivos

Parâmetros elétricos	CVW800	CVW900
Tensão nominal	650 V cc	
Corrente nominal	450 Arms	
Corrente de sobrecarga (1 min)	750 Arms	
Refrigeração e características ambientais		
Fluido de refrigeração	30% glicol + 70% água	20% glicol + 80% água
Faixa de temperatura	-40 °C a 60 °C ¹⁾	-25 - 65 °C
Parâmetros mecânicos		
Grau de proteção	AM IP60K / IP66 / IP67	IP66

Nota: 1) De 50 °C com redução de corrente de saída 50% / °C até 60 °C. As características técnicas informadas referem-se ao produto standard. Mediante necessidade de aplicação, este produto poderá ser customizado. Com isso, algumas características poderão sofrer alterações.

Fonte: Catálogo WEG – Mobilidade Elétrica.

2.4 BATERIAS E GERENCIAMENTO DE ENERGIA

A eletrificação de veículos pesados, como caminhões, ônibus e outros veículos comerciais de grande porte, enfrenta desafios significativos no fornecimento e gerenciamento de energia. O desenvolvimento de baterias de alta capacidade, juntamente com sistemas de gerenciamento de energia avançados, é essencial para garantir a eficiência operacional, autonomia e sustentabilidade desses veículos. A transição para a mobilidade elétrica no setor de transportes pesados não é apenas uma questão de adaptação tecnológica, mas também envolve considerações econômicas, ambientais e logísticas que precisam ser abordadas de forma integrada.

Atualmente, as baterias de íon-lítio dominam o mercado de veículos elétricos devido à sua alta densidade energética, vida útil e custos relativamente acessíveis. Elas permitem que veículos pesados, que requerem grandes quantidades de energia, operem de forma eficiente e com um alcance adequado para as necessidades do transporte comercial. O aumento da capacidade dessas baterias, aliado à melhoria dos processos de fabricação, tem permitido que caminhões e ônibus elétricos superem desafios como a autonomia e a capacidade de carga. No entanto, as baterias de íon-lítio apresentam desafios em termos de sustentabilidade e segurança, principalmente devido ao impacto ambiental da extração de materiais como lítio e cobalto, além do risco de incêndios em caso de falhas (Zheng et al., 2020).

Para mitigar esses desafios, outras tecnologias de baterias estão sendo pesquisadas e desenvolvidas. As baterias de sódio e magnésio, por exemplo, oferecem vantagens significativas em termos de segurança e abundância de recursos, sendo alternativas mais econômicas e ambientalmente amigáveis. Embora as baterias de estado sólido apresentem um grande potencial em termos de densidade energética e segurança, ainda enfrentam obstáculos relacionados ao custo elevado e à escalabilidade, o que limita sua implementação em veículos pesados no curto prazo (Leite et al., 2024). O desenvolvimento de novas gerações de baterias está sendo impulsionado não só pela necessidade de aumentar a

autonomia dos veículos, mas também pela demanda por soluções mais sustentáveis e menos impactantes para o meio ambiente.

O uso de baterias de íon-lítio é, no entanto, essencial para a adoção generalizada de veículos pesados elétricos no presente, já que a tecnologia de baterias de estado sólido ainda não atingiu um estágio comercialmente viável para a indústria automotiva pesada. Portanto, a pesquisa continua sendo vital para otimizar a eficiência, a segurança e a sustentabilidade das baterias de íon-lítio, ao mesmo tempo em que se busca desenvolver novas alternativas.

2.4.1 Sistema de Gerenciamento de Baterias

Além da tecnologia das baterias, o gerenciamento eficaz de energia é fundamental para otimizar o desempenho e a longevidade das baterias nos veículos elétricos pesados. Os sistemas de gerenciamento de baterias (BMS) desempenham um papel crucial ao monitorar constantemente o estado de carga, a temperatura e a saúde das células da bateria. Esses sistemas garantem que a energia seja distribuída de maneira eficiente e equilibrada, prevenindo o desgaste excessivo das células e aumentando a vida útil do conjunto da bateria (Leite et al., 2024). O BMS também é responsável por implementar técnicas de carregamento inteligente, que otimizam o uso da energia e reduzem o tempo de inatividade dos veículos.

Um exemplo importante da eficiência energética promovida pelo BMS é o uso de carregamento regenerativo. Esta tecnologia permite que parte da energia dissipada durante a frenagem seja convertida em eletricidade e armazenada novamente nas baterias, o que aumenta a eficiência geral do sistema. O carregamento regenerativo tem se mostrado particularmente eficaz em ambientes urbanos, onde os veículos enfrentam paradas frequentes e ciclos de frenagem constantes, como é o caso de ônibus e caminhões urbanos (Schwab, 2024). O uso dessa tecnologia contribui para reduzir o desgaste das baterias e aumentar a autonomia dos veículos, além de proporcionar uma operação mais sustentável.

2.4.2 Inversores de alta frequência

Outro aspecto fundamental no gerenciamento de energia é a utilização de inversores de alta eficiência. Esses dispositivos convertem a corrente contínua (CC) armazenada nas baterias em corrente alternada (CA), que é necessária para alimentar os motores elétricos. A eficiência do inversor é crucial para garantir que a energia seja utilizada de maneira eficiente e adaptada às condições de carga e velocidade do veículo. O avanço nos inversores de alta eficiência tem sido um ponto chave para aumentar a competitividade dos veículos pesados elétricos, tornando-os mais acessíveis para os consumidores e mais viáveis para as frotas comerciais (Zheng et al., 2020).

2.4.3 Produção e Uso de Baterias

Apesar dos avanços tecnológicos, ainda existem desafios significativos a serem superados no que diz respeito à produção e uso de baterias para veículos pesados. A capacidade limitada das baterias de íon-lítio em fornecer uma autonomia prolongada para veículos de grande porte, aliada aos custos elevados de produção e à questão ambiental associada à extração de materiais raros, exige uma busca constante por alternativas mais sustentáveis e eficientes. A eficiência das baterias de íon-lítio tem melhorado, mas os custos de produção e os desafios logísticos de fornecer grandes quantidades de baterias de alta capacidade continuam sendo um obstáculo para uma adoção mais ampla de veículos pesados elétricos.

Uma das soluções mais promissoras para mitigar esses desafios é a reciclagem de baterias. O desenvolvimento de tecnologias de reciclagem eficientes que possam recuperar materiais como lítio, cobalto e outros metais preciosos das baterias em fim de vida é essencial para a criação de uma economia circular no setor de mobilidade elétrica. As tecnologias de reciclagem estão avançando rapidamente, com novos métodos sendo desenvolvidos para aumentar a eficiência e reduzir o impacto ambiental do processo (Urias et al., 2017). A reciclagem não só ajuda a reduzir a dependência de novos recursos naturais, mas também diminui os custos de produção e as emissões associadas à fabricação de novas baterias.

Além disso, a evolução da infraestrutura de carregamento também é um desafio importante. Em veículos pesados, a necessidade de recarregar as baterias de forma rápida e eficiente, especialmente em longas rotas, exige o desenvolvimento de tecnologias de carregamento ultra-rápido. Esse tipo de carregamento pode reduzir significativamente o tempo de inatividade dos veículos e garantir que eles operem de forma contínua, sem interrupções, mesmo durante longos períodos de operação. O aprimoramento das redes de carregamento e a implementação de soluções de carregamento rápido são essenciais para a viabilidade comercial dos caminhões e ônibus elétricos (Schwab, 2024).

2.4.4 Transição Energética em veículos pesados

A transição para veículos elétricos pesados não só representa uma melhoria significativa na eficiência energética e na redução das emissões de carbono, mas também está alinhada com as metas globais de sustentabilidade. A utilização de baterias e sistemas de gerenciamento de energia eficientes, aliados à redução das emissões de gases de efeito estufa, contribui diretamente para a descarbonização do setor de transporte, que é um dos maiores responsáveis pelas emissões globais de CO₂. Além disso, a redução do uso de combustíveis fósseis e a promoção de energias renováveis, como a energia solar e eólica, para alimentar os veículos elétricos, aumenta ainda mais o impacto positivo no meio ambiente, tornando a mobilidade elétrica uma solução chave para um futuro mais sustentável e livre de emissões (Leite et al., 2024).

A pesquisa contínua em novas tecnologias de baterias e na otimização do gerenciamento de energia tem o potencial de melhorar ainda mais a sustentabilidade dos veículos pesados elétricos. Além disso, as novas abordagens para a reciclagem e reutilização de materiais valiosos nas baterias podem contribuir para a criação de um ciclo de vida mais sustentável para os veículos elétricos. O futuro do transporte pesado está fortemente ligado ao avanço dessas tecnologias, que irão definir o papel dos veículos elétricos na redução das emissões globais e no avanço da descarbonização.

2.5 DESAFIOS DA MOBILIDADE ELÉTRICA

2.5.1 Infraestrutura de Recarga

A expansão da infraestrutura de recarga é crucial para a ampla adoção de Ves e representa um dos desafios mais significativos no caminho para a eletrificação do transporte. Como apontado por Mansano Lima (2023), para acompanhar o crescimento esperado na utilização de Ves, seria necessário um aumento anual de pelo menos 20% na capacidade de potência do sistema elétrico de recarga. Este aumento deve não apenas focar na quantidade, mas também na qualidade das instalações, incluindo o acesso a carregadores rápidos, que são essenciais para viagens interurbanas e longas distâncias.

Adicionalmente, as estações de recarga rápida enfrentam desafios particulares devido ao seu alto consumo energético e à complexidade técnica envolvida na gestão eficiente da carga. Estas estações são ainda escassas e representam um investimento significativo tanto em termos financeiros quanto tecnológicos. A implementação dessas tecnologias avançadas requer planejamento cuidadoso e cooperação entre diversos setores, incluindo governos, empresas de energia e fabricantes de Ves, para garantir que sejam acessíveis e economicamente viáveis (Mansano Lima, 2023).

2.5.2 Custos Associados

Embora o custo de aquisição dos veículos elétricos esteja diminuindo, eles ainda representam um investimento significativo em comparação com os veículos à combustão. Estudos indicam que, apesar de um VE poder economizar cerca de R\$ 5.000 por ano em combustível e manutenção, o custo inicial pode ser até 40% maior do que seus equivalentes a combustão (Hax, 2023). Isso é exacerbado pelos custos necessários para a instalação de equipamentos de carregamento doméstico e as atualizações na infraestrutura elétrica que podem ser necessárias.

2.5.3 Aceitação do Mercado

A aceitação do mercado é crucial e ainda desafiadora. A “ansiedade de alcance”, o medo de que a bateria do veículo se esgote antes de encontrar uma estação de recarga, ainda é um problema significativo. Uma pesquisa recente mostrou que 30% dos consumidores consideram a autonomia de bateria insuficiente como um impedimento principal para a compra de um VE (Almeida, 2022). Para combater isso, são necessárias campanhas de conscientização e educação que enfatizem a eficiência e os benefícios ambientais dos Ves.

2.5.4 Desafios Técnicos e Tecnológicos

Os desafios técnicos também são consideráveis. A eficácia das baterias de Ves, principalmente em termos de capacidade de carga e longevidade, ainda necessita de melhorias significativas. As baterias de lítio, que dominam o mercado atual, possuem limitações conhecidas de densidade energética e impactos ambientais associados à sua produção e descarte. Pesquisas apontam para uma necessidade de desenvolver tecnologias de baterias alternativas que não só ofereçam maior eficiência energética, mas também sejam mais amigáveis ao ambiente (Hax, 2023).

3 METODOLOGIA

3.1 PARÂMETROS E CONFIGURAÇÕES DO VEÍCULO

A simulação da conversão do Ford Cargo C816 para um veículo elétrico exigiu a definição precisa de uma série de parâmetros físicos e mecânicos que influenciam diretamente o desempenho do veículo. Esses parâmetros foram escolhidos com base nas especificações originais do veículo e nas necessidades do novo sistema de propulsão elétrico.

Os dados do veículo a ser simulado são:

Massa Total do Veículo: 8500 kg, refletindo o peso do chassi e a adição dos componentes do sistema elétrico, incluindo o pacote de baterias.

Área Frontal: 8.64 m², crucial para o cálculo das forças aerodinâmicas que o veículo experimenta durante a condução.

Coefficiente de Arrasto: 0.7, um valor estimado que ajuda a determinar a resistência aerodinâmica enfrentada pelo veículo.

Coefficiente de Atrito das Rodas: 0.015, que influencia o cálculo da resistência ao rolamento.

A transmissão original do Ford Cargo C816 foi adaptada para acomodar o motor elétrico WEG Tração. Os ajustes incluíram:

Tipo de Transmissão: Conversão para uma transmissão direta sem marchas, típica em veículos elétricos, eliminando a necessidade de uma caixa de câmbio tradicional.

Relação de Redução: 5.57, configurada para otimizar o torque e a eficiência do motor nas velocidades de operação urbana.

Eficiência da Transmissão: Estimada em 95%, refletindo as perdas mínimas esperadas devido ao sistema simplificado.

Ajustes no Motor e Controle

Potência do Motor: 160 kW, escolhida para proporcionar uma resposta adequada às demandas de aceleração e capacidade de carga do veículo.

Eficiência do Motor: 90%, indicativa da capacidade do motor de converter energia elétrica em trabalho mecânico com perdas limitadas.

Sistema de Gerenciamento do Motor: Configurado para maximizar a eficiência energética e o desempenho, utilizando algoritmos avançados de controle baseados em feedback de sensores em tempo real para ajustar dinamicamente os parâmetros operacionais do motor.

Esses parâmetros e configurações foram fundamentais para garantir que a simulação refletisse com mais precisão as capacidades e limitações do Ford Cargo C816 como um veículo elétrico. Eles foram essenciais para validar a viabilidade técnica da conversão e para estimar o impacto das modificações no desempenho geral do veículo em um ambiente urbano.

Para que um automóvel se locomova seu conjunto de trem de força precisa vencer forças de resistência ao movimento. Segundo Gillespie (2021), as forças atuantes em um veículo tendem a alterar sua trajetória, sendo essas forças compostas pelo atrito dos pneus com o solo, atrito do ar com a superfície do veículo, inclinação da pista e a inércia. No caso de caminhões, essas forças são equivalentes, incluindo a Força de Arrasto Aerodinâmico, Força de Resistência de Rolagem e Força de Tração Total. A Figura 6 ilustra essas forças de maneira detalhada, destacando como cada uma delas atua sobre o caminhão em movimento e influencia seu desempenho nas operações.

A seguir, são descritas as principais fórmulas utilizadas na simulação, cada uma desempenhando um papel vital na modelagem do comportamento do caminhão elétrico e na avaliação de seu desempenho:

1. A Força de Arrasto Aerodinâmico (F_{ad}) é dada pela Equação (1) na qual calcula a força de resistência aerodinâmica que atua contra a direção do movimento do veículo, como ilustra a Figura 6. É essencial para entender como a forma e a velocidade do veículo afetam o consumo de energia, especialmente em velocidades mais altas onde o arrasto aerodinâmico se torna significativamente maior.

$$F_{ad} = \frac{\rho A C_d V^2}{2} \quad (1)$$

Onde:

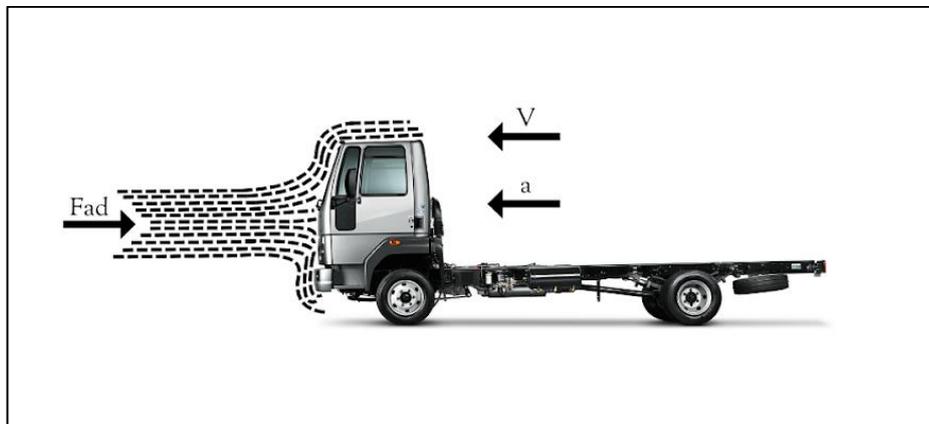
ρ é a densidade do ar (1.225 kg/m³).

A é a área frontal do veículo (8.64 m²).

C_d é o coeficiente de arrasto (0.7).

V é a velocidade do veículo em m/s.

Figura 6– Representação da Força de Arrasto Aerodinâmico no caminhão proposto.



Fonte: Adaptada Ford Motors.

2. Força de Resistência de Rolagem (F_{rr}) é dada pela Equação (2) na qual calcula a força de resistência de rolagem devido ao contato das rodas com a superfície da estrada. É um componente crucial para determinar o esforço requerido pelo veículo para manter uma velocidade constante em superfícies planas, influenciando diretamente o consumo de energia.

$$F_{rr} = \mu_{rr} \times m \times g \quad (2)$$

Onde:

μ_{rr} é o coeficiente de atrito na roda (0.015)

m é a massa total do veículo (8500 kg).

g é a aceleração devido à gravidade (9.81 m/s²).

3. Força de Tração Total (F_{te}) é dada pela Equação (3) responsável por sumarizar todas as forças que o veículo precisa superar para se mover e acelerar, incluindo arrasto aerodinâmico, inclinação (se houver), aceleração e resistência de rolagem. Essencial para calcular a energia necessária para vencer essas forças e manter ou alterar a velocidade.

$$F_{te} = F_{ad} + F_{hc} + F_{la} + F_{rr} \quad (3)$$

Onde:

F_{hc} é a força devido à inclinação (considerada zero em superfície plana).

F_{la} é a força devido à aceleração linear ($m \times \text{aceleração}$).

4. Potência do Motor (Potência Trativa na Roda) representada na Equação (4) determina a potência que o motor deve gerar para superar as forças resistivas e mover o veículo à velocidade desejada. Esta é uma métrica crucial para entender o desempenho do motor elétrico e a eficácia da transmissão em converter potência elétrica em mecânica.

$$F_{motor} = F_{te} \times V \quad (4)$$

5. Corrente da Bateria representada na Equação (5) calcula a corrente que a bateria precisa fornecer para atender à demanda de potência do motor. Essencial para avaliar a carga na bateria e gerenciar a profundidade de descarga para maximizar a vida útil da bateria.

$$I_{bateria} = \frac{P_{motor}}{V_{celula} n_{motor} n_{inversor}} \quad (5)$$

Onde:

V_{celula} é a tensão nominal da célula da bateria (3.2 volts).

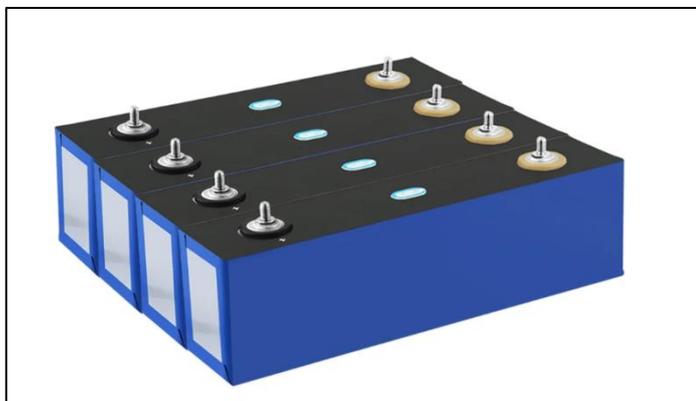
n_{motor} e $n_{inversor}$ são as eficiências do motor e do inversor, respectivamente.

3.2 PARÂMETROS DA BATERIA

A escolha do pacote de baterias de íons de lítio para o Ford Cargo C816 elétrico foi considerada não apenas pelas características técnicas, mas principalmente pela acessibilidade e custo-benefício dessa tecnologia em relação a outras opções disponíveis no mercado. As baterias de íons de lítio são amplamente reconhecidas por sua densidade energética superior, eficiência de carga e descarga e melhor ciclo de vida, tornando-as ideais para a aplicação deste projeto.

A bateria escolhida possui células com uma tensão nominal de 3.2 volts e uma resistência interna de apenas 0.002 ohms, o que contribui para uma eficiência energética elevada e menor geração de calor durante operações intensas, reduzindo assim a necessidade de um sistema sofisticado de refrigeração. Com 96 células configuradas em série e 12 células em paralelo, o pacote de baterias atinge uma capacidade nominal significativa, fornecendo a corrente necessária para a entrega de potência e torque exigidos em condições variadas de condução do ciclo SFUDS. Além das características técnicas, a decisão pela escolha dessa bateria também foi fortemente influenciada pela sua disponibilidade no mercado e seu custo relativamente acessível em comparação com outras tecnologias avançadas, como as baterias de estado sólido. Esses fatores tornam a bateria de íons de lítio uma escolha economicamente viável para a conversão do veículo, oferecendo um equilíbrio ideal entre desempenho e custo, essencial para a viabilidade do projeto de eletrificação do caminhão.

Figura 7: Ilustração de um pack de 4 células das baterias escolhidas.



Fonte: Autor

3.3 MODELAGEM E SIMULAÇÃO

A metodologia adotada para a simulação deste projeto foi planejada para alinhar eficiência e precisão, aspectos críticos para a validação da conversão do Caminhão Ford Cargo C816 em um veículo totalmente elétrico para uso urbano. A escolha do software MATLAB/Simulink para realizar essa simulação foi motivada pela sua capacidade excepcional de modelar sistemas dinâmicos complexos e pela ampla aceitação no campo da engenharia automotiva. O MATLAB oferece uma plataforma integrada que facilita a simulação de componentes eletrônicos e mecânicos em um ambiente controlado, permitindo ajustes técnicos precisos e análise detalhada do comportamento do veículo sob diversas condições operacionais.

A primeira etapa da modelagem envolveu a definição dos parâmetros básicos do veículo, como massa, área frontal e coeficiente de arrasto, que são cruciais para a precisão das simulações aerodinâmicas e de resistência ao rolamento. A integração desses parâmetros no modelo do MATLAB permitiu simular como o veículo responderia fisicamente ao ser equipado com um sistema de propulsão elétrica, levando em consideração as características específicas do Ford Cargo C816.

Para representar de maneira realista o cenário de uso urbano, foi selecionado um ciclo de condução padrão que simula condições típicas de tráfego da cidade. Esse ciclo inclui variações de velocidade, paradas frequentes, e acelerações moderadas, mimetizando o uso diário em ambientes urbanos congestionados. O ciclo escolhido foi o Simplified Federal UrbanDriving Schedule (SFUDS) que em estudos relacionados a veículos elétricos e gestão de carga de bateria, é crucial para compreender seu papel em contextos práticos e acadêmicos. O ciclo SFUDS, serve como um padrão para simular condições de condução urbana em testes de veículos. Sua aplicação permite aos pesquisadores e desenvolvedores avaliarem a eficácia de estratégias de gestão de carga em condições que mimetizam o uso diário em ambientes urbanos.

Este ciclo simula uma variedade de condições urbanas, desde paradas frequentes até acelerações e desacelerações, que são críticas para a avaliação realista do

desempenho da bateria e do sistema de propulsão elétrica (Bansal, S., & Malhotra, K. 2023).

O ciclo escolhido ajudou a identificar os potenciais desafios operacionais, como a demanda por torque em baixas velocidades e a eficiência do regenerativo de frenagem.

A simulação avançou para a análise do sistema de gerenciamento de bateria, crucial para garantir que o veículo elétrico atendesse às expectativas de autonomia e eficiência energética. O modelo incluiu detalhes sobre a configuração das células da bateria, sua capacidade, potência máxima de descarga e recarga. Este nível de detalhamento foi vital para otimizar o balanço entre desempenho e segurança do veículo elétrico, assegurando que a bateria fosse capaz de suportar as demandas do ciclo urbano

4 RESULTADOS

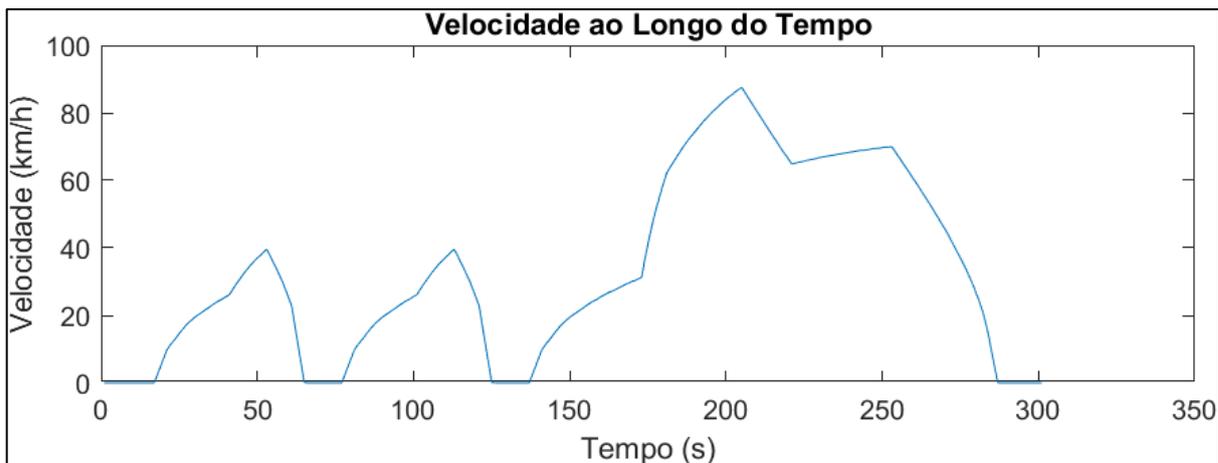
4.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS DE VELOCIDADE E ACELERAÇÃO

A análise detalhada dos dados de velocidade e aceleração para o Ford Cargo C816 elétrico, conforme evidenciado pelos gráficos gerados na simulação MATLAB, revela aspectos críticos sobre o comportamento do veículo em um contexto urbano simulado. A capacidade de resposta em termos de velocidade e aceleração é essencial para determinar a viabilidade de veículos elétricos em ambientes urbanos congestionados.

4.1.1 Comportamento de Velocidade e tração

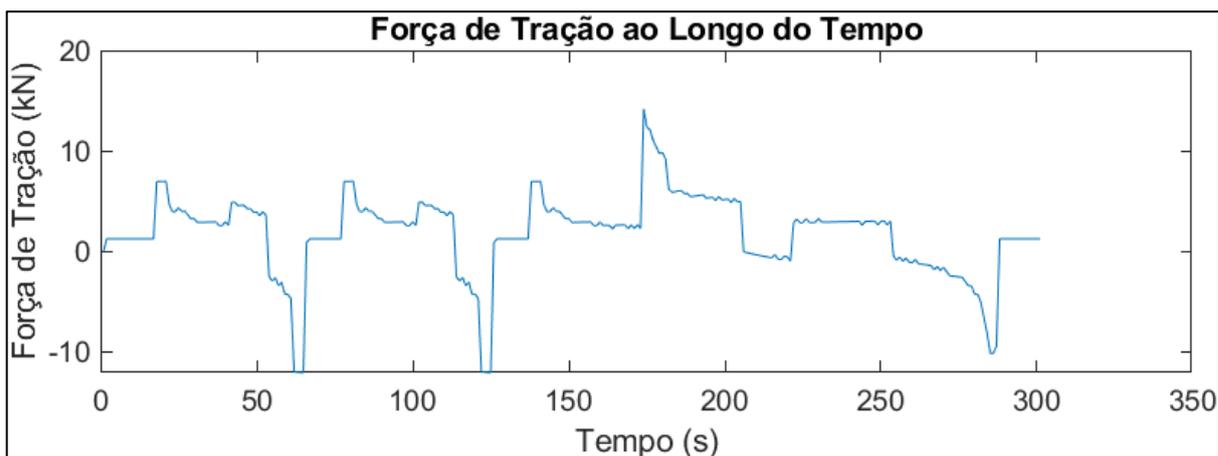
Diante da Figura 8 a variação da velocidade, que oscila entre 0 e 86 km/h, demonstra a capacidade do veículo de lidar com os típicos padrões de parada e partida encontrados em cenários urbanos. Esta capacidade é crucial, pois as condições de tráfego urbano exigem que veículos comerciais mantenham a eficiência operacional apesar das frequentes interrupções causadas por semáforos, cruzamentos e congestionamentos. A capacidade do Cargo C816 elétrico de atingir rapidamente a velocidade máxima e de parar completamente em resposta a sinais de trânsito é uma indicação clara de sua adequação ao ambiente urbano. O gráfico de desempenho de potência do motor, ilustrado na Figura 9, reforça essa análise ao mostrar picos de potência em fases de aceleração, o que contribui para uma resposta ágil nas demandas de tráfego urbano.

Figura 8: Comportamento da velocidade do veículo durante a simulação no ciclo.



Fonte: Autor

Figura 9: Comportamento da força de tração pelo tempo para um padrão de funcionamento do veículo.

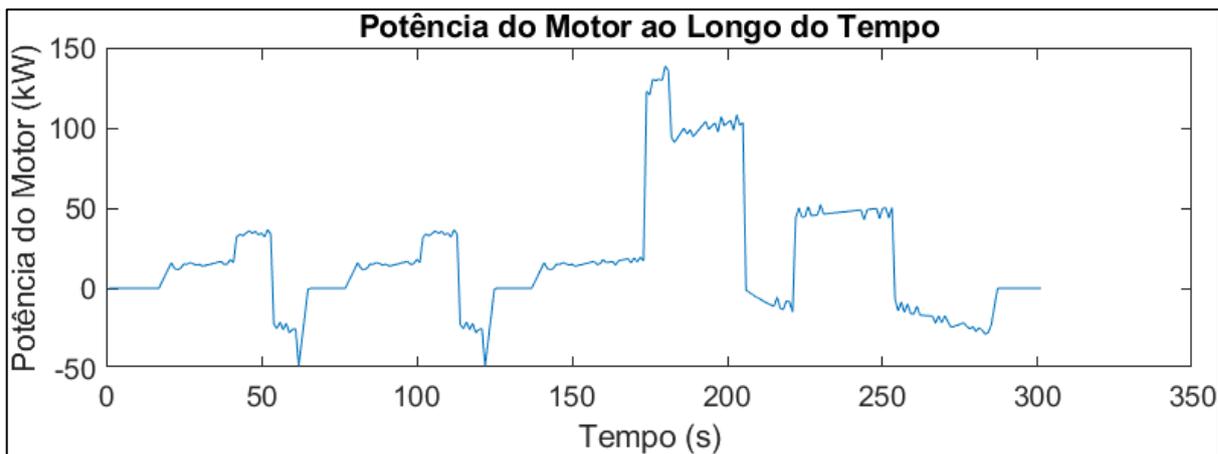


Fonte: Autor

4.2 COMPORTAMENTO DA POTÊNCIA E ACELERAÇÃO DO MOTOR

O gráfico de desempenho de potência do motor, ilustrado na Figura 10, reflete a eficiência do sistema de propulsão elétrica. O veículo demonstra picos de potência durante as fases de aceleração intensa, que são fundamentais para assegurar entradas seguras em vias rápidas e para manobras de ultrapassagem. Essa capacidade de resposta rápida é uma vantagem dos motores elétricos, que podem entregar potência máxima de forma instantânea, ao contrário dos motores a combustão interna que necessitam de um aumento gradual na entrega de energia.

Figura 10: Gráfico de Potência do Motor em Condições de Aceleração e Desaceleração.



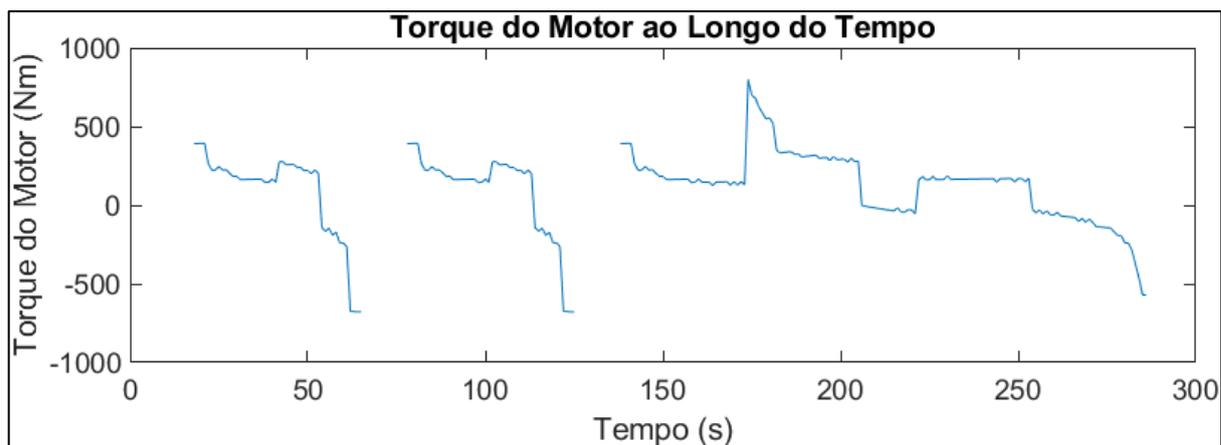
Fonte: Autor

Torque e Performance:

O torque do motor, conforme indicado na Figura 11, varia significativamente e está intrinsecamente ligado à potência. A entrega de torque nos momentos necessários permite ao veículo superar obstáculos comuns em cenários urbanos, como subidas e arrancadas em semáforos. A capacidade do motor elétrico de fornecer torque instantâneo desde zero RPM facilita essas tarefas, proporcionando uma experiência de condução superior, com arranques mais suaves e poderosos.

As quebras no gráfico de torque representam momentos de desaceleração ou paradas temporárias, comuns em ambientes urbanos. Essas variações refletem a adaptação do motor às condições dinâmicas de tráfego, onde acelerações e desacelerações são frequentes. Esses intervalos demonstram a flexibilidade do sistema de propulsão elétrica em ajustar o torque de acordo com as exigências imediatas, contribuindo para uma condução mais controlada em condições urbanas.

Figura 11: Gráfico de Torque do Motor Durante o Ciclo de Operação Urbana.



Fonte: Autor

4.2.2 Eficiência do Motor e Implicações Energéticas

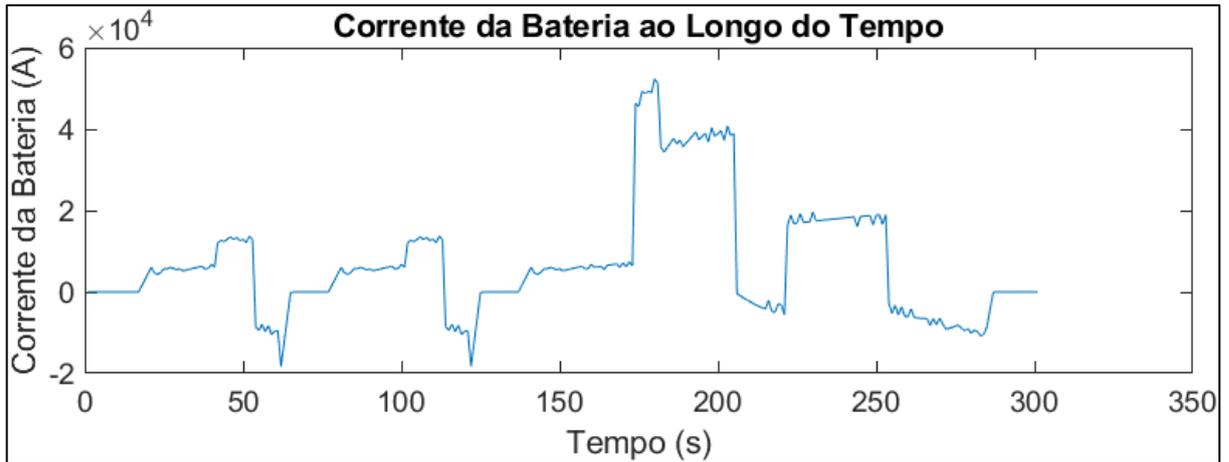
A eficiência com que o motor utiliza a energia elétrica armazenada é evidente pelos momentos em que o consumo de energia é minimizado apesar de manter a performance. Esta eficiência é crucial para maximizar a autonomia do veículo e minimizar os custos operacionais. A gestão eficaz do torque e da potência, especialmente em um ambiente urbano que exige frequentes paradas e partidas, demonstra o potencial de economia de energia em comparação com os sistemas tradicionais a combustão.

4.3 CONSUMO E EFICIENCIA DA BATERIA

4.3.1 Eficiência Energética e Regeneração

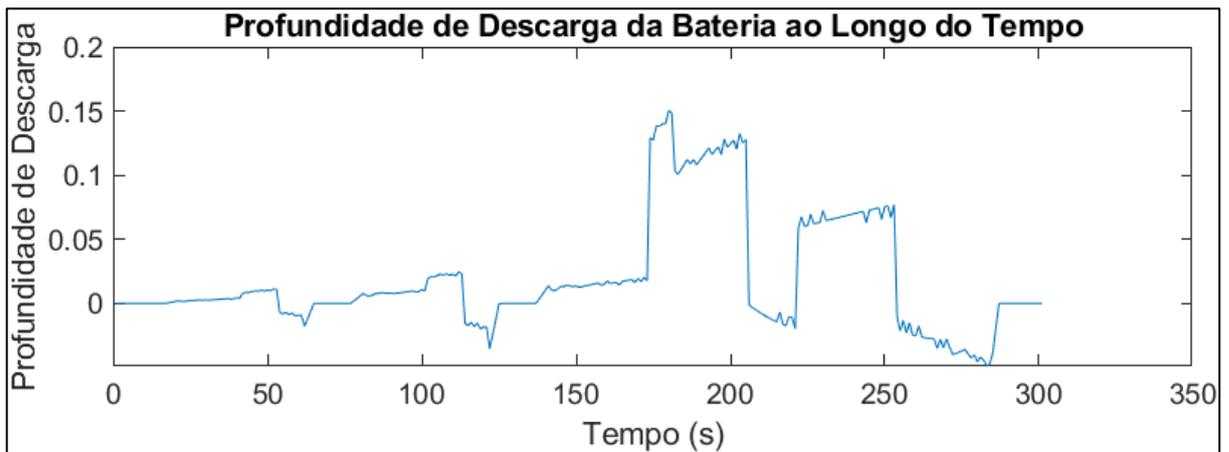
O monitoramento da corrente da bateria, ilustrado na Figura 12, e da profundidade de descarga, conforme mostrado na Figura 13 durante o ciclo de condução ilustra a gestão eficiente da energia. A habilidade do veículo de recarregar a bateria através da frenagem regenerativa durante as desacelerações mostra um avanço significativo na tecnologia de veículos elétricos, contribuindo para a sustentabilidade e eficiência energética. Este processo não só ajuda a conservar energia, como também prolonga a vida útil da bateria, reduzindo a necessidade de ciclos de carga frequentes.

Figura 12: Gráfico da Corrente da Bateria Durante o Ciclo de Operação.



Fonte: Autor

Figura 13: Gráfico da Profundidade de Descarga da Bateria Durante o Ciclo de Operação.



Fonte: Autor

4.3.2 Autonomia e consumo

A autonomia necessária para o caso do Ford Cargo C816 elétrico precisa não apenas fornecer energia de forma eficiente, mas também sustentar essa eficiência ao longo de variadas condições de operação. Durante a simulação no ciclo SFUDS, observou-se que o consumo de energia foi de 1,5673 kWh para 300 segundos de simulação, o que escala para cerca de 18,808 kWh para uma operação contínua de uma hora, assumindo uma demanda de energia constante.

O tempo de simulação foi ajustado para 5 minutos, facilitando as análises em intervalos menores, mas validado para manter a precisão em escalas de tempo maiores, garantindo que os resultados representem o desempenho do veículo ao longo de operações urbanas completas.

A partir dos dados simulados, calculou-se que o consumo instantâneo de energia era governado pela potência requerida para superar forças de arrasto, resistência de rolagem e para proporcionar a aceleração necessária conforme as mudanças de velocidade no ciclo SFUDS.

Com base na capacidade total da bateria de 55 kWh (calculada a partir de 180 Ah e 96 células em série com cada célula oferecendo 3.2 volts), a autonomia do veículo pode ser estimada. Considerando o consumo de 18,808 kWh por hora de operação, a autonomia é de aproximadamente três horas de operação contínua sob condições similares ao teste, o que é uma métrica importante para operações urbanas diárias.

4.4 CONSIDERAÇÃO SOBRE EMISSÕES DE CO₂

4.4.1 Veículo Diesel

Os veículos diesel, como a configuração original do Ford Cargo C816, emitem uma quantidade significativa de CO₂ e outros poluentes, incluindo óxidos de nitrogênio (NO_x) e partículas finas (PM_{2.5}), que contribuem para a poluição do ar e problemas de saúde pública. A quantidade exata de CO₂ emitida depende da eficiência do motor, do tipo de combustível e das condições de operação, mas em geral:

Um caminhão diesel emite aproximadamente 2,6 kg de CO₂ para cada litro de diesel queimado na combustão, que somado com o valor médio de 0,5 kg de CO₂ emitidos para produzir e distribuir o combustível, chegou-se a uma taxa final de emissão em torno de 3,2 kg de CO₂/l de diesel. 2.68 kg de CO₂ por litro de diesel consumido.

Considerando um consumo médio de 4.5 km por litro e uma operação constante durante uma hora a uma velocidade média de 60 km/h, o consumo seria de aproximadamente 13.33 litros, levando a:

$$13.33 \frac{\text{litros}}{\text{hora}} \times 3.2 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{litro}} \times 3 \text{ horas} = 128 \text{ kg CO}_2 \quad (6)$$

4.4.2 Veículo Elétrico

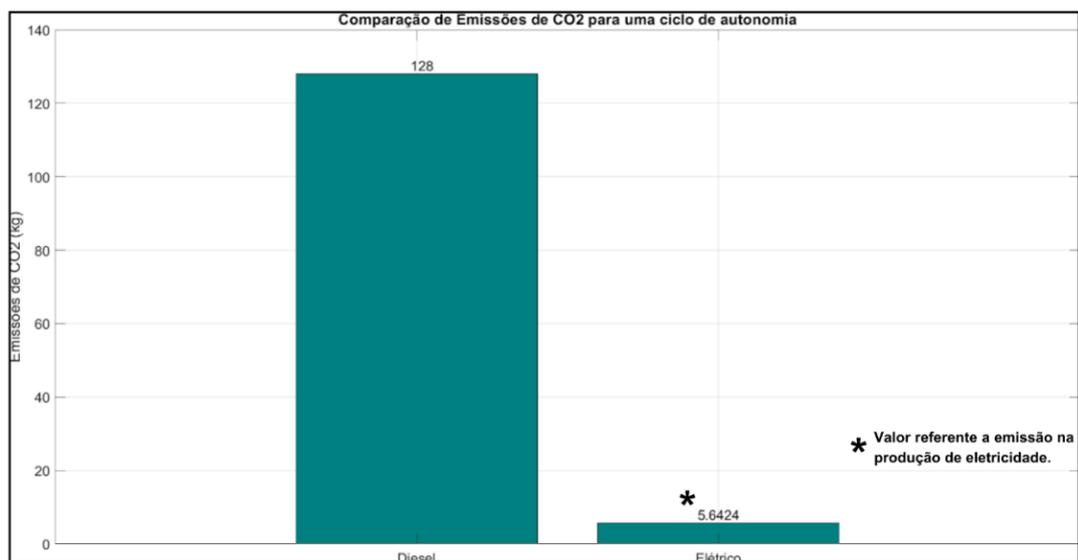
Um veículo elétrico, por outro lado, não emite CO₂ ou poluentes locais durante a operação, o que resulta em uma redução significativa das emissões diretas. No entanto, é importante considerar as emissões associadas à produção de eletricidade, conhecidas como emissões indiretas. A quantidade de CO₂ emitida para gerar a eletricidade necessária para operar o veículo elétrico depende da matriz energética.

Supondo que a eletricidade seja gerada a partir de uma fonte com emissão de 0.1 kg de CO₂ por kWh, um valor comum para uma matriz que inclui uma mistura de renováveis e não renováveis de acordo com o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (BRASIL, 2024).

$$18.808 \text{ kWh} \times 0.1 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{kWh}} \times 3 \text{ horas} = 5.64 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{hora}} \quad (7)$$

4.4.3 Comparação

Figura 14: Gráfico de comparações de emissões durante o ciclo de autonomia (3 horas).



Fonte: Autor

A redução de emissões ao converter para elétrico é, portanto, significativa, com uma diminuição de mais de 90% nas emissões de CO₂. Além disso, as emissões de NO_x

e PM2.5 são eliminadas na operação elétrica, o que é especialmente benéfico em ambientes urbanos onde a qualidade do ar é uma preocupação crescente conforme destacado na associação portuguesa de recursos hídricos (APRH.2020).

A conversão do Ford Cargo C816 de diesel para elétrico apresenta uma oportunidade notável para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e outros poluentes. Essa redução não só ajuda a cumprir com as regulamentações ambientais cada vez mais rigorosas, mas também contribui para metas mais amplas de sustentabilidade e saúde pública (Branco et al. 2023).

Além disso, a redução de emissões pode melhorar a imagem pública das empresas que optam por frotas mais verdes, alinhando-se com as expectativas crescentes de responsabilidade ambiental corporativa.

4.5 CUSTO-BENEFÍCIO DA CONVERSÃO

Diante da análise da simulação pode ser analisado os custos operacionais diários e anuais, assim como o impacto financeiro acumulado ao longo de um período operacional estimado de 25 anos.

4.5.1 Cálculos Iniciais de Consumo e Custo

Para uma compreensão precisa dos benefícios financeiros proporcionados pela eletrificação do veículo, inicialmente calculamos o consumo de energia durante uma operação típica de uma hora, que resultou em 18.808 kWh. Com base no preço médio de R\$0.65 por kWh (ANEEL), o custo operacional por hora para o veículo elétrico é de aproximadamente R\$12,23.

4.5.2 Comparação com o Modelo a Diesel

Em contrapartida, a operação do modelo a diesel, considerando um consumo de 4.5 km por litro e um custo de R\$5.85 por litro de diesel de acordo com a PETROBRAS (2024), resulta em um gasto de R\$78,00 para cobrir 60 km em uma hora. Esta

análise revela uma significativa economia operacional diária ao se adotar a versão elétrica, que se amplifica quando projetada ao longo de um ano.

4.5.3 Projeção Anual e de Longo Prazo

Assumindo 250 dias úteis por ano, o custo anual do veículo elétrico é de R\$9.170, enquanto o do modelo a diesel é de R\$58.500. Estendendo essa projeção para um ciclo de vida operacional de 25 anos, o custo total para o veículo elétrico é de R\$229.250, comparado a R\$1.462.500 para o diesel. Esses cálculos evidenciam uma economia substancial de mais de R\$1,2 milhão em 25 anos, ressaltando a viabilidade econômica da conversão para elétrico no longo prazo.

4.5.4 Discussão sobre Custo-Benefício

A conversão para um veículo elétrico, embora exija um investimento inicial em infraestrutura e tecnologia de bateria, compensa significativamente em termos de custos operacionais reduzidos e menor manutenção. Além disso, há benefícios ambientais consideráveis, incluindo a redução de emissões de CO₂ e outros poluentes, que não foram monetizados nesta análise, mas representam um valor adicional significativo.

4.6 DESAFIOS E OPORTUNIDADES

Embora os dados mostrem muitos aspectos positivos, a implementação em larga escala de veículos elétricos como o Ford Cargo C816 ainda enfrenta desafios significativos. Entre os principais obstáculos, destaca-se a infraestrutura de carregamento, que permanece insuficiente em muitos locais, especialmente em áreas rurais ou rotas de longa distância. Essa lacuna limita a viabilidade operacional dos veículos elétricos pesados, que exigem uma infraestrutura robusta para atender à demanda por recargas frequentes. Além disso, a falta de um padrão fixo de recarga, com horários e locais dependentes do comportamento do usuário, pode gerar desequilíbrios momentâneos na rede elétrica. Essa imprevisibilidade exige

respostas rápidas do operador do sistema para manter a estabilidade e qualidade do fornecimento de energia (Saldanha, 2017).

Para lidar com essa variabilidade, o sistema elétrico precisará se tornar mais flexível e inteligente, integrando tecnologias como redes inteligentes (smart grids), medidores inteligentes e sistemas avançados de gerenciamento de demanda exemplificados na Figura 15. Essas ferramentas são essenciais para otimizar o uso da infraestrutura existente e evitar sobrecargas, garantindo uma adaptação sustentável ao crescimento da frota elétrica. Ao mesmo tempo, o aumento da participação de fontes renováveis, como energia solar e eólica, na matriz energética brasileira apresenta uma oportunidade para sustentar a demanda adicional por energia dos veículos elétricos, minimizando emissões de gases de efeito estufa. Projeções indicam que a energia eólica e solar terá um crescimento expressivo nos próximos anos, atingindo 13,88% e 8,49% da capacidade instalada, respectivamente, até 2028 (De Brito; Teixeira; De Souza, 2023).

Figura 15: Exemplo de Smart Grid.



Fonte: AUTOSSUSTENTAVEL

Os custos iniciais elevados de veículos elétricos também representam um entrave significativo, especialmente para frotas comerciais que operam com margens apertadas. O preço das baterias, principal componente do custo de fabricação, é diretamente influenciado pela disponibilidade de materiais como lítio e cobalto. Isso leva à necessidade de soluções inovadoras, como a reciclagem de baterias, para

criar uma economia circular. Essa prática não só reduz a dependência de novos recursos naturais, mas também mitiga os impactos ambientais associados à extração de matérias-primas. Ademais, incentivos governamentais, como subsídios fiscais e políticas para o desenvolvimento de infraestrutura de carregamento, são cruciais para acelerar a adoção dos veículos elétricos.

Outra questão relevante é a necessidade de modernização da infraestrutura elétrica. O reforço das redes de transmissão e distribuição, combinado com a expansão de redes inteligentes, é vital para suportar a crescente demanda por eletricidade. A integração de sistemas fotovoltaicos residenciais e comerciais com a recarga de veículos também se apresenta como uma solução promissora. Essa abordagem descentralizada permite que os próprios consumidores gerem parte da energia necessária para abastecer seus veículos, aliviando a pressão sobre o sistema elétrico e promovendo maior resiliência e sustentabilidade (Saldanha, 2017).

Além das questões técnicas e econômicas, a aceitação do mercado também desempenha um papel fundamental. A transição para veículos elétricos exige treinamento e adaptação de operadores de frotas, além de ajustes logísticos para integrar novas tecnologias. Apesar desses desafios, os benefícios a longo prazo são claros. A redução de custos operacionais, aliada à maior eficiência energética e à descarbonização do transporte, posiciona o Ford Cargo C816 como um exemplo promissor na transformação do setor de mobilidade. Com avanços contínuos em infraestrutura e políticas de incentivo, os veículos elétricos pesados têm o potencial de redefinir o transporte sustentável no Brasil.

5 CONCLUSÃO

A conversão do Ford Cargo C816 para um veículo elétrico demonstrou ser uma estratégia viável e eficiente para o transporte comercial urbano. Os resultados da simulação revelaram não apenas um desempenho superior em comparação à versão a diesel, mas também uma significativa economia de energia, refletida em um consumo energético inferior durante os ciclos de condução urbanos. O motor elétrico, com sua resposta instantânea e torque disponível desde o início, aprimora a dirigibilidade e a capacidade do veículo de lidar com as frequentes paradas e arranques exigidos em ambientes urbanos.

Adicionalmente, a análise de custo-benefício favorece a eletrificação, pois o menor número de partes móveis e a durabilidade do motor elétrico resultam em custos de manutenção reduzidos. Com o aumento esperado nos preços dos combustíveis fósseis e a contínua queda nos custos das baterias, a transição para tecnologias elétricas se torna ainda mais atraente para as empresas.

A implementação do sistema de frenagem regenerativa também contribui para a eficiência do Cargo C816, recuperando energia durante as frenagens e prolongando a vida útil dos componentes. Essa tecnologia não apenas reduz o consumo de energia, mas também melhora a sustentabilidade das operações.

Em suma, a eletrificação do Ford Cargo C816 se alinha com as tendências globais de sustentabilidade e regulamentações ambientais, apresentando-se como uma solução estratégica para modernizar as frotas comerciais. Com a capacidade de oferecer um transporte mais eficiente e ambientalmente responsável, a mobilidade elétrica se estabelece como uma alternativa promissora para o futuro do transporte urbano.

REFERÊNCIAS

ABNETT, K. Parlamento Europeu aprova fim de vendas de carros novos a gasolina e diesel em 2035. Reuters/CNN Brasil, 2023. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br>.

ABREU, Victor Hugo Souza de; D'AGOSTO, Márcio de Almeida; MARUJO, Lino Guimarães. Conexão Estratégica: Explorando as Relações entre Mobilidade Elétrica e Smart Grid para Transformar a Mobilidade Urbana. 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/256883/1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

ALMEIDA, M. O Discurso Publicitário dos Automóveis Elétricos e a Influência na Percepção do Consumidor. Universidade de São Paulo, 2022. Disponível em: https://repositorio.ipl.pt/bitstream/10400.21/17008/1/Tese%20-%20O%20discurso%20publicitário%20dos%20automóveis%20elétricos_Mariana%20Almeida.pdf.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. In: Base de Dados das Tarifas das Distribuidoras de Energia Elétrica. [S. l.], 11 jun. 2024. Disponível em: <https://portalrelatorios.aneel.gov.br/luznatarifa/basestarifas>.

ANEEL; CENTRO DE DOCUMENTAÇÃO - CEDOC. Bibliografia temática: mobilidade elétrica. v. 4, n. 6, jun. Brasília: ANEEL : CEDOC, 2022. 14 p. (Bibliografia temática, v. 4). Disponível em: <https://biblioteca.aneel.gov.br/acervo/detalhe/224532>.

ANFAVEA. O Caminho da Descarbonização do Setor Automotivo no Brasil. 2021.

ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DE RECURSOS HÍDRICOS (APRH). A Indústria e o Ambiente. Newsletter, v. 120, jan./fev. 2020. Disponível em: https://www.aprh.pt/Newsletter/img/IndustriaeAmbiente120_jan_fev_2020.pdf#page=19.

AUTOSSUSTENTAVEL. Disponível em: <https://autossustentavel.com/2018/08/smart-grid.html>.

BANSAL, S.; MALHOTRA, K. Advancing State of Charge Management in Electric Vehicles With Machine Learning: A Technological Review. *Journal of Electric Vehicles*, 2023. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=10474001>.

BARASSA, Edgar et al. 1º Anuário brasileiro da mobilidade elétrica. Brasília: PNME, 2020. Disponível em: <https://pnme.org.br/wp-content/uploads/2021/03/1o-ANUARIO-BRASILEIRO-DA-MOBILIDADE-ELETRICA-2020.pdf#page=95>.

BARBOSA, W. et al. Electric Vehicles: Bibliometric Analysis of the Current State of the Art and Perspectives. *Energies*, v. 15, n. 395, 2022.

BRANCO, José Eduardo Holler; et al. Ações e políticas para redução da emissão de CO2 no transporte de cargas do Brasil. *Transportes*, v. 31, n. 2, 2023. p. e2415-e2415.

BRASIL. Fator de emissão de CO2 na geração de energia elétrica no Brasil em 2023 é o menor em 12 anos. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2024/02/fator-de-emissao-de-co2-na-geracao-de-energia-eletrica-no-brasil-em-2023-e-o-menor-em-12-anos>.

DE BRITO, Everton Sáigon Medeiros; TEIXEIRA, Telma; SOUZA, Frank Pavan de. As potencialidades e os limites da energia solar fotovoltaica no Brasil. *CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES* 16.9 (2023): 15663-15680. Disponível em: <https://ojs.revistacontribuciones.com/ojs/index.php/clcs/article/view/1758/1374>.

DE CARVALHO, Carlos Henrique Ribeiro. Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros. *Texto para Discussão*, n. 1606, 2011. Disponível em:

https://portalantigo.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/TDs/td_1606.pdf#page=9.33.

FORD MEDIA. Ford Cargo 816 vence o prêmio Lótus de "Caminhão Leve do Ano". 2014. Disponível em: <https://media.ford.com/content/fordmedia/fsa/br/pt/news/2014/03/27/ford-cargo-816-vence-o-premio-lotus-de--caminhao-leve-do-ano-/jcr:content/rightRailPar/relatedphoto.html>.

GILLESPIE, Thomas (ed.). Fundamentals of Vehicle Dynamics. SAE International, 2021.

GOVERNO DO ESTADO DO PARANÁ. Os desafios da mobilidade elétrica. Revista Smart Energy, v. 4, n. 8, 2019.

GREVE, Fernanda; MACHADO, Roberto. Veículos elétricos: o impacto do ciclo de vida na pegada ambiental. Revista Brasileira de Energia, v. 27, n. 4, 2021. Disponível em: <https://revistabrasileiraenergia.com.br/veiculos-eletricos-impactos-ambientais>.

IBGE. Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua (PNAD). Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE (IEMA). Mobilidade Urbana e o impacto ambiental da frota de ônibus no Brasil. Relatório Técnico, 2022.

IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.

KOCH, Walter. Veículos híbridos e elétricos: fundamentos, componentes e sistemas. 2ª ed. São Paulo: Editora Érica, 2020.

LÓPEZ, Martin. O papel dos ímãs permanentes no avanço tecnológico dos motores elétricos. *JournalofMagneticMaterials*, v. 48, n. 2, 2023.

MCKINSEY & COMPANY. *Automotiverevolution – perspective towards 2030*. 2022. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/automotive-revolution>.

MILLER, John M. *Propulsion Systems for HybridVehicles*. 3rd ed. Stevenage: IET, 2020.

NOGUEIRA, Pedro. Estudos de viabilidade na reciclagem de baterias de íon-lítio. *JournalofBatteryResearch*, v. 34, n. 1, 2024.

PNME. *Aliança pela Mobilidade Elétrica no Brasil*. São Paulo, 2022. Disponível em: <https://pnme.org.br/>.

PORTAL ENERGIA. *Benefícios e desafios do Smart Grid*. 2023. Disponível em: <https://portalenergia.com/smart-grid-beneficios/>.

RIBEIRO, Carlos H.; MARQUES, Joana. Os impactos socioeconômicos da adoção de veículos elétricos no Brasil. *Revista de Transportes e Mobilidade Sustentável*, v. 15, n. 1, 2023.

SCHWAB, Camila Barbieri. *Estudo das tecnologias de veículos elétricos e análise de um sistema de gerenciamento de baterias em Hardware in the Loop virtual*. 2024.

SOUZA, Eduardo F.; ROCHA, Cláudio. Análise dos desafios técnicos na conversão de veículos a combustão para elétricos. *Revista de Engenharia Automotiva*, v. 14, n. 3, 2022.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ (UNIFEI). *Estudos de eficiência energética em veículos elétricos. Relatório Técnico*, 2023.

WEG. Catálogo Técnico - Motores de Tração Elétrica. Jaraguá do Sul: WEG, 2023.

ZHANG, Wei et al. Analysis of Permanent Magnet Motors in Electric Vehicle Applications. IEEE Transactions on Magnetics, v. 57, n. 2, 2021.

ANEXOS

Códigos para implementação do ciclo SFUDS:

```
% Script para análise de dados de conversão elétrica de um veículo
% Modelo do veículo: Ford Cargo C816
% Dados do Veículo Ford Cargo C816:
massa = 8500; % Massa total do veículo em kg
areaFrontal = 8.64; % Área frontal do veículo em m²
coeficienteArrasto = 0.7; % Coeficiente de arrasto
mu_rr = 0.015; % Coeficiente de atrito na roda
ro = 1.225; % Densidade do ar em kg/m³
relacaoVelocidade = 5.57; % Relação de redução
raioRoda = 0.367; % Raio da roda em metros
eficienciaTransmissao = 0.95; % Eficiência da transmissão
eficienciaInversor = 0.92; % Eficiência do inversor
eficienciaMotor = 0.9; % Eficiência do motor
potenciaMotor = 160000; % Potência do motor em watts
% Dados da Bateria:
tensaoNominalCelula = 3.2; % Tensão nominal da célula da bateria em volts
resistenciaInternaCelula = 0.002; % Resistência interna da célula da bateria em ohms
numeroCelulasSerie = 96; % Número de células em série
capacidadeNominalCelula = 180; % Capacidade nominal da célula da bateria em Ah
numeroCelulasParalelo = 12; % Número de células em paralelo
% Parâmetros do Ciclo SFUDS:
Ciclo_SFUDS_metroSegundo;
% Calculando resistência interna da bateria para o banco de células
resistenciaInternaBateria = resistenciaInternaCelula * numeroCelulasSerie;
% Vetores auxiliares para armazenar os dados
potenciaMotorVec = zeros(1, N);
torqueMotorVec = zeros(1, N);
forcaTracaoVec = zeros(1, N);
correnteBateriaVec = zeros(1, N);
profundidadeDescargaVec = zeros(1, N);
% Loop para simulação do ciclo de condução
for i = 2:N
% Cálculo da aceleração
aceleracao = V(i) - V(i-1);
% Cálculo da força devido ao arrasto aerodinâmico
Fad = 0.5 * ro * areaFrontal * coeficienteArrasto * V(i)^2;
% Cálculo da força devido à inclinação (considerada plana)
Fhc = 0;
% Cálculo da força devido à aceleração linear
Fla = massa * aceleracao;
% Cálculo da força de resistência de rolagem
Frr = mu_rr * massa * 9.81;
% Força trativa total
```

```

Fte = Fad + Fhc + Fla + Frr;
% Potência trativa na roda
potenciaRoda = Fte * V(i);
% Velocidade angular na roda
wRoda = V(i) / raioRoda;
% Velocidade angular no motor
wMotor = wRoda * relacaoVelocidade;
% Potência do motor
potenciaMotorVec(i) = potenciaRoda * eficienciaTransmissao * eficienciaMotor;
% Torque do motor
torqueMotorVec(i) = potenciaMotorVec(i) / wMotor;
% Força de tração
forcaTracaoVec(i) = Fte;
% Corrente da bateria
correnteBateriaVec(i) = potenciaMotorVec(i) / tensaoNominalCelula /
(eficienciaMotor * eficienciaInversor);
% Profundidade de descarga da bateria
profundidadeDescargaVec(i) = correnteBateriaVec(i) * (i - 1) / 3600 /
capacidadeNominalCelula / numeroCelulasSerie;
end
% Gráficos
figure;
subplot(3, 2, 1);
plot(V * 3.6);
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Velocidade (km/h)');
title('Velocidade ao Longo do Tempo');
subplot(3, 2, 2);
plot(potenciaMotorVec / 1000);
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Potência do Motor (kW)');
title('Potência do Motor ao Longo do Tempo');
subplot(3, 2, 3);
plot(torqueMotorVec);
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Torque do Motor (Nm)');
title('Torque do Motor ao Longo do Tempo');
subplot(3, 2, 4);
plot(forcaTracaoVec / 1000);
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Força de Tração (kN)');
title('Força de Tração ao Longo do Tempo');
subplot(3, 2, 5);
plot(correnteBateriaVec);
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Corrente da Bateria (A)');
title('Corrente da Bateria ao Longo do Tempo');
subplot(3, 2, 6);
plot(profundidadeDescargaVec);
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Profundidade de Descarga');
title('Profundidade de Descarga da Bateria ao Longo do Tempo');

```