

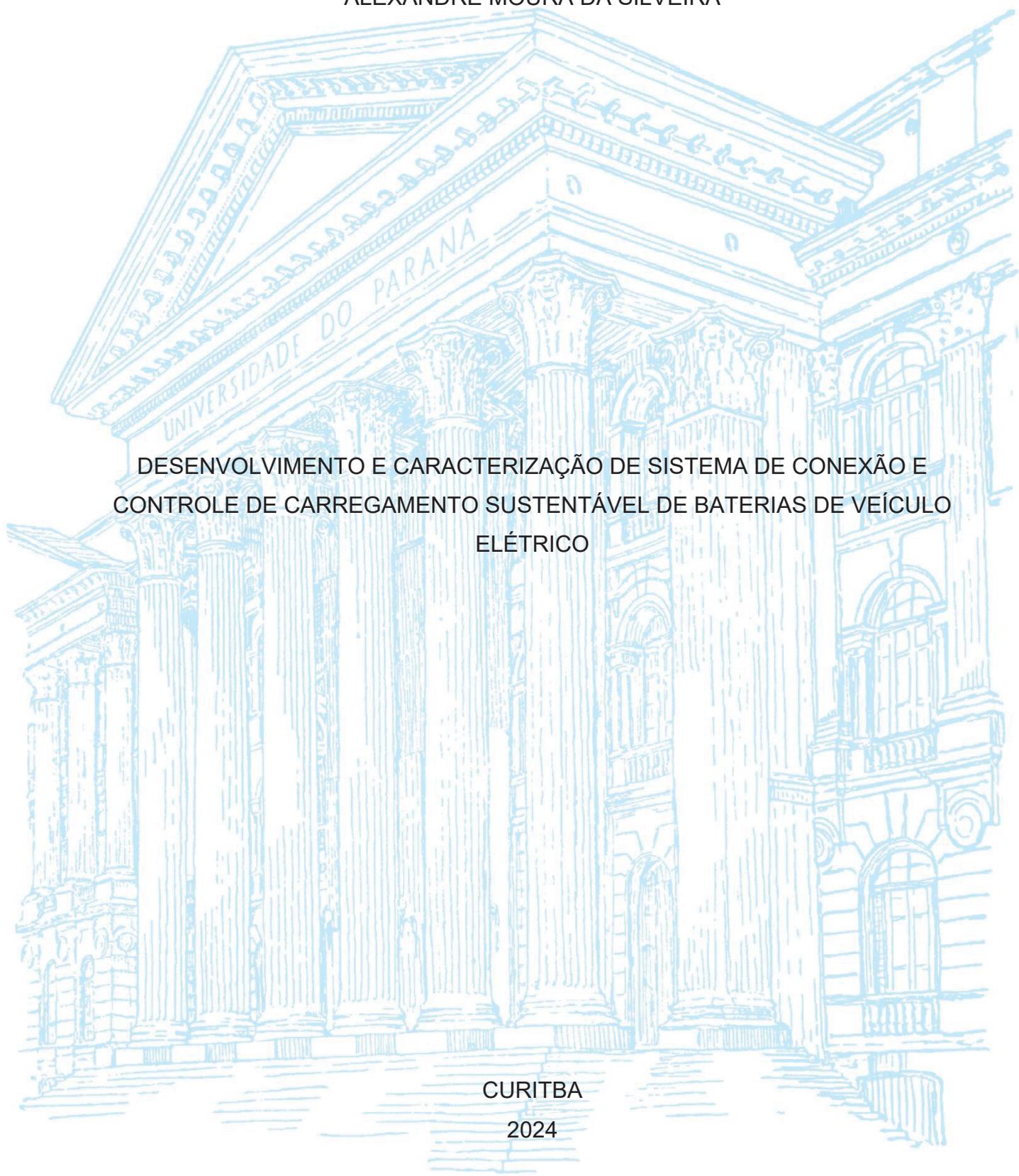
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ALEXANDRE MOURA DA SILVEIRA

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE SISTEMA DE CONEXÃO E
CONTROLE DE CARREGAMENTO SUSTENTÁVEL DE BATERIAS DE VEÍCULO
ELÉTRICO

CURITIBA

2024



ALEXANDRE MOURA DA SILVEIRA

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE SISTEMA DE CONEXÃO E
CONTROLE DE CARREGAMENTO SUSTENTÁVEL DE BATERIAS DE VEÍCULO
ELÉTRICO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. José Viriato Coelho Vargas, PhD

Coorientadora: Profa. Giuliana Sardi Venter, Dr.

CURITIBA

2024

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Silveira, Alexandre Moura da

Desenvolvimento e caracterização de sistema de conexão e controle de carregamento sustentável de baterias de veículo elétrico. / Alexandre Moura da Silveira. – Curitiba, 2024.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. PhD José Viriato Coelho Vargas

Coorientadora: Profa. Dr^a Giuliana Sardi Venter

1. Veículos elétricos. 2. Mobilidade sustentável. 3. Pilhas e baterias elétricas. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Vargas, José Viriato Coelho. IV. Venter, Giuliana Sardi. V. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
MECÂNICA - 40001016040P5

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA MECÂNICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **ALEXANDRE MOURA DA SILVEIRA** intitulada: **DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE SISTEMA DE CONEXÃO E CONTROLE DE CARREGAMENTO SUSTENTÁVEL DE BATERIAS DE VEÍCULO ELÉTRICO**, sob orientação do Prof. Dr. JOSE VIRIATO COELHO VARGAS, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 26 de Setembro de 2024.

Assinatura Eletrônica

01/10/2024 16:23:00.0

JOSE VIRIATO COELHO VARGAS

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

04/10/2024 09:37:56.0

LUIZ ALBERTO OLIVEIRA ROCHA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL)

Assinatura Eletrônica

09/10/2024 14:02:35.0

DIOGO BERTA PITZ

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

RESUMO

A demanda de energia e o estudo de impacto ambiental do consumo de combustíveis fósseis têm tomado notoriedade mundial e são temas de permanente discussão entre pesquisadores e políticos. Propor uma fonte de energia alternativa e ambientalmente correta tem, portanto, extrema relevância no sentido de promover a mobilidade sustentável. Este presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento e caracterização de uma solução de sistema de conexão e controle de carregamento dinâmico para soluções de autonomia estendida de veículos elétricos a partir da geração de hidrogênio sustentável e utilização de pilha de combustível. O sistema construído para o estudo compreende um veículo de passageiros 100% elétrico e uma solução de autonomia estendida inovadora. O veículo elétrico utilizado é um Renault Zoe que possui uma bateria de tração com capacidade de 52 kWh e autonomia de 357,8 km (ciclo urbano UDDS 398,4 km e ciclo rodovia HFEDS 318,1 km). A solução de autonomia estendida dispõe de uma pilha de combustível Horizon do tipo PEM (*Proton Exchange Membrane*), de 5 kW de potência de saída, alimentada com hidrogênio gerado através de um reator que utiliza reação de alumínio sustentável e solução aquosa de hidróxido de sódio. Para que seja possível a transferência de energia elétrica gerada pela pilha de combustível para o veículo elétrico foi desenvolvido um sistema de conexão que promove aumento de tensão de saída da pilha de 72 V para 400 V, compatível com o barramento de alta tensão do veículo elétrico. O aumento de tensão é realizado por um módulo conversor DCDC YSTECH modelo DCH6KW-200-3 de 6 kW que controla também a potência de transferência de energia através da limitação de corrente. O gerenciamento do sistema é realizado por uma ECU externa Vector VN8911 capaz de coletar informações do conversor DCDC e do veículo elétrico, assim como pilotar o conversor DCDC para liberação de carga. Testes estáticos de carregamento bem como um ciclo dinâmico *US Combined* (utilizado para homologação de autonomia de veículos elétricos no Brasil) foram realizados para medição de parâmetros experimentais: tensão de saída da pilha de combustível, tensão e temperatura da bateria de tração do veículo elétrico, corrente elétrica, SOC da bateria e consumo de hidrogênio. A partir dos valores obtidos foi possível caracterizar o sistema determinando o aumento de autonomia proporcionado pelo sistema proposto, a eficiência global bem como dos subsistemas isoladamente, potência de recarga e quantidade total de energia transferida. Foi atingido o propósito principal da capacidade de transferência de carga da pilha de combustível para o veículo elétrico, de 8,1620 kWh, proporcionando um aumento de autonomia de 36,7 km (ciclo combinado) nos testes realizados e uma eficiência global de 89,62%.

Palavras-chave: mobilidade sustentável, veículo elétrico, extensor de autonomia, pilha de combustível, sistema de conexão e controle e carregamento dinâmico de bateria.

ABSTRACT

The global demand for energy and the environmental impact study of fossil fuel consumption have gained worldwide prominence and are subjects of ongoing discussion among researchers and policymakers. Proposing an alternative and environmentally friendly energy source is, therefore, of utmost importance in promoting sustainable mobility. The objective of this work is the development and characterization of a dynamic charging connection and control system for range extender solutions for electric vehicles, using sustainable hydrogen generation and fuel cell technology. The system developed for the study includes a fully electric passenger vehicle and an innovative range extender solution. The electric vehicle used is a Renault Zoe, equipped with a 52 kWh traction battery and a range of 357.8 km (398.4 km in the UDDS urban cycle and 318.1 km in the HFEDS highway cycle). The range extender solution features a Horizon PEM (Proton Exchange Membrane) fuel cell with a 5 kW output power, fueled by hydrogen generated through a reactor that uses sustainable aluminum and an aqueous sodium hydroxide solution. To enable the transfer of the electrical energy generated by the fuel cell to the electric vehicle, a connection system was developed to boost the fuel cell's output voltage from 72 V to 400 V, compatible with the electric vehicle's high-voltage bus. The voltage increase is achieved using a 6 kW DCDC converter module, YSTECH model DCH6KW-200-3, which also controls the power transfer through current limitation. The system is managed by an external ECU, Vector VN8911, capable of collecting information from the DCDC converter and the electric vehicle, as well as piloting the DCDC converter to release the charge. Static charging tests, as well as a dynamic US Combined cycle (used for range certification of electric vehicles in Brazil), were conducted to measure experimental parameters: fuel cell output voltage, traction battery voltage and temperature of the electric vehicle, electric current, battery SOC, and hydrogen consumption. The values obtained allowed the system to be characterized, determining the range increase provided by the proposed system, the overall efficiency as well as the efficiency of the subsystems individually, the recharge power, and the total amount of energy transferred. The main objective of transferring the fuel cell's charge to the electric vehicle, achieving 8.1620 kWh, was met, providing a range increase of 36.7 km (combined) in the tests performed, with an overall efficiency of 89.62%.

Keywords: sustainable mobility, electric vehicle, range extender, fuel cell, connection system and control, and dynamic battery charging.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – DENSIDADE ENERGÉTICA DAS CÉLULAS DE LÍTIUM AO LONGO DOS ANOS	15
Figura 2 – DISPONIBILIDADE DE ESTAÇÕES DE RECARGA	15
Figura 3 – DENSIDADE DE ENERGIA DAS DIFERENTES TECNOLOGIAS DE BATERIAS	23
Figura 4 – A) MOTOR ELÉTRICO DE INDUÇÃO B) MOTOR ELÉTRICO DE IMÃ PERMANENTE	25
Figura 5 – AUTONOMIA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NA EUROPA EM 2019 (KM).....	28
Figura 6 – CICLO DE CONDUÇÃO US COMBINED.....	32
Figura 7 – BMW I3 COM OPÇÃO DE EXTENSOR DE AUTONOMIA UTILIZANDO MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA DE 647CC	33
Figura 8 – SISTEMA DE EXTENSÃO DE AUTONOMIA UTILIZANDO BATERIA AUXILIAR EXTERNA	34
Figura 9 – ARQUITETURA ELÉTRICA DE UM SISTEMA DE EXTENSOR DE AUTONOMIA E MODOS DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA	37
Figura 10 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO SISTEMA DE AUTONOMIA ESTENDIDA A PARTIR DE HIDROGÊNIO SUSTENTÁVEL	40
Figura 11 – ESQUEMA COMPLETO DO PROJETO E DISPOSIÇÃO DOS SUBSISTEMAS	41
Figura 12 – REATOR DE HIDROGÊNIO, PARCERIA ENTRE UEM E UFPR	41
Figura 13 – CILINDRO DE GIFEL UTILIZADO NOS TESTES.....	42
Figura 14 – PILHA DE COMBUSTÍVEL PEM HORIZON DE 5KW	43
Figura 15 – CURVA DE TENSÃO X CORRENTE	44
Figura 16 – CURVA DE POTÊNCIA DE SAÍDA X CORRENTE.....	45
Figura 17 – EXEMPLO DE CIRCUITO CONVERSOR DCDC TIPO BOOST	46
Figura 18 – YSTech DCH6KW-200-3	47
Figura 19 – ESQUEMA DE MONTAGEM DO SISTEMA JUNCTION BOX	49
Figura 20 – COMPONENTES DO SISTEMA DE CONEXÃO DE ALTA TENSÃO	50
Figura 21 – VECTOR VN8911.....	54
Figura 22 – DINAMÔMETRO DE CHASSIS SERVITEC C-2025 4WD	56
Figura 23 – CICLO DE CONDUÇÃO US COMBINED.....	57
Figura 24 – SISTEMA EXTENSOR DE AUTONOMIA ACOPLADO AO VEÍCULO ELÉTRICO.....	67
Figura 25 – OFICINA SENAI PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS	69
Figura 26 – ISALAMENTO POLO NEGATIVO BATERIA AUXILIAR 12V	69
Figura 27 – DESCOMISSIONAMENTO BATERIA DE TRACÇÃO	69
Figura 28 – SUPORTE MECANICO DO SISTEMA DE CONEXÃO.....	70
Figura 29 – CONEXÃO ELÉTRICA DE ALTA TENSÃO ENTRE O POWERTRAIN E A BATERIA DE TRACÇÃO	70
Figura 30 – CONONENTES INTERNOS JUNCTION BOX.....	71
Figura 31 – SISTEMA DE CONEXÃO INSTALADO.....	71
Figura 32 – MONTAGEM DO SISTEMA DE CONEXÃO FINALIZADA.....	72
Figura 33 – CURVA DE POLARIZAÇÃO DA PILHA DE COMBUSTÍVEL	73
Figura 34 – CURVA DE POTÊNCIA DA PILHA DE COMBUSTÍVEL	74
Figura 35 – CURVAS DE EFICIÊNCIA DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA.....	74
Figura 36 – CICLO US COMBINED COM ATIVAÇÃO DO SISTEMA DE EXTENSÃO DE AUTONOMIA	75
Figura 37 – PERFIL DE TEMPERATURA DA BATERIA DE TRACÇÃO.....	82
Figura 38 – CHARGE SUSTAINING OBSERVADO DURANTE O TESTE DE AUTONOMIA.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – CARACTERÍSTICAS DO TANQUE DE HIDROGÊNIO	43
Tabela 2 – CARACTERÍSTICAS DA PILHA DE COMBUSTÍVEL HORIZON PEM 5KW	43
Tabela 3 – CARACTERÍSTICAS GERAIS DO CONVERSOR DCDC.....	47
Tabela 4 – PARÂMETROS DO CONVERSOR DCDC	47
Tabela 5 – ITENS DO SISTEMA DE CONEXÃO EP-TENDER.....	50
Tabela 6 – CARACTERÍSTICAS POWERTRAIN RENAULT ZOE.....	51
Tabela 7 – CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE RECARGA RENAULT ZOE.....	51
Tabela 8 – CARACTERÍSTICAS GERAIS BATERIA DE TRAÇÃO RENAULT ZOE	52
Tabela 9 – TEMPOS DE DESACELERAÇÃO E CONDIÇÕES DE ENSAIO	52
Tabela 10 – CARACTERÍSTICAS VECTOR VN8911	55
Tabela 11 - ESTIMAÇÃO DE AUMENTO DE AUTONOMOMIA.....	65
Tabela 12 – CÁLCULO DE AUTONOMIA.....	78
Tabela 13 - SÍNTESE DOS RESULTADOS PONDERADOS	81

LISTA DE SIGLAS

BMS	- Battery Management System
CAN	- Controller area network
CD	- Charge depleting
CH ₄	- Gás metano
CO ₂	- Dióxido de carbono
CS	- Charge sustaining
DBC	- Database CAN, descritor de mensagens que trafegam na rede CAN
DCDC	- Conversor de corrente contínua
Duty cycle	- ciclo de trabalho utilizado em conversores DCDC
ECU	- Engine control unit
EESM	- Electric Excited Synchronous Motor
EPA	- Environmental protection agency
EREV	- Veículo elétrico com extensão de autonomia
FCEV	- Fuel cell electric vehicle
GD	- Geração distribuída
GEE	- Gases de efeito estufa
HFEDS	- Highway Fuel Economy Driving Schedule
HWFET	- Highway fuel economy test
ICO	- Motores a ignição por compressão
IEA	- International energy association
ITS	- Intelligent Transportation Systems
Junction Box	- sistema de conexão elétrica entre o extensor de autonomia e o veículo elétrico
NO _x	- Óxidos de nitrogênio
OBC	- Onboard charger
OECD	- Organization for Economic Cooperation and Development
PEM	- Proton exchange membrane
SAE	- Society of Automobile Engineers
SOC	- State of charge
UDDS	- Urban dynamometer driving schedule
US Combined	- ciclo de condução utilizado para homologação de autonomia para veículos elétricos
VE	- Veículo elétrico

LISTA DE SÍMBOLOS

η	- Eficiência da pilha de combustível.
η_{DCDC}	- Eficiência do conversor DCDC.
$\eta_{DCDC(AVG)}$	- Eficiência média do conversor DCDC.
η_{Global}	- Eficiência de transferência de energia gerada pela pilha de combustível para o veículo elétrico.
$\eta_{Global(AVG)}$	- Eficiência média de transferência de energia gerada pela pilha de combustível para o veículo elétrico.
$\eta_{Veículo}$	- Eficiência de transferência de energia do conversor DCDC para o veículo elétrico.
$\eta_{Veículo(AVG)}$	- Eficiência média de transferência de energia do conversor DCDC para o veículo elétrico.
LHV_{H_2}	- Valor calorífico do hidrogênio.
M_{H_2}	- Massa molar do hidrogênio.
\dot{W}	- Potência nominal da pilha Horizon.
W_{el}	- Energia total produzida pela reação aquosa de alumínio e hidróxido de sódio.
m_{H_2}	- Massa de hidrogênio.
m_{Al}	- Massa de alumínio.
m_{H_2O}	- Massa de água.
m_{NaOH}	- Massa de hidróxido de sódio.
m_T	- Massa total de reagentes.
\dot{m}_{H_2}	- Vazão mássica de hidrogênio.
B	- Estimativa da magnitude do erro fixo e constante.
$ECdc_{combinado}$	- Consumo de energia DC combinada em Wh/km.
$ECdc_{HFEDS}$	- Consumo de energia DC em ciclo rodoviário em Wh/km.
$ECdc_{HFEDS_1}$	- Consumo de energia DC no ciclo rodoviário número 1 em Wh/km.
$ECdc_{HFEDS_2}$	- Consumo de energia DC no ciclo rodoviário número 2 em Wh/km.
$ECdc_{UDDS}$	- Consumo de energia DC em ciclo urbano em Wh/km.
$ECdc_{UDDS_1}$	- Consumo de energia DC no ciclo urbano número 1 em Wh/km.
$ECdc_{UDDS_2}$	- Consumo de energia DC no ciclo urbano número 2 em Wh/km.
$ECdc_{UDDS_3}$	- Consumo de energia DC no ciclo urbano número 3 em Wh/km.
$ECdc_{UDDS_4}$	- Consumo de energia DC no ciclo urbano número 4 em Wh/km.
E_{DCDC}	- Energia total calculada na saída do conversor DCDC em Wh.
$E_{dc_{HFEDS_i}}$	- Energia utilizada na fase específica HFEDS_i em Wh.
$E_{dc_{UDDS_i}}$	- Energia utilizada na fase específica UDDS_i em Wh.
E_{Pilha}	- Energia gerada pela pilha de combustível em Wh.
$E_{Veículo}$	- Energia total calculada na entrada do BMS da bateria de tração em Wh.
i_{DCDC}	- Corrente de saída do conversor DCDC em A.
i_{Pilha}	- Corrente de saída da pilha de combustível em A.
$i_{Veículo}$	- Corrente de entrada da bateria de tração em A.
K_{DCDC_1}	- Coeficiente de ponderação da fase urbana número.
P	- Precisão dos equipamentos de medição.
P_{DCDC}	- Potência de saída do conversor DCDC em W.
P_{Pilha}	- Potência de saída da pilha de combustível em W.
$P_{Veículo}$	- Potência na entrada do BMS da bateria de tração em W.
$P_{combinado}$	- Autonomia combinada nos ciclos urbano e rodoviário em quilômetros.

R_{REX}	- Autonomia proporcionada pelo sistema de extensão de autonomia em km.
U	- Incerteza de medição.
UBE	- Energia utilizável da bateria em Wh.
UBE_{Base}	- Energia utilizável da bateria do teste de referência em kWh.
UBE_{REX}	- Energia utilizável da bateria somada ao extensor de bateria em kWh.
V_{DCDC}	- Tensão de saída do conversor DCDC em V.
V_{Pilha}	- Tensão de saída da pilha de combustível em V.
$V_{Veículo}$	- Tensão de entrada do BMS da bateria de tração em V.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
1.1.	CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO.....	14
1.2.	CONCEITOS BÁSICOS	16
1.3.	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	18
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1.	MOBILIDADE E A IMPORTÂNCIA PARA O DESENVOLVIMENTO DAS SOCIEDADES	19
2.2.	IMPACTO DO CO ₂ E GASES DE EFEITO ESTUFA CAUSADOS PELA MOBILIDADE URBANA	20
2.3.	A MOBILIDADE ELÉTRICA E SEU IMPACTO NO FUTURO SUSTENTÁVEL.....	21
2.4.	DEFINIÇÃO DE UM VEÍCULO ELÉTRICO	22
2.4.1.	Componentes de um veículo elétrico.....	23
2.5.	INFRAESTRUTURA DE RECARGA NO MUNDO PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS	25
2.6.	AUTONOMIA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS: LIMITAÇÕES ATUAIS E VISÃO PARA O FUTURO	27
2.7.	REGULAMENTAÇÃO DE HOMOLOGAÇÃO DE AUTONOMIA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NO BRASIL 29	
2.7.1.	Instrução normativa SAE J1634	30
2.8.	SISTEMAS DE AUTONOMIA ESTENDIDA PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS.....	32
2.9.	SISTEMAS DE GESTÃO E CONTROLE DE TRANSFERÊNCIA DE CARGA PARA EXTENSORES DE AUTONOMIA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS	35
2.9.1.	Gestão e controle de transferência dinâmica de carga para extensores de autonomia de veículos elétricos.....	37
2.10.	DESAFIOS.....	38
2.11.	OBJETIVOS.....	39
2.11.1.	Objetivo Geral	39
2.11.2.	Objetivos Específicos.....	39
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1.	PROJETAR E CONSTRUIR UM SISTEMA EXPERIMENTAL DE CARREGAMENTO DE BATERIAS DE VEÍCULO ELÉTRICO.....	40
3.1.1.	Reator de hidrogênio	41
3.1.2.	Tanque de armazenamento de hidrogênio	42
3.1.3.	Pilha de combustível	43
3.1.4.	Conversor DCDC	45
3.1.5.	Junction box	48
3.1.6.	Veículo elétrico	50
3.1.7.	ECU de controle	53
3.2.	OBTENÇÃO E ANÁLISE DE DADOS EXPERIMENTAIS NO SISTEMA CONSTRUÍDO	55

3.2.1.	Testes estáticos	56
3.2.2.	Dinamômetro de Chassis.....	56
3.2.3.	Ciclo de condução <i>US Combined</i>	57
3.3.	DEFINIR FUNÇÕES OBJETIVO QUE CARACTERIZEM O DESEMPENHO DO SISTEMA.....	57
3.3.1.	Parâmetros de desempenho da pilha de combustível	58
3.3.2.	Parâmetros de desempenho do conversor DCDC	58
3.3.3.	Parâmetros de desempenho na transferência de energia para o veículo elétrico e eficiência global	59
3.3.4.	Metodologia de cálculo de autonomia.....	61
3.4.	CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA	63
3.5.	INCERTEZAS DE MEDIÇÃO	65
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
4.1.	PROJETAR E CONSTRUIR UM SISTEMA EXPERIMENTAL DE CARREGAMENTO DE BATERIAS DE VEÍCULO ELÉTRICO.....	67
4.1.1.	Montagem Junction Box e sistema de conexão <i>EP-Tender</i>	68
4.2.	OBTENÇÃO E ANÁLISE DE DADOS EXPERIMENTAIS NO SISTEMA CONSTRUÍDO	72
4.2.1.	Testes estáticos	72
4.2.2.	Testes dinâmicos	75
4.2.3.	Testes dinâmicos de autonomia.....	78
4.2.4.	Resultados complementares.....	81
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
5.1.	CONCLUSÃO	83
5.2.	SUGESTÕES PARA OS TRABALHOS FUTUROS	84
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os detalhes sobre os antecedentes que contextualizam e motivam o desenvolvimento desta dissertação. Para tanto, é feita uma introdução consistindo da motivação para o trabalho, dos conceitos básicos que fundamentam o sistema em desenvolvimento, bem como a estrutura completa de organização do documento.

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO

A demanda crescente por energia no planeta é tema de estudo de pesquisadores e políticos pelo mundo todo e estima-se que os combustíveis fósseis ainda serão utilizados por um longo período. No entanto, atualmente a busca por fontes alternativas de energia tem sido prioridade para a humanidade, principalmente por conta do impacto ambiental que os combustíveis fósseis causam.

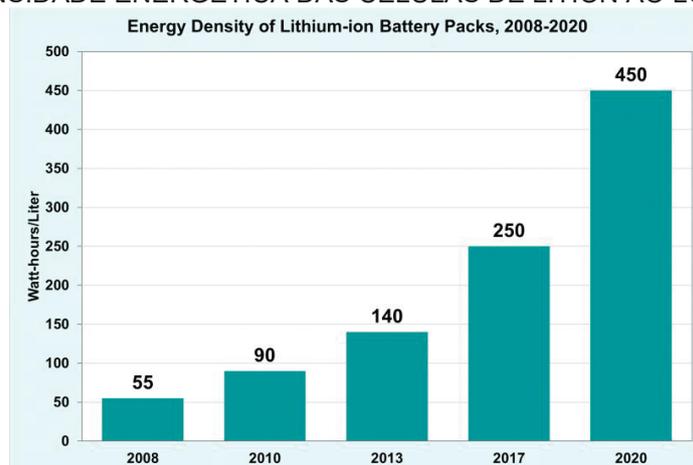
A IEA (do inglês *International Energy Association*) (IEA, 2022) estima que o crescimento na demanda por energia seja de cerca de 3,5% ao ano, passando de 2,9 EJ em 1971 para 15,1 EJ em 2019. Considerando petróleo, carvão, gás natural, biocombustíveis e lixo, eletricidade e outros (fontes alternativas de energia).

Este mesmo estudo mostra que a mobilidade representa em torno de 40% da demanda de petróleo mundial e uma alternativa para o uso do combustível fóssil é a eletrificação. Veículos elétricos substituem o tradicional motor térmico movido à gasolina por um sistema de bateria de tração, geralmente constituída de células de íons de lítio, e um motor elétrico para tração. Esses veículos têm a vantagem da “emissão zero” e se considerarmos somente o seu uso, são ambientalmente compatíveis.

A tecnologia de motores de tração já é bastante estabelecida no mercado mundial, mas as baterias ainda estão em franco desenvolvimento atualmente e ainda apresentam limitações de autonomia.

Outro aspecto impactante na mobilidade elétrica é a densidade energética das baterias de lítio, que têm aumentado com o desenvolvimento de novas tecnologias ao longo dos anos, como mostra a figura 1, mas que ainda necessita grande evolução.

FIGURA 1 – DENSIDADE ENERGÉTICA DAS CÉLULAS DE LÍTIO AO LONGO DOS ANOS



Fonte: <https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/fofw-1234-april-18-2022-volumetric-energy-density-lithium-ion-batteries>. Último acesso 17/08/2024

Em complemento, a disponibilidade de estações de recarga no Brasil ainda é deficitária e está em desenvolvimento em comparação à Europa, como mostra a figura 2.

FIGURA 2 – DISPONIBILIDADE DE ESTAÇÕES DE RECARGA



Fonte: <https://map.electromaps.com/pt/>. Último acesso 17/08/2024

O modelo elétrico Renault Zoe, por exemplo, em sua versão lançada em 2019 dispõe de uma bateria de 52 kWh o que lhe permite uma autonomia homologada de 357,8 km (ciclo urbano UDDS 398,4 km e ciclo rodovia HFEDS 318,1 km) no ciclo *US Combined*. Além da limitação de autonomia, podemos adicionar limitações como baixa potência de recarga e limitada infraestrutura disponível no país. Isto posto, a

utilização em massa de veículos elétricos no Brasil será ainda por muito tempo limitada e, portanto, incapaz de substituir por completo os veículos a combustão.

Novas tecnologias que contribuam para viabilizar a propulsão alternativa à combustão, mesmo com as grandes limitações ainda existentes na rede elétrica mundial, se inserem nesse contexto. Sistemas geradores de energia elétrica sustentável podem proporcionar aos veículos elétricos autonomia estendida, oferecendo alcances compatíveis ou superiores aos veículos tradicionais à combustão, trazendo potenciais ganhos para o setor e mitigando o impacto no meio ambiente.

Para garantir a sustentabilidade da geração de energia, devemos levar em conta combustíveis limpos, como o hidrogênio, por exemplo. O hidrogênio verde apresenta diversas vantagens para a mobilidade, destacando-se como uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis. Ele pode ser produzido a partir de fontes renováveis, como energia solar, eólica ou até mesmo utilizando sucata de alumínio em reação com hidróxido de sódio, sem emissão de gases de efeito estufa, o que contribui significativamente para a redução da poluição do ar e das emissões de carbono.

Portanto, com essas melhorias técnicas, os veículos elétricos poderiam aumentar sua competitividade no sistema de transportes, contribuindo para conquistar o mercado e incorporando novas tecnologias ou processos a um produto já existente (veículo elétrico). Adicionalmente, esses sistemas poderiam criar novos mercados com a geração de energia limpa e sustentável *in situ* para outros produtos e aplicações através da geração distribuída (GD) de energia.

1.2. CONCEITOS BÁSICOS

Um veículo elétrico é composto por baterias que necessitam de recargas frequentes para a alimentação de motores elétricos, muitas vezes de alta potência. Em consequência, é necessária a existência de infraestrutura adequada para esse carregamento, o que ainda não está amplamente disponível no mundo (KLEINER, BROKATE, BLASER, FRIE, 2018).

Tendo em vista que as redes elétricas ainda não são capazes de atender à demanda requerida pela frota de veículos necessária para atender a sociedade,

quando se considera a substituição da propulsão a combustão, é necessário buscar fontes alternativas de energia elétrica para recarga de baterias veiculares.

Uma possível solução seria a combinação de geração de energia elétrica distribuída e *in situ* no local da demanda. Sistemas locais de menor proporção geradores de energia elétrica, tais como grupo moto-geradores, pilhas de combustível, e outros poderiam atender essa necessidade.

De fato, considerando grupos moto-geradores ou pilhas de combustível, o hidrogênio poderia suprir a demanda desses sistemas. Isso porque o hidrogênio é um combustível que não gera emissões, sendo, portanto, ambientalmente correto. No entanto, o hidrogênio não está disponível naturalmente, sendo necessário processos industriais para a sua produção.

Dentre os processos mencionados no parágrafo anterior, destacam-se processos que não requeiram consumo energético para a sua execução. Por exemplo, o hidrogênio pode ser gerado pela reação do alumínio e água na presença do hidróxido de sódio, que são substâncias comuns de consumo cotidiano. A água para o processo pode ser inclusive salgada, tendo grande disponibilidade no planeta. O hidróxido de sódio apresenta alta disponibilidade e tem baixo valor no mercado. O alumínio, por sua vez, é o terceiro elemento mais abundante na Terra, sendo o primeiro entre os metais (VARGAS, 2021).

O hidrogênio gerado pela reação mencionada pode ser convertido em energia elétrica tanto através de pilhas de combustível como pela utilização de grupos moto-geradores. Nas pilhas de combustível ocorre a conversão do hidrogênio em energia elétrica por meio de reações eletroquímicas, sendo um método altamente eficiente de geração de eletricidade por ser um gerador químico e não estar limitado pela eficiência de Carnot (BARD, FAULKNER, 1995). Em grupos moto-geradores, o hidrogênio pode ser utilizado como combustível de motores a ignição por compressão (ICO) para acionar geradores elétricos, mas que são limitados em termos de eficiência térmica pela eficiência de Carnot como qualquer máquina térmica cíclica (BARD, FAULKNER, 1995).

O escopo desta dissertação é de desenvolver e caracterizar um sistema de conexão e controle de carregamento sustentável para baterias de veículo elétrico, que seja capaz de transferir energia de forma segura e eficiente, uma vez que, baseado na literatura disponível, o mercado e a pesquisa carecem deste tipo de solução.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

No Capítulo 1 foram apresentadas a contextualização e a motivação para elaboração da dissertação de mestrado, bem como a organização e escopo desta dissertação. Já no Capítulo 2, será realizada uma revisão bibliográfica com o objetivo de esclarecer conceitos básicos sobre o veículo elétrico, autonomia estendida, sistemas de controle de veículos elétricos, os desafios relacionados à nova tecnologia e por fim os objetivos do trabalho, geral e específicos. O Capítulo 3 descreve os materiais e métodos a serem implementados no procedimento experimental do trabalho. No Capítulo 4 estão descritos os resultados obtidos através dos experimentos realizados. O Capítulo 5 traz as considerações finais e recomendações para trabalhos futuros. Ao final desta dissertação estão apresentadas as referências bibliográficas que nortearam o desenvolvimento desta dissertação e que subsidiarão a revisão da literatura para o trabalho de dissertação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta etapa, realiza-se uma revisão bibliográfica com o objetivo de esclarecer conceitos básicos sobre os elementos do sistema de autonomia estendida presentes na literatura científica. A revisão traz o estado da arte relacionado aos veículos elétricos, sistemas de autonomia estendida, sistemas de conexão e controle de carregamento e transferência de carga. Em complemento apresentam-se os desafios atuais relacionados a viabilidade da tecnologia.

2.1. MOBILIDADE E A IMPORTÂNCIA PARA O DESENVOLVIMENTO DAS SOCIEDADES

A mobilidade é um fator essencial para o desenvolvimento e crescimento das sociedades. Ela engloba a capacidade das pessoas de se moverem livremente e de maneira eficiente dentro e entre diferentes regiões, facilitando o acesso a serviços essenciais, oportunidades econômicas e interações sociais. A importância da mobilidade vai além do mero transporte; ela influencia a qualidade de vida, a prosperidade econômica e a coesão social.

Um levantamento do Banco Mundial (2019) demonstra que um dos principais benefícios da mobilidade é a promoção das atividades econômicas. Uma rede de transporte bem desenvolvida permite o movimento eficiente de mercadorias e serviços, vital para o comércio e a economia. Isso permite que as empresas alcancem um mercado mais amplo, reduzindo custos de transporte e aumentando a eficiência da cadeia de suprimentos. Conseqüentemente, isso leva ao aumento da produtividade, criação de empregos e crescimento econômico. De acordo com o relatório, melhorias na infraestrutura de transporte podem aumentar o PIB em até 2%.

Além disso, a mobilidade promove a inclusão e coesão social. Ela conecta pessoas de diferentes origens e regiões, promovendo a troca cultural e o entendimento. Sistemas de transporte eficientes permitem que indivíduos participem de atividades sociais, culturais e recreativas, melhorando sua qualidade de vida geral. Essa conectividade ajuda a reduzir as disparidades entre áreas urbanas e rurais, promovendo uma sociedade mais inclusiva. Um estudo da OECD destaca que a mobilidade é essencial para a integração social e o desenvolvimento regional (OECD, 2022).

Mas o impacto ambiental da mobilidade também não pode ser negligenciado. Investir em infraestrutura de mobilidade verde ambientalmente compatível não só preserva o meio ambiente, mas também promove estilos de vida mais saudáveis e comunidades mais saudáveis. De acordo com um artigo de Liu et al. (2023), a transição para sistemas de transporte sustentável pode reduzir significativamente as emissões de CO₂.

2.2. IMPACTO DO CO₂ E GASES DE EFEITO ESTUFA CAUSADOS PELA MOBILIDADE URBANA

Como dito, a mobilidade urbana desempenha um papel central na vida das pessoas, facilitando o deslocamento diário e conectando diferentes regiões e centro das cidades. No entanto, ela também é uma das principais fontes de emissões de dióxido de carbono (CO₂) e outros gases de efeito estufa (GEE), que contribuem massivamente para as mudanças climáticas. Diversos estudos têm investigado o impacto ambiental da mobilidade urbana, destacando a necessidade urgente de soluções sustentáveis.

De acordo com o estudo publicado por Liddle, B. (2014), o setor de transporte é altamente responsável pelas emissões globais de CO₂ relacionadas à energia. Os veículos movidos a combustíveis fósseis, como carros, ônibus e caminhões, são os principais contribuintes para essas emissões. Além do CO₂, esses veículos também emitem outros GEE, como metano (CH₄) e óxidos de nitrogênio (NO_x), que exacerbam o efeito estufa.

O artigo de Toledo et al. (2018) analisa o impacto das emissões de GEE em cidades no Brasil. Este estudo revelou que áreas urbanas densamente povoadas têm níveis mais elevados de emissões devido ao tráfego intenso e ao uso predominante de veículos particulares. Além disso, a falta de infraestrutura adequada para transporte público e mobilidade ativa, como ciclovias e calçadas, agrava ainda mais a situação.

A transição para soluções de mobilidade sustentável é fundamental para mitigar esses impactos. De acordo com o estudo Teixeira et al. (2018), a adoção de veículos elétricos (VE) pode reduzir significativamente as emissões de CO₂ no setor de transporte urbano. No entanto, o estudo também destaca que a eficácia dos VE

depende da fonte de eletricidade utilizada. Se a eletricidade for gerada a partir de fontes renováveis, como solar e eólica, as reduções de emissões serão ainda maiores.

O artigo de Gan et al. (2019) enfatiza a importância do planejamento urbano integrado para reduzir as emissões de GEE. Cidades que investem em transporte público eficiente, infraestrutura para bicicletas e políticas de incentivo ao uso de veículos elétricos conseguem reduzir substancialmente suas emissões. Além disso, promover o uso de tecnologias inteligentes, como sistemas de transporte inteligente (ITS), pode otimizar o fluxo de tráfego e reduzir o consumo de combustível.

2.3. A MOBILIDADE ELÉTRICA E SEU IMPACTO NO FUTURO SUSTENTÁVEL

A mobilidade elétrica tem ganhado destaque como uma solução viável para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e promover um futuro sustentável. Veículos elétricos (VEs) são considerados uma alternativa ecológica aos veículos tradicionais movidos a combustíveis fósseis, pois não emitem CO₂ durante sua operação. A adoção generalizada de VEs pode reduzir significativamente as emissões de GEE no setor de transporte, especialmente em áreas urbanas densamente povoadas (Hawkins et al., 2019).

Além da redução direta das emissões, a mobilidade elétrica também apresenta vantagens em termos de eficiência energética. VEs são mais eficientes se comparados aos veículos a combustão interna, convertendo uma maior parte da energia armazenada em movimento útil (Woody et al., 2024). Essa eficiência energética não apenas reduz o consumo total de energia, mas também diminui a demanda por combustíveis fósseis, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas.

No entanto, a eficácia dos VEs em reduzir as emissões depende da fonte de eletricidade utilizada para carregá-los. Se a eletricidade for gerada a partir de fontes renováveis, como solar e eólica, os benefícios ambientais dos VEs são maximizados (Lindhjem et al., 2018). Por outro lado, se a eletricidade for predominantemente gerada a partir de carvão ou outras fontes não renováveis, o impacto positivo dos VEs

pode ser reduzido. Portanto, a transição para uma matriz energética mais limpa é crucial para o sucesso da mobilidade elétrica.

A infraestrutura de recarga é outro fator crítico para a adoção em larga escala de VEs. A disponibilidade e acessibilidade de estações de recarga são determinantes para a confiança do consumidor e a expansão da mobilidade elétrica (Thiel et al., 2019). Investimentos em infraestrutura de recarga, juntamente com incentivos governamentais e políticas de apoio, são essenciais para superar as barreiras atuais e promover a transição para uma mobilidade mais sustentável.

2.4. DEFINIÇÃO DE UM VEÍCULO ELÉTRICO

Os veículos elétricos (VEs) são uma inovação tecnológica que tem transformado o setor de transporte, oferecendo uma alternativa mais sustentável e eficiente aos veículos tradicionais movidos a combustíveis fósseis. Essencialmente, um VE é um automóvel que utiliza um ou mais motores elétricos para propulsão, alimentados por uma bateria recarregável. A principal vantagem dos VEs reside em sua eficiência energética superior e na capacidade de operar sem emitir poluentes durante a condução (Momoh, 2009).

A bateria é o coração dos veículos elétricos, armazenando a energia necessária para alimentar o motor elétrico. As baterias de íons de lítio são as mais utilizadas atualmente devido à sua alta densidade de energia e durabilidade (Totev, 2021). Essas baterias podem ser recarregadas através de redes elétricas, e o tempo de recarga pode variar dependendo da capacidade da bateria e do tipo de carregador utilizado. Além disso, o desenvolvimento contínuo de tecnologias de bateria está focado em aumentar a autonomia dos VEs e reduzir o tempo de recarga.

Os veículos elétricos também se destacam por sua simplicidade mecânica. Ao contrário dos motores de combustão interna, que possuem numerosas peças móveis e requerem manutenção frequente, os motores elétricos são mais simples e requerem menos manutenção. A menor necessidade de manutenção reduz os custos operacionais dos VEs ao longo de sua vida útil (Tiwari et al., 2017). Além disso, os VEs operam de maneira mais silenciosa, contribuindo para a redução da poluição sonora nas áreas urbanas.

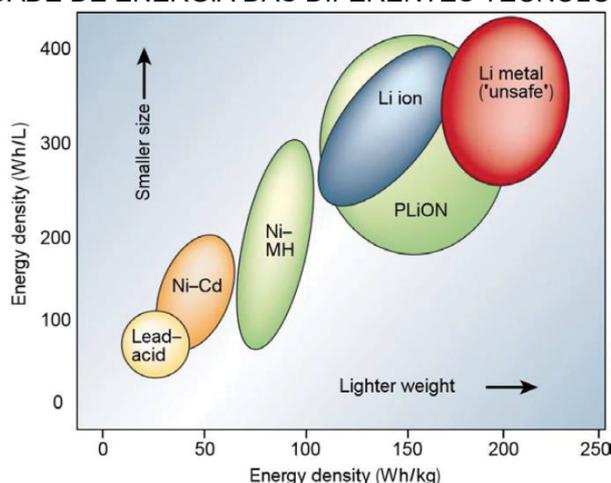
2.4.1. Componentes de um veículo elétrico

Um veículo elétrico é composto por diversos componentes principais que trabalham em conjunto para proporcionar um transporte limpo e eficiente. Os componentes fundamentais de um VE incluem a bateria e seu sistema de gestão (BMS), o sistema de recarga (OBC), o motor elétrico e o inversor, (Li et al., 2019).

A bateria de tração é o componente central de um veículo elétrico, responsável por armazenar a energia elétrica necessária para alimentar o motor. As baterias de íons de lítio são as mais utilizadas atualmente, devido à sua alta densidade de energia e longa vida útil. Essas baterias são preferidas por seu desempenho superior e capacidade de fornecer energia constante durante a operação do veículo (Wang et al., 2016). Além das baterias de íons de lítio, outras tecnologias, como baterias de estado sólido, estão sendo desenvolvidas para melhorar ainda mais a eficiência e a segurança dos VEs.

Os veículos elétricos modernos aumentaram consideravelmente suas autonomies, mas de forma geral ainda apresentam valores inferiores aos seus similares à combustão (Deng, 2015). Para exemplificar este fenômeno a figura 3 mostra a densidade de energia segundo o tipo de tecnologia empregada.

FIGURA 3 – DENSIDADE DE ENERGIA DAS DIFERENTES TECNOLOGIAS DE BATERIAS



Fonte: Li-ion batteries: basics, progress, and challenges (DENG, 2015)

Para o correto funcionamento e segurança do sistema de baterias de íons de lítio é necessário um sistema de gestão de bateria (BMS) que desempenha um papel vital na manutenção da saúde e desempenho da bateria. Ele monitora e regula a carga e descarga das células da bateria, garantindo que todas as células operem

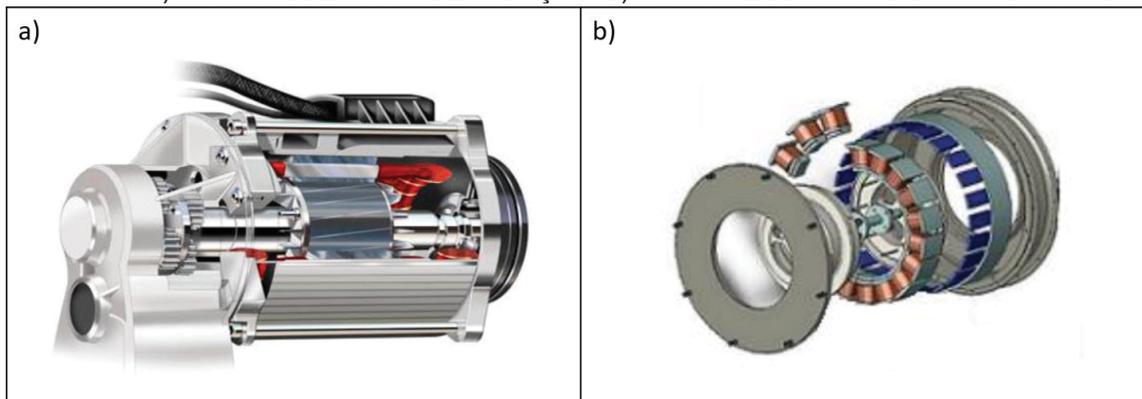
dentro de limites seguros. O BMS é indispensável para prolongar a vida útil da bateria e otimizar o desempenho do veículo (Hannan et al., 2018). Além disso, o sistema de recarga, que inclui o carregador e a infraestrutura de recarga, é também importante para garantir que os veículos elétricos possam ser recarregados de maneira eficiente e conveniente.

Outro componente indispensável de um veículo elétrico é o sistema de recarga On-Board Charger (OBC), responsável por converter a corrente alternada (AC) da rede elétrica em corrente contínua (DC) para carregar a bateria do veículo. Este processo de conversão é necessário para a operação eficiente e segura dos VEs, permitindo que os usuários carreguem seus veículos diretamente em tomadas domésticas ou estações de recarga públicas. Os sistemas OBC modernos são projetados para oferecer alta eficiência de conversão em múltiplos níveis de potência, atendendo às diversas necessidades de carregamento dos usuários (Maurya et al., 2019). Além disso, esses sistemas são equipados com tecnologias avançadas de controle e monitoramento, garantindo uma recarga otimizada e prolongando a vida útil da bateria.

O motor elétrico é outro componente indispensável dos veículos elétricos. Diferente dos motores de combustão interna, os motores elétricos convertem energia elétrica diretamente em movimento mecânico, resultando em maior eficiência energética. Os motores de ímã permanente e os motores de indução são os tipos mais comuns utilizados em VEs, devido à sua alta eficiência e confiabilidade (Chau et al., 2014).

Hoje no mercado não existe um padrão no que diz respeito aos tipos de motores elétricos de tração para mobilidade. Um levantamento realizado por Santiago et al. (2012) mostra que os fabricantes de veículos são muito conservadores quando se trata de novas tecnologias e a maioria adota um único motor de indução (IM) ou ímã permanente (PM) com um sistema de transmissão mecânico com diferencial tradicional. Na figura 4 são exemplificados os dois tipos de motores elétricos apresentados anteriormente.

FIGURA 4 – A) MOTOR ELÉTRICO DE INDUÇÃO B) MOTOR ELÉTRICO DE IMÃ PERMANENTE



Fonte: Projeto e análise ao funcionamento de carros elétricos (FREITAS, 2012)

O inversor de frequência, por sua vez, é também um componente essencial no sistema de propulsão dos veículos elétricos, responsável por converter a corrente contínua (DC) fornecida pela bateria em corrente alternada (AC) necessária para o funcionamento do motor elétrico. Este processo de conversão é usado para controlar a velocidade e o torque do motor elétrico, permitindo que o veículo opere de maneira eficiente e suave em diversas condições de condução. Os inversores de frequência modernos utilizam tecnologias avançadas de modulação e controle para otimizar o desempenho do motor elétrico, melhorando a eficiência energética e a autonomia do veículo (Crolla et al., 2012).

2.5. INFRAESTRUTURA DE RECARGA NO MUNDO PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS

A infraestrutura de recarga é um componente chave para massificação da mobilidade elétrica global. Com a crescente adoção de veículos elétricos (VEs), a demanda por estações de recarga eficientes e acessíveis tem aumentado significativamente. A expansão da infraestrutura de recarga é fundamental para garantir a conveniência e a confiança dos consumidores, promovendo a transição para veículos elétricos (Sierzchula et al., 2014). O artigo destaca que a disponibilidade de pontos de recarga públicos e privados influencia diretamente a decisão dos consumidores de adquirir VEs.

A União Europeia tem implementado políticas robustas para apoiar a expansão da infraestrutura de recarga. Países como Noruega, Alemanha e Países Baixos lideram a implementação de estações de recarga devido a políticas de incentivo fiscal

e subsídios governamentais (Jochem et al., 2015). A padronização dos tipos de conectores e a interoperabilidade entre diferentes redes de recarga são fatores que têm facilitado a integração e a expansão da infraestrutura na região.

A China é outro exemplo significativo, com um rápido crescimento na infraestrutura de recarga impulsionado por políticas governamentais agressivas. A China tem investido pesadamente em estações de recarga tanto públicas quanto privadas, e as grandes cidades, como Pequim e Xangai, já possuem uma vasta rede de pontos de recarga (Li et al., 2018). A estratégia da China envolve também o desenvolvimento de tecnologia de recarga ultrarrápida, que visa atender à crescente demanda dos usuários de VEs.

No Brasil, a infraestrutura de recarga para veículos elétricos (VEs) ainda enfrenta muitos desafios, limitando a expansão do mercado de mobilidade elétrica no país. A falta de uma rede ampla e eficiente de estações de recarga é um dos principais obstáculos para a adoção em massa de VEs no Brasil (Bitencourt et al., 2023). A maioria das estações de recarga está concentrada nas principais capitais, deixando vastas áreas do país sem cobertura adequada. Essa distribuição desigual impede que os motoristas de VEs façam viagens longas com confiança, restringindo a mobilidade apenas a áreas urbanas.

Além da distribuição inadequada, a infraestrutura de recarga no Brasil também sofre com a falta de padronização e interoperabilidade entre diferentes redes de recarga. A ausência de um padrão unificado para conectores e sistemas de pagamento dificulta a integração e a expansão das estações de recarga (de Oliveira et al., 2022). Motoristas de VEs muitas vezes enfrentam dificuldades ao tentar usar estações de diferentes fornecedores, o que pode desincentivar a adoção desses veículos no país. A falta de uma regulamentação clara e incentivos governamentais específicos para a instalação de pontos de recarga também contribui para a lenta expansão da infraestrutura.

Outro desafio significativo é o alto custo de instalação e manutenção das estações de recarga. Os investimentos necessários para desenvolver uma rede robusta de recarga são elevados, e o retorno sobre o investimento pode ser incerto devido à baixa densidade atual de VEs no país (Berhorst et al., 2024). Esse cenário cria um ciclo vicioso onde a falta de infraestrutura limita a adoção de VEs, e a baixa adoção de VEs, por sua vez, desencoraja novos investimentos em infraestrutura de recarga. Para superar esses desafios, é essencial que o governo brasileiro

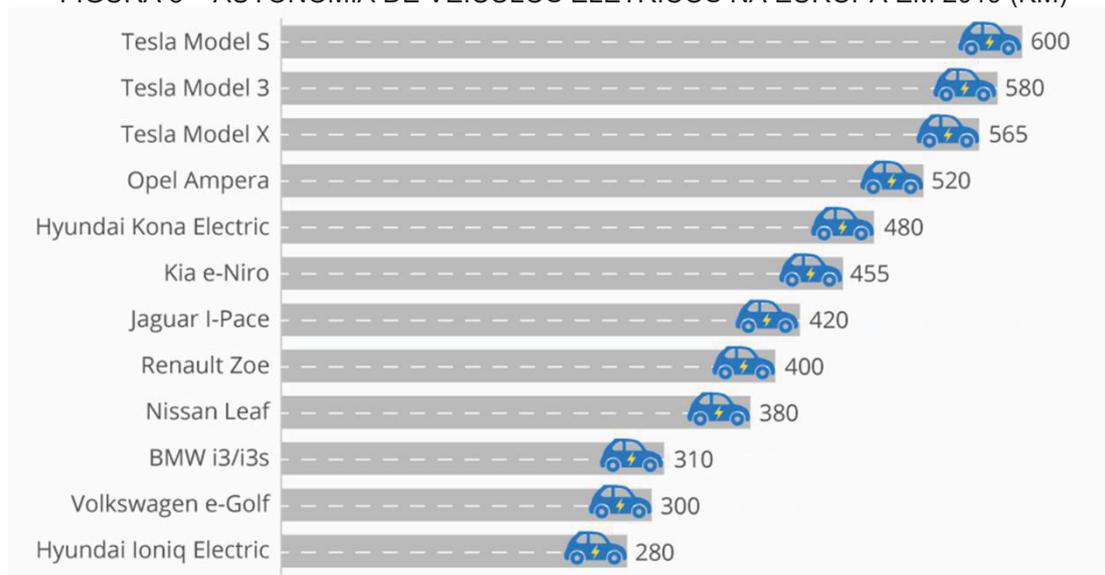
implemente políticas de incentivo e parcerias público-privadas que facilitem a expansão da rede de recarga e tornem a mobilidade elétrica uma opção viável para mais consumidores.

2.6. AUTONOMIA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS: LIMITAÇÕES ATUAIS E VISÃO PARA O FUTURO

Outro fator a ser levado em consideração por consumidores na opção por veículos elétricos (VEs) é a autonomia. A autonomia refere-se à distância que um veículo elétrico pode percorrer com uma única carga da bateria, e é frequentemente uma preocupação central para os potenciais compradores. Um estudo de Rauh & Wood (2015) deixa claro que a autonomia limitada é uma das principais barreiras para a aceitação generalizada dos VEs, com muitos consumidores receosos de que os VEs não ofereçam a mesma conveniência que os veículos a combustão interna, especialmente para viagens mais longas.

Atualmente, a autonomia dos VEs varia significativamente entre diferentes modelos e fabricantes. Modelos de ponta podem percorrer mais de 600 km com uma única carga, enquanto opções mais acessíveis geralmente têm autonomia entre 200 e 300 km, como visto na figura 5. Esta variação é influenciada por fatores como a capacidade da bateria, a eficiência do motor, o peso do veículo e o uso de acessórios elétricos, como ar-condicionado e aquecedores. Além disso, as condições climáticas extremas podem afetar negativamente a autonomia, com o desempenho das baterias sendo prejudicado em temperaturas muito altas ou muito baixas. Essas variáveis são cruciais para entender as limitações atuais da autonomia dos VEs (Holland et al., 2016).

FIGURA 5 – AUTONOMIA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NA EUROPA EM 2019 (KM)



Fonte: <https://www.statista.com/chart/17132/the-electric-cars-that-will-get-you-the-furthest/>. Último acesso 17/08/2024

Para superar essas limitações, a indústria automotiva está investindo consideravelmente em pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias de baterias. As baterias de íons de lítio, atualmente a tecnologia dominante, estão sendo constantemente melhoradas em termos de densidade energética e durabilidade. Além disso, novas tecnologias de baterias, como as baterias de estado sólido e de lítio-enxofre, estão sendo exploradas por seu potencial de oferecer maior autonomia e segurança. Esses avanços tecnológicos são fundamentais para estender a autonomia dos VEs e tornar a mobilidade elétrica mais atraente para um público mais amplo (Moghadasi et al., 2024).

Olhando para o futuro, a visão para a autonomia dos VEs é promissora. Com o contínuo avanço das tecnologias de baterias e a expansão da infraestrutura de recarga, espera-se que os VEs possam oferecer autonomias comparáveis ou até superiores às dos veículos a combustão interna, o que ainda é um desafio. A integração de tecnologias inteligentes, como sistemas de gerenciamento de energia e recarga bidirecional, também pode contribuir para uma utilização mais eficiente da energia disponível.

2.7. REGULAMENTAÇÃO DE HOMOLOGAÇÃO DE AUTONOMIA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NO BRASIL

A homologação de autonomia de veículos elétricos no Brasil é um processo aplicado para garantir que os consumidores recebam informações precisas e confiáveis sobre a eficiência e o desempenho dos veículos que estão adquirindo. Este processo é regulamentado por normas e diretrizes estabelecidas por órgãos governamentais, que visam padronizar os métodos de medição e assegurar a transparência no mercado automotivo. A clareza e a uniformidade nas regulamentações são essenciais para a construção da confiança dos consumidores e para a promoção da adoção de veículos elétricos (de Oliveira et al., 2022).

No Brasil, o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) é o principal órgão responsável pela regulamentação e homologação de veículos elétricos. De acordo com as diretrizes do INMETRO, a autonomia de um veículo elétrico deve ser medida em condições controladas de laboratório, utilizando ciclos de condução padrão que simulem diferentes condições de trânsito e tipos de rodovias. Esses testes são fundamentais para fornecer uma estimativa realista da autonomia que os consumidores podem esperar em situações de uso cotidiano (Rauh et al., 2015).

A metodologia utilizada pelo INMETRO para homologação de autonomia de veículos elétricos é baseada em normas internacionais, como o ciclo de condução *US Combined*. Este ciclo foi originalmente concebido nos Estados Unidos para homologação de autonomia de veículos elétricos naquele país, reconhecido globalmente e proporciona uma medida precisa e representativa da autonomia. A adoção de padrões internacionais facilita a comparação entre diferentes modelos de veículos e fabricantes e melhora a transparência no mercado (Jochem et al., 2015).

Além dos testes de laboratório, a regulamentação brasileira também exige que os fabricantes forneçam informações detalhadas sobre os fatores que podem influenciar a autonomia dos veículos elétricos, como temperatura ambiente, topografia e estilo de condução. Essas informações são mandatórias para que os consumidores possam tomar decisões informadas e ajustar suas expectativas de acordo com suas condições de uso específicas (Hannan et al., 2018). Isso contribui para uma maior satisfação do usuário e para a confiança no mercado de veículos elétricos.

2.7.1. Instrução normativa SAE J1634

A instrução normativa SAE J1634, desenvolvida pela *Society of Automotive Engineers* (SAE), é um padrão que descreve detalhadamente o procedimento para a medição da eficiência energética e autonomia de veículos elétricos (VEs). Este padrão estabelece procedimentos uniformes para testar a eficiência dos VEs em condições controladas de laboratório, garantindo que os resultados sejam consistentes e comparáveis (SAE_J1634_2017 (EN)).

Utilizando o Brasil como referência para homologação de autonomia de veículos elétricos, o teste de eficiência energética de acordo com a SAE J1634 envolve simular um ciclo de condução específico que reflete diferentes condições de condução, como urbano, rodoviário e combinado. Esses ciclos são projetados para reproduzir padrões reais de condução, oferecendo uma estimativa realista da eficiência energética e da autonomia dos veículos elétricos (SAE_J1634_2017 (EN)).

Além de medir a eficiência energética, a instrução normativa SAE J1634 também fornece diretrizes para a avaliação de outros aspectos críticos dos veículos elétricos, como a capacidade da bateria, a eficiência do sistema de recarga e o desempenho em diferentes condições climáticas. Isso é particularmente importante à medida que os fabricantes buscam melhorar a autonomia e a eficiência dos seus modelos de VEs para atender às expectativas dos consumidores (SAE_J1634_2017 (EN)).

A implementação da norma SAE J1634 tem um impacto significativo no mercado automotivo, incentivando a transparência e a competitividade. Fabricantes que aderem a esses padrões podem demonstrar o desempenho superior de seus veículos de maneira verificável, aumentando a confiança dos consumidores e facilitando a adoção de veículos elétricos. A harmonização dos padrões de teste, como a SAE J1634, com outras normas internacionais, fortalece a cooperação global na promoção de tecnologias de transporte limpo e eficiente (Sierzchula et al., 2014). Assim, a SAE J1634 não só ajuda a padronizar os testes de eficiência e autonomia dos VEs, mas também contribui para um futuro mais sustentável no setor de mobilidade.

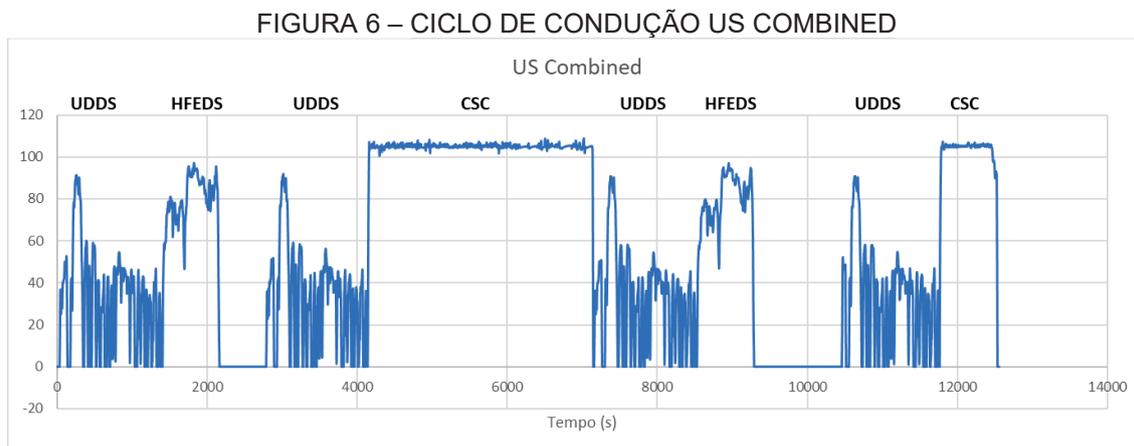
O procedimento de homologação segue o ciclo de condução *US Combined* (visto na figura 6) e é um dos padrões mais reconhecidos para a avaliação da eficiência e autonomia de veículos elétricos (VEs) nos Estados Unidos e utilizado também no Brasil. Este procedimento é desenvolvido pela *Environmental Protection Agency* (EPA) e combina dois ciclos de condução principais: o ciclo urbano (*Urban Dynamometer Driving Schedule*, UDDS) e o ciclo rodoviário (*Highway Fuel Economy Test*, HWFET). A metodologia *US Combined* fornece uma estimativa abrangente e realista do desempenho dos VEs em condições de uso misto, refletindo tanto a condução em áreas urbanas quanto em rodovias (Sovacool et al., 2017).

O ciclo urbano UDDS simula a condução em áreas metropolitanas, com frequentes paradas e partidas, velocidades médias mais baixas e períodos de marcha lenta. Já o ciclo rodoviário HWFET simula a condução em rodovias, com velocidades mais constantes e maiores. Ao combinar esses dois ciclos, o procedimento *US Combined* oferece uma avaliação mais equilibrada da eficiência energética e da autonomia do veículo. Essa abordagem permite que os consumidores obtenham uma visão mais precisa de como o veículo se comporta em diferentes cenários de condução, orientando uma decisão de compra mais informada e avaliando diferentes veículos de forma mais abrangente (Plotz et al., 2018).

O procedimento de homologação *US Combined* não apenas avalia a autonomia dos VEs, mas também analisa a eficiência do consumo de energia. Os testes são realizados em condições controladas de laboratório, onde o veículo é submetido a uma série de testes padronizados que simulam situações de condução realistas. Essa padronização é essencial para garantir que os resultados sejam consistentes e comparáveis entre diferentes modelos de veículos e fabricantes (Nealer et al., 2015). Além disso, os testes consideram fatores como o uso de acessórios elétricos (ar-condicionado, aquecedores) que podem influenciar significativamente a autonomia e a eficiência energética do veículo.

Os resultados dos testes *US Combined* são divulgados em etiquetas de eficiência energética, conhecidas como *Monroney Stickers* e que, no Brasil, fazem parte do programa governamental de etiquetagem e eficiência energética, que são afixadas nos veículos novos. Estas etiquetas fornecem informações diversas e importantes sobre a autonomia, a eficiência energética e os custos operacionais esperados, permitindo que os consumidores comparem diferentes modelos, marcas e tecnologias de forma direta e transparente. Essa transparência é fundamental para

promover a adoção de VEs, pois ajuda a construir confiança na tecnologia e a destacar os benefícios econômicos e ambientais dos veículos elétricos (Rauh et al., 2015). Com o contínuo avanço das tecnologias de VEs e a crescente demanda por soluções de transporte sustentável, o procedimento *US Combined* continua a desempenhar um papel vital na padronização e na promoção da mobilidade elétrica.



Fonte: O autor

2.8. SISTEMAS DE AUTONOMIA ESTENDIDA PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS

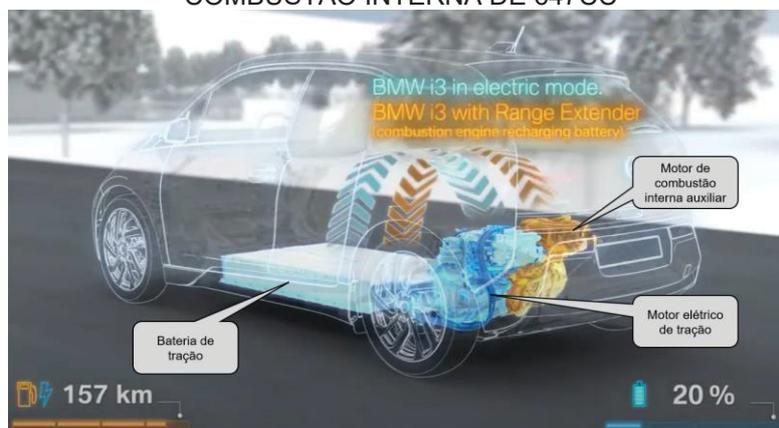
O aumento dos preços da energia levou a um novo interesse no desenvolvimento de veículos elétricos, mas ao mesmo tempo muitos podem ver um veículo elétrico como uma alternativa inferior ao carro movido a gasolina em função da autonomia limitada, tempo necessário para recarregar a bateria e disponibilidade limitada da infraestrutura. Além disso, há a concorrência com os veículos híbridos que não exigem investimento em infraestrutura e que apresentam boa autonomia. Por esta característica muitos consumidores adquirem veículos elétricos como um segundo carro, além de possuírem um veículo à combustão comum. Ao mesmo tempo, melhorias na eficiência de uma tecnologia de veículo híbrido pode levar à adoção de um veículo deste tipo como o único carro doméstico (Bilotkach, 2012).

Nos últimos anos, intensificaram-se os esforços para impulsionar o *powertrain* elétrico como parte da matriz de transporte nas principais cidades do mundo. Os veículos elétricos (EVs) podem ser a solução promissora para atender aos rigorosos regulamentos de emissões, além de serem ambientalmente favoráveis. O principal fator é a densidade limitada de energia das baterias atuais, 0,565 MJ/kg para bateria

de íons de lítio em comparação com o combustível fóssil com 43,448 MJ/kg (referência gasolina comercial). Melhorar a autonomia dos EVs adicionando baterias maiores poderia afetar negativamente seu desempenho, pois o motor elétrico deve ser mais potente e mais energia será necessária para conduzir o peso extra. Além disso, o longo tempo de recarga da bateria e a escassez de infraestrutura de carregamento, especialmente nos países em desenvolvimento, têm sido um obstáculo à popularização dos veículos elétricos (Xian et al., 2016).

A limitada autonomia de veículos elétricos ainda gera medo e ansiedade de que não haverá energia suficiente para chegar ao seu destino, mas a adoção de uma unidade auxiliar de potência pode minimizar ou mesmo resolver o problema. Atualmente, muitos sistemas e configurações de veículos elétricos de autonomia estendida (EREVs) foram propostos para aumentar a energia disponível. Os sistemas de extensão de autonomia podem ser baseados em recuperação de energia (via frenagem regenerativa ou recuperação através do movimento dos amortecedores, por exemplo) ou mesmo utilizando uma fonte externa (um motor de combustão interna estacionário ou uma pilha de combustível, por exemplo) (Puma-Benavides et al., 2021, Sarlioglu et al., 2015).

FIGURA 7 – BMW i3 COM OPÇÃO DE EXTENSOR DE AUTONOMIA UTILIZANDO MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA DE 647CC



Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=j1z8O8V1rHk>. Último acesso 17/08/2024

Outra abordagem para estender a autonomia dos VEs é o uso de baterias auxiliares removíveis ou modulares, como pode ser visto na figura 8. Essas baterias adicionais podem ser instaladas no veículo quando se prevê a necessidade de percorrer distâncias maiores do que o habitual. Essa abordagem é particularmente útil para veículos comerciais que podem necessitar de maior autonomia em

determinadas rotas ou operações (de Oliveira et al., 2022). As baterias auxiliares podem ser recarregadas separadamente e trocadas conforme necessário, oferecendo uma solução flexível e escalável para aumentar a autonomia dos VEs.

FIGURA 8 – SISTEMA DE EXTENSÃO DE AUTONOMIA UTILIZANDO BATERIA AUXILIAR EXTERNA



Fonte: <https://eptender.com/en/>. Último acesso 17/08/2024

O conceito de veículos elétricos alimentados por hidrogênio, ou veículos elétricos de célula de combustível (FCEV, do inglês *Fuel Cell Electric Vehicle*), também está ganhando força como uma solução de autonomia estendida. Esses veículos utilizam células de combustível para converter hidrogênio em eletricidade, que é então usada para alimentar o motor elétrico. Os FCEVs podem oferecer autônias comparáveis ou até superiores aos veículos a combustão interna, com tempos de reabastecimento semelhantes aos dos combustíveis fósseis tradicionais (Sierzchula et al., 2014).

Uma opção promissora para soluções de extensão de autonomia de veículos elétricos é através do uso de pilhas de combustível, e que têm ganhado destaque como uma solução alternativa para a mobilidade sustentável, oferecendo uma série de vantagens significativas em relação aos motores de combustão interna e às baterias convencionais. Uma das principais vantagens das pilhas de combustível é sua alta eficiência energética. As pilhas de combustível podem converter hidrogênio em eletricidade com eficiência de até 60%, comparado aos motores de combustão interna que operam com eficiência média de 25-30% (Wu et al., 2008). Isso significa que uma maior proporção da energia do combustível é utilizada para propulsão, resultando em menos desperdício e maior economia de energia.

Além da eficiência, as pilhas de combustível oferecem vantagens ambientais consideráveis. Diferente dos motores de combustão interna, que emitem dióxido de

carbono (CO₂) e outros poluentes nocivos, as pilhas de combustível emitem apenas vapor d'água como subproduto. Este aspecto ambientalmente amigável torna as pilhas de combustível uma tecnologia atraente para a redução de emissões de gases de efeito estufa e poluição do ar. A adoção de veículos com pilhas de combustível pode desempenhar um papel considerável na mitigação das mudanças climáticas e na melhoria da qualidade do ar urbano (Staffell et al., 2019).

Outro ponto a favor das pilhas de combustível é a rapidez no reabastecimento comparado às baterias convencionais. Enquanto a recarga completa de uma bateria de íons de lítio pode levar várias horas, o reabastecimento de hidrogênio em um veículo com pilha de combustível pode ser realizado em poucos minutos, semelhante ao tempo necessário para abastecer um veículo a gasolina ou diesel. Este benefício de conveniência é destacado por Hassan et al. (2023), onde é enfatizado que a rapidez do reabastecimento é um fator crítico para a aceitação ampla dos veículos movidos a hidrogênio, especialmente para usos comerciais e de longa distância.

As pilhas de combustível também oferecem maior durabilidade e menor degradação de desempenho ao longo do tempo, em comparação com as baterias convencionais. As baterias de íons de lítio, por exemplo, tendem a perder capacidade e eficiência após múltiplos ciclos de carga e descarga, enquanto as pilhas de combustível mantêm sua eficiência e capacidade de geração de energia por um período mais longo. Essa durabilidade estendida resulta em menores custos de manutenção e substituição ao longo da vida útil do veículo, tornando as pilhas de combustível uma opção economicamente viável a longo prazo (Ding et al., 2019). Assim, ao combinar alta eficiência energética, vantagens ambientais, rapidez no reabastecimento e durabilidade, as pilhas de combustível emergem como uma tecnologia de ponta para o futuro da mobilidade sustentável.

2.9. SISTEMAS DE GESTÃO E CONTROLE DE TRANSFERÊNCIA DE CARGA PARA EXTENSORES DE AUTONOMIA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

Os sistemas de gestão e controle de transferência de carga são componentes que norteiam a aplicação, a eficiência e funcionalidade dos extensores de autonomia em veículos elétricos (VEs), apesar de serem ainda objeto escasso de estudo na literatura. Esses sistemas devem garantir que a transferência de energia entre a fonte

de extensão de autonomia e a bateria de tração do veículo elétrico seja realizada de maneira otimizada e sem interrupções. A gestão eficiente da transferência de carga pode melhorar significativamente a eficiência energética do veículo e aumentar sua autonomia total (Ding et al., 2024).

Um dos principais desafios desses sistemas é a necessidade de integração suave e compatível entre diferentes fontes de energia. Para os VEs que utilizam extensores de autonomia à base de motores de combustão interna é essencial que a transição entre o uso da energia fornecida pela bateria e o uso da energia gerada pelo motor seja praticamente imperceptível para o usuário. A implementação de algoritmos de controle avançados que monitoram continuamente o estado de carga da bateria, as demandas de potência do veículo e as condições de operação do extensor de autonomia é fundamental para garantir essa integração suave (Yao et al., 2021).

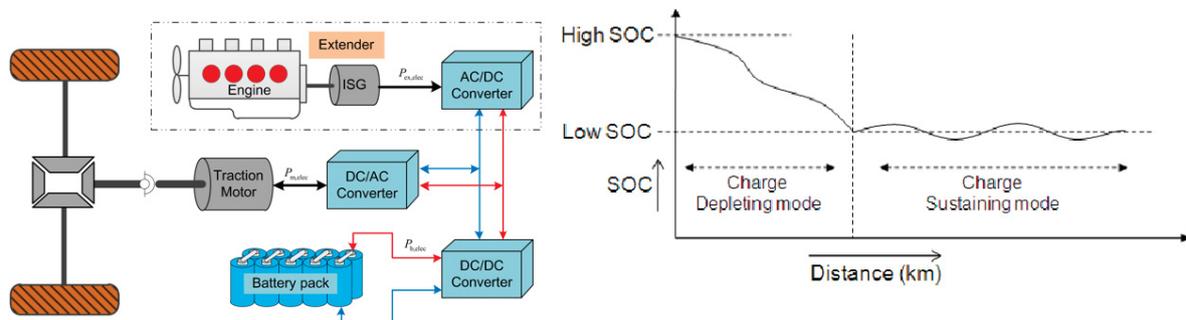
Além da integração, os sistemas de gestão e controle de transferência de carga também devem ser capazes de otimizar o uso das diferentes fontes de energia com base em critérios de eficiência e durabilidade. A otimização pode incluir a priorização do uso da bateria em condições de baixa demanda de energia e a ativação do extensor de autonomia durante picos de demanda ou quando a carga da bateria atinge níveis críticos (Chen et al., 2014). Esta abordagem não apenas maximiza a eficiência energética, mas também prolonga a vida útil da bateria ao evitar ciclos de descarga profunda.

Os avanços recentes em tecnologias de comunicação e sensores têm permitido o desenvolvimento de sistemas de gestão e controle cada vez mais sofisticados e precisos. A utilização de redes de sensores para monitoramento em tempo real e a aplicação de técnicas de aprendizado de máquina para prever as demandas de energia são exemplos de como a tecnologia está sendo utilizada para melhorar a gestão de transferência de carga. Conforme apresentado e discutido por Li et al., (2021), essas inovações estão permitindo que os VEs com extensores de autonomia alcancem níveis de desempenho e eficiência que eram inimagináveis há poucos anos. Em resumo, os sistemas de gestão e controle de transferência de carga são fundamentais para o sucesso dos extensores de autonomia, contribuindo para a viabilidade e a adoção generalizada dos veículos elétricos.

2.9.1. Gestão e controle de transferência dinâmica de carga para extensores de autonomia de veículos elétricos

Diferentemente da recarga estática da bateria de um veículo elétrico ligado a infraestrutura de recarga, a transferência de energia de um sistema de extensão de autonomia deve levar em conta o caráter dinâmico da ação e determinam a sua eficiência. Sua arquitetura de funcionamento pode ser vista na figura 9. Duas estratégias amplamente utilizadas para essa finalidade são os modos *charge depleting* (CD) e *charge sustaining* (CS). No modo CD, o objetivo é maximizar a utilização da energia armazenada na bateria, permitindo que o nível de carga diminua continuamente até atingir um limite predeterminado. Esse método é ideal para viagens curtas, onde a recarga pode ser realizada com facilidade. A estratégia CD pode melhorar a eficiência energética do veículo, uma vez que prioriza o uso da energia elétrica em vez do combustível fóssil, em uma opção de aplicação híbrida (Ding et al., 2024).

FIGURA 9 – ARQUITETURA ELÉTRICA DE UM SISTEMA DE EXTENSOR DE AUTONOMIA E MODOS DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA



Fonte: O autor

Por outro lado, o modo CS é projetado para manter o estado de carga da bateria dentro de uma faixa específica, ativando o extensor de autonomia quando necessário para evitar que a bateria se esgote completamente. Esta abordagem é particularmente útil para viagens mais longas, onde a disponibilidade de estações de recarga pode ser limitada. A estratégia CS garante que o veículo tenha sempre uma reserva de energia suficiente, proporcionando uma operação mais confiável e prolongando a vida útil da bateria (Yao et al., 2021). A implementação eficaz dessas estratégias requer sistemas de controle avançados que monitorem continuamente o estado de carga da bateria e as condições de operação do veículo.

A combinação das estratégias CD e CS pode otimizar ainda mais a eficiência dos VEs com extensores de autonomia. O uso integrado dessas duas estratégias permite que o veículo alterne dinamicamente entre modos, adaptando-se às condições de condução e às demandas de energia em tempo real (Chen et al., 2014). Por exemplo, o veículo pode operar no modo CD durante a parte inicial de uma viagem, quando a bateria está completamente carregada, e alternar para o modo CS à medida que o nível de carga diminui, garantindo uma utilização mais eficiente e prolongada da energia disponível. Essa gestão dinâmica de carga não apenas maximiza a autonomia do veículo, mas também melhora a experiência de condução ao oferecer um desempenho consistente e confiável.

2.10. DESAFIOS

A revisão bibliográfica apresentou o estado da arte da literatura relacionado a transição da mobilidade para uma solução ambientalmente correta, ao desenvolvimento de veículos elétricos e extensores de autonomia. Entretanto o caminho para a substituição dos veículos a combustão por veículos elétricos ainda é longo e apresenta grandes lacunas e desvantagens do ponto de vista do usuário e aplicação em grande escala.

Verifica-se então que são necessárias iniciativas de caráter inovador que possam viabilizar a utilização massiva dos veículos elétricos pela sociedade. Dentre essas iniciativas, podem ser citadas:

1. Autonomia da Bateria: A autonomia limitada das baterias atuais ainda é uma preocupação para muitos consumidores, especialmente para viagens longas.
2. Infraestrutura de Recarga: A falta de uma infraestrutura de recarga ampla e eficiente limita a conveniência e a praticidade dos veículos elétricos (VEs).
3. Tempo de Recarga: Embora a tecnologia de recarga rápida esteja avançando, os tempos de recarga das baterias ainda são significativamente mais longos do que o reabastecimento de veículos a combustão.

4. Durabilidade e Ciclo de Vida das Baterias: A degradação das baterias ao longo do tempo e com múltiplos ciclos de carga e descarga pode reduzir a vida útil dos veículos elétricos.
5. Fontes alternativas de energia: Viabilizar sistemas de geração distribuída e sustentável de energia.

2.11. OBJETIVOS

2.11.1. Objetivo Geral

Dentre os desafios listados no item 2.10, define-se como objetivo geral desta dissertação: Desenvolvimento e caracterização de sistema de conexão e controle de carregamento sustentável de baterias de veículo elétrico.

2.11.2. Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

1. Projetar e construir um sistema experimental de carregamento de baterias de veículo elétrico;
2. Obtenção e análise de dados experimentais no sistema construído;
3. Definir funções objetivo que caracterizem o desempenho do sistema.
4. Caracterização do sistema.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

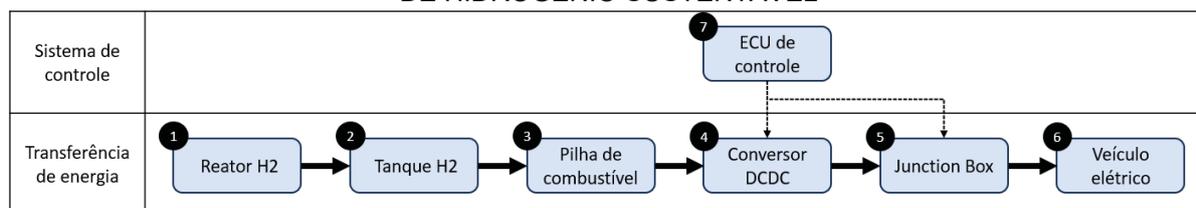
O presente capítulo apresenta detalhes sobre o aparato experimental que se fez necessário para alcançar os objetivos do trabalho. Desde o hidrogênio utilizado para alimentar a pilha de combustível até o veículo elétrico utilizado para a análise, bem como equipamentos utilizados para a medição dos parâmetros. Ao final, é apresentada também a metodologia aplicada para a obtenção dos dados.

3.1. PROJETAR E CONSTRUIR UM SISTEMA EXPERIMENTAL DE CARREGAMENTO DE BATERIAS DE VEÍCULO ELÉTRICO

O presente projeto, desenvolvimento e caracterização de sistema de conexão e controle de carregamento sustentável de baterias de veículo elétrico, é parte integrante do projeto de pesquisa denominado “Desenvolvimento de solução de autonomia estendida para veículos elétricos a partir de hidrogênio sustentável e pilha de combustível” (Vargas, 2020) e tem como objeto a transferência de energia elétrica do proposto extensor de autonomia, gerada pela pilha de combustível, para o sistema do veículo elétrico.

Na figura 10 é mostrado o diagrama esquemático da arquitetura do sistema completo, mostrados os subsistemas presentes no projeto.

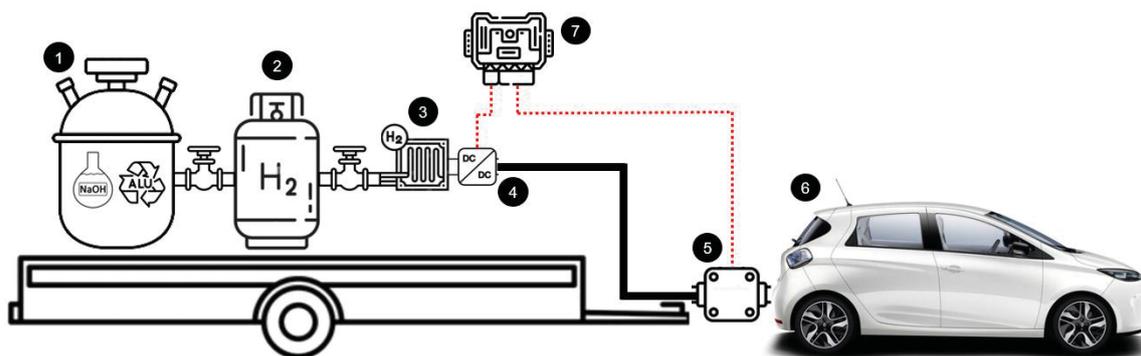
FIGURA 10 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO SISTEMA DE AUTONOMIA ESTENDIDA A PARTIR DE HIDROGÊNIO SUSTENTÁVEL



Fonte: O autor

De forma ilustrativa, a figura 11 apresenta o projeto completo e a disposição dos subsistemas.

FIGURA 11 – ESQUEMA COMPLETO DO PROJETO E DISPOSIÇÃO DOS SUBSISTEMAS



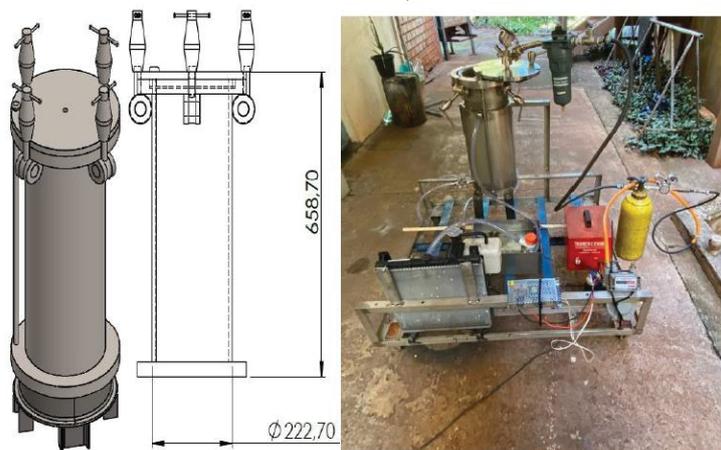
Fonte: O autor

1. Reator de hidrogênio;
2. Tanque de armazenamento de hidrogênio;
3. Pilha de combustível;
4. Conversor DCDC;
5. Junction Box;
6. Veículo elétrico;
7. ECU de controle.

3.1.1. Reator de hidrogênio

O reator de hidrogênio é a unidade onde temos a realização da reação do alumínio reciclável, vindo das latas de bebidas descartadas e o hidróxido de sódio em meio aquoso. Na figura 12 é mostrado o reator fabricado pela equipe da UEM em colaboração com a equipe da UFPR.

FIGURA 12 – REATOR DE HIDROGÊNIO, PARCERIA ENTRE UEM E UFPR



Fonte: Relatório-Trimestral-Nr-4-Proj-FUNDEP-ROTA-2030

O reator de geração de H_2 nas dimensões que foi construído em aço inox e apresenta um volume útil de 18 L. Isso permite operação segura até a $P_{max} = 20bar$ (pressão máxima de operação) conforme os experimentos realizados demonstraram.

A produção prévia experimental de H_2 foi de 44,35g no experimento de melhor resultado, o que possibilitou a operação de um maçarico na oficina durante 10 min (Vargas, 2022). Essa produção será aumentada com a otimização experimental do sistema, que está em andamento.

3.1.2. Tanque de armazenamento de hidrogênio

Para garantir o correto e contínuo funcionamento da pilha de combustível e assegurar uma eficiente transferência de energia do sistema de extensão de bateria para o veículo elétrico foi necessário adicionar um tanque de armazenamento de hidrogênio gerado pelo reator. Foi criado assim o que foi denominado de pulmão, evitando variações de pressão e fluxo de hidrogênio para a pilha de combustível.

O tanque escolhido foi construído em aço para armazenamento de gás hidrogênio e é fabricado utilizando tubos de aço SAE 4130. Este tanque é equipado com uma válvula padrão ABNT 218-2 e possui uma rosca interna do gargalo tipo 3/4" NGT, assegurando compatibilidade com os padrões industriais. O sistema pode ser visto na figura 13.

FIGURA 13 – CILINDRO DE GIFEL UTILIZADO NOS TESTES



Fonte: O autor

Na tabela 1 são apresentadas as características fornecidas pelo fabricante.

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS DO TANQUE DE HIDROGÊNIO

Código	Fabricante	Capacidade (L)	Dimensões (mm)	Peso (kg)	Pressão máxima (bar)	Norma
235.050.209	Gifel	50	235 x 1390	55,5	200	ISO 9809-1

Fonte – Gifel

3.1.3. Pilha de combustível

Para o projeto do extensor de autonomia foi realizada a aquisição de uma pilha de combustível de tecnologia PEM (*Proton Exchange Membrane*) de 5 kW da marca Horizon, que pode ser vista na figura 14.

FIGURA 14 – PILHA DE COMBUSTÍVEL PEM HORIZON DE 5KW

5000W Fuel Cell Stack
User Manual



Fonte: Manual Horizon 5000W Fuel Cell Stack

A pilha de combustível é capaz de fornecer 5 kW e apresenta as características fornecidas na tabela 2.

TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS DA PILHA DE COMBUSTÍVEL HORIZON PEM 5KW

Tipo de célula de combustível	PEM (<i>Proton Exchange Membrane</i>)
Número de células	120
Potência nominal	5000 W
Performance	72V @ 70A
Tensão da válvula de alimentação H2	12 V
Tensão da válvula de purga	12 V
Tensão do ventilador	24 V
Reagentes	Hidrogênio e Ar
Temperatura externa	5 até 30°C
Max stack temperatura	65°C
Pressão H2	0.45-0.55 bar
Pureza hidrogênio	≥99.995 % H ₂ seco
Umidificação	Auto umidificada
Refrigeração	Ar (ventilador integrado)
Peso (com ventilador e carcaça)	30 kg (±200 g)

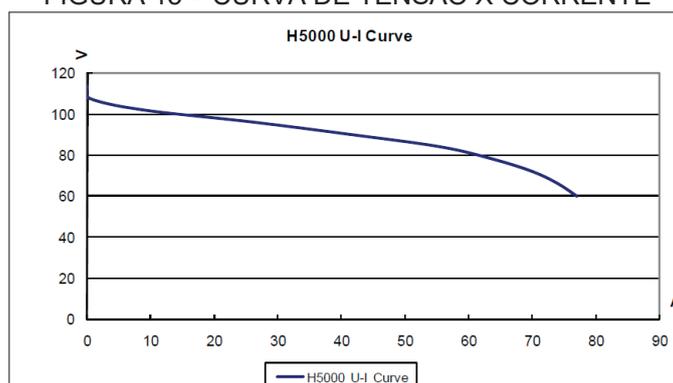
Controlador	2.5 kg (± 100 g)
Dimensões	65 cm x 35 cm x 21.2 cm
Fluxo em máxima potência	65 L/min
Tempo de partida	≤ 30 s em temperatura ambiente
Eficiência do stack	40% @ 72 V
Desligamento baixa tensão	60 V
Desligamento de sobrecorrente	90 A
Desligamento de sobre temperatura	65°C
Fonte externa de potência	24 V (± 1 V), 8 A~12 A

Fonte: Manual Horizon 5000 W Fuel Cell Stack

A pilha de combustível Horizon escolhida apresenta características de desempenho descritas para condições operacionais padrão, definidas ao nível do mar e à temperatura ambiente.

Na figura 15 é apresentada a curva característica de tensão em função da corrente fornecida pelo fabricante, onde é evidenciado uma tensão de polarização em circuito aberto de em torno de 115 V.

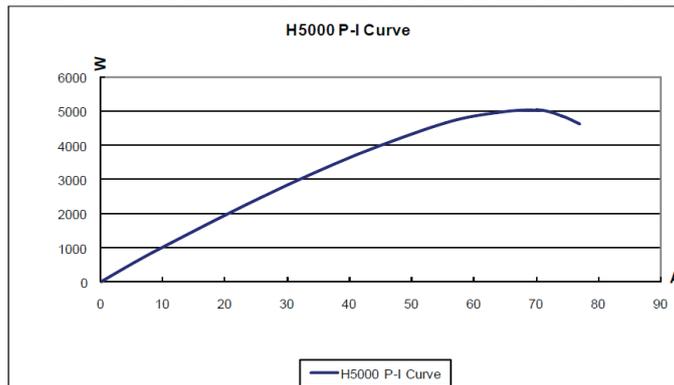
FIGURA 15 – CURVA DE TENSÃO X CORRENTE



Fonte: Manual Horizon 5000 W Fuel Cell Stack

Na figura 16 é apresentada a curva característica de potência de saída em função da corrente. De antemão, verificamos pela informação disponibilizada pelo fabricante que temos um platô posicionado na zona de potência máxima onde não temos alteração de potência de saída mesmo aumentando a demanda de corrente, o que nos indica possivelmente um pico de eficiência de operação.

FIGURA 16 – CURVA DE POTÊNCIA DE SAÍDA X CORRENTE



Fonte: Manual Horizon 5000 W Fuel Cell Stack

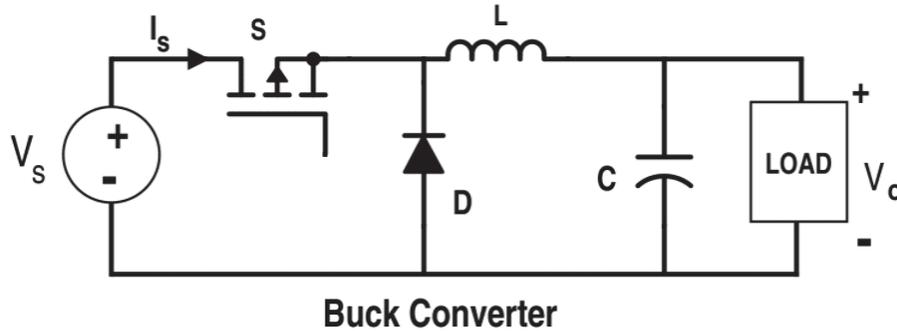
3.1.4. Conversor DCDC

Para que haja compatibilidade entre a pilha de combustível que fornece 5 kW a 72 V e o barramento de alta tensão do veículo elétrico é necessário um dispositivo capaz de aumentar a tensão, que será realizado através de um conversor DCDC ajustável. O veículo em estudo, Renault Zoe apresenta o sistema de alta tensão em 400 V.

Para que o extensor de autonomia proposto tenha versatilidade e relevância comercial é importante que ele seja ajustável. Neste projeto usamos a referência de 400 V para alta tensão do barramento elétrico do veículo em questão, Renault Zoe com bateria completamente carregada.

Um conversor DCDC é um dispositivo eletrônico de tensão que realiza a conversão aplicando tensão contínua pulsada em um indutor ou transformador com determinada frequência (usualmente na faixa de 100 kHz a 5 MHz) e que faz com que o fluxo de corrente gere energia magnética armazenada, que é então aproveitada em uma saída. Ajustando-se o ciclo de trabalho (do inglês *duty cycle*), a tensão na saída pode ser alterada. Os conversores DCDC apresentam geralmente eficiência de conversão na faixa de 80% a 95%. Na figura 17 temos um exemplo de circuito DCDC tipo boost.

FIGURA 17 – EXEMPLO DE CIRCUITO CONVERSOR DCDC TIPO BOOST



Fonte: <https://www.filipeflop.com/blog/como-funciona-um-conversor-de-tensao-dc-dc/>. Último acesso 18/08/2024

Para um sistema em que a pilha de combustível fornece uma tensão variável de saída em função do fluxo de hidrogênio é imprescindível que o projeto seja controlado de forma que a tensão de saída após o conversor DCDC seja constante no valor desejado, neste caso 400 V com a bateria completamente carregada do veículo elétrico Renault Zoe.

Selecionar um conversor DCDC ideal, especialmente do tipo boost, pode ser uma tarefa desafiadora devido à diversidade de opções no mercado e às especificações técnicas envolvidas. A principal dificuldade reside na necessidade de encontrar um conversor que atenda precisamente às exigências de tensão de entrada e saída, corrente máxima e eficiência energética. Além disso, fatores como tamanho físico, capacidade de dissipação de calor e confiabilidade são críticos para aplicações industriais e de alta performance.

Após uma análise detalhada das especificações técnicas e das necessidades específicas do projeto, a escolha recaiu sobre o conversor DCH6KW-200-3 da YSTech, que pode ser visto na figura 18. Este modelo se destacou por sua capacidade de converter eficientemente a tensão DC de entrada para uma saída boost com alta potência (6 kW), atendendo assim às exigentes demandas do sistema. Além da potência, a eficiência energética do conversor e sua capacidade de operação em condições adversas foram pontos decisivos na escolha.

A decisão de escolha do conversor YSTech DCH6KW-200-3 levou em conta principalmente três aspectos:

1. Potência de operação superior ao da pilha de combustível.
2. Tensões de entrada compatível com a faixa de operação da pilha de combustível.

3. Tensões de saída compatíveis com o barramento de alta tensão do veículo elétrico Renault Zoe.

As características do conversor YSTech DCH6KW-200-3 estão presentes na tabela 3.

FIGURA 18 – YSTECH DCH6KW-200-3



Fonte: manual do conversor DCDC YSTech DCH6KW-200-3

TABELA 3 – CARACTERÍSTICAS GERAIS DO CONVERSOR DCDC

Modelo	Faixa de tensão de entrada (V)	Faixa de tensão de saída (V)	Faixa de corrente de entrada (A)
DCH6KW-200-3	40-180	350-500	0-120

Fonte: manual do conversor DCDC YSTech DCH6KW-200-3

Os parâmetros elétricos do conversor DCDC estão presentes nas tabelas 3 e

4.

TABELA 4 – PARÂMETROS DO CONVERSOR DCDC

Parâmetros de entrada do conversor DCDC				
No.	Item	Parâmetro	Unidade	Notas
1	Faixa de tensão de entrada	40~120 40~180	V	40~120, 150 MOS 40~170, 200 MOS
2	Tensão nominal de entrada		Vdc	De acordo com os parâmetros da pilha
3	Corrente nominal de entrada	120	A	De acordo com os parâmetros da pilha
4	Corrente de entrada de pico (1min)	130	A	
5	Faixa de potência recomendada	3-6	kW	Depende da tensão da pilha
6	Varição de corrente de entrada	+/- 1%		
7	Tempo de resposta do controle de corrente de entrada	≤100	ms	
8	Eficiência	≥97%		
9	Modelo de controle	1 – Corrente constante de entrada e limite de tensão de saída (Padrão). 2 – Corrente constante de entrada. 3 - Tensão constante de saída.		
Parâmetros de saída do conversor DCDC				
No.	Item	Parâmetro	Unidade	Notas
1	Faixa de tensão de saída	250-350 350-500 500-750	Vdc	250-350 350-500 500-750

2	Tensão nominal de saída		Vdc	Corresponde a diferentes plataformas de bateria de lítio, como 24V; 48V 80V;
3	Corrente nominal de saída		A	Depende da plataforma da bateria de lítio
4	Ondulação da corrente de saída	+/- 1%		
5	Ondulação da tensão de saída	+/- 2.5	V	carga sem bateria
6	Tempo de inicialização	100	ms	
7	Controle de tensão elétrica	12 ou 24	Vdc	Este circuito de controle exige que a fonte forneça tensão de ativação, que é usado para acionar ventiladores, relés, fonte de alimentação da placa etc. A potência necessária é de 30W.
8	Modo de Comunicação	CAN2.0		

Fonte: manual do conversor DCDC YSTech DCH6KW-200-3

O conversor DCDC é o componente responsável por garantir a compatibilidade entre a tensão de entrada, proveniente da pilha de combustível, e a tensão de saída, utilizada pelo veículo elétrico. Além disso, ele gerencia a transferência de carga para a bateria de tração e regula a corrente elétrica.

O controle do conversor DCDC é realizada através de uma comunicação dedicada no formato CAN (*Controller Area Network*), com taxa de 100kbps e o controle de transferência de carga é realizado através da limitação de corrente.

3.1.5. Junction box

O subsistema de conexão com o veículo chamado de *Junction Box* tem a atribuição de conectar eletricamente o extensor de autonomia ao barramento de alta tensão do veículo elétrico e faz parte de um sistema completo de conexão elétrica e mecânica.

Este sistema foi especificado considerando as características técnicas do veículo elétrico em estudo, Renault Zoe. Por não existir sistemas deste tipo disponíveis no mercado, uma procura ampla foi necessária para identificação e aquisição do equipamento correto.

Identificamos que uma empresa na Europa, especializada em extensores de autonomia para veículos elétricos chamada *EP-Tender*, poderia nos fornecer parcialmente seu sistema para a adaptação ao uso de pilha de combustível.

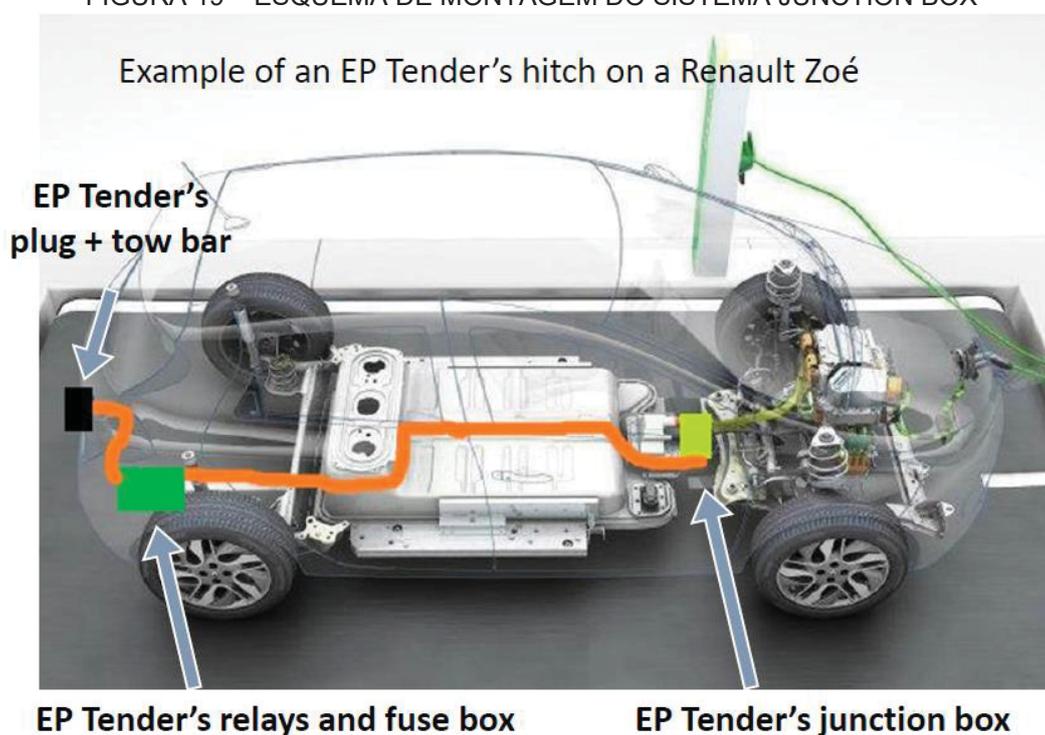
Além de transmitir a potência elétrica gerada pela pilha de combustível ao veículo elétrico, a *Junction Box* também tem a responsabilidade de proteção do conjunto veículo elétrico e extensor de autonomia além de promover a comunicação de parâmetros importantes de gerenciamento através da CAN com o veículo e com o

conversor DCDC. Se tratando de um reboque, e sistema desembarcado portanto, a *Junction Box* deve interromper a conexão em caso de falha, acidente e/ou ruptura.

Uma função complementar e necessária é a de isolar as conexões quando o extensor de autonomia não estiver conectado e evitar acidentes graves com a linha viva.

Na figura 19 está demonstrado um esquema da adaptação necessária feita no Renault Zoe para que a energia elétrica produzida pela pilha de combustível seja transferida para o barramento de alta tensão.

FIGURA 19 – ESQUEMA DE MONTAGEM DO SISTEMA JUNCTION BOX



Fonte: EP-Tender

O conjunto adquirido contém os componentes descritos na tabela 5.

TABELA 5 – ITENS DO SISTEMA DE CONEXÃO EP-TENDER

Item	Descrição
1	Junction, cabos HV e 2 conectores de bateria (macho + fêmea)
2	Caixa de relés (2 relés Panasonic HV 80A, fusível Busmann 100 A)
3	Gateway CAN (incluindo software para seleção de mensagens, transcodificação, banco de dados CAN, + controle analógico dos relés HV)
4	Barra de reboque com receptor Westfalia e suportes para fixar plugue EP Tender e caixa de relé
5	Chicote HV com plugues EP Tender macho e fêmea (HV + e -, 12 V + e -, CAN alto e CAN baixo)
6	Colar Westfalia com suporte para plugue HV
7	Instruções de montagem

Fonte: O autor

Na figura 20 são mostrados os componentes do conjunto antes da montagem.

FIGURA 20 – COMPONENTES DO SISTEMA DE CONEXÃO DE ALTA TENSÃO



Fonte: O autor.

3.1.6. Veículo elétrico

O veículo utilizado para o estudo foi um Renault Zoe 2019 cedido pela Renault do Brasil em modalidade de comodato para execução dos testes de aumento de autonomia.

O Renault Zoe é um veículo elétrico compacto projetado para atender às demandas urbanas com alta eficiência energética e zero emissões de poluentes. Equipado com uma bateria de íons de lítio, o Zoe oferece uma autonomia de até 357,8 km (ciclo urbano UDDS 398,4 km e ciclo rodovia HFEDS 318,1 km) homologada no

ciclo *US Combined* para o mercado brasileiro. A motorização do Zoe é composta por um motor elétrico EESM (do inglês *Electric Excited Synchronous Motor*), capaz de gerar até 135 CV (100 kW) de potência e 245 Nm de torque, proporcionando uma aceleração suave e silenciosa, característica marcante dos veículos elétricos. O design aerodinâmico do Zoe, aliado à sua leveza estrutural, contribui para uma maior eficiência energética, tornando-o uma escolha ideal para condução urbana e deslocamentos diários. Na tabela 6 estão descritas algumas características do *powertrain* do Renault Zoe.

TABELA 6 – CARACTERÍSTICAS POWERTRAIN RENAULT ZOE

Powertrain	5AQ*605 (R135)
Tipo	Rotor de enrolamento síncrono
Potência máxima	100 kW / 136 CV de 4200 a 11200 rpm
Torque máximo	245 Nm de 1500 a 3600 rpm
Rotação máxima	12000 rpm
Arrefecimento	Ar e água

Fonte: Gamme_organe_&_vehicule_EV-(P)HEV_202003

O sistema de recarga dispõe de um carregador de bordo que suporta recargas rápidas em até 50 kW DC, o que o faz capaz de recuperar até 150 km de autonomia em apenas 30 minutos, tornando-o um dos veículos elétricos mais práticos e acessíveis do mercado. Na tabela 7 são apresentadas as características do sistema de recarga.

TABELA 7 – CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE RECARGA RENAULT ZOE

Porta de carga	Tipo 2
Localização da porta	Frente - Meio
Potência de carga	22 kW AC
Carregamento rápido	CCS
Localização da porta	Frente - Meio
Potência de carga (máx.)	46 kW CC
Potência de carga (10-80%)	41 kW CC
Tempo de carga (0->315 km)	3 horas
Tempo de carga (31->252 km)	56 min

Fonte: <https://ev-database.org/car/1164/Renault-Zoe-ZE50-R110>. Último acesso 22/08/24

A bateria de tração do modelo Zoe 2019 tem a capacidade total utilizável de 52 kWh, e na tabela 8 estão descritas as características gerais.

TABELA 8 – CARACTERÍSTICAS GERAIS BATERIA DE TRAÇÃO RENAULT ZOE

Capacidade nominal *	54.7 kWh
Tipo de bateria	Lithium-ion
Número de células	192
Arquitetura	400 V
Período de garantia	8 anos
Quilometragem de garantia	160,000 km
Capacidade utilizável	52.0 kWh
Material do cátodo	NCM712
Configuração do pacote	96s2p
Tensão nominal	350 V

Fonte: <https://ev-database.org/car/1164/Renault-Zoe-ZE50-R110>. Último acesso 22/08/24

Para que seja possível a realização dos testes em dinamômetro, os parâmetros dinâmicos do veículo devem ser conhecidos e controlados. Para o veículo em questão os parâmetros de desaceleração (simulação de condição de rodagem em rodovia) foram obtidos do processo de homologação oficial da Renault, como segue na tabela 9. O teste realizado para obtenção dos tempos de desaceleração consiste em medições em rodovia aberta, plana e com condições meteorológicas controladas e ausência de vento. Várias manobras de desaceleração são realizadas de ida e volta no mesmo percurso, colocando o veículo em posição da transmissão em neutro e acima de 120 km/h. Conforme o veículo vai perdendo velocidade os tempos são aquisitados. Estes dados de tempo de desaceleração servem como parâmetros de resistência aerodinâmica e atritos diversos (freios, rolamento e pneus, principalmente). Estes dados então são parametrizados no dinamômetro para que o teste de autonomia tenha representatividade real de uso rodoviário e urbano.

TABELA 9 – TEMPOS DE DESACELERAÇÃO E CONDIÇÕES DE ENSAIO

Velocidade (km/h)	Normal		Severizado	
	Força (N)	Potência (kW)	Força (N)	Potência (kW)
120	766	25,5	842,6	28,05
110	668,8	20,4	735,68	22,44
100	580	16,1	638	17,71
90	499,6	12,5	549,56	13,75
80	427,7	9,5	470,47	10,45
70	364,3	7,1	400,73	7,81
60	309,3	5,2	340,23	5,72
50	262,8	3,6	289,08	3,6
40	224,7	2,5	247,17	2,75
30	195,1	1,6	214,61	1,76
20	173,9	1	191,29	1,1
10	161,2	0,4	177,32	0,44
Inércia	1701		1701	
f0	157,018	N	172,7198	N
f2	0,0423	N/(km/h) ²	0,04653	N/(km/h) ²

Fonte: NT0068-20_Coastdown_B10ph2 5AQ 605_EN_LS

Os testes foram realizados tomando em conta a curva de desaceleração “severizada”. Esta é uma prática comum na indústria automotiva pois considera a utilização de consumidores de energia, tais como ar-condicionado, autorrádio, aquecimento etc.

3.1.7. ECU de controle

Para o gerenciamento eficiente e seguro do sistema veículo elétrico e extensor de autonomia é necessário levar em conta parâmetros de estado de funcionamento do veículo elétrico.

A bateria de tração deve apresentar um estado de carga (SOC) diferente de 100% para que seja capaz de absorver carga. Não só isso, mas que haja uma margem de segurança pois o sistema de freio regenerativo do veículo elétrico também carrega a bateria dinamicamente, então para que não exista impacto da capacidade de frenagem o valor seguro de SOC deve ser inferior a 90% para ativação da pilha de combustível.

Da mesma forma, quando a bateria chega no seu nível mínimo de carga, o gerenciamento do veículo elétrico se encarrega de alertar o condutor através do painel de instrumentos e toma ações invasivas de limitação de potência e velocidade. Por isso então é importante desligarmos a pilha de combustível para transferência de carga a partir de um valor de 10% de SOC ou abaixo.

O terceiro ponto para ser levado em consideração é o estado do freio regenerativo. Considerando uma condição em que o powertrain estiver regenerando energia através da frenagem do veículo e, ao mesmo tempo, estivermos com a pilha de combustível gerando energia, a potência total, somando powertrain e pilha, não pode exceder a capacidade total de absorção de energia da bateria, para não causar sobrecarga e nem limitar a frenagem regenerativa, gerando condições de risco para o veículo e os passageiros.

Baseado então nas explicações anteriores, o software de gestão do extensor de autonomia necessita de acesso à leitura dos parâmetros do veículo e pilha de combustível, através do conversor DCDC para então gerenciar o acionamento e controlar a potência elétrica transferida ao veículo elétrico. A leitura dos parâmetros necessariamente se faz através das redes CAN do veículo e do conversor DCDC.

Uma pesquisa foi realizada no mercado para identificar uma ECU programável capaz de ler, gerenciar e acionar os sistemas de forma contínua, robusta e segura. Baseado na experiência da indústria automotiva, selecionamos a empresa Vector que nos ofereceu o equipamento VN8911 apto a nos responder aos requisitos.

A família de interface VN8900 é projetada para aplicações de alto desempenho em combinação com CANoe/CANalyzer. As áreas de aplicação incluem simulações de sistema ou aplicativos de *bypass* com *Simulink*, simulações de barramento restantes, implementações de gateway, execuções de teste (MiniHIL) ou monitoramento de dados.

Outro recurso importante é a execução de configurações CANoe/CANalyzer críticas em termos de tempo sem nenhum computador (*stand alone*) do usuário e sem quaisquer efeitos negativos na funcionalidade do aplicativo em execução. O dispositivo pode ser visto na figura 21.

FIGURA 21 – VECTOR VN8911



Fonte: Manual VN8900_Manual_EN

Na tabela 10 são apresentadas as características do VN8911.

TABELA 10 – CARACTERÍSTICAS VECTOR VN8911

Processador	Intel ATOM E3845 Quad-Core com 1,91 GHz
Memória	4GB
Disco rígido	CFast , 60 GB
Transceptor	Depende do módulo plug-in e seus Piggybacks
Interface de computador	USB 3.0 SuperSpeed
Faixa de temperatura	Operação: -40 °C...+60 °C Envio e armazenamento: -40 °C...+85 °C
Humidade relativa do ar ambiente	15%...95%, sem condensação
Corrente de saída USB 1/2	Máx. 1050 mA, ambas as portas combinadas
Alimentação	6 V...36 V DC Alimentação: 9 V DC
Consumo de energia	Tip. 7,0 W sem módulo plug-in
Tempo de inicialização	Aproximadamente 30 segundos
Dimensões (CxLxA)	190 mm x 170 mm x 60 mm (com módulo plug-in)
Requisitos do sistema operacional	Windows 10 (x64, 64 bits) Windows 11 (x64, 64 bits)
Ethernet	1000BASE-T/100BASE-TX/10BASE-T
Módulos de plug-in suportados	VN8970

Fonte: Manual VN8900_Manual_EN

3.2. OBTENÇÃO E ANÁLISE DE DADOS EXPERIMENTAIS NO SISTEMA CONSTRUÍDO

A obtenção e análise de dados experimentais no sistema construído requer a realização de testes estáticos e dinâmicos para assegurar a precisão e a confiabilidade dos resultados. Testes estáticos são fundamentais para verificar o comportamento do sistema em condições controladas, permitindo a análise detalhada de parâmetros como corrente e tensão sem a influência de fatores externos dinâmicos. Paralelamente, o uso de um dinamômetro é crucial para avaliar o desempenho do sistema sob condições operacionais reais, avaliando o comportamento usando como referência um ciclo de condução conhecido, como o *US Combined*, como detalhado neste tópico. A combinação desses testes proporciona uma compreensão abrangente do comportamento do sistema, permitindo ajustes e otimizações necessárias para alcançar os objetivos do projeto.

3.2.1. Testes estáticos

Com o sistema completo montado foi possível realizar experimentos de transferência de carga do sistema externo de extensão de autonomia para o veículo elétrico. Os testes estáticos consistiram em gerar energia através da pilha e controlar a corrente (e a potência de recarga) através do controle do conversor DCDC de forma a poder caracterizar a pilha, avaliar comportamento e controle do conversor DCDC assim como a quantidade de energia transferida ao veículo elétrico. Sem a interferência de fontes externas ou mesmo a influência do comportamento dinâmico do veículo em uso, as informações disponibilizadas pelos fabricantes da pilha de combustível e do conversor DCDC foram checados bem como foi possível identificar os pontos mais favoráveis para operação, baseados nos resultados de eficiência.

3.2.2. Dinamômetro de Chassis

O dinamômetro de chassis da marca Servitec modelo C-2025 4WD disponibilizado pelo SENAI Paraná ISI de Eletromobilidade localizado na FIEP em Curitiba e visto na figura 22 foi utilizado durante os testes de avaliação de extensão de autonomia. Este equipamento dispõe de freio eletromagnético necessário para aplicação de carga e simulação de operação em vias públicas. Informado pelo fabricante, o equipamento apresenta uma precisão de medição de $\pm 1\%$.

FIGURA 22 – DINAMÔMETRO DE CHASSIS SERVITEC C-2025 4WD



Fonte: O autor

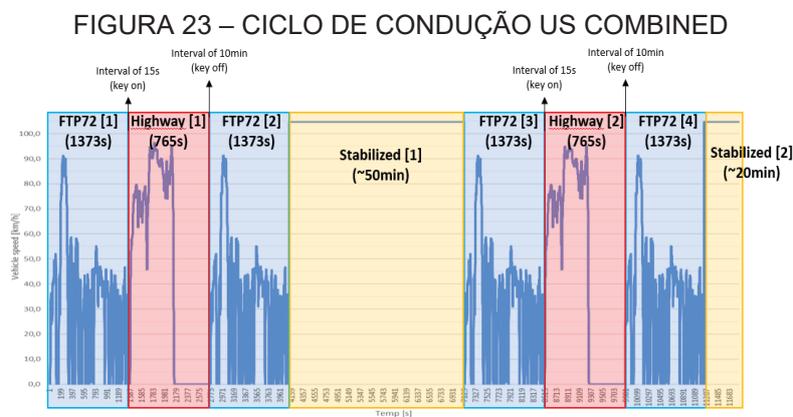
3.2.3. Ciclo de condução *US Combined*

O ciclo *US Combined*, visto na figura 23, foi escolhido para execução dos testes pois é utilizado para certificar a autonomia de veículos elétricos e oferece uma representação mais realista das condições de condução diárias. Este ciclo combina elementos de direção urbana (*city*) e rodoviária (*highway*), simulando situações comuns de trânsito, como paradas, acelerações e cruzeiro em alta velocidade.

Outro aspecto importante é a questão de repetibilidade, podendo ser realizado alterando parâmetros específicos (com e sem o sistema de extensão de autonomia, por exemplo) e eliminando as variações externas de tráfego em vias públicas.

Identificação das fases do ciclo *US Combined*:

- FTP72 ou UDDS (*Urban Dynamometer Driving Schedule*) – ciclo urbano.
- Highway ou HFEDS (*Highway Fuel Economy Driving Schedule*) – ciclo rodoviário.



Fonte: O autor

3.3. DEFINIR FUNÇÕES OBJETIVO QUE CARACTERIZEM O DESEMPENHO DO SISTEMA

Neste tópico será apresentado como foram realizados os cálculos de potência, eficiência, quantidade de energia e autonomia do sistema.

3.3.1. Parâmetros de desempenho da pilha de combustível

A partir da conexão de baixa tensão do conversor DCDC é possível realizar a leitura da tensão e corrente da saída da pilha. E com o controle de corrente é possível então obter a curva de polarização tensão x corrente, potência de saída da pilha de combustível e energia total gerada.

Potência de saída da pilha de combustível

$$P_{Pilha} = V_{Pilha} \times i_{Pilha} \quad (1)$$

Onde:

P_{Pilha} – Potência de saída da pilha de combustível em W.

V_{Pilha} – Tensão de saída da pilha de combustível em V.

i_{Pilha} – Corrente de saída da pilha de combustível em A.

Energia gerada pela pilha de combustível:

$$E_{Pilha} = \int P_{Pilha} dt \quad (2)$$

Onde:

E_{Pilha} – Energia total calculada gerada pela pilha de combustível em Wh.

3.3.2. Parâmetros de desempenho do conversor DCDC

Cálculo de potência de saída do conversor DCDC, energia gerada e eficiência de conversão.

$$P_{DCDC} = V_{DCDC} \times i_{DCDC} \quad (3)$$

Onde:

P_{DCDC} – Potência de saída do conversor DCDC em W.

V_{DCDC} – Tensão de saída do conversor DCDC em V.

i_{DCDC} – Corrente de saída do conversor DCDC em A.

Energia total calculada na saída do conversor DCDC:

$$E_{DCDC} = \int P_{DCDC} dt \quad (4)$$

Onde:

E_{DCDC} – Energia total calculada na saída do conversor DCDC em Wh.

A partir dos valores calculado anteriormente é possível calcular a eficiência do conversor DCDC através da fórmula.

$$\eta_{DCDC} = \frac{P_{DCDC}}{P_{Pilha}} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

η_{DCDC} – Eficiência de conversão de baixa para alta tensão do conversor DCDC.

Alternativamente é possível calcular a eficiência média do conversor DCDC através da fórmula.

$$\eta_{DCDC(AVG)} = \frac{E_{DCDC}}{E_{Pilha}} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

$\eta_{DCDC(AVG)}$ – Eficiência média de conversão de baixa para alta tensão do conversor DCDC.

E_{DCDC} – Energia total calculada na saída do conversor DCDC em Wh.

E_{Pilha} – Energia gerada pela pilha de combustível em Wh.

3.3.3. Parâmetros de desempenho na transferência de energia para o veículo elétrico e eficiência global

Cálculo de potência de entrada na bateria de tração do veículo elétrico.

$$P_{Veículo} = V_{Veículo} \times i_{Veículo} \quad (7)$$

Onde:

$P_{Veículo}$ – Potência na entrada do BMS da bateria de tração em W.

$V_{Veículo}$ – Tensão de entrada do BMS da bateria de tração em V.

$i_{Veículo}$ – Corrente de entrada da bateria de tração em A.

Energia total calculada na saída do conversor DCDC:

$$E_{Veículo} = \int P_{Veículo} dt \quad (8)$$

Onde:

$E_{Veículo}$ – Energia total calculada na entrada do BMS da bateria de tração em Wh.

A partir dos valores calculados anteriormente pelas equações 7 e 3 é possível calcular a eficiência de transferência de energia do conversor DCDC para o veículo elétrico através da fórmula.

$$\eta_{Veículo} = \frac{P_{Veículo}}{P_{DCDC}} \times 100 \quad (9)$$

Onde:

$\eta_{Veículo}$ – Eficiência de transferência de energia do conversor DCDC para o veículo elétrico.

Alternativamente é possível calcular a eficiência média transferência de energia do conversor DCDC para o veículo elétrico através da fórmula.

$$\eta_{Veículo(AVG)} = \frac{E_{Veículo}}{E_{DCDC}} \times 100 \quad (10)$$

Onde

$\eta_{Veículo(AVG)}$ – Eficiência média de transferência de energia do conversor DCDC para o veículo elétrico.

$E_{Veículo}$ – Energia total calculada na entrada do BMS da bateria de tração em Wh.

E_{DCDC} – Energia total calculada na saída do conversor DCDC em Wh.

Com os valores calculados anteriormente podemos então calcular a eficiência global de transferência da energia gerada pela pilha de combustível para o veículo elétrico.

$$\eta_{Global} = \frac{P_{Veículo}}{P_{Pilha}} \times 100 \quad (11)$$

Onde:

η_{Global} – Eficiência de transferência de energia gerada pela pilha de combustível para o veículo elétrico.

Alternativamente é possível calcular a eficiência média global de transferência da energia gerada pela pilha de combustível para o veículo elétrico através da fórmula.

$$\eta_{Global(AVG)} = \frac{E_{Veículo}}{E_{Pilha}} \times 100 \quad (12)$$

Onde:

$\eta_{Global(AVG)}$ – Eficiência média de transferência de energia gerada pela pilha de combustível para o veículo elétrico.

3.3.4. Metodologia de cálculo de autonomia

Para medição de autonomia foi utilizada a instrução normativa SAE_J1634 que orienta a homologação de autonomia de veículos elétricos no Brasil. Esta norma é ampla e leva em consideração cálculos de conversão de energia de recarga das baterias em corrente alternada (CA) e eficiências de conversão para corrente DC. No entanto, para o estudo em questão serão utilizados apenas os cálculos de descarga DC da energia da bateria de tração do veículo elétrico e distância percorrida durante o ciclo *US Combined*, como demonstrado nesta seção.

A autonomia para o ciclo, medida em quilômetros, é calculada usando a energia utilizável da bateria (UBE) e o consumo de energia DC por quilômetro ponderado pela fase do ciclo.

$$R_{combinado} = \frac{UBE}{ECdc_{combinado}} \quad (13)$$

Onde:

$R_{combinado}$ – Autonomia combinada nos ciclos urbano e rodoviário em quilômetros.

UBE – Energia utilizável da bateria em Wh.

$ECdc_{combinado}$ – Consumo de energia DC combinada em Wh/km.

O consumo de energia DC combinada ($ECdc_{combinado}$) segue a ponderação:

$$ECdc_{combinado} = 0,55 \times ECdc_{UDDS} + 0,45 \times ECdc_{HFEDS} \quad (14)$$

Onde:

$ECdc_{UDDS}$ – Consumo de energia DC em ciclo urbano em Wh/km.

$ECdc_{HFEDS}$ – Consumo de energia DC em ciclo rodoviário em Wh/km.

Os valores de consumo de energia DC em ciclo urbano ($ECdc_{UDDS}$) e ciclo rodoviário são obtidos através das fórmulas:

$$ECdc_{UDDS} = K_{UDDS_1} \times ECdc_{UDDS_1} + \left(\frac{1 - K_{UDDS_1}}{3}\right) \times ECdc_{UDDS_2} + \left(\frac{1 - K_{UDDS_1}}{3}\right) \times ECdc_{UDDS_3} + \left(\frac{1 - K_{UDDS_1}}{3}\right) \times ECdc_{UDDS_4} \quad (15)$$

Onde:

K_{UDDS_1} – Coeficiente de ponderação da fase urbana número.

$ECdc_{UDDS_1}$ – Consumo de energia DC no ciclo urbano número 1 em Wh/km.

$ECdc_{UDDS_2}$ – Consumo de energia DC no ciclo urbano número 2 em Wh/km.

$ECdc_{UDDS_3}$ – Consumo de energia DC no ciclo urbano número 3 em Wh/km.

$ECdc_{UDDS_4}$ – Consumo de energia DC no ciclo urbano número 4 em Wh/km.

e

$$ECdc_{HFEDS} = \frac{ECdc_{HFEDS_1} + ECdc_{HFEDS_2}}{2} \quad (16)$$

Onde:

$ECdc_{HFEDS_1}$ – Consumo de energia DC no ciclo rodoviário número 1 em Wh/km.

$ECdc_{HFEDS_2}$ – Consumo de energia DC no ciclo rodoviário número 2 em Wh/km.

Por fim, o consumo de energia DC em um ciclo isolado é calculado da seguinte forma:

$$ECdc_{UDDS_i} = \frac{\text{distância percorrida UDDS}_i}{Edc_{UDDS_i}} \quad (17)$$

Onde:

Edc_{UDDS_i} – energia utilizada na fase específica UDDS_i em Wh.

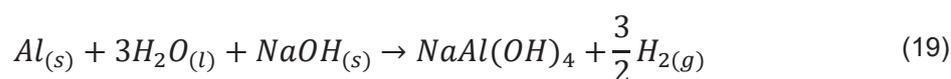
$$ECdc_{HFEDS_i} = \frac{\text{distância percorrida HFEDS}_i}{Edc_{HFEDS_i}} \quad (18)$$

Onde:

Edc_{HFEDS_i} – energia utilizada na fase específica HFEDS_i em Wh.

3.4. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA

Neste tópico, será detalhado o cálculo teórico de expectativa de aumento de autonomia utilizando o extensor a base de hidrogênio. Assim, realiza-se a seguir o cálculo para a geração de H₂ necessário para prover uma autonomia adicional (estendida) de cerca de 150 km para o veículo Renault Zoe:



A eficiência nominal pilha de combustível Horizon com potência $\dot{W} = 5kW$ é $\eta = 0,4$ (40 %). Assim a vazão necessária de H₂ para operar a pilha em sua potência máxima (5 kW) é calculada por:

$$\eta = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_H} \quad (20)$$

$$\dot{Q}_H = \dot{m}_{H_2} \times LHV_{H_2} \quad (21)$$

Onde:

$LHV_{H_2} = 119,93 \text{ MJ/kg}$ é o valor calorífico do hidrogênio, então temos:

$M_{H_2} = 2 \text{ kg/kmol}$ massa molar do hidrogênio.

$\dot{W} = 5 \text{ kW}$ potência nominal da pilha Horizon 5kW

$\eta = 0,4$

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{\dot{W}}{\eta \times LHV_{H_2}} = \frac{5}{0,4 \times 119,93 \times 10^3} = 1,042 \times 10^{-4} \text{ kg/s} \quad (22)$$

Assim, com base na equação 22 e para 4 h de operação da pilha (14.400 s) é necessário produzir $m_{H_2} = 1,5 \text{ kg}$. A estequiometria da reação da equação 19 mostra que para isso, são necessários: $m_{Al} = 10,8 \text{ kg}$; $m_{H_2O} = 21,6 \text{ kg}$ e $m_{NaOH} = 16 \text{ kg}$, totalizando $m_T = 48,4 \text{ kg}$ de reagentes e catalizador para obter uma energia total disponível na forma de eletricidade $W_{el} = 20 \text{ kWh}$.

Com base nos argumentos apresentados, a equipe do projeto está considerando uma mudança de estratégia para viabilizar um produto para o mercado que requeira o mínimo de ação do usuário. Para tanto, o sistema de geração de H_2 seria mantido na forma estacionária ou transportável apenas para a produção e engarrafamento de H_2 .

Assim, por exemplo, engarrafando H_2 produzido pelo sistema a $P = 160 \text{ bar}$ em garrafas com $V = 50 \text{ L}$ (tipicamente disponíveis no mercado), obter-se-ia a seguinte massa de H_2 disponível em cada garrafa para o veículo elétrico (por garrafa de 50 L):

$$m_{H_2} = \frac{pV}{R_{H_2}T} = \frac{(1,60 \times 10^7) \text{ Nm}^{-2} \times (50 \times 10^{-3}) \text{ m}^3}{4124 \text{ Jkg}^{-1} \text{ K}^{-1} \times 298,15 \text{ K}} = 0,650 \text{ kg} \quad (23)$$

Para uma massa de 0,650 kg de H_2 estimamos obter, por proporcionalidade, 8,66 kWh de energia elétrica produzida.

Finalmente, é importante estimar a autonomia estendida a ser obtida com energia total disponível gerada (W_{el}) disponibilizado pela pilha de combustível. Isso dependerá do veículo elétrico a ser utilizado. Para o veículo Renault Zoe em uso por este projeto, verifica-se que a autonomia nominal de até 357,8 km (ciclo urbano UDDS 398,4 km e ciclo rodovia HFEDS 318,1 km) homologados, com uma carga total de baterias de 52 kWh, de onde podemos tirar a relação de 145,33 Wh/km assim, com a carga extra de 20 kWh, a autonomia estendida seria de 137,61 km. Complementarmente a tabela 11 abaixo demonstra as relações de autonomia extra levando em conta a quantidade de H_2 utilizada no experimento.

TABELA 11 - ESTIMAÇÃO DE AUMENTO DE AUTONOMOMIA

Energia	Autonomia Combinada (km)	Autonomia UDDS (km)	Autonomia HF (km)
52 kWh (original)	357,80	398,40	318,10
20 kWh	137,61	153,23	122,34
8,66 kWh	59,58	66,34	52,97

Fonte: O autor

3.5. INCERTEZAS DE MEDIÇÃO

Uma análise de incerteza de medições experimentais é necessária para que os resultados sejam explorados ao máximo. A sugestão de Kim et al (1993) é que incerteza seja realizada de acordo com um intervalo de confiança de 95%. Este intervalo é obtido com a repetição dos testes, utilizando o mesmo equipamento de medição e repetindo as mesmas condições.

No caso dos testes estáticos e de aumento de autonomia, a incerteza será avaliada utilizando a fórmula:

$$U = [B^2 + P^2]^{1/2} \quad (24)$$

Onde:

U – Incerteza de medição.

B – Estimativa da magnitude do erro fixo e constante.

P – Precisão dos equipamentos de medição.

O veículo elétrico Renault Zoe segue as orientações das normas IEC-62660 para sensores de corrente e tensão e R039r2e para medição de velocidade. O

conversor DCDC, fabricado na China segue normas equivalentes a respeito de imprecisão de medição, GB/T 17626.

O valor de erro fixo (B) é negligenciável frente a magnitude da incerteza de medição dos equipamentos utilizados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo mostra os resultados obtidos nos testes realizados com o sistema de extensão de autonomia acoplado ao veículo elétrico, com o objetivo de caracterizar o desempenho do sistema, eficiência e aumento de autonomia proporcionado. Os testes foram divididos em duas etapas, testes estáticos para caracterização do sistema sem a interferência das condições dinâmicas de uso do veículo elétrico e testes em dinamômetro de chassi para a medição de autonomia.

4.1. PROJETAR E CONSTRUIR UM SISTEMA EXPERIMENTAL DE CARREGAMENTO DE BATERIAS DE VEÍCULO ELÉTRICO

Foi posto em funcionamento o sistema de extensão de autonomia acoplado ao veículo elétrico, através da parceria do Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento de Energia Autossustentável da Universidade Federal do Paraná (NPDEAS -UFPR), por meio do projeto “Desenvolvimento de solução de autonomia estendida para veículos elétricos a partir de hidrogênio sustentável e pilha de combustível”, projeto de pesquisa submetido à Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa (FUNDEP) no edital Rota 2030 - Linha V (biocombustíveis, segurança veicular e propulsão alternativa à combustão), Chamada 02/2020-EIXO (III). Conforme exposto na figura 24.

FIGURA 24 – SISTEMA EXTENSOR DE AUTONOMIA ACOPLADO AO VEÍCULO ELÉTRICO



Fonte: O autor

4.1.1. Montagem Junction Box e sistema de conexão *EP-Tender*

A montagem da *Junction Box* foi realizada com o auxílio de um elevador veicular na oficina do SENAI Paraná ISI de eletromobilidade. Por se tratar de veículo elétrico e disponibilidade de alta tensão, ferramentas especiais, procedimentos específicos e habilitação elétrica válida para operar em circuitos elétricos de alta tensão e grupos motopropulsores de veículos elétricos foram adotados para segurança e integridade do equipamento e pessoas envolvidas. A área de operação deve ser claramente identificada e protegida. Em complemento, a empresa *EP-Tender*, fornecedora do sistema de conexão forneceu um manual de instruções passo a passo para a correta instalação de todo o equipamento.

As operações requerem Equipamentos de Proteção Individual (EPI) adequados para intervir nos componentes de alta tensão e no veículo elétrico, como:

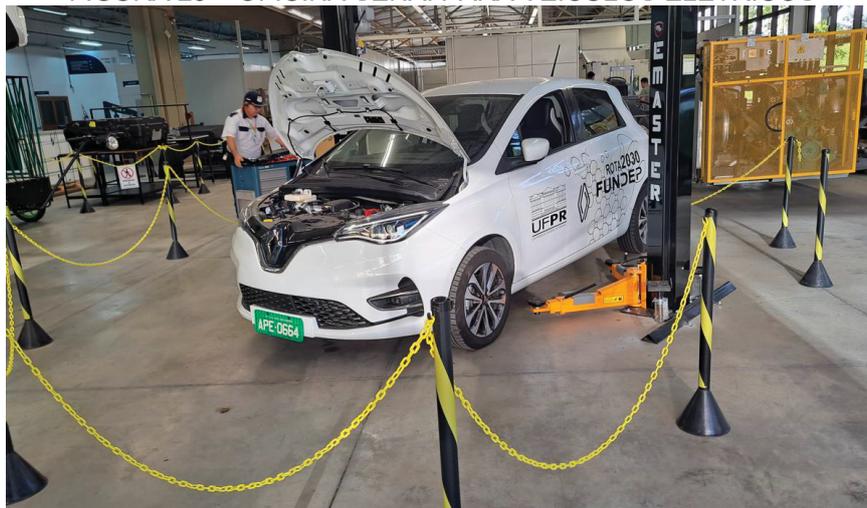
- Óculos de proteção.
- viseira facial.
- Luvas de isolamento (de borracha).
- Mangas de isolamento.
- Capacete.
- Calçado de segurança.
- Vestuário resistente a chamas.

Materiais e equipamentos necessários para a montagem:

- Elevador veicular.
- Ferramentas de oficina (chaves diversas, alicates, chaves de fenda etc.)
- Mesa elevatória para sustentação da bateria de tração.
- Cintas plásticas.
- Trava rosca.
- Alicates de crimpagem de cabos elétricos.
- Estilete.
- Termo retráteis.
- Solda estanho.
- Soprador térmico.

Na figura 25 é mostrada a visão geral da oficina onde a instalação do equipamento foi realizada.

FIGURA 25 – OFICINA SENAI PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS



Fonte: O autor

Para acesso aos sistemas de alta tensão e descomissionamento do veículo elétrico é necessário o isolamento da alimentação 12 V da bateria auxiliar e desmontagem do MSD (do inglês *manual service disconnect*). Nas figuras 26 e 27 são mostrados estes passos.

FIGURA 26 – ISALAMENTO POLO NEGATIVO BATERIA AUXILIAR 12V



Fonte: EP Tender kit_Renault Zoe_Mounting instructions

FIGURA 27 – DESCOMISSIONAMENTO BATERIA DE TRAÇÃO



Fonte: EP Tender kit_Renault Zoe_Mounting instructions

Após o isolamento do sistema de 12 V e descomissionamento da bateria de tração podemos executar as instalações mecânicas e elétricas. Na figura 28 é mostrada a instalação mecânica na qual contempla os suportes para a *Junction Box*, conectores traseiros para o sistema de extensão de autonomia assim como o engate para reboque.

FIGURA 28 – SUPORTE MECANICO DO SISTEMA DE CONEXÃO



Fonte: O autor

A etapa seguinte de montagem do sistema de conexão foi a desmontagem da bateria de tração para instalação dos conectores de alta tensão, mostrado na figura 29. Este componente é responsável pela ligação elétrica do barramento de alta tensão do veículo com o extensor de autonomia externa, possibilitando a transferência de energia.

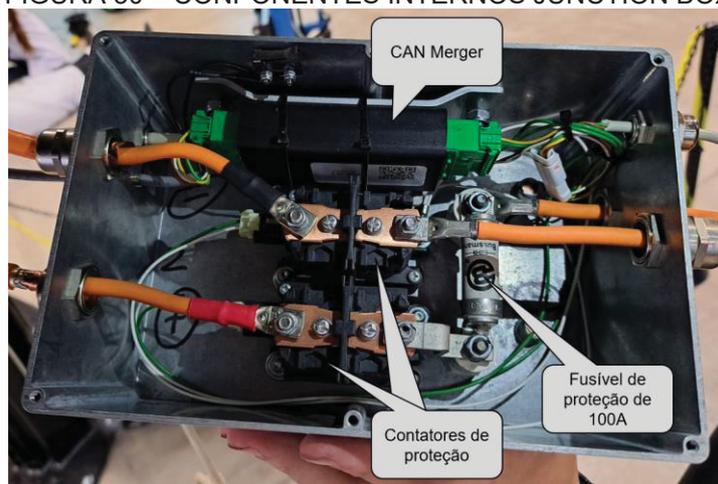
FIGURA 29 – CONEXÃO ELÉTRICA DE ALTA TENSÃO ENTRE O POWERTRAIN E A BATERIA DE TRAÇÃO



Fonte: O autor

Com parte mecânica e elétrica de alta tensão montadas, o próximo passo é adicionar ao sistema a *Junction Box*, equipamento responsável pela proteção do sistema, acionamento dos contatores e disponibilização das informações CAN do veículo, para comunicação e auxílio na lógica de controle para transferência de energia. Na figura 30 são detalhados os componentes internos da *Junction Box*.

FIGURA 30 – COMPONENTES INTERNOS JUNCTION BOX



Fonte: O autor

Para finalização da instalação, os componentes foram organizados e alocados no veículo elétrico Renault Zoe de forma a minimizar a adaptação e devolver a sua aparência original.

Na figura 31 é apresentado o sistema completo montado ainda sem as capas de proteção originais do veículo e na figura 32 o resultado final já com o sistema adaptado disponível para os testes seguintes.

FIGURA 31 – SISTEMA DE CONEXÃO INSTALADO



Fonte: O autor

FIGURA 32 – MONTAGEM DO SISTEMA DE CONEXÃO FINALIZADA



Fonte: O autor.

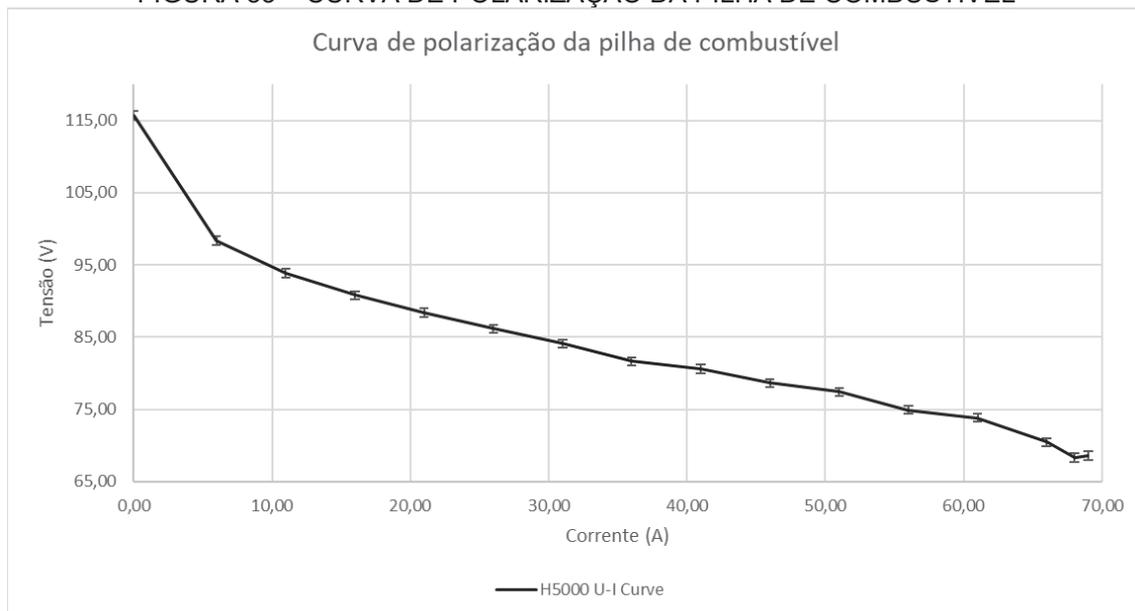
4.2. OBTENÇÃO E ANÁLISE DE DADOS EXPERIMENTAIS NO SISTEMA CONSTRUÍDO

4.2.1. Testes estáticos

Com o sistema construído e operacional, os primeiros testes realizados dentro do laboratório LMH (Laboratório de Máquinas Hidráulicas) da Universidade Federal do Paraná. Os testes levaram em conta a capacidade de conexão do sistema e o controle de transferência de energia para o veículo elétrico, caracterizando o sistema e identificando os pontos otimizados de operação.

A partir da figura 33 pode ser observada a caracterização da pilha de combustível confrontando os valores fornecidos pelo fabricante. A curva apresentada mostra a tensão de saída da pilha em função da corrente. Este resultado está bastante próximo a referência informada pelo fabricante (ver figura 33) e observa-se uma leve redução de tensão que pode ser explicada pelos consumidores ativos no momento dos testes: ventiladores da pilha de combustível, perda nos cabos de transmissão de baixa tensão e o consumo da eletrônica do conversor DCDC. A tensão em circuito aberto é de 115,67 V. No gráfico não fica evidente, mas a incerteza máxima calculada para este experimento é de 0,58 V, considerando 0,5% de incerteza do equipamento de medição.

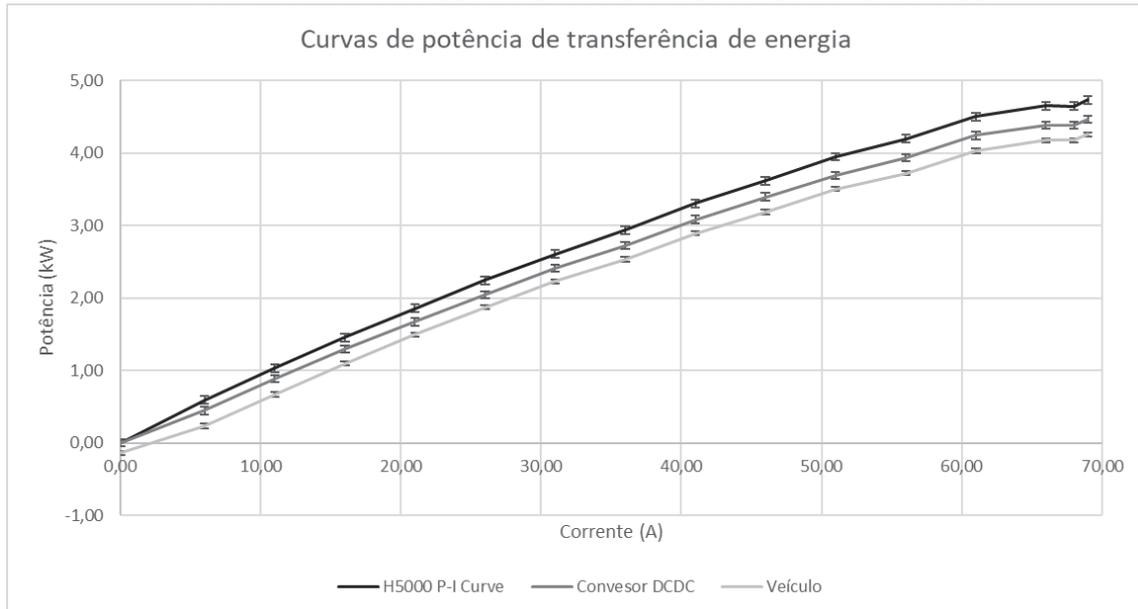
FIGURA 33 – CURVA DE POLARIZAÇÃO DA PILHA DE COMBUSTÍVEL



Fonte: O autor

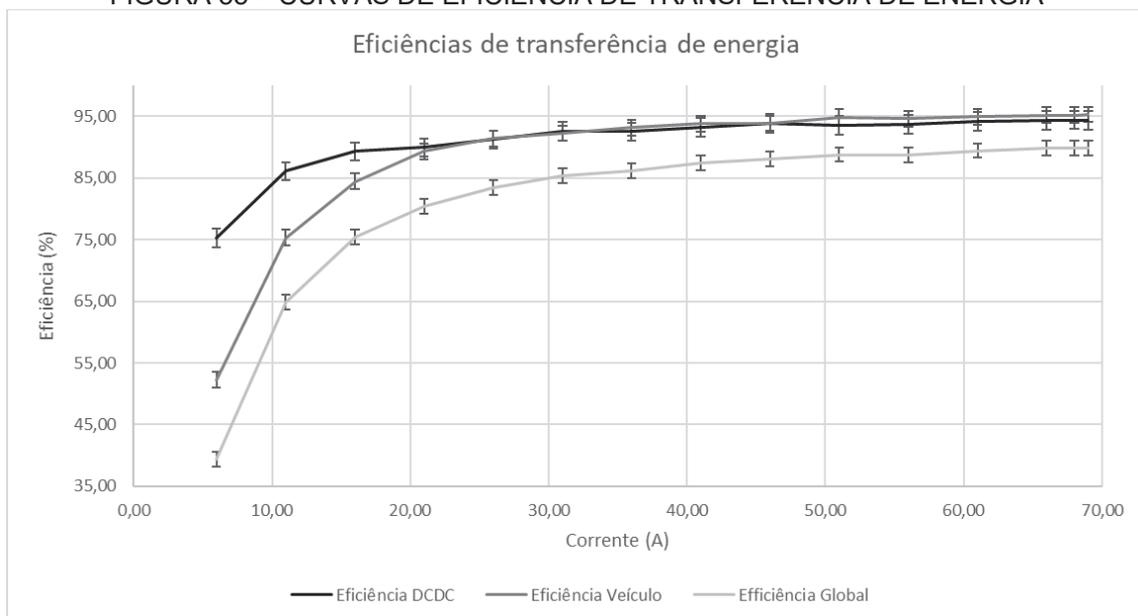
A partir da figura 34 podem ser observadas as curvas de potência da pilha de combustível, curva de potência na saída do conversor DCDC e potência de entrada no BMS do veículo elétrico em função da corrente. O resultado de medição de potência da pilha de combustível é bastante próximo ao apresentado pelo fabricante (ver figura 16) com uma pequena diferença atribuída aos consumidores: ventiladores da pilha de combustível, perda nos cabos de transmissão de baixa tensão e o consumo da eletrônica do conversor DCDC. Analisando a curva é possível identificar uma zona de estabilização de potência em torno da potência máxima de operação. No gráfico pode-se também observar as perdas de transferência de energia comparando as potências entre a pilha e os demais subsistemas DCDC e veículo. A incerteza de medição, considerando as três curvas, apresentou o valor máximo calculado de 0,05 kW.

FIGURA 34 – CURVA DE POTÊNCIA DA PILHA DE COMBUSTÍVEL



A partir da figura 35 pode ser observado as curvas de eficiência do conversor DCDC e a eficiência global, calculadas a partir das potências de entrada e saída do conversor DCDC e potência elétrica medida no BMS do veículo elétrico. Com este resultado fica claro que durante os testes dinâmicos de aumento de autonomia as mais altas correntes, e potências conseqüentemente, devem ser privilegiadas para exploração da melhor eficiência de transferência de energia gerada pela pilha de combustível para veículo elétrico.

FIGURA 35 – CURVAS DE EFICIÊNCIA DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA

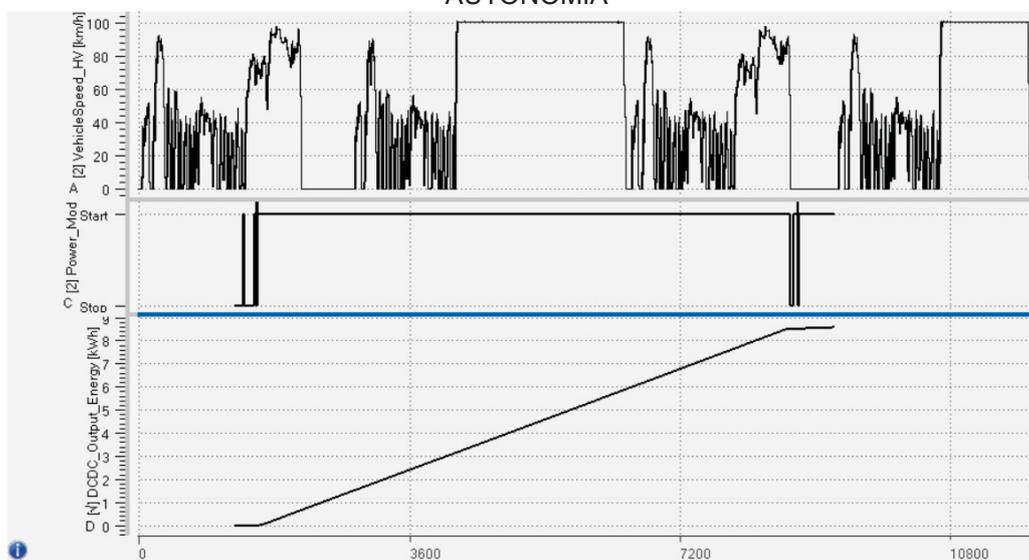


4.2.2. Testes dinâmicos

Os testes dinâmicos foram realizados no dinamômetro de chassis do centro de eletromobilidade do SENAI Paraná ISI de eletromobilidade localizado na FIEP utilizando o ciclo *US Combined* como referência. Os testes com e sem o sistema de extensão de autonomia foram realizados com o mesmo veículo, mesmo dinamômetro, mesmo condutor e durante a mesma semana para diminuirmos interferências externas nos resultados.

A figura 36 mostra os gráficos extraídos da gravação dos parâmetros do sistema de extensão de autonomia estendida e do veículo elétrico. Na primeira seção temos o perfil de velocidade do ciclo *US Combined*, a segunda seção apresenta o período de ativação de carga do sistema de extensão de autonomia enquanto na terceira seção pode ser observada a quantidade de energia acumulada durante ciclo calculada na saída do DCDC.

FIGURA 36 – CICLO US COMBINED COM ATIVAÇÃO DO SISTEMA DE EXTENSÃO DE AUTONOMIA



Fonte: O autor

Durante os testes dinâmicos a pilha de combustível foi ativada utilizando uma corrente de 66A, aproveitando a zona de melhor eficiência, tanto da pilha como do conversor DCDC e do veículo. Os testes realizados para a comprovação de aumento de autonomia foram realizados com uma garrafa apenas de hidrogênio de 50 L a 160 bar de pressão (contendo 0,650kg de H₂), para tanto, a estimativa de ganho de

autonomia deve ser ajustada para 8,67 kWh e 60,33 km adicionais na autonomia do veículo.

Para o cálculo de energia transferida para o veículo, utilizamos a quantidade total de energia calculada na saída do conversor DCDC multiplicada pela eficiência calculada de transferência de energia entre o conversor e o veículo. Nos testes realizados no dinamômetro não foi possível utilizar os valores de corrente e tensão medidos no BMS da bateria de tração pois este sistema está conectado ao extensor de bateria e ao *powertrain* simultaneamente, apresentando valores medidos referentes ao somatório de recarga e consumo de energia.

Energia calculada gerada pela pilha de combustível (utilizando as medições de corrente e tensão).

$$E_{Pilha} = \int P_{Pilha} dt = 9,1071 kWh \quad (25)$$

Neste ponto, é importante compararmos o valor obtido de energia gerada pela pilha observado durante o teste, de 9,1071 kWh com o valor teórico de 8,67 kWh do tópico 3.4. Surpreendentemente o valor obtido no teste foi superior ao teórico.

A análise da diferença dos valores de energia pode ter dois grandes campos de investigação: a quantidade de hidrogênio disponível e a eficiência da pilha de combustível.

A quantidade de hidrogênio disponível foi calculada no tópico 3.4 levando em conta a pressão indicada no manômetro da garrafa de hidrogênio no início do teste dinâmico utilizando o dinamômetro, e que indicava 160 bar.

Analisando as informações da pilha, temos o valor de eficiência de operação de 40% indicada no ponto de 72 A de corrente, mas é possível que seja também um valor médio para eficiência de conversão e que a eficiência, assim como apresentado para o conversor DCDC e o veículo elétrico, seja dependente da corrente, neste caso poderíamos estimar uma eficiência para a pilha a partir dos valores de energia teórico e medido no ciclo dinâmico.

$$\eta_{Real} = \frac{W}{m_{H_2} \times LHV_{H_2}} = \frac{9,1071 \times 3600}{0,650 \times 119,93 \times 10^3} = 42,06\% \quad (26)$$

O valor de 42,06% é plausível e não distante da eficiência declarada no manual de utilização do fabricante.

Energia calculada na saída do conversor DCDC combustível (utilizando as medições de corrente e tensão).

$$E_{DCDC} = \int P_{DCDC} dt = 8,5718 kWh \quad (27)$$

Considerando os valores calculados de energia, podemos obter a eficiência média do conversor DCDC.

$$\eta_{DCDC(AVG)} = \frac{E_{DCDC}}{E_{Pilha}} \times 100 = \frac{8,5718}{9,1071} \times 100 = 94,12\% \quad (28)$$

O valor obtido no teste dinâmico está bem próximo ao resultado obtido no teste estático da figura 35, que foi de 94,33%.

Para calcular a energia transferida para a bateria de tração, é necessário utilizar o valor de energia calculado na saída do conversor DCDC e multiplicar pelo rendimento de transferência entre o conversor DCDC e o veículo elétrico, obtido nos testes estáticos.

$$\eta_{Veículo} = \frac{P_{Veículo}}{P_{DCDC}} \times 100 = 95,22\% \quad (29)$$

$$E_{Veículo} = \int P_{Veículo} dt = \eta_{Veículo} \times \int P_{DCDC} dt = 0,9522 \times 8,5718 = 8,1620 kWh \quad (30)$$

A partir dos valores já obtidos de energia gerada pela pilha de combustível e a energia introduzida na bateria de tração pelo sistema de extensão de autonomia avaliado no ciclo de condução *US Combined* podemos determinar o rendimento médio global da transferência de energia. Utilizando como referência a corrente de 66 A.

$$\eta_{Global(AVG)} = \frac{E_{Veículo}}{E_{Pilha}} \times 100 = \frac{8,1620}{9,1071} = 89,62\% \quad (31)$$

4.2.3. Testes dinâmicos de autonomia

Na tabela 12 são apresentados os dados comparativos de consumo de carga DC da bateria do teste realizado como referência sem o sistema de extensão de bateria e a repetição com o fornecimento de energia externa pela pilha de combustível. O cálculo de autonomia foi realizado segundo a instrução normativa SAE_J1634, descrita no tópico 3.3.4.

TABELA 12 – CÁLCULO DE AUTONOMIA

	Valores homologados	Teste referência (sem extensor de bateria)	Teste com Extensor de bateria
Energia de Descarga Fase (Edc_[ciclo_i])			
Edc_{UDDS_1}	1731,3 Wh	2500,0 Wh	2650,0 Wh
Edc_{HFEDS_1}	2767,2 Wh	6200,0 Wh	6331,0 Wh
Edc_{UDDS_2}	1600,1 Wh	2200,0 Wh	2190,0 Wh
Edc_{CSC_M}	35115,1 Wh	20650,0 Wh	26081,8 Wh
Edc_{UDDS_3}	1584,2 Wh	3150,0 Wh	3052,1 Wh
Edc_{HFEDS_2}	2737,5 Wh	7000,0 Wh	6081,2 Wh
Edc_{UDDS_4}	1594,7 Wh	2450,0 Wh	2500,0 Wh
Edc_{CSC_F}	6095,9 Wh	8350,0 Wh	11850,0 Wh
Distância Percorrida			
Dist_{UDDS_1}	12,0 km	12,3 km	12,3 km
Dist_{HFEDS_1}	16,5 km	17,2 km	17,2 km
Dist_{UDDS_2}	12,0 km	12,3 km	12,3 km
Dist_{CSC_M}	158,7 km	49,9 km	63,2 km
Dist_{UDDS_3}	11,9 km	12,3 km	12,3 km
Dist_{HFEDS_2}	16,4 km	17,2 km	17,2 km
Dist_{UDDS_4}	12,0 km	12,3 km	12,3 km
Dist_{CSC_F}	27,2 km	19,3 km	33,5 km
Consumo de Energia DC (ECdc)			
ECdc_{UDDS_1}	144,8 Wh/km	202,8 Wh/km	215,4 Wh/km
ECdc_{HFEDS_1}	168,1 Wh/km	360,5 Wh/km	368,1 Wh/km
ECdc_{UDDS_2}	133,7 Wh/km	178,4 Wh/km	178,0 Wh/km
ECdc_{CSC_M}	221,3 Wh/km	413,8 Wh/km	412,5 Wh/km
ECdc_{UDDS_3}	132,9 Wh/km	256,1 Wh/km	248,1 Wh/km

ECd_{HFEDS_2}	166,5 Wh/km	407,0 Wh/km	353,6 Wh/km
ECd_{UDDS_4}	133,1 Wh/km	199,2 Wh/km	203,3 Wh/km
ECd_{CSC_F}	223,9 Wh/km	432,8 Wh/km	353,7 Wh/km
Energia de Bateria Utilizável (UBE)			
UBE_{total FDT}	53226,1 Wh	52500,0 Wh	60736,1 Wh
Fatores de Escala			
Fator de Escala [UDDS_1]	3,25%	4,76%	4,36%
Fator de Escala [UDDS_2,3,4]	32,25%	31,75%	31,88%
Energia de Descarga Ciclo (Edc_{ciclo})			
Cidade (Edc UDDS)	6510,3 Wh	10300,0 Wh	10392,1 Wh
Estrada (Edc HFEDS)	5504,8 Wh	13200,0 Wh	12412,2 Wh
Combinado	6057,8 Wh	11605,0 Wh	11301,1 Wh
Consumo de Energia DC (ECdc)			
Cidade (ECdc UDDS)	133,6 Wh/km	210,8 Wh/km	210,1 Wh/km
Estrada (ECdc HFEDS)	167,3 Wh/km	383,7 Wh/km	360,8 Wh/km
Combinado (ECdc Comb)	148,8 Wh/km	288,6 Wh/km	277,9 Wh/km
Autonomia			
Cidade (Edc UDDS)	398,4 km	249,0 km	289,1 km
Estrada (Edc HFEDS)	318,1 km	136,8 km	168,3 km
Combinado	357,8 km	181,9 km	218,6 km

Através da tabela podemos obter o valor de aumento de autonomia proporcionado pelo sistema que é de 36,7 km \pm 3,67 km.

E em uma primeira análise está muito longe do objetivo inicial de aumento de autonomia com uma garrafa de 50 L de H₂, descrito no tópico 3.4 que indicou 59,58 km.

Para tanto, um estudo mais profundo se faz então necessário para entender e justificar a diferença no resultado e como último recurso, ajustar os parâmetros utilizados para que os resultados sejam comparáveis aos objetivos.

Como complemento, o resultado de autonomia oficial do veículo Zoe (primeira coluna da tabela 18) é de 357,8 km, substancialmente maiores que os 181,9 km obtidos no teste de referência deste estudo.

A primeira verificação a ser feita é a conformidade do veículo em termos de representatividade da bateria de tração. Uma bateria degradada pode impactar significativamente a autonomia. Neste ponto observamos que o teste de homologação obteve um valor de energia utilizável da bateria de 53,23k Wh e o teste de referência mostra 52,5 kWh, valores próximos e não justificariam a diferença em autonomia por si só.

O segundo ponto a ser investigado é o consumo de energia Wh/km. Neste caso o teste de homologação nos apresenta 148,8 Wh/km, enquanto o teste de referência obtivemos 288,6 Wh/km e 277,9 Wh/km utilizando o sistema de extensão de autonomia. Comparando os valores concluímos neste ponto que os testes realizados para demonstração do sistema de autonomia estendida têm uma eficiência muito inferior à homologada. O autor atribui o drástico aumento de consumo de energia a parametrização do dinamômetro e o esforço que o veículo realizou para seguir o ciclo de condução além de não termos contado com a frenagem regenerativa durante o teste pois o dinamômetro não conta com modo gerador. Mesmo parametrizando corretamente os dados de esforço mencionados no tópico 3.1.6, tabela 15 ao cálculo de força do dinamômetro, claramente as forças aplicadas durante teste de homologação e nos testes de verificação do sistema de extensão de autonomia não se correlacionam.

No entanto, é possível, através dos resultados do teste dinâmico demonstrado no tópico 4.2.2, verificar a quantidade total de energia entregue ao veículo elétrico gerado pelo sistema de extensão de autonomia, que é de 8,1620 kWh. Para estimar o aumento de autonomia proporcionado pela energia extra será utilizado o valor de consumo elétrico homologado de 148,8 Wh/km, assim obtêm-se um aumento de autonomia mais representativo.

$$R_{REX} = \frac{(UBE_{REX} - UBE_{Base})}{ECdc_{HOMOL}} = \frac{8,1620}{0,1488} = 54,85km \pm 5,4km \quad (32)$$

Onde:

R_{REX} – autonomia proporcionada pelo sistema de extensão de autonomia em km.

UBE_{REX} – energia utilizável da bateria somada ao extensor de bateria em kWh.

UBE_{Base} – energia utilizável da bateria do teste de referência em kWh.

Com este artifício obtêm-se valores próximos ao desejado, considerando 54,85 km como resultado projetado do teste com o sistema de extensão de bateria comparado ao objetivo teórico de 59,58 km (determinado no tópico 3.4).

Na tabela 13 é apresentado a síntese dos resultados ponderados.

TABELA 13 - SÍNTESE DOS RESULTADOS PONDERADOS

	Consumo de Energia	Capacidade Original	REX +8,1620kWh	Delta
Cidade (ECdc UDDS)	133,6 Wh/km	53226,1 Wh	61388,1 Wh	
Estrada (ECdc HFEDS)	167,3 Wh/km	318,15 km	366,93 km	48,79 km
Combinado (ECdc Comb)	148,8 Wh/km	357,70 km	412,55 km	54,85 km
		398,40 km	459,49 km	61,09 km

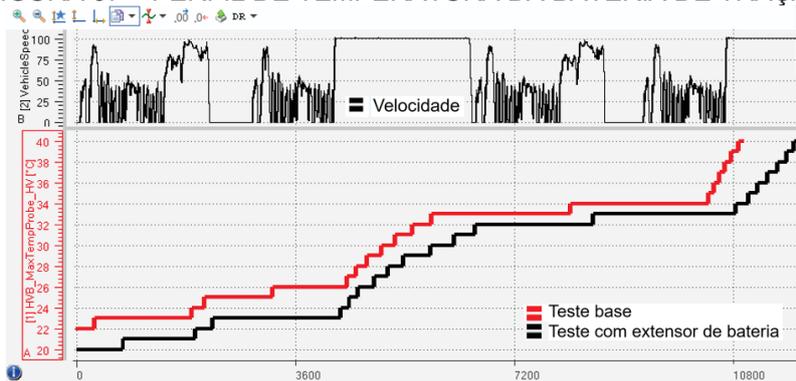
Fonte: o Autor

4.2.4. Resultados complementares

Durante os testes e análise dos dados, foram encontrados resultados relacionados ao comportamento do sistema do veículo operando com extensor de autonomia que reforçam o potencial de aplicação e que originalmente não haviam sido previstos.

Durante os testes de autonomia um parâmetro importante e com alto impacto na performance do sistema é a corrente solicitada pelo *powertrain*. E naturalmente, com o consumo da energia da bateria de tração do veículo elétrico, temos a queda do SOC e tensão, onde pode ser observado 398,8V no início do ciclo de condução com a bateria completamente carregada e SOC = 100% e ao final do teste, 294,5V com SOC = 0%. Sabendo que o teste de autonomia é realizado através da repetição dos ciclos UDDS, HFEDS e CSC (descrito em detalhes no tópico 2.7.1), para manter o nível de potência no *powertrain*, a corrente deve aumentar à medida que a tensão cai. Observa-se na figura 37 o comportamento de temperatura da bateria do veículo elétrico durante o teste e pode-se constatar um efeito de retardo no aumento de temperatura por conta da contribuição de corrente proveniente da pilha de combustível, o que poderia indicar um efeito positivo de aumento de vida útil da bateria do veículo elétrico por estar exposta a um nível menor de stress térmico.

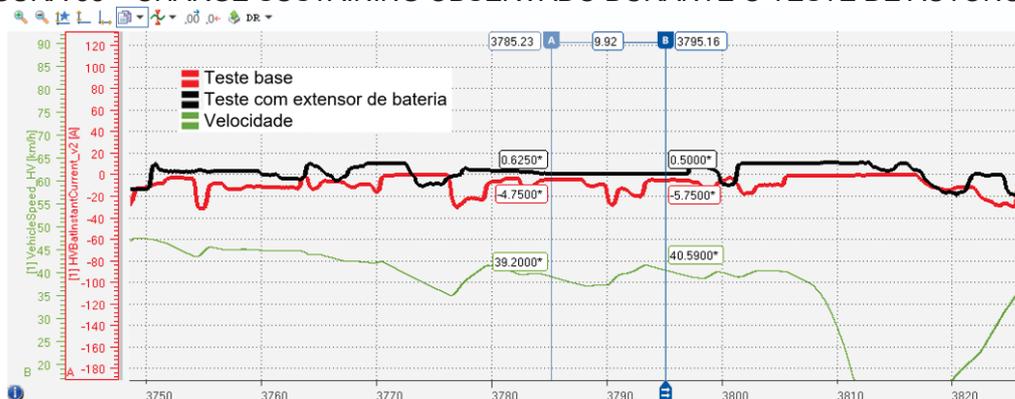
FIGURA 37 – PERFIL DE TEMPERATURA DA BATERIA DE TRAÇÃO



Fonte: O autor

Na figura 38 abaixo, observa-se outro comportamento identificado, onde, durante o teste com o extensor de bateria, a corrente medida no BMS da bateria está perto de zero, indicando uma condição de *Charge Sustaining*, onde o veículo elétrico se mantém a uma velocidade de 40 km/h com a potência fornecida pela pilha de combustível. Nesta condição não existe uso da energia da bateria, diminuindo a ciclagem e stress térmico, prolongando sua vida útil.

FIGURA 38 – CHARGE SUSTAINING OBSERVADO DURANTE O TESTE DE AUTONOMIA



Fonte: O autor

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta dissertação de mestrado foi desenvolvido e caracterizado um sistema de conexão e controle de carregamento sustentável de baterias de veículo elétrico. Todos os detalhes de especificação, montagem e caracterização foram apresentados incluindo testes estáticos e dinâmicos em dinamômetro. Assim foi possível estabelecer um sistema protótipo de alta eficiência para sistema de conexão de extensores de autonomia para veículos elétricos.

5.1. CONCLUSÃO

Ao tema central proposto desenvolvimento de um sistema de conexão para carregamento sustentável de baterias de veículo elétrico, parte integrante do projeto “Desenvolvimento de solução de autonomia estendida para veículos elétricos a partir de hidrogênio sustentável e pilha de combustível”, o objetivo foi alcançado com a construção do protótipo operacional que permite a transferência de energia da pilha de combustível para o veículo de forma segura e eficiente. Resultados demonstrados de 36,7 km medidos e que ajustados às condições de homologação representam 54,85 km, energia total transferida ao veículo de 8,1620 kWh e rendimento global de transferência de energia de 89,62%. Além do objetivo original proposto, foram obtidos os seguintes produtos:

- i. Sistema de conexão utilizando conversor DCDC e Junction Box operacional gerenciado pela ECU de controle Vector VN8911.
- ii. Lógica de controle baseado em programação Vector para acionamento e controle de carga.
- iii. Demonstração de transferência de energia em ciclo dinâmico.
- iv. Comprovação de aumento de autonomia proporcionado pelo extensor de autonomia utilizando energia renovável.
- v. Alta eficiência global de transferência e identificação dos pontos ótimos de operação.

5.2. SUGESTÕES PARA OS TRABALHOS FUTUROS

Espera-se que esta dissertação de mestrado sirva como inspiração para outros trabalhos que buscam analisar a aplicação de tecnologias alternativas e ambientalmente compatíveis na mobilidade do futuro. A seguir são propostas algumas sugestões:

- i. Uso de dinamômetro veículos do tipo “geratriz” para que seja usado o recurso de frenagem regenerativa e com isso se aproximar dos resultados homologados de eficiência energética do veículo elétrico em análise.
- ii. Ciclo de aferição de esforços do dinamômetro para garantir a correlação entre valores obtidos nos testes e homologados.
- iii. Verificação do impacto aerodinâmico promovido pela adição do sistema de extensão de bateria e assim comprovar os ganhos reais de aumento de autonomia.
- iv. Medição em tempo real de pressão e vazão de hidrogênio na alimentação da pilha para ajuste dos cálculos de eficiência e principalmente eficiência global.
- v. Aumento do nível de potência do sistema de extensão de autonomia para favorecer percursos curtos de utilização e condições de "*charge sustaining*" onde o veículo elétrico poderia consumir a energia externa.
- vi. Medição de tensão e corrente na saída da pilha e na conexão com a bateria de tração em tempo real para análise de consumo, eficiência e balanço de energia.
- vii. Medição de tensão em todas as sessões dos cabos de conexão para verificar a perda nos cabos e otimização do sistema de extensão de autonomia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, WORLD TOTAL FINAL CONSUMPTION BY SOURCE. Disponível em <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021/final-consumption>. Acesso: 12/12/22.

KLEINER, F et al. Quantitative analysis of the public charging-point evolution: A demand-driven spatial modeling approach. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 62, p. 212-224, 2018.

Vargas, J. V. C. Desenvolvimento De Solução De Autonomia Estendida Para Veículos Elétricos A Partir De Hidrogênio Sustentável E Pilha De Combustível. **UFPR**, 2021.

BARD, A. J.; FAULKNER, L. R. *Electrochemical Methods - Fundamentals and Applications*. New York: John Wiley & Sons, INC., 2001. BEJAN, A. **Convection Heat Transfer**, 2. ed. [S.I.]: John Wiley & Sons, 1995.

Banco Mundial. Mobility and Economic Inclusion Are Key to Productive Cities in the 21st Century. Disponível em: <https://www.worldbank.org/en/news/feature/2019/09/20/mobility-and-economic-inclusion-are-key-to-productive-cities-in-the-21st-century>. Acesso 17/08/2024.

OECD. Current Challenges To Social Mobility And Equality Of Opportunity. **Centre On Well-Being, Inclusion, Sustainability And Equal Opportunity**, 2022.

LIU, X.; DIJK, M.; COLOMBO, C. Improving multilevel policy mixes for sustainable urban mobility transition. **Environmental Innovation and Societal Transitions**, v. 50, 1 mar. 2024.

LIDDLE, B. Impact of population, age structure, and urbanization on carbon emissions/energy consumption: Evidence from macro-level, cross-country analyses. **Population and Environment**, v. 35, n. 3, p. 286–304, 2014.

TOLEDO, A. L. L.; ROVERE, E. L. LA. Urban mobility and greenhouse gas emissions: Status, public policies, and scenarios in a developing economy city, Natal, Brazil. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 11, 2018.

TEIXEIRA, A. C. R.; SODRÉ, J. R. Impacts of replacement of engine powered vehicles by electric vehicles on energy consumption and CO2 emissions. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 59, p. 375–384, 1 mar. 2018.

GAN, J. et al. An estimation method of road traffic ghg emissions in planning year based on road traffic planning and design indicators in counties. **4th International Conference on Intelligent Transportation Engineering, ICITE 2019**, p. 334–339, 1 set. 2019.

- HAWKINS, T. R.; GAUSEN, O. M.; STRØMMAN, A. H. Environmental impacts of hybrid and electric vehicles-a review. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 8, p. 997–1014, set. 2012.
- WOODY, M. et al. Electric and gasoline vehicle total cost of ownership across US cities. **Journal of Industrial Ecology**, v. 28, n. 2, p. 194–215, 1 abr. 2024.
- LINDHJEM, H. et al. Environmental economic impact assessment in China: Problems and prospects. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 27, n. 1, p. 1–25, jan. 2007.
- THIEL, C. et al. Assessing the impacts of electric vehicle recharging infrastructure deployment efforts in the european union. **Energies**, v. 12, n. 12, 2019.
- OMONOWO, M. D.; OMOIGUI, Michael O. An Overview of Hybrid Electric Vehicle Technology, 2009.
- TOTEV, V.; GUEORGIEV, V. Batteries of Electric Vehicles. **2021 13th Electrical Engineering Faculty Conference, Bulef 2021**, 2021.
- Tiwari, Ashish; Jaga, Om Prakash. Component Selection For An Electric Vehicle: A Review, 2017.
- LI, Z.; KHAJEPOUR, A.; SONG, J. A comprehensive review of the key technologies for pure electric vehicles. **Energy**, v. 182, p. 824–839, 1 set. 2019.
- WANG, Q. et al. A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 64, p. 106–128, 1 out. 2016.
- DENG, D.; Li-ion batteries: basics, progress, and challenges. **Energy Science and Engineering**, 2015.
- HANNAN, M. A. et al. State-of-the-Art and Energy Management System of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicle Applications: Issues and Recommendations. **IEEE Access**, v. 6, p. 19362–19378, 20 mar. 2018.
- MAURYA, R. et al. On-board power quality charger for electric vehicles with minimized switching stresses. **Electrical Engineering**, v. 104, n. 3, p. 1667–1680, 1 jun. 2022.
- CHAU, K. T.; LI, W. Overview of electric machines for electric and hybrid vehicles. **International Journal of Vehicle Design**, v. 64, n. 1, p. 46–71, 2014.
- DE SANTIAGO, J. et al. Electrical Motor Drivelines in Commercial All-Electric Vehicles: A Review. **Transactions on vehicular technology**, v. 61, n. 2, 2012.

SHANG, J. et al. Robust coordination control of multiple three-level electrical excited synchronous motor system. **Lecture Notes in Electrical Engineering**, v. 377, p. 551–565, 2016.

CROLLA, D. A.; CAO, D. The impact of hybrid and electric powertrains on vehicle dynamics, control systems and energy regeneration. **Vehicle System Dynamics**, v. 50, n. SUPPL. 1, p. 95–109, 1 jan. 2012.

JOCHER, P.; BABROWSKI, S.; FICHTNER, W. Assessing CO2 emissions of electric vehicles in Germany in 2030. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 78, p. 68–83, 1 ago. 2015.

LI, Q.; LONG, R.; CHEN, H. Differences and influencing factors for Chinese urban resident willingness to pay for green housings: Evidence from five first-tier cities in China. **Applied Energy**, v. 229, p. 299–313, 1 nov. 2018.

BITENCOURT, L. et al. Understanding Business Models for the Adoption of Electric Vehicles and Charging Stations: Challenges and Opportunities in Brazil. **IEEE Access**, v. 11, p. 63149–63166, 2023.

BURANELLI DE OLIVEIRA, M. et al. Factors influencing the intention to use electric cars in Brazil. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 155, p. 418–433, 1 jan. 2022a.

BERHORST, N. et al. Business model and economic feasibility of electric vehicle fast charging stations with photovoltaic electric generation and battery storage in Brazil. **Advanced Technologies in Electric Vehicles: Challenges and Future Research Developments**, p. 323–343, 1 jan. 2024.

RAUH, N.; FRANKE, T.; KREMS, J. F. Understanding the impact of electric vehicle driving experience on range anxiety. **Human Factors**, v. 57, n. 1, p. 177–187, 13 fev. 2015.

HOLLAND, S. P. et al. Are there environmental benefits from driving electric vehicles? the importance of local factors. **American Economic Review**, v. 106, n. 12, p. 3700–3729, 1 dez. 2016.

MOGHADASI, S. et al. Design and performance analysis of hybrid electric class 8 heavy-duty regional-haul trucks with a micro-pilot natural gas engine in real-world highway driving conditions. **Energy Conversion and Management**, v. 309, 1 jun. 2024.

SAE. Battery Electric Vehicle Energy Consumption and Range Test Procedure, 2017.

Sierzchula, W.; Bakker, S., Maat, K.; & van Wee, B. The influence of financial incentives and other socio-economic factors on electric vehicle adoption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 153-170, 2014.

SOVACOOOL, B. K.; AXSEN, J.; KEMPTON, W. The Future Promise of Vehicle-to-Grid (V2G) Integration: A Sociotechnical Review and Research Agenda. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 42, p. 377–406, 17 out. 2017.

PLÖTZ, P.; FUNKE, S. Á.; JOCHEM, P. The impact of daily and annual driving on fuel economy and CO₂ emissions of plug-in hybrid electric vehicles. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 118, p. 331–340, 1 dez. 2018.

BILOTKACH, V.; MILLS, M. Simple Economics of Electric Vehicle Adoption. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 54, 2012.

XIAN, T. F.; SOON, C. M.; RAJOO, S. A Parametric Study: The Impact of Components Sizing on Range Extended Electric Vehicle's Driving Range. **UTM Centre for Low Carbon Transport**, 2016.

BENAVIDES, P. et al. A Systematic Review of Technologies, Control Methods, and Optimization for Extended-Range Electric Vehicles. **Applied Sciences**, 2021.

SARLIOGLU, B. et al. Benchmarking of Electric and Hybrid Vehicle Electric Machines, Power Electronics, and Batteries, 2015.

WU, J. et al. A review of PEM fuel cell durability: Degradation mechanisms and mitigation strategies. **Journal of Power Sources**, v. 184, n. 1, p. 104–119, 15 set. 2008.

STAFFELL, I. et al. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. **Energy and Environmental Science**, v. 12, n. 2, p. 463–491, 1 fev. 2019.

HASSAN, Q. et al. Hydrogen Fuel Cell Vehicles: Opportunities and Challenges, 2023.

DING, Y. et al. Automotive Li-Ion Batteries: Current Status and Future Perspectives. **Electrochemical Energy Reviews**, v. 2, n. 1, 1 mar. 2019.

DING, X. et al. Research on Energy Management Strategy for Extended-Range Electric Vehicle Based on Bargaining Game. **Energy Technology**, v. 12, n. 5, 1 maio 2024.

YAO, M.; ZHU, B.; ZHANG, N. Adaptive real-time optimal control for energy management strategy of extended range electric vehicle. **Energy Conversion and Management**, v. 234, 15 abr. 2021.

CHEN, B. C.; GUAN, J. C.; LI, J. H. Adaptive power management control of range extended electric vehicle. **Energy Procedia**, v. 61, p. 67–70, 2014.

LI, J. et al. A real-time optimization energy management of range extended electric vehicles for battery lifetime and energy consumption. **Journal of Power Sources**, v. 498, 30 jun. 2021.

KIM, J. H.; SIMON T. W.; VISKANTA R. Journal Of Heat Transfer Policy On Reporting Uncertainties In Experimental Measurements And Results, 1993.