



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS GRADUAÇÃO ENGENHARIA AUTOMOTIVA

**MODIFICAÇÃO EM UM BANCO DINAMOMÉTRICO PARA
REALIZAR ENSAIOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM
VEÍCULOS ELÉTRICOS**

**HELLEN MARTINS SOUZA
GUILHERME FERREIRA SILVA**

Orientador: Stephan Hennings Och
Universidade Federal do Paraná – UFPR

Coorientador: Giovanni Reis
HORSE

CURITIBA
AGOSTO DE 2023

**HELLEN MARTINS SOUZA
GUILHERME FERREIRA SILVA**

**MODIFICAÇÃO EM UM BANCO DINAMOMÉTRICO PARA
REALIZAR ENSAIOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM
VEÍCULOS ELÉTRICOS**

Trabalho de conclusão de curso submetido à banca examinadora designada pelo Colegiado do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná no Setor de Tecnologia, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de pós graduando em Engenharia Automotiva.

Orientador: Stephan Hennings Och
 Universidade Federal do Paraná – UFPR

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS GRADUAÇÃO ENGENHARIA AUTOMOTIVA
CURITIBA
AGOSTO DE 2023

**HELLEN MARTINS SOUZA
GUILHERME FERREIRA SILVA**

**MODIFICAÇÃO EM UM BANCO DINAMOMÉTRICO PARA
REALIZAR ENSAIOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM
VEÍCULOS ELÉTRICOS**

Stephan Hennings Och
Orientador

Giovanny Reis
Coorientador

Professor
Luis Henrique Assumpção Lolis

Curitiba, 22 de Agosto de 2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS GRADUAÇÃO ENGENHARIA AUTOMOTIVA
CURITIBA
AGOSTO DE 2023

Resumo

Com intuito de levantar as informações necessárias para a adaptação dos meios de ensaio de um Laboratório de Emissões Veiculares para executar testes de determinação de eficiência energética e autonomia de veículos leves de propulsão exclusivamente elétrica, foi realizado um estudo dos regulamentos técnicos que definem o contexto regulatório de certificação de veículos destinados ao mercado brasileiro. Foram abordados os programas de regulação de emissões de escapamento denominado PROCONVE, programa de eficiência energética vigente, Rota 2030, e o Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular, sendo estes os suportes que definem o procedimento SAE J1634:2017 como referência para obtenção dos valores de certificação até que uma norma equivalente nacional seja publicada. Foram levantados os parâmetros a serem aquisitados e o memorial de cálculo necessário de forma a prover as instruções para a criação de um formulário padronizado para emissão de relatórios deste tipo de teste neste laboratório. Também foi realizado um levantamento sobre equipamentos de medição disponíveis no mercado que atendam aos requisitos do procedimento normativo para aquisição de dados. A fim de expandir a aplicabilidade da adaptação do laboratório para além do contexto de homologação, foram desenvolvidas algumas simulações e cenários de testes utilizando o Matlab/Simulink demonstrando que este investimento também possui potencial de prover testes e estudos fundamentais ao desenvolvimento de engenharia de veículos elétricos.

Palavras-chave:

Electric Vehicles; Hybrid Vehicles; Dynamometric Bench; Electric power consumption.

Abstract

In order to gather the necessary information to adapt the testing means of a Vehicle Emissions Laboratory to carry out tests to determine the energy efficiency and autonomy of light vehicles with exclusively electric propulsion, a study was carried out of the technical regulations that define the regulatory context certification of vehicles destined for the Brazilian market. The exhaust emission regulation programs called PROCONVE, the current energy efficiency program, Rota 2030, and the Brazilian Vehicle Labeling Program were discussed, these being the supports that define the SAE J1634:2017 procedure as a reference for obtaining certification values until a national equivalent standard is published. The parameters to be acquired, and the necessary calculation report, were collected in order to provide instructions for creating a standardized form for issuing reports of this type of test in this laboratory. A survey was also carried out on measuring equipment available on the market that meets the requirements of the normative procedure for data acquisition. In order to expand the applicability of laboratory adaptation beyond the homologation context, some simulations and test scenarios were developed using Matlab/Simulink, demonstrating that this investment also has the potential to provide fundamental tests and studies for the development of electric vehicle engineering.

Keywords: Electric Vehicles; Hybrid Vehicles; Dynamometric Bench; Electric power consumption.

Lista de Figuras

Figura 1 – Ciclo urbano de condução	8
Figura 2 – Ciclo estrada de condução do dinamômetro da EPA (HFEDS)	9
Figura 3 – Descritvo da sequência de testes UDDS para compor o SCT em função do estado de carga da bateria	10
Figura 4 – Descritvo da sequência de testes HFEDS para compor o SCT em função do estado de carga da bateria	10
Figura 5 – Estado de carregamento	11
Figura 6 – Ciclos de Recarga	12
Figura 7 – Valor RMS vs Senóide	19
Figura 8 – HIOKI PW3390	20
Figura 9 – Esquemático do laboratório de emissões veiculares da HORSE	23
Figura 10 – Modelo de um banco dinamométrico para testes de veículos elétricos	25
Figura 11 – Modelo detalhado	26
Figura 12 – Modelo detalhado	27
Figura 13 – Controle da máquina síncrona	28
Figura 14 – Controle da máquina síncrona	28
Figura 15 – Primeiro cenário	29
Figura 16 – Segundo cenário	30
Figura 17 – Terceiro cenário	31

Lista de Abreviaturas e Siglas

AC	Corrente alternada;
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica;
BEV	Veículo a bateria elétrica;
CAT	Certificado de Adequação de Legislação de Trânsito;
DC	Corrente contínua;
DETRAN	Departamento Estadual de Trânsito;
Eac	Energia de recarga AC;
EC	Consumo elétrico;
Edc	Energia de recarga DC;
ESG	<i>Environmental, Social and Governance</i>
EV	Veículos elétricos;
FC	Carga total;
FTP	Testes de Emissões Federal;
FDT	Teste de esgotamento completo;
HEV	Veículos elétricos híbridos;
HFEDS	Ciclo de teste na rodovia;
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis;
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia;
LCVM	Licença para Uso da Configuração de Veículo ou Motor;
LDVs	Veículos leves;
LEV	Laboratório de emissões veiculares;
MCT	Teste de vários ciclos;
PDT	Teste de esgotamento parcial;

PBEV-INMETRO	Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular;
PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos;
RENAVAM	Registro Nacional de Veículos Automotores;
SCT	Metodologia de teste único;
SENATRAN	Secretaria Nacional de Trânsito;
SOC	Estado de carga;
SUV	<i>Sport Utility Vehicle</i> ;
TCS	Sistema de controle de tração;
UBE	Energia de bateria utilizável;
UDDS	Ciclo de teste na cidade;

Lista de Símbolos

V	Tensão elétrica;
I	Corrente elétrica;
f	Frequência;
n	Número de amostras;
E_{dc}	Energia de descarregamento;
CR	Recuperação de carga;
FRE	Energia de recarga;
UBE	Ensaio de descarga completa;
RAF	Fator de alocação de recarga;
$EC_{ac_{ciclo}}$	Consumo de energia em corrente alternada;
$EC_{dc_{[phase]_i}}$	Energia consumida em corrente contínua;

Sumário

1 – Introdução	1
1.1 Justificativa e Relevância	2
1.2 Objetivos Gerais	2
1.2.1 Objetivos específicos	2
1.3 Estrutura do Trabalho	3
2 – Políticas ambientais e normas vigentes	4
2.1 PROCONVE	4
2.2 Rota 2030	5
2.2.1 Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV)	6
2.3 SAE J1634	7
2.3.1 UDDS - <i>Urban Dynamometer Driving Schedule</i>	7
2.3.2 HFEDS - <i>Highway Fuel Economy Driving Schedule</i>	9
2.3.3 SCT - <i>Single Cycle Test</i>	9
2.3.4 MCT - <i>Multi Cycle Test</i>	10
2.3.5 Descritivo geral da preparação e procedimento de teste	11
2.3.6 Aquisição de dados e parâmetros calculados	12
2.3.6.1 Fatores de escala de ciclos	14
2.3.6.2 Consumo de energia em corrente contínua total	14
2.3.6.3 Consumo de energia em corrente alternada	14
2.3.6.4 Fator de alocação de recarga (RAF)	15
2.3.6.5 Verificação de carga completa	15
2.3.6.6 Autonomia	15
2.4 Aquisição de Dados	16
2.4.1 Analisador de Potência	18
3 – Chassis dinamométrico para VEH	22
3.1 Laboratório de Emissões da HORSE	22
3.2 Modificação do chassis dinamométrico para veículos elétricos	24
3.2.1 Modelo do banco dinamométrico para veículos elétricos	25
3.2.2 Máquinas elétricas com tensão elétrica maior que a prevista	29
3.2.3 Máquinas elétricas alimentadas com tensão elétrica menor que a prevista	30
3.2.4 Máquinas elétricas com tensão elétrica igual que a prevista	31
4 – Conclusão	33

Referências 35

1 Introdução

Para incentivar à pesquisa e desenvolvimento, o governo federal promove programas como o Rota 2030 que visa desenvolver novos parâmetros para eficiência veicular utilizando o modelo *Well to Wheel* (WTW) para avaliar as emissões de gases poluentes ao longo da cadeia energética durante o ciclo de vida do veículo. O *Well to Tank* (WTT) abrange as etapas desde a produção de eletricidade até os impactos em postos de recarga. Assim, para atender a nova necessidade do mercado automotivo como segurança, desempenho e eficiência energética do veículo, requisitos mais rigorosos farão parte do escopo de homologação para que o veículo tenha o aval positivo por parte de instituições governamentais para ser comercializado. (DESENVOLVIMENTO INDÚSTRIA, 2023)

Os fabricantes e importadores de veículos são obrigados a informar os dados de consumo de combustível, expresso em km/L e eficiência energética, expressa em MJ/km, de cada modelo. O procedimento ABNT NBR 10312 é definido pelo INMETRO para fins de determinação dos esforços a serem aplicados pelo banco dinamômetro para simular as forças resistivas, sejam aerodinâmicas, resistência de rolamento dos pneus. Este procedimento descreve a determinação pelo método de desaceleração em pista, e é aplicável tanto para veículos a combustão interna, híbridos e puramente elétricos. Dessa forma é possível simular situações reais de carga e acompanhar o desempenho do motor em tempo real e de forma totalmente estática. (INMETRO, 2023)

O consumo e a eficiência energética de veículos equipados com motor à combustão é determinado pelo método de balanço de carbono, que consiste na determinação do consumo de combustível a partir das massas de hidrocarbonetos totais (HC), monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂) emitidas pelo motor do veículo durante os ciclos de condução definido na ABNT NBR 7024. Alternativamente pode ser determinado pelo método gravimétrico ou volumétrico, que consiste na medição direta da massa ou do volume de combustível fornecido ao veículo durante os ciclos de condução. Os veículos híbridos, tanto recarregáveis externamente como os apenas de recarga interna aplica o procedimento ABNT NBR 16567:2020, que também leva a menção ao ABNT NBR 7024:2017, assim como nos casos de veículos à combustão citado anteriormente. Para veículos elétricos a determinação da eficiência energética e autonomia da bateria é realizado conforme os ensaios descritos na SAE J1634:2017. (INMETRO, 2023)

Dessa forma, os testes de eficiência para veículos elétricos é bastante particular quando comparado aos procedimentos aplicáveis a veículos equipados a motor à combustão.

1.1 Justificativa e Relevância

Em um contexto incluindo debates sobre ecologia, ESG (*Environmental, Social and Governance*), que visam incentivar a eletrificação do setor de transportes são notadas várias iniciativas. Ao abordar especificamente o tema proposto nesse trabalho, dentre os benefícios em modificar o banco dinamométrico já existente para a realizar os testes em veículos elétricos (EV), é a redução dos custos comparado ao adquirir uma nova infraestrutura para um laboratório.

O Laboratório de Emissões Veiculares (LEV) da HORSE possui em seu escopo de acreditação diversos testes no âmbito de emissões, tanto de escapamento como evaporativas, e de eficiência energética de veículos a combustão. Com o aumento dos desenvolvimentos de projetos de veículos eletrificados, foi percebida a oportunidade de ampliação do escopo para contemplar os testes de eficiência energética de veículos elétricos. Dessa forma, é possível perceber a importância do processo de medição de emissões e consumo no laboratório de emissões veiculares. Os valores mensurados que serão apresentados ao longo do trabalho são a base da estrutura de política ambiental do setor automotivo no país.

1.2 Objetivos Gerais

Essa monografia visa apresentar um banco dinamométrico modificado para medição de consumo em veículos elétricos e híbridos (VEH) e a viabilidade de utilizar a estrutura 4x2 de forma a desativar a tração complementar para veículos com a tração 4x4.

Inicialmente, será revisado os procedimentos de medição de consumo de combustível, de determinação do consumo elétrico e autonomia para veículos leves definidos como referência para os processos de certificação de veículos leves no Brasil. Com a finalidade de orientar a adaptação de um laboratório de emissões veiculares que atualmente é capacitado para a realização de testes apenas de veículos de propulsão a combustão interna. Assim, é necessário a adaptação do banco dinamométrico que já é uma instalação própria da HORSE para realizar testes de veículos de propulsão puramente elétrica. Dessa forma, o investimento será menos dispendioso se não for alterar todos os meios de aquisição dos parâmetros de eficiência energética, além de evitar custos com fornecedores externos de teste. Os seguintes tópicos serão abordados de forma específica:

1.2.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Detalhar o processo de determinação do consumo elétrico e autonomia de veículos leves de propulsão puramente elétrica conforme SAE J1634:2017;
- Levantar os parâmetros que possibilitam a medição do consumo elétrico e autonomia, conforme SAE J1634:2017, além de abordar a caracterização técnica dos equipamentos necessários;
- Caracterizar o processo de medição a ser implementado no laboratório de emissões veiculares como objeto principal deste estudo.

1.3 Estrutura do Trabalho

O primeiro capítulo desse trabalho apresenta o escopo do tema a ser abordado, a justificativa e relevância, os objetivos pretendidos ser atingidos ao final da atividade, por conseguinte, a organização do texto explicitando o tema central do trabalho, e por fim, a conclusão e trabalhos futuros.

A segunda seção exibe uma revisão literária e das normas SAE J1634 acerca do consumo de energia de veículos movidos à bateria elétrica, regras de procedimento dos testes nos veículos a serem realizados. Ao tratar de veículos elétricos que possuem motores trifásicos também será apresentado os conceitos de fator de potência, potência ativa, potência reativa e por fim, o funcionamento dos capacitores diante desses fenômenos, uma vez que este representa a bateria do veículo. Uma pequena abordagem sobre o consumo de combustível e eficiência de veículos híbridos (VEH) também será feito nesse capítulo.

No capítulo três é abordado o tema central deste trabalho. Isto é, discute-se sobre banco dinamométrico que se encontra no LEV equipado HIOKI PW3390 *Power Analyzer*, que se trata um medidor de potência de bancada que é capaz de realizar medições trifásicas com alto grau de precisão. Após uma breve simulação de um veículo elétrico em um dinamômetro de rolos onde se apresenta a corrente trifásica, a velocidade do rotor e o torque aplicado. Por fim, tem-se a conclusão apresentando os benefícios da implementação de um aquisitor de dados em um banco de rolos já existente.

2 Políticas ambientais e normas vigentes

Políticas ambientais são conjuntos de metas e instrumentos cujo objetivo é reduzir os impactos negativos causados pela ação humana sobre o meio ambiente e são necessárias para conduzir a posturas e procedimentos mais sustentáveis, reduzindo a quantidade de poluentes lançados no ambiente e minimizando os recursos naturais.

- PROCONVE - Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores, que visa a redução da emissão de poluentes, a promoção do desenvolvimento tecnológico nacional e a melhoria da qualidade dos combustíveis. (CETESB, 2023)
- Rota 2030 - programa de incentivo através de benefícios tributários, em contrapartida a atendimentos de requisitos de adesão ao Programa de Etiquetagem Veicular (PBEV – INMETRO), cumprimento de metas de eficiência energética e de desempenho estrutural e de tecnologias assistivas, além de dispêndios em Pesquisa e Desenvolvimento. (9.557, 2018)
- Renovabio - visa o aprimoramento das políticas e dos aspectos regulatórios dos biocombustíveis, a fim de contribuir para a superação dos desafios técnicos e econômicos a serem enfrentados pelo setor. (ENERGIA, 2016)

A comprovação ao atendimento dos limites ocorre através do processo de homologação dos veículos junto ao IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis), que concede a Licença para Uso da Configuração de Veículo ou Motor (LCVM)(NACIONAL, 2018). Esta licença é requisito para o registro dos veículos junto ao Senatran (Secretaria Nacional de Trânsito), responsável pela emissão do Certificado de Adequação de Legislação de Trânsito (CAT) e junto ao Registro Nacional de Veículos Automotores (RENAVAM), possibilita o registro e licenciamento de veículos ao DETRAN. Emitir Certificado de Adequação à Legislação de Trânsito. (SENATRAN, 2023) Para veículos leves, as bases do IBAMA com as informações de emissões e de eficiência são referência para informações do Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV-INMETRO) e, somado ao registro de emplacamentos do Senatran, servem de base para o Rota2030 no que diz respeito a avaliação da Eficiência Energética. (REPÚBLICA, 2018)

2.1 PROCONVE

A Instrução Normativa 11, de 25 de julho de 2014 define através do artigo 1º que o ensaio de autonomia deve ser realizado conforme o ciclo de condução de estrada

previsto na Norma Brasileira ABNT NBR 7024:2010 e ABNT NBR 16567:2020, ou suas sucedâneas, e declarado no processo de obtenção da Licença para Uso da Configuração de Veículo ou Motor (LCVM) para veículos leves de passageiro e comercial, nacionais ou importados.(??)

Para atingir os objetivos de redução de emissões de poluentes, o PROCONVE foi estabelecido sob o formato de fases definidas por categoria de veículo. O PROCONVE L aplica-se para veículos leves, passageiros e comerciais, PROCONVE P para veículos pesados, PROMOT M para motocicletas e similares e PROCONVE MAR para máquinas agrícolas e rodoviárias. Estas fases são caracterizadas pelo estabelecimento de limites de emissões. Na data de elaboração deste trabalho, o PROCONVE L está na 7ª fase, L7, e já tem definida a introdução da fase L8 a partir de 1º de Janeiro de 2025, conforme Resolução CONAMA 492, de 20 de Dezembro de 2018. Para veículos pesados, a fase em vigor é a P8, descrita pela Resolução CONAMA 490, de 16 de Novembro de 2018. Para motocicletas e veículos similares, a fase em vigor é a PROMOT M5, descrita na Resolução CONAMA 493, de 24 de Junho de 2019. Para máquinas agrícolas e rodoviárias, está em vigor a fase PROCONVE MAR-1, descrito na Resolução CONAMA 433, de 13 de julho de 2011.

Cabe ressaltar que veículos de propulsão puramente elétrica são isentos da emissão da licença junto ao IBAMA (LCVM) até a fase L7, para a fase L8, devido à mudança metodológica de limites de emissões que deixará de ser por modelo e passará a ser pela média corporativa, os veículos elétricos passarão a ter uma licença junto ao IBAMA onde constará como veículo zero emissões. (CETESB, 2023)

2.2 Rota 2030

O Programa Rota 2030, sucessor do programa Inovar-Auto que esteve em vigor de 2013 a 2017, trata-se de uma estratégia do governo federal para incentivo ao desenvolvimento do setor automotivo do país. Este se divide nas seguintes frentes:

- Eficiência energética;
- Desempenho estrutural e tecnologias assistivas;
- Adesão a programas de rotulagem veicular.

Em se tratando da frente de eficiência energética, o fabricante ou o importador de veículos deve apresentar relatórios anuais para acompanhamento do atendimento aos requisitos quanto a frota, sendo esta a meta compulsória, e por veículo, onde se atribui incentivos fiscais.

Os veículos são classificados em três categorias em que estão sujeitos a aplicação de três equações em função de sua massa em ordem de marcha para verificação do atendimento mandatório da frota:

- Categoria 1: veículos passageiro, comercial leve com massa em ordem de marcha menor que 1.564 kg e SUV (*Sport Utility Vehicle*) Compacto;
- Categoria 2: veículos fora de estrada e SUV Grande cuja área projetada seja maior que 8 m²;
- Categoria 3: comercial leve com massa em ordem de marcha maior que 1.564 kg;

Na presente fase, o programa é dedicado a veículos leves, cuja massa máxima autorizada de até 3.856 kg e massa em ordem de marcha de até 2.720 kg. (9.557, 2018)

M.O.M. (kg) - é a massa do veículo mestre completo em ordem de marcha, conforme definido pela Norma ABNT NBR ISO 1176:2006, incluindo massa da(s) roda(s) sobressalente(s), do extintor de incêndio, peças sobressalentes padrão, calços e caixa de ferramentas padrão constante da respectiva LCVM.(UNIÃO, 2018)

Para veículos de propulsão exclusivamente elétrica, objeto principal desse trabalho, o procedimento de medição de eficiência energética em MJ/km fica definida na Portaria N° 2.202-SEI, de 28 de dezembro de 2018, no Capítulo V Art. 16 § 2º: “Os veículos referidos no § 1º devem atender às prescrições das regras ABNT NBR 16567:2016 e SAE J1634 da USA Society of Automotive Engineers - SAE, até que se tenha uma norma técnica ABNT NBR equivalente e em vigor.”

2.2.1 Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV)

O Programa Brasileiro de Etiquetagem foi uma iniciativa promovida pelo Inmetro em 1984 para racionalizar o uso dos diversos tipos de energia no País, informando os consumidores sobre a eficiência energética de cada produto, estimulando-os a fazer uma compra mais consciente. A etiquetagem veicular foi definida em 2008, sendo um programa voluntário, e que teve sua adesão incentivada ao longo dos anos subsequentes. Para que o fabricante. Dentre os requisitos do Rota 2030 está a adesão do Programa de Etiquetagem Veicular em 100% da frota como requisito compulsório. (INMETRO, 2021)

Além das provisões sobre a etiqueta, o Inmetro também é responsável pela avaliação da conformidade do programa. Inicialmente, as principais provisões regulamentares deste foram estabelecidas na Portaria Inmetro n.º 391, de 04 de novembro de 2008. Esta foi revogada e substituída pela Portaria Inmetro n.º 377, de 29 de setembro de 2011. Em 2020, o Inmetro disponibilizou para consulta pública a Portaria N° 16, de 07 de outubro de 2020, que substituiria a anterior, trazendo importantes provisões, tais

como os procedimentos definidos para avaliação da eficiência energética e autonomia dos veículos elétricos. Ainda que não oficializada definitivamente, estas definições foram importantes para que os fabricantes de veículos aderentes aos programas PBEV e Rota2030 pudessem etiquetar os veículos elétricos. Só em maio de 2023 que a Portaria Nº 169, de 3 de maio de 2023 foi publicada, oficializando os procedimentos já praticados.

Conforme o item 6.1.2.1.2.1, “O Ensaio de Medição de Consumo de Combustível ou Energia deve ser realizado para o ciclo de condução urbano e para o ciclo de condução de estrada, conforme normas técnicas ABNT NBR 10312, ABNT NBR 7024, ABNT NBR 6601, ABNT NBR 16567, SAE J1634:2017 ou norma ABNT equivalente e suas normas sucedâneas”

2.3 SAE J1634

A SAE determina procedimentos de testes em veículos elétricos para serem operados em via pública e privada. Essa norma refere-se apenas para veículos elétricos em que sua única forma de energia é a bateria. Esse documento estabelece padrões para determinar o consumo e a autonomia de veículos leves, baseando-se no procedimento de Testes de Emissões Federal (FTP). Para isto, é utilizado o ciclo denominado UDDS (*Urban Dynamometer Driving Schedule*) que se trata de um plano detalhado para realizar testes e avaliações em veículos automotores dentro de um ambiente simulado de condução urbana. Esse tipo de teste é comumente utilizado para avaliar o desempenho e a eficiência de veículos em condições de tráfego urbano. Ainda, é utilizado ciclo HFEDS (*Highway Fuel Economy Driving Schedule*), que envolve testar veículos em condições de estrada para determinar sua eficiência energética em viagens de longa distância.

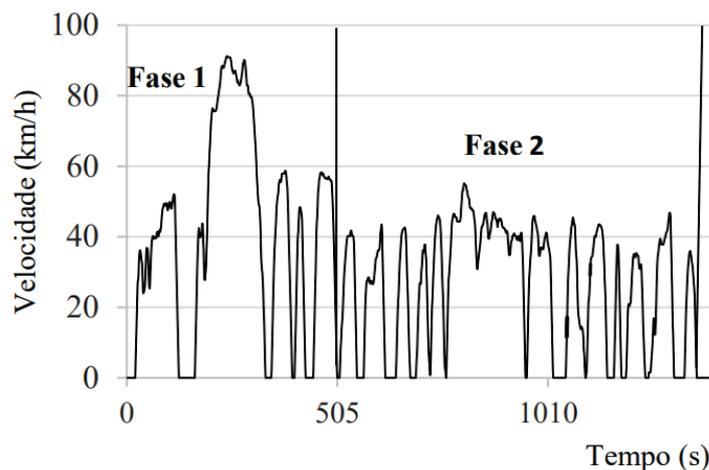
2.3.1 UDDS - *Urban Dynamometer Driving Schedule*

Um ciclo urbano de condução em dinamômetro (UDDS) é um perfil de velocidade em função do tempo padronizado usado para avaliar a eficiência energética e as emissões de veículos, simulando condições típicas de direção urbana. Este ciclo consiste em segmentos repetidos de aceleração, desaceleração e condução em estado estacionário que imitam o tráfego de parada e partida comumente encontrado em ambientes urbanos.

O ciclo UDDS foi inicialmente desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA como parte do Procedimento de Teste Federal (FTP) para testes de emissão de veículos leves. Este ciclo é comumente usado para determinar as classificações de economia de combustível exibidas na etiqueta veicular, bem como para fins de teste e certificação de emissões, sendo no contexto de emissões também denominado FTP 72, quando composto por uma fase transitória e uma fase estabilizada e FTP 75 quando

composto por uma fase transitória iniciado por partida a frio, uma fase estabilizada e mais uma fase transitória de partida a quente sucedido de um intervalo de 10 minutos. De maneira mais sucinta e genérica, também pode ser referenciado por ciclo urbano. É uma ferramenta essencial para avaliar o desempenho dos veículos em condições realistas de condução urbana, levando em consideração fatores como marcha lenta, aceleração e desaceleração que afetam a eficiência de combustível e as emissões.

Figura 1 – Ciclo urbano de condução



Fonte: (DIAS, 2017)

Na Figura 1, a fase 1 observada no ciclo é denominado por fase transitória. A fase 2 também é denominada por fase estabilizada.

No contexto brasileiro, é importante observar que para os testes de determinação de emissões conforme ABNT NBR 6601:2021, aplicável a veículos com propulsão a combustão, o procedimento define a realização de uma fase transitória, uma fase estabilizada, um período de 10 (dez) minutos com o veículo desligado e logo após mais uma fase transitória. Conforme este procedimento o ciclo urbano também é chamado de ciclo de três fases.

Já no contexto da ABNT NBR 16567:2020, aplicável a veículos híbridos, a determinação de emissões e consumo de combustível urbano é realizada por fase transitória, seguida de fase estabilizada, intervalo de 10 (dez) minutos com o veículo desligado, seguido por mais uma fase transitória e por fim fase estabilizada. Neste caso, o ciclo é chamado de CST, *Charge Sustaining Test*, devido à condição do ponto de sustentação de carga da bateria. No contexto da SAE J1634, o ciclo urbano, ou então UDDS, será composto por fase transitória seguido de fase estabilizada.

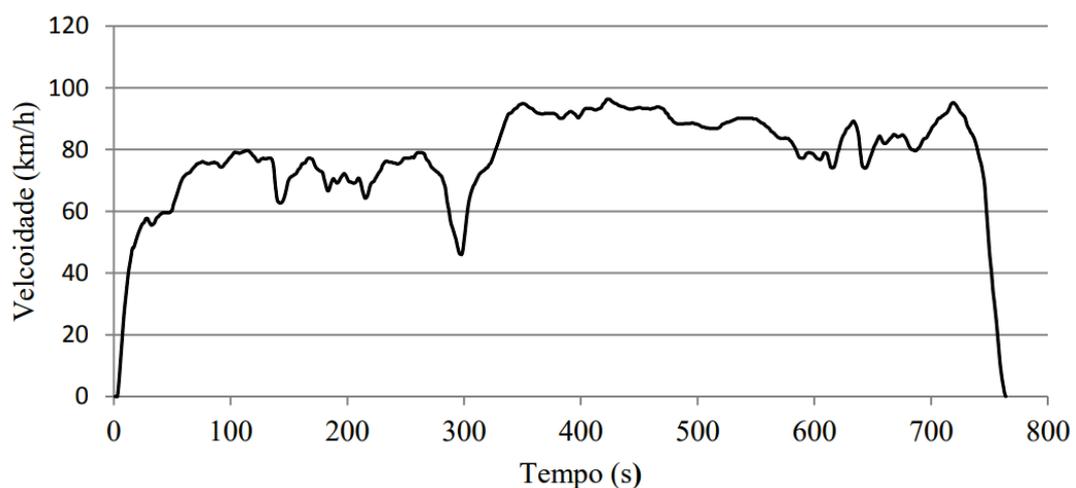
2.3.2 HFEDS - Highway Fuel Economy Driving Schedule

O Highway Fuel Economy Driving Schedule (HFEDS), também conhecido como ciclo rodoviário ou HFET (*Highway Fuel Economy Test*), é um ciclo de condução padronizado usado para avaliar a eficiência de combustível e as emissões de veículos em condições de condução em rodovias. Semelhante ao Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS), o HFEDS faz parte do Procedimento de Teste Federal (FTP) usado pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA para testes de emissão e classificações de economia de combustível.

O ciclo de direção HFEDS foi projetado para representar condições típicas de direção em rodovias em termos de velocidade e aceleração. Consiste em uma direção relativamente estável em velocidades mais altas em comparação com o UDDS, com marcha lenta mínima e comportamento limitado de parada e partida. O perfil do ciclo de velocidade-tempo é baseado em dados reais de condução em rodovias para garantir que reflita as condições do mundo real com a maior precisão possível.

O ciclo HFEDS é usado em conjunto com o ciclo UDDS para criar uma representação abrangente dos cenários de direção urbana e rodoviária. Este procedimento de teste combinado fornece uma avaliação mais holística da eficiência de combustível e desempenho de emissões de um veículo, levando em consideração as diferentes condições de direção que os veículos podem encontrar no mundo real.

Figura 2 – Ciclo estrada de condução do dinamômetro da EPA (HFEDS)



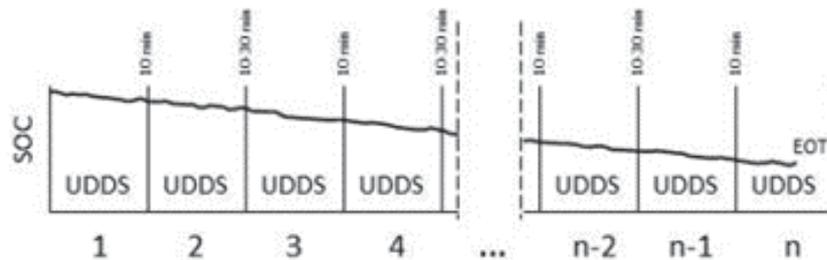
Fonte: (DIAS, 2017)

2.3.3 SCT - Single Cycle Test

A determinação da autonomia e do consumo de energia dos veículos elétricos a bateria (BEV) pode ser realizado através do SCT (*Single Cycle Test*), ilustrado na Figura 3

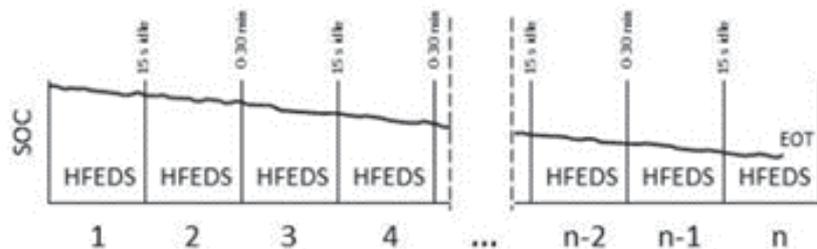
para o ciclo urbano e para o ciclo de estrada é apresentado na Figura 4. O SCT exige que um veículo seja conduzido repetidamente ao longo do mesmo perfil de ciclo até que a energia da bateria do veículo (*SOC – State of Charge*) esteja completamente esgotada.

Figura 3 – Descrição da sequência de testes UDDS para compor o SCT em função do estado de carga da bateria



Fonte: SAE J1634:2017

Figura 4 – Descrição da sequência de testes HFEDS para compor o SCT em função do estado de carga da bateria

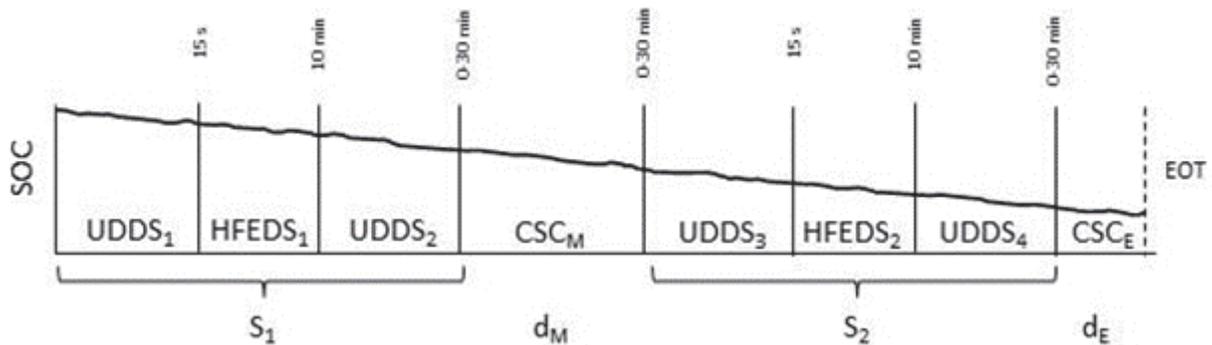


Fonte: SAE J1634:2017

2.3.4 MCT - Multi Cycle Test

A característica do SCT de se tornar muito longo, principalmente diante dos avanços da tecnologia das baterias permitirem cada vez mais uma capacidade de autonomia maior, levou a idealização do MCT, descrito na Figura 5, no qual mescla ciclos UDDS, HFEDS e trechos de alta velocidade constante denominado CSC (*Constant Speed Cycle*). Neste trecho a velocidade deve constante em 105 km/h. Caso o veículo não seja capaz de atingí-la, admite-se realizar em 90% da velocidade máxima sustentável. Desta forma, o SCT é recomendado para determinação de autonomia e eficiência energética para veículos cuja bateria possui autonomia de até 97 km, e aos que possuem autonomia maior, recomenda-se o MCT.

Figura 5 – Estado de carregamento



Fonte: SAE J1634:2017

2.3.5 Descritivo geral da preparação e procedimento de teste

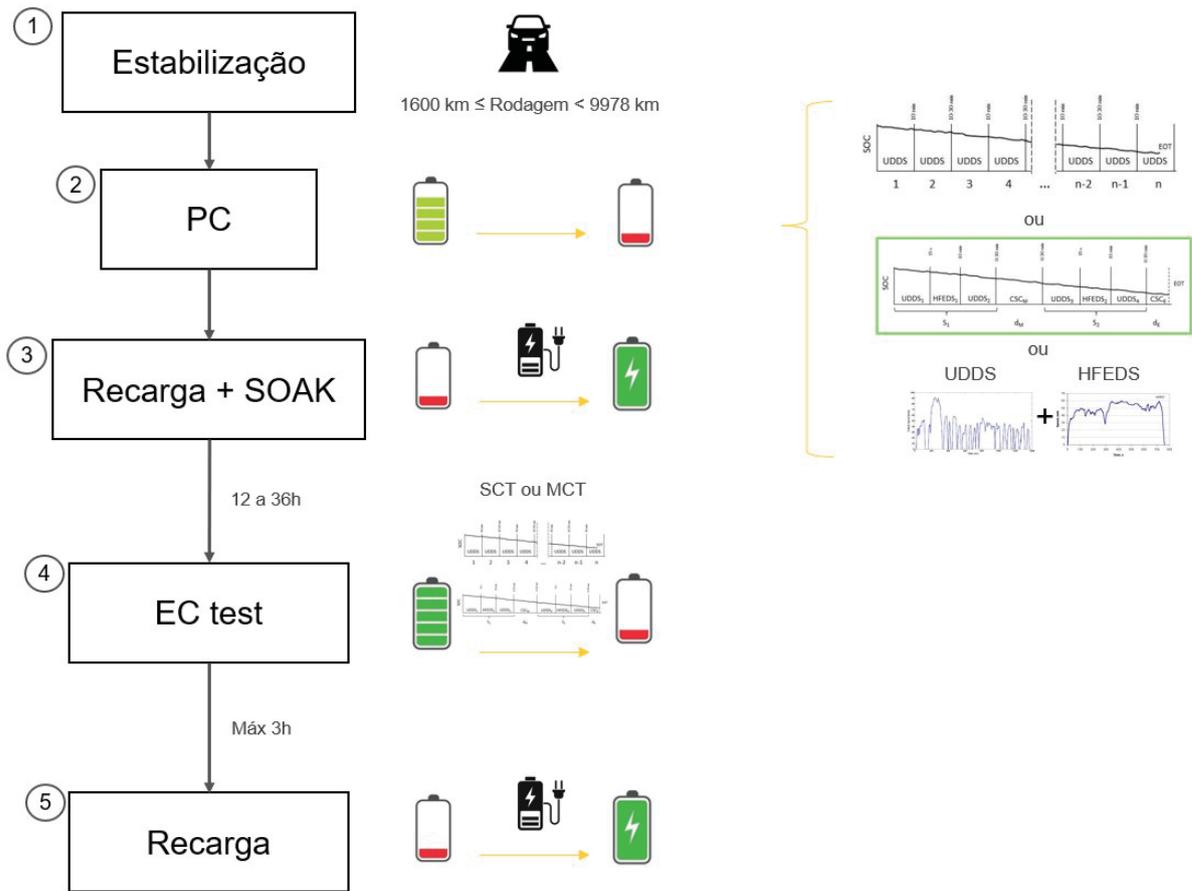
O veículo deve ser rodado a fim de acumular quilometragem mínima de 1.600 km cuja forma pode ser definida pelo fabricante, podendo ser em condições normais de uso, cliente, rotas definidas ou até mesmo seguindo ciclos em dinamômetros dedicados para acúmulo de rodagem, sendo esta etapa o amaciamento.

Deve-se carregar completamente em ambiente de temperatura controlada entre 20 °C e 30 °C. Recomenda-se que esta recarga seja mensurada. Então deve-se realizar um descarregamento completo através do ciclo MCT ou SCT em banco dinamométrico, ou ainda é permitido a realização de ao menos um ciclo UDDS, ou um HFEDS. Denomina-se esta etapa por condicionamento. Na sequência, o veículo deverá ser completamente recarregado, aquisitando os parâmetros de carregamento, realizado em ambiente de temperatura controlada e deve permanecer nesta condição de temperatura por um período de mínimo 12 e máximo 36 horas. Qualquer deslocamento que seja necessário deve ser feito rebocando ou empurrando o veículo, sem que se utilize a propulsão do veículo. Esta etapa é chamada de estabilização ou *SOAK*.

A próxima etapa é a efetivamente o teste de determinação do consumo energético (EC) que deve ser sucedida por um carregamento completo em período não maior do que 3 (três) horas do fim do teste.

O fluxograma representado pela Figura 6 descreve as etapas gerais do procedimento SAE-J1634:2017.

Figura 6 – Ciclos de Recarga



Fonte: autoral

2.3.6 Aquisição de dados e parâmetros calculados

Os dados e parâmetros, conforme a Tabela 1, a serem aquisitados e exibidos no relatório de teste de determinação da eficiência energética e autonomia da bateria emitidos pelo laboratório equipado com o banco dinamométrico.

Tabela 1 – Parâmetros que devem ser registrados.

Item	Parâmetro	Descrição	Unidade
1	Capacidade da Bateria em Ampére - Hora	-	<i>DCAh</i>
2	Temperatura do Ambiente de Teste	-	<i>C</i>
3	Horário, Início do SOAK	Pré-teste do período soak	-
4	Horário, Fim do SOAK	Pré-teste do período soak	-
5	Distância percorrida (Total)	-	<i>km(mi)</i>
6	Distância percorrida por fase (D cycle)	-	<i>km(mi)</i>
7	Energia Descarregada (EDC)	DC líquida WATT-Horas descarregada durante o teste	<i>DCW × h</i>
8	Descarga Amp-horas DC	DC líquida A*h descarregada	<i>DCA × h</i>
9	Tempo, Fim de teste	Tempo conectado ao EVSE	-
10	Modo de carga do veículo	Tensão Nominal AC na tomada	-
11	Tempo, Início de carga	Tempo conectado ao EVSE	-
12	Tensão de Tomada	Tensão Nominal AC na tomada	-
13	Tensão de Recarga AC	Tensão de tempo real RMS medida na tomada (1 amostra no mínimo por minuto)	<i>ACVolts</i>
14	Energia de Recarga AC	Energia AC Total da tomada	<i>ACW × h</i>
15	Recarga DC Amp-Horas (CC)	DC líquida A.h devolvida a bateria	<i>DCA × h</i>
16	Tempo, Fim do período de recarga	Carga de tempo total (FC) é alcançada	-

Fonte: SAE J1634.

De maneira geral, a energia de descarga E_{dc} , dado em kW, é determinada por:

$$E_{dc} = \frac{1}{3600 \times f} \sum_{j=0}^n V_j \times I_j \quad (1)$$

A determinação da energia consumida em corrente contínua em cada ciclo individualmente, em kW/km, é:

$$ECdc_{[ciclo]_i} = \frac{E_{dc_{ciclo}_i}}{D_{ciclo}_i} \quad (2)$$

2.3.6.1 Fatores de escala de ciclos

A aplicação desses fatores se deve ao consumo de energia dos primeiros ciclos tende a ser mais elevado do que o dos ciclos subsequentes. Isto ocorre devido a limitações da regeneração em cargas elevadas, perdas parasitas e temperatura do sistema.

Os fatores de escala de ciclos determinam a contribuição do valor do consumo de energia de cada fase para o consumo total de energia para um determinado tipo de ciclo. Para determinar o fator de escala do SCT utiliza-se a Equação 3.

$$K_{[ciclo]_i} = \frac{1}{n_{[ciclo]}} \quad (3)$$

Sendo $K_{[ciclo]_i}$ o fator de escala do primeiro ciclo e $n_{[ciclo]}$ o número de ciclos.

Para determinar os fatores de escala do MCT utilizam-se as Equações 4 e 5:

$$K_{UDDS_1} = \frac{Edc_{UDDS_1}}{UBE} \quad (4)$$

Sendo K_{UDDS_1} o fator de escala do primeiro ciclo e UBE a energia bateria utilizável.

$$K_{[UDDS]_2} = K_{[UDDS]_3} = K_{[UDDS]_4} = \frac{1 - K_{UDDS_1}}{3} \quad (5)$$

Sendo $K_{[UDDS]_1}$ o fator de escala do primeiro ciclo urbano, $K_{[UDDS]_2}$ o fator de escala do segundo ciclo urbano, $K_{[UDDS]_3}$ o fator de escala do terceiro ciclo urbano e $K_{[UDDS]_4}$ o fator de escala do quarto ciclo urbano, sucessivamente.

2.3.6.2 Consumo de energia em corrente contínua total

O consumo de energia em corrente contínua total urbano ou estrada Edc_{ciclo} é calculado somando o produto entre o fator de escala de fase e o respectivo consumo de energia de descarga em corrente contínua para cada uma das fases de um dado tipo de ciclo (UDDS ou HFEDS) como descrito na Equação 6.

$$Edc_{ciclo} = \sum (K_{ciclo_i} \times ECdc_{ciclo_i}) \quad (6)$$

2.3.6.3 Consumo de energia em corrente alternada

O consumo de energia em corrente alternada $ECac_{ciclo}$ é determinado multiplicando o consumo de energia em corrente contínua de descarga para um determinado ciclo de condução pelo fator de alocação de recarga conforme a Equação 7.

$$ECac_{ciclo} = RAF \times \sum (Ki \times ECdc_{ciclo}) = RAF \times ECdc_{ciclo} \quad (7)$$

2.3.6.4 Fator de alocação de recarga (RAF)

Valor proporcional entre a energia de recarga FRE e a energia consumida no ensaio de descarga completa da bateria UBE , determinando um fator equivalente a ser aplicado para cada fase do ensaio de acordo com a Equação 8.

$$RAF = \frac{FRE}{UBE} \quad (8)$$

A energia de recarga total FRE é energia de recarga em corrente alternada necessária para recarregar a bateria até sua carga completa no período seguinte a um ensaio de descarga completa.

2.3.6.5 Verificação de carga completa

A equivalência da carga pré e pós-ensaio deve ser verificada usando a definição de índice de recuperação de carga, CR descrita na Equação 9. Uma vez que a capacidade líquida deve retornar à bateria com objetivo de atingir a carga completa durante o evento de recarga, e esta deve ser maior ou igual à capacidade em Ampère-hora Ah , líquida descarregada pela bateria durante o ensaio de descarga completa.

$$CR = \frac{|C_c|}{|C_d|} \geq 0,97 \quad (9)$$

2.3.6.6 Autonomia

A autonomia é definida como a distância total de ensaio conduzida, expressa em quilômetros (km), a partir do início do ensaio, até o ponto em que o veículo atinja a velocidade zero após satisfazer os critérios de fim de ensaio. O fim do ensaio é atingido quando ocorre um dos casos:

- Quando o veículo é incapaz de manter a tolerância de velocidade do ciclo devido à limitação de potência do sistema ou condição em que o fabricante define por motivo de segurança, ou;
- Quando o veículo é conduzido em potência máxima e ainda assim não é incapaz de seguir o ciclo;
- Outro critério especificado pelo fabricante.

2.4 Aquisição de Dados

Em várias aplicações, é essencial obter medições de potência precisas e consistentes. Alta precisão e estabilidade em instrumentos de medição garantem que os resultados obtidos sejam confiáveis e possam ser reproduzidos de forma consistente. A alta precisão é definida como uma série de medições, isto é uma medida da concordância entre determinações repetidas. Geralmente é quantificada como um desvio padrão de uma série de medidas. (SILVA, 1997)

Considerando a análise de máquinas elétricas, é importante entender a relação de fase entre diferentes grandezas elétricas. O ângulo de fase elétrico refere-se à diferença de fase entre duas correntes ou tensões alternadas. No contexto da análise do motor, as medições do ângulo de fase podem fornecer informações sobre as características elétricas do motor, como a relação entre tensão e corrente, o que pode ajudar a diagnosticar problemas e otimizar a eficiência energética do próprio motor. (ROHAN; KIM, 2017)

A eficiência do motor indica a eficácia com que a energia elétrica é convertida em energia mecânica sem perdas. Para medir a eficiência do motor, conecta-se o motor a uma balança dinamométrica. Dessa forma se mede a força rotacional (torque) produzida pelo motor, enquanto o *encoder* rastreia a posição rotacional e a velocidade do motor. Ao realizar a medição de torque e rotação e portando os dados de entrada de energia elétrica, a eficiência do motor pode ser calculada como na Equação 10.

$$\text{Eta} = \frac{P_m}{P_e} \quad (10)$$

Sendo P_m a potência mecânica total sem as perdas de atrito e P_e a potência elétrica sem as perdas por indução e correntes parasitas.

O IPMSM que é o motor de ímã permanente opera com base nos princípios de indução eletromagnética e interação entre os enrolamentos do estator e os ímãs permanentes embutidos no rotor. Quando uma corrente elétrica é aplicada aos enrolamentos do estator, um campo magnético rotativo é criado. Este campo magnético interage com os ímãs fixos no rotor, fazendo com que o rotor gire e gere saída mecânica, ou seja, energia cinética que move o veículo.

O torque produzido por um IPMSM está diretamente relacionado à força do campo magnético e à corrente que flui pelos enrolamentos do estator. Os fatores que influenciam a saída de torque de um IPMSM:

- Magnitude da corrente: aumentando a corrente que flui através dos enrolamentos do estator a força do campo magnético também aumenta, o que resulta em maior produção de torque;

- Força do ímã permanente: a força dos ímãs permanentes embutidos no rotor afeta a capacidade de geração de torque do motor;
- Posição do Rotor: a posição do rotor em relação ao campo magnético do estator influencia a produção de torque. O torque máximo é normalmente alcançado quando os ímãs do rotor estão alinhados com os enrolamentos do estator;
- Geometria do estator e do rotor: o projeto físico e a geometria do estator e do rotor também afetam o desempenho do torque.

Em uma máquina síncrona de ímã permanente interior, o torque se refere à força rotacional gerada pela interação entre os componentes do estator e do rotor, com fatores como corrente, força do ímã e posição do rotor influenciando a saída do torque do motor. (NELSON, 2017)

A seção posterior apresenta o equipamento que será utilizado para realizar a avaliação e medir o desempenho do motor elétrico durante os testes homologativos.

2.4.1 Analisador de Potência

Dentre os analisadores de potência que o mercado oferece atualmente, será apresentado nesta monografia o HIOKI PW3390, uma vez que os laboratórios similares ao da HORSE utilizam esse equipamento para homologação de VE, portanto se trata de um analisador muito confiável em suas medidas. Conforme a SAE J1634, é necessário que os amperímetros que utilizam a técnica de integração devem ter intervalo máximo de integração de 0,05 s, para que as mudanças bruscas de corrente possam ser consideradas sem introduzir erros de integração significativos. A precisão total das medições de corrente e tensão deve ser de 1% da leitura ou 0,3% do fundo de escala, o que for maior. Esses parâmetros estão de acordo com os expostos no manual do HIOKI PW3390. (HIOKI, 2023)

Das principais características que compõe o analisador de potência é importante mencionar a medição simultânea de energia AC e DC; esse recurso implica que o dispositivo de medição está equipado para lidar com medições de energia em corrente alternada (AC) e corrente contínua (DC). A capacidade de medir ambos os tipos de energia indica a adaptabilidade do dispositivo a diferentes tipos de sistemas de energia, isto é, não é necessário adquirir outro equipamento para mensurar a energia alternada ou contínua. Os canais de medição do HIOKI PW3390 já são adaptados.

O equipamento também consegue realizar a medição separada de parâmetros de potência; o dispositivo permite medições separadas de vários parâmetros relacionados à potência, como a energia fornecida, energia comercializada, potência consumida e energia regenerada. Uma breve explicação será abordada a seguir.

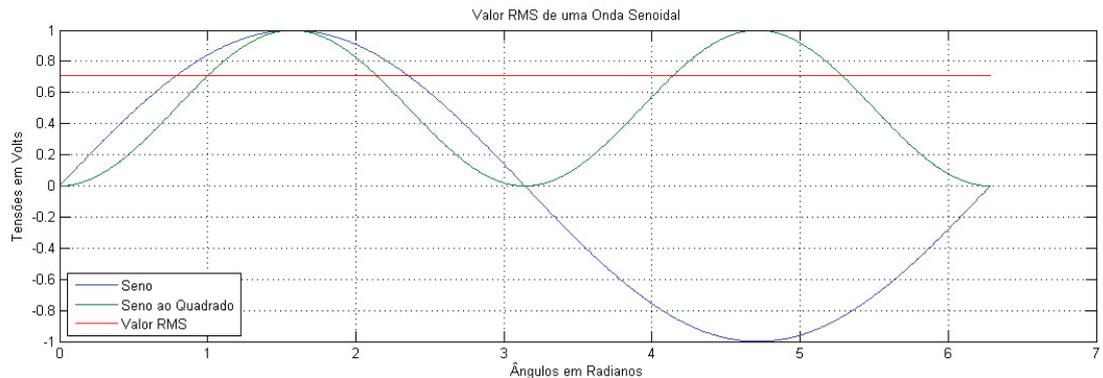
A energia fornecida é a quantidade de energia concedida a um sistema. Já a energia comercializada é energia que está sendo realimentada na rede de distribuição e vendida para a concessionária (comum em sistemas de energia renovável, como energia solar). A potência consumida é definida como quantidade de energia utilizada pelo sistema ou dispositivo. E a energia regenerada se refere a energia que está sendo gerada pelo sistema e fornecida de volta à rede como exemplo que será abordado a seguir; frenagem regenerativa em veículos elétricos. A separação dessas medições fornece uma visão abrangente dos fluxos de energia em um sistema. (HIOKI, 2023)

Medições de potência podem ser feitas em modo DC e modo RMS para medição de potência. O dispositivo oferece dois modos de medição distintos; modo DC é utilizado para medir entrada de energia, vendida, consumida e regenerada em sistemas de corrente contínua. Isso pode incluir sistemas como armazenamento de bateria ou processos industriais baseados em DC. Modo RMS (Root Mean Square); este modo é usado para medir corrente e potência integrada (energia elétrica) em sistemas AC. As medições RMS fornecem uma maneira eficaz de entender os valores médios de energia

em sistemas AC. (SILVA, 1997)

A Figura 7 ilustra a definição de valor RMS; trata-se da raiz quadrada da média dos valores instantâneos elevados ao quadrado. A média RMS é utilizada quando se deseja eliminar a influência do sinal negativo da senoide, o que é comum para calcular erros e quando se trabalha com tensões alternadas. Quando o sinal é periódico, é necessário calcular o valor RMS em um período (ou de um número inteiro de períodos). Dessa forma, o sinal que era variável no tempo se torna um valor fixo.

Figura 7 – Valor RMS vs Senóide



Fonte: autoral

A Equação 11 mostra como determinar o valor RMS a partir de uma senoide.

$$E_{ef} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707 E_m \quad (11)$$

Sendo E_{ef} a energia eficaz e E_m a energia média.

O analisador de potência é capaz de armazenar os dados a longo prazo; o dispositivo tem capacidade de salvar dados de medição por períodos prolongados. Esses dados são armazenados em mídia de armazenamento de alta capacidade. Esse recurso é particularmente útil para rastrear tendências, alterações de desempenho e possíveis problemas ao longo do tempo. (HIOKI, 2023)

É indispensável citar que HIOKI PW3390 suporta várias configurações do sistema de energia, isto sugere que o dispositivo de medição e monitoramento de energia foi projetado para ser adaptável e versátil, capaz de trabalhar com uma variedade de diferentes configurações do sistema de energia. Essa adaptabilidade inclui as faixas de tensão e frequência, medição de diferentes tipos de carga, métodos de conexão ao equipamento, suporte a diferentes fatores de potência, integração a sistemas de energia renovável e por fim a personalização de relatórios e parâmetros que se deseja obter. A seguir terá uma breve explicação de cada configuração e sua vantagem. (HIOKI, 2023)

Para as faixas de tensão e frequência, o dispositivo pode acomodar vários níveis de tensão e frequência comumente encontrados em diferentes regiões ou aplicações. Isso é importante porque os sistemas de energia podem variar significativamente com base na localização geográfica e nos requisitos industriais. Além disso, a "função de correção de fase do sensor de corrente" é um recurso comumente encontrado em sistemas de medição ou controle que envolve o monitoramento de correntes elétricas. Para isto, é necessário o uso do sensor de corrente que é um dispositivo que mensura a corrente elétrica que flui via um condutor. Para a corrigir de fase de um circuito em corrente alternada, a forma de onda da corrente e a forma de onda da tensão podem não estar perfeitamente alinhadas no tempo, devido a fatores como cargas indutivas ou componentes reativos. Essa mudança de fase pode resultar em imprecisões nas medições ou ações de controle. Para solucionar possíveis erros, o HIOKI utiliza sobreamostragem virtual, uma nova tecnologia, para corrigir os erros da fase de corrente do sensor com uma resolução de $0,01^\circ$, tolerando uma medição precisa dos componentes de potência de alta frequência e baixo fator de potência contidos nas frequências de comutação de saída do inversor. (BHATT, 2016)

O HIOKI PW3390 suporta diferentes tipos de carga; como resistiva, indutiva e capacitiva, as quais podem exigir considerações de medição específicas. O dispositivo pode acomodar essas variações nesses tipos de carga. Além disso, diferentes sistemas de energia podem exigir métodos de conexão específicos, como conexão direta, transformadores de corrente ou divisores de tensão. O dispositivo pode suportar esses diversos requisitos de conexão. (HIOKI, 2023)

A Figura 8 apresenta o equipamento HIOKI PW3390.

Figura 8 – HIOKI PW3390



Fonte: (HIOKI, 2023)

Diante do mencionado anteriormente, diferentes fatores de potência também são suportados de acordo com o tipo de carga. O fator de potência varia dependendo dos tipos de cargas conectadas ao sistema. O dispositivo pode lidar com variações de fator de potência e fornecer medições precisas em uma variedade de fatores de potência.

O dispositivo também pode suportar medição e monitoramento em sistemas que envolvem fontes de energia renovável, como painéis solares ou turbinas eólicas, que podem ter configurações exclusivas, devido a medições de corrente AC e DC, suportar diferentes fatores potência

E por fim, o dispositivo pode ser personalizado oferecendo configurações feitas pelo usuário e parâmetros de medição para se adaptar a configurações e requisitos específicos do sistema de energia, além de personalizar relatórios.

Um dispositivo de medição de energia que suporta várias configurações de sistema de energia é projetado para ser altamente adaptável, tornando-o adequado para uso em vários setores e aplicações. Essa adaptabilidade é essencial porque os sistemas de energia podem variar amplamente, e um dispositivo versátil pode fornecer medições e informações precisas em diversos cenários. (MOHD; AZIZ, 2022)

3 Chassis dinamométrico para VEH

Este capítulo visa apresentar os equipamentos que integram o Laboratório de emissões da HORSE e como adaptá-lo para realizar testes de eficiência energética baseando-se na norma SAE J1634 para veículos elétricos. A próxima seção é uma apresentação do banco dinamométrico.

3.1 Laboratório de Emissões da HORSE

Os dinamômetros de rolos são fundamentais na simulação dos esforços resistivos do veículo durante os testes necessários para verificação das emissões e eficiência energética nos diversos contextos regulatórios, sejam estes; europeu, americano, indiano, brasileiro, etc.

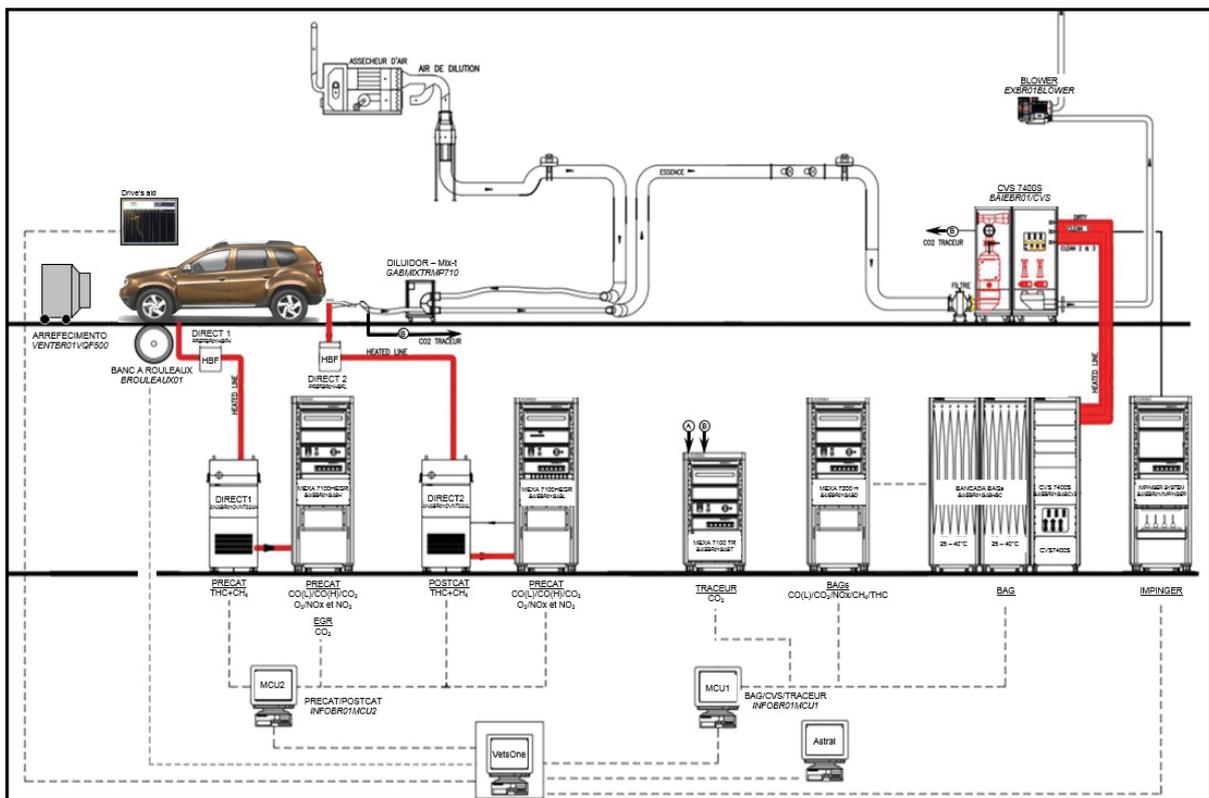
Os componentes básicos do dinamômetro de chassis da HORSE incluem:

- Rolo de teste: é onde as rodas do veículo são colocadas para simular a condição de condução. Ele está conectado ao sistema de medição e aplica uma carga controlada ao veículo, permitindo a simulação de diferentes condições de estrada;
- Sistema de medição de carga: este sistema é responsável por aplicar uma carga controlada às rodas do veículo durante os testes simulando a resistência à rolagem e outras condições de estrada para avaliar o desempenho do veículo em diferentes situações;
- Sistema de aquisição de dados: coleta informações vitais do veículo durante o teste, como velocidade das rodas, potência, torque, consumo de combustível, emissões, entre outros parâmetros relevantes;
- Sensores e transdutores: sensores são usados para medir várias grandezas, como velocidade das rodas, temperatura do motor, pressão de óleo, entre outros. Transdutores transformam essas grandezas em sinais elétricos que podem ser processados pelo sistema de aquisição de dados;
- Controlador: o objetivo é gerenciar os parâmetros do teste, como a carga aplicada ao veículo e a simulação das condições de estrada. Ele garante que os testes sejam realizados de maneira controlada e repetível;
- Sistema de Resfriamento: como os testes podem resultar em aquecimento do veículo, especialmente em testes prolongados de alta carga, um sistema de resfriamento pode ser necessário para manter as condições ideais de teste;

- Software de Análise: o software é usado para controlar o teste, coletar dados em tempo real e realizar análises posteriores. Ele ajuda a interpretar os resultados e a criar relatórios detalhados;
- Estrutura e Plataforma: a estrutura que suporta o dinamômetro e o veículo deve ser robusta e segura para garantir que os testes sejam realizados com segurança;
- Laboratório de Emissões Veiculares (LEV): o dinamômetro é instalado em um ambiente controlado em termos de temperatura, umidade e qualidade do ar para assegurar medições precisas e confiáveis dos veículos durante os testes;

A Figura 9 representa o esquemático dos meios e do dinamômetro de chassis do LEV da HORSE.

Figura 9 – Esquemático do laboratório de emissões veiculares da HORSE



Fonte: HORSE

As especificações técnicas do banco dinamométrico da HORSE pode ser analisadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Modelo de um banco dinamométrico para testes de veículos elétricos

Technical insight

Roller diameter	1219,2 mm (48")
Distance between the outside edges of the rollers	2743 mm
Distance between the inside edges of the rollers	914 mm
Max. permissible axle load	4500 kg
Max. test speed	200 km/h
Roller surface	smooth
Inertia simulation range	454 – 5400 kg
Max. continuous power in motor mode	150 kW
	from 92 km/h to 189 km/h
Max. continuous power in generator mode	153 kW
	from 92 km/h to 200 km/h
Max. motor power for 60 s	187 kW
	from 92 km/h to 149 km/h
Max. generator power for 60 s	205 kW
	from 92 km/h to 177 km/h
Max. motor power for 10 s	228 kW

Fonte: HORSE

3.2 Modificação do chassis dinamométrico para veículos elétricos

A intenção desse trabalho é integrar o HIOKI PP3390 à infraestrutura do banco de rolos de forma que os dados coletados pelo analisador de potência possam ser usados para monitorar ou analisar o desempenho do veículo durante os testes. Para garantir a conexão física é necessário a conexão de cabos ou interfaces que permitam a transferência de dados entre os dispositivos. (KESLER; TUMBEK, 2022)

Além disso, é indispensável calibrar o HIOKI PP3390 para garantir que suas medições sejam precisas e confiáveis em relação aos padrões de referência. Também deve-se configurar o HIOKI PP3390 para registrar os parâmetros elétricos relevantes durante os testes do banco de rolos (KONDO CHIAKI YAMAURA, 2017). Pode ser necessário configurar o software do HIOKI para coletar, armazenar e exibir os dados. Por fim, a coleta de dados do HIOKI PP3390 deve estar sincronizada com as operações do banco de rolos para que os dados possam ser correlacionados com as condições do teste. Para demonstrar o quão o HIOKI P3390 é um dispositivo poderoso, na próxima seção será modelado um sistema de banco dinamométrico para o teste de veículos elétricos em que se deve obter dados em que se comprove que determinado ponto sofreu regeneração, também o nível de consumo da bateria e a tensão injetada pelo

carregador.

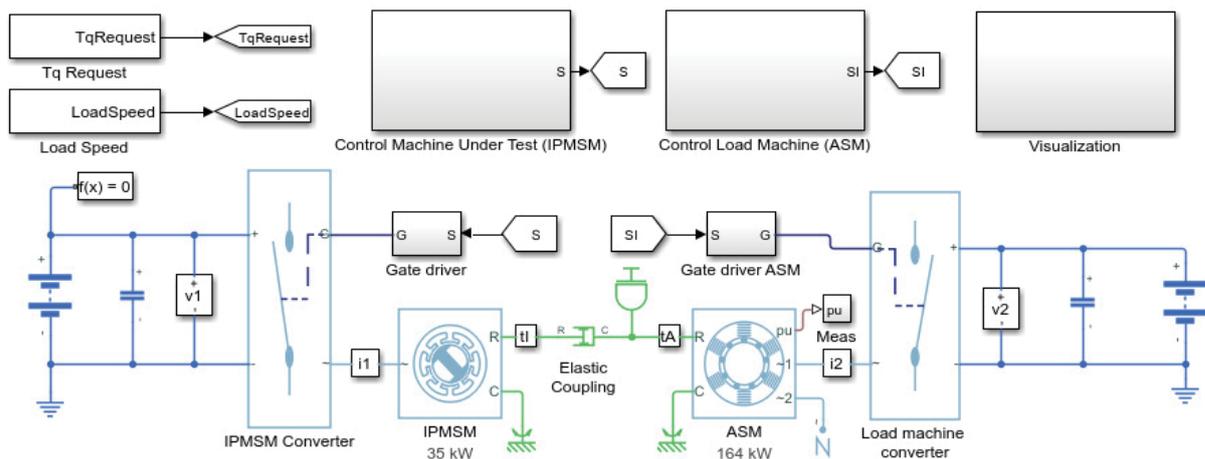
3.2.1 Modelo do banco dinâmométrico para veículos elétricos

Visando monitorar os parâmetros como corrente elétrica e torque no motor é necessário modelar um banco dinâmométrico para testar os veículos elétricos. Para isto, é necessário utilizar uma máquina síncrona de ímã permanente interior (IPMSM), o termo "torque" refere-se à força rotacional gerada pela interação entre os componentes do estator e do rotor do motor. (KONDO CHIAKI YAMAURA, 2017)

Esse modelo foi adicionado ao trabalho com o intuito de mostrar o porquê da aquisição equipamento HIOKI PW3390 além de mostrar a sua capacidade; geração de gráficos de corrente trifásica, do torque, e da velocidade do rotor. Além de obter relatórios concisos integrando todos os parâmetros em que é realizado o teste dinâmométrico. Além disso, é essencial que a tensão que alimenta a bateria deve estar concisa para não ocorrer o mau funcionamento do veículo.

Utilizando a biblioteca »ee _electric _engine _dyno do Simulink foi possível simular um banco dinâmométrico para veículos elétricos, uma vez que o objetivo do banco dinâmométrico é avaliar as medidas de torque, velocidade rotacional e a potência total do sistema a partir da tensão elétrica inserida no veículo. O modelo é apresentado na Figura 10.

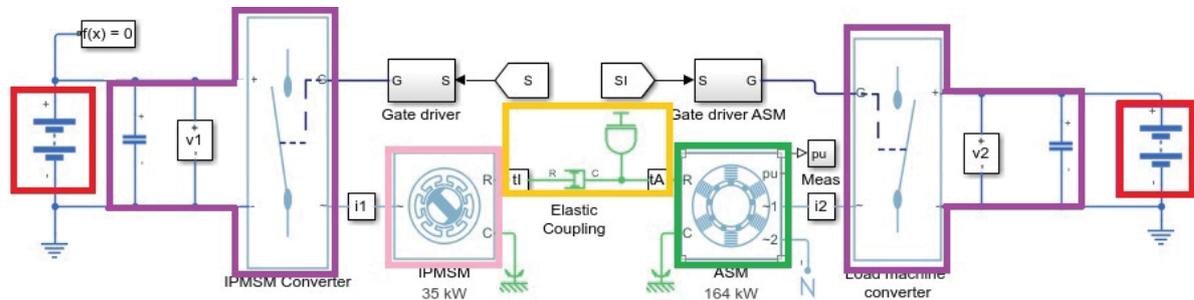
Figura 10 – Modelo de um banco dinâmométrico para testes de veículos elétricos



Fonte: Simulink

Para melhor entendimento do modelo, os blocos serão separados e a seguir haverá uma explicação sobre cada um deles.

Figura 11 – Modelo detalhado



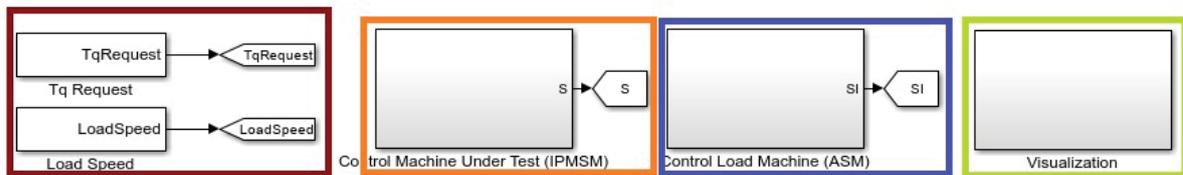
Fonte: Simulink

A explicação seguinte utiliza a Figura 11. Para realizar o teste de um dinamômetro, o ambiente de simulação será composto por uma máquina assíncrona (ASM) com 164 kW de potência, destacado de rosa, o que produz a carga para o torque e uma máquina síncrona de ímã permanente (IPMSM) com 35 kW de potência destacado de rosa. As duas máquinas estão conectadas via um eixo mecânico destacado na cor amarelo. Por meio de dois conversores trifásicos controlados sublinhados na cor magenta, estão conectados às duas baterias de alta tensão, destacadas na cor vermelho. As baterias são adicionadas como fonte de energia para o IPMSM e o ASM, de modo a acionar as máquinas elétricas e controlar suas operações. O conversor controlado trifásico, blocos em roxo, é responsável por converter a corrente contínua (CC) da bateria em corrente alternada (CA) necessária para acionar o IPMSM. Este conversor garante que as correntes de fase sejam adequadamente moduladas para controlar a operação do motor. Dessa forma, uma máquina elétrica pode operar nos modos de motorização e geração, isto conforme a carga. No modo de motorização, o motor está consumindo energia elétrica para produzir saída mecânica (movimento rotacional). No modo de geração, o motor atua como um gerador, convertendo energia mecânica (movimento rotacional) de volta em energia elétrica. (KIYAKLI, 2018)

Para fornecer carga, é necessário utilizar uma fonte ideal de velocidade angular, usada para simular a carga no motor. Essa fonte fornece a velocidade de rotação necessária ou entrada de velocidade angular para o motor.

Analisando a Figura 12, o subsistema de controle responsável por gerenciar a operação do IPMSM está destacado na cor laranja, usa uma abordagem de malha aberta para controlar o torque IPMSM e uma abordagem de malha fechada para controlar a corrente. A cada instante de amostra, a solicitação de torque é convertida em referências de corrente relevantes. Destacado em marrom tem-se dois grupos de construção de sinais

Figura 12 – Modelo detalhado



Fonte: Simulink

que pode ser utilizados como a entrada da simulação, em que é possível inserir requisições de torque e requisições de carga, nesse bloco pode-se inserir uma tabela .XLS que construa o sinal desejado. Em azul tem-se o controle da máquina assíncrona que utiliza uma taxa única para controlar sua velocidade. Em verde-lima tem-se o bloco de visualização em que é possível visualizar vários gráficos que fazem parte do resultado da simulação e como o IPMSM que representa o banco dinamométrico operando. Neste mesmo bloco também é apresentado os resultados da máquina assíncrona (ASM), que é os resultados de interesse para essa monografia. (KALOKO; PURNOMO, 2011)

Na Figura 13 é apresentado o controle da máquina síncrona. Em magenta tem-se os dados de entrada: corrente trifásica, potência, ângulo de fases e tensão elétrica. Essas entradas estão conectadas a mais 3 (três) blocos: controlador de torque em vermelho, controlador de corrente em amarelo e o gerador de sinais PWM em laranja, esses blocos incorporam os parâmetros de entrada e realizam o ajuste adequado para o bom funcionamento da máquina de ímã permanente.

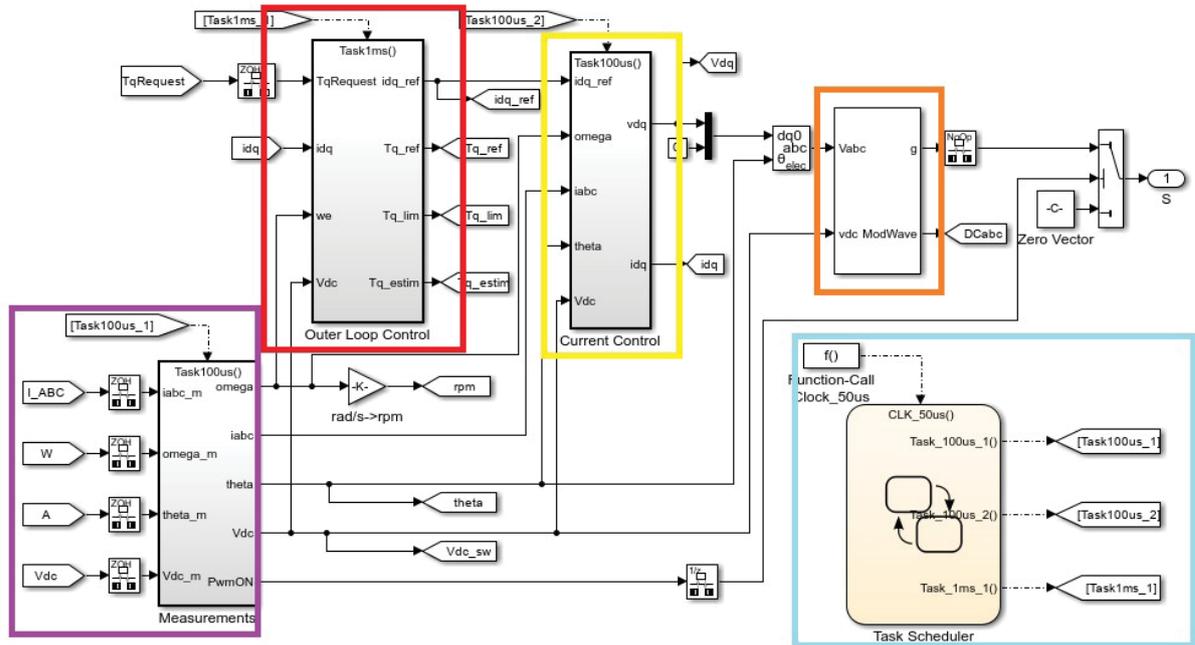
O bloco de PWM é inserido, pois o objetivo é gerar sinais analógicos que variam no tempo e em conjunto com filtros passa - baixa é possível obter sinais fiéis a um sinal real. O bloco em azul é o *task scheduler*, ele é implementado para máquinas elétricas de fluxo.

Para o controle da máquina assíncrona é apresentado os blocos na Figura 14.

O subsistema da Figura 14 utiliza uma taxa única de amostragem para controlar a velocidade da máquina assíncrona. Nota-se que os parâmetros de entrada são: velocidade da carga transformada de rpm para PU (por unidade), corrente trifásica, potência e tensão elétrica. Este subsistema utiliza o controle derivativo (PD) que serve para corrigir o erro diminuindo o tempo de resposta e melhorando a estabilidade do sistema.

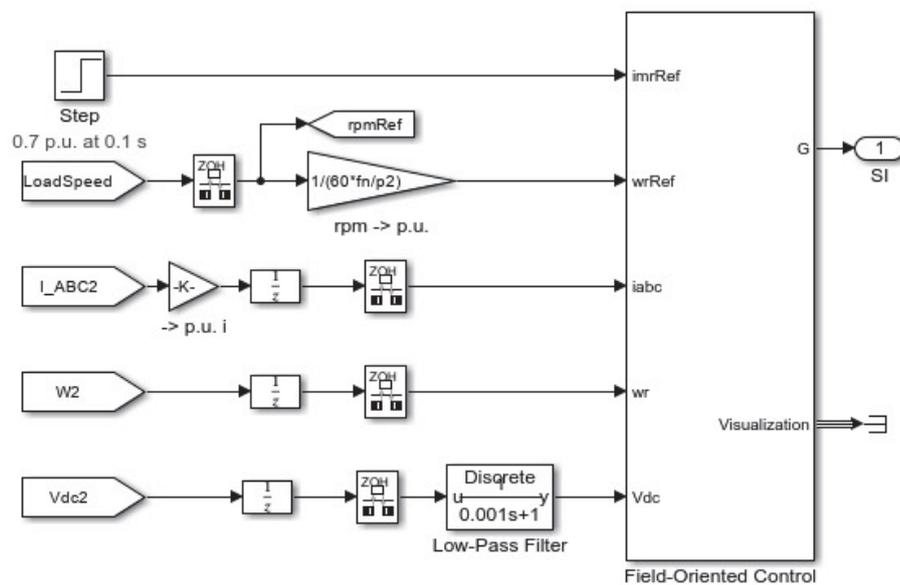
Quando o sistema de controle usa uma abordagem em malha aberta para controlar o torque do motor significa que o sistema de controle calcula e aplica os sinais de controle necessários sem usar feedback da corrente ou velocidade do motor. O sistema de controle usa uma abordagem de malha fechada para controlar a corrente do motor.

Figura 13 – Controle da máquina síncrona



Fonte: Simulink

Figura 14 – Controle da máquina síncrona



Fonte: Simulink

Isso envolve medir a corrente real nos enrolamentos do motor e compará-la com uma corrente de referência desejada. Um controlador proporcional-integral (PI) ajusta os sinais de controle para minimizar a diferença entre as correntes medidas e desejadas. O controle de corrente é baseado em PI e usa uma taxa de amostragem mais rápida

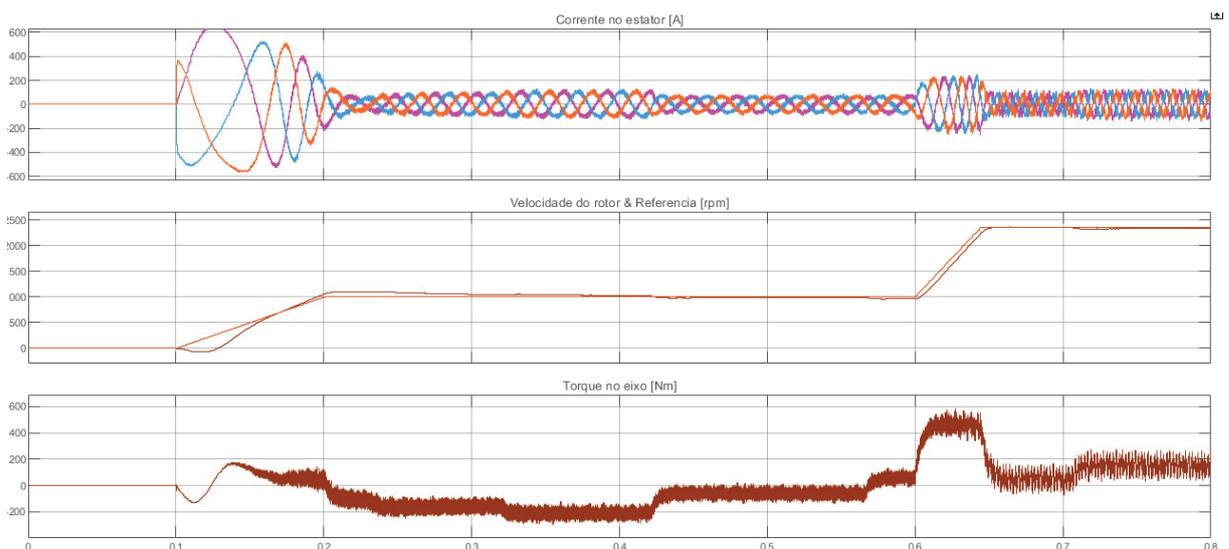
do que a taxa usada para controle de torque. Isto é, o sistema de controle emprega diferentes taxas de amostragem para controle de torque e controle de corrente. A taxa de amostragem para controle de corrente é mais rápida do que a taxa usada para controle de torque. Isso permite ajustes mais rápidos das referências de corrente para manter o controle de corrente preciso. A simulação usa várias etapas para o torque nos modos de motor e gerador.

Para essa simulação foram adotados 3 (três) cenários, dessa forma foi utilizado o Simulink. O tempo de amostragem para todas as simulações foi de 0,8 segundos.

3.2.2 Máquinas elétricas com tensão elétrica maior que a prevista

No primeiro cenário o IPMSM foi alimentado com 400 V enquanto que o ASM foi alimentado com uma tensão de 775 V. Assim obteve-se a Figura 15.

Figura 15 – Primeiro cenário



No início da simulação nota-se que há um distúrbio; a corrente trifásica atinge um valor maior que o previsto. Após aproximadamente 0,22 segundos, a corrente atinge o estado estacionário em que a máquina elétrica começa a operar como um motor, consumindo energia. Em 0,33 segundos há aumento na amplitude da corrente e isso gera torque negativo, fazendo com que a máquina elétrica opere como um gerador, fornecendo energia para o sistema, nesse momento se pode afirmar que houve uma desaceleração ou frenagem. Isto é, com a energia regenerativa, os motores elétricos dos veículos elétricos são capazes de atuar como geradores durante a desaceleração ou frenagem. Eles transformam a energia cinética em energia elétrica, que é então redirecionada de volta para a bateria para armazenamento. Isso permite que parte da energia que seria perdida como calor nos freios seja reutilizada.

A velocidade do rotor possui um valor negativo no início da simulação, portanto se trata de máquinas que podem operar em ambos os sentidos de rotação, como motores elétricos ou como geradores. Após o sinal de rampa aplicado, a velocidade do rotor acompanha a referência. A velocidade do rotor de uma máquina rotativa é determinada pela frequência da corrente alternada aplicada ao estator (parte estacionária) da máquina e pelo número de pólos magnéticos do estator. Para máquinas elétricas síncronas, como motores síncronos e geradores síncronos, a velocidade do rotor é diretamente relacionada à frequência da corrente alternada e ao número de pólos da máquina.

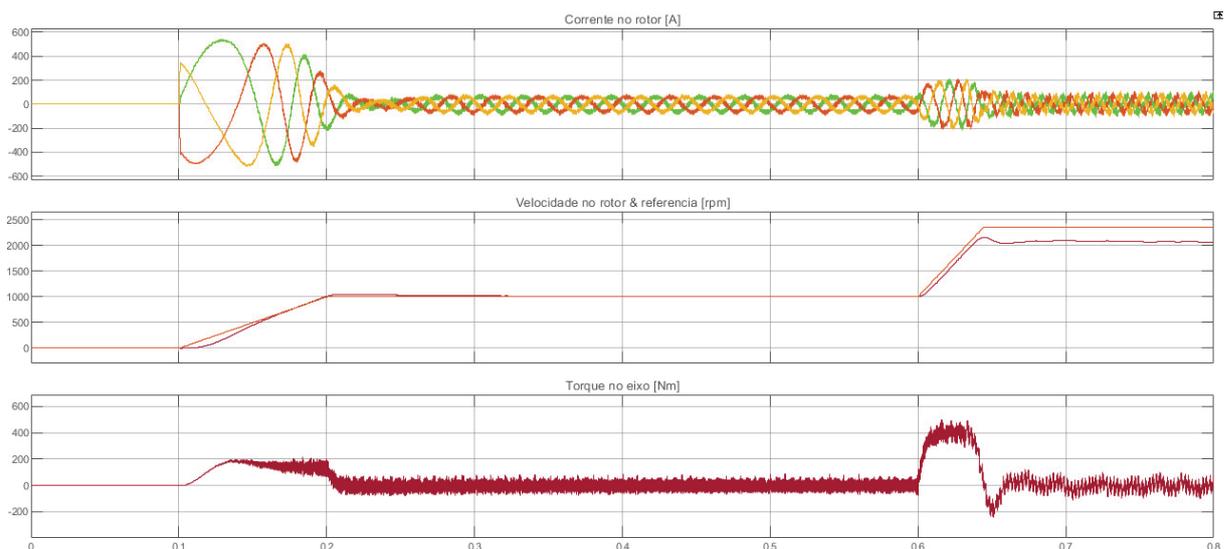
O torque no início é negativo, isto é, torque reverso ou torque de oposição, que se trata de um fenômeno que pode ocorrer em máquinas elétricas, incluindo máquinas síncronas, quando a carga na máquina excede sua capacidade de geração de energia. O torque é responsável por impulsionar o rotor e executar trabalho. Ou seja, a máquina começa a atuar como um motor, caracterizando a regeneração de frenagem.

Esse cenário não é o ideal, pois devido à alta corrente no início da simulação pode queimar o motor por sobreaquecimento.

3.2.3 Máquinas elétricas alimentadas com tensão elétrica menor que a prevista

No segundo cenário o IPMSM foi alimentado com 200 V enquanto o ASM foi alimentado com uma tensão de 650 V. Dessa forma, obteve-se a Figura 16.

Figura 16 – Segundo cenário



No início da simulação observa-se que a corrente elétrica não atinge o valor máximo, fica em aproximadamente 500 A. Após 0,22 segundos a corrente entra em estado estacionário até atingir 0,6 segundos. Em 0.6 segundos há um aumento expressivo

na frequência e amplitude da corrente e em aproximadamente 0,65 segundos a corrente entra em estado estacionário mais uma vez, porém há um aumento significativo na frequência.

A velocidade do rotor inicialmente acompanha a referência. A partir de 0,6 segundos a velocidade do rotor não consegue acompanhar a referência. Para que isso fosse possível, seria necessário realizar um controle proporcional integral.

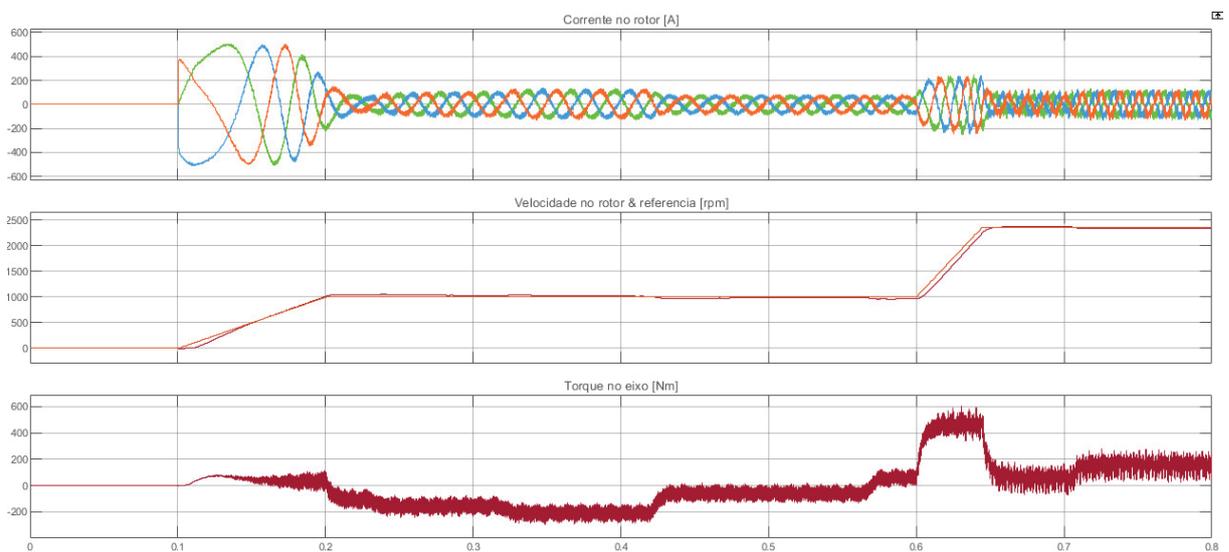
O torque no eixo após 0,2 segundos entra em estado estacionário até 0,6 segundos. Nota-se que o torque é praticamente nulo durante esse trecho. Quando o motor começa a atuar, não há potência suficiente para entregar a máquina, dessa forma há uma queda brusca no torque em 0,65 segundos.

A máquina tenta manter o torque, porém a velocidade no estator não acompanha a referência. Portanto, este cenário haverá mau funcionamento do veículo, pois a tensão elétrica fornecida está abaixo do que a máquina precisa para manter a potência durante o seu trajeto.

3.2.4 Máquinas elétricas com tensão elétrica igual que a prevista

No terceiro cenário o IPMSM foi alimentado com 400 V enquanto o ASM foi alimentado com uma tensão de 850 V. Dessa forma, obteve-se a Figura 17.

Figura 17 – Terceiro cenário



A corrente trifásica no início da simulação atinge valores aproximadamente de 400 A. Em 0,2 segundos é atingido o estado estacionário e em 0,6 segundos há um distúrbio. Nota-se que a velocidade do estator sempre acompanha a referência. O torque no eixo varia conforme a corrente no rotor. Durante o estado estacionário da corrente trifásica há um ligeiro aumento na amplitude e frequência, então a máquina opera

como um gerador. Em aproximadamente 0,45 segundos, a amplitude abaixa e também a frequência, isso faz com que tenha um ligeiro aumento no torque. Dessa forma, é possível concluir que essa máquina opera perfeitamente, ora como gerador e ora como motor.

4 Conclusão

O estudo do procedimento SAE J1634:2017 pode proporcionar uma síntese dos parâmetros de aquisição e o passo a passo para o memorial de cálculo. Todas estas informações deverão ser explicitadas em um relatório de teste de eficiência energética de veículos elétricos. Importante destacar que a estas informações serão suficientes para certificar as informações da etiqueta do Programa Brasileiro de Etiquetagem veicular, que exibe os valores de consumo equivalente de combustível expresso em km/L equivalente de gasolina urbano e estrada e a autonomia. O consumo de equivalente de combustível é obtido a partir $EC_{ac_{UDDS}}$ para o urbano e $EC_{ac_{HFEDS}}$ para o estrada, realizando a conversão de unidades de Wh/km para MJ/km ao multiplicar por 0,0036 e de MJ/km para km/L equivalente de gasolina através da densidade energética da gasolina de referência (E22) estabelecida em 28,99 MJ/L e aplicando o deflator de 70% para ajuste a condições de uso real. A autonomia é obtida pela distancia percorrida nos ciclos UDDS e HFEDS, sendo definida como autonomia ponderada a partir da ponderação de 55% da distancia em ciclo urbano e 45% da distancia em ciclo estrada, também aplicando um deflator de 70% para ajuste a condições de uso real.

A utilização de dinamômetros de chassis implementando o equipamento HIOKI PW3390 para testar veículos elétricos pode ser uma alternativa viável e eficaz para avaliar o desempenho desses veículos em condições de condução reais. Os veículos elétricos podem ser testados em condições de condução reais e com base na exaustividade de testes que a SAE J1634 propõe, replicando as situações que os motoristas enfrentam no dia a dia, uma vez que o HIOKI PW3390 apresenta medições precisas e detalhadas dos parâmetros elétricos e mecânicos do motor elétrico. Isso permite uma avaliação detalhada do desempenho do motor em diferentes condições de carga e velocidade. Isso inclui acelerações, desacelerações, curvas e outras manobras.

Além disso, o HIOKI PW3390 é utilizado para medir e registrar a qualidade da energia elétrica, incluindo parâmetros como tensão, corrente, frequência, potência, fator de potência, harmônicas, transientes e outros aspectos relacionados à qualidade da energia em sistemas elétricos. Dessa forma, é possível realizar simulações de condições de estrada e testes sob diferentes cargas, proporcionando uma avaliação mais próxima das condições de uso real do veículo.

Nos processos de homologação evita-se ao máximo o uso de tomadas OBD para comunicação via CAN, porque pode alterar arquivos de configuração, calibrações e assim descaracterizar o veículo que está sendo homologado. O objetivo é ter o veículo em condições reais de uso para que o resultado seja o mais próximo possível do real.

Quanto a avaliação viabilidade da adequação da estrutura do laboratório de emissões veiculares da HORSE, é indispensável destacar que para testar veículos que possuem tração 4x4 onde não é possível desativar um dos eixos tratores, deve-se fazer um investimento maior, pois o LEV possui os rolos somente para um eixo de tração. Porém, para os veículos que tiverem essa possibilidade de desacoplar ou desabilitar um dos eixos de tração, é permitido performar o testes no dinamômetro com rolo único através da configuração do veículo de modo que contabilize qualquer frenagem regenerativa adicional significativa devido à perda de frenagem por atrito no eixo desativado. Além disto, a frenagem auxiliada por dinamômetro deve ser desligada durante o ensaio.

Referências

- 9.557, D. n.º. *Programa Rota 2030*. [S.l.]: Subchefia para Assuntos Jurídicos, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 6.
- BHATT, A. Planning and application of electric vehicle with matlab®/simulink. **2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)**, 2016. Citado na página 20.
- CETESB. **Proconve**. 2023. [Urlhttps://cetesb.sp.gov.br/veicular/proconve/](https://cetesb.sp.gov.br/veicular/proconve/). Citado 2 vezes nas páginas 4 e 5.
- DESENVOLVIMENTO INDÚSTRIA, C. e. S. Ministério do. **Rota 2030 - Mobilidade e Logística**. 2023. [Urlhttps://www.gov.br/produtividade-e-comercio-exterior/pt-br/assuntos/competitividade-industrial/setor-automotivo/rota-2030-mobilidade-e-logistica](https://www.gov.br/produtividade-e-comercio-exterior/pt-br/assuntos/competitividade-industrial/setor-automotivo/rota-2030-mobilidade-e-logistica). Citado na página 1.
- DIAS, I. de L. G. **ANÁLISE EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DO AR CONDICIONADO AUTOMOTIVO NAS EMISSÕES E NO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM VEÍCULOS LEVES CONSIDERANDO O CICLO URBANO (FTP-75)**. 2017. [Urlhttps://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBDAYLNWP/1/dissertaoiolanda-delourdesgonalvediasfinal.pdf](https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBDAYLNWP/1/dissertaoiolanda-delourdesgonalvediasfinal.pdf). Citado 2 vezes nas páginas 8 e 9.
- ENERGIA, M. de Minas e. **RenovaBio**. 2016. [Urlhttps://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/renovabio](https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/renovabio). Citado na página 4.
- HIOKI. **PW3390 POWER ANALYZER**. 2023. [Urlhttps://www.hioki.com/in-en/download/29963](https://www.hioki.com/in-en/download/29963). Citado 3 vezes nas páginas 18, 19 e 20.
- INMETRO. **O Programa Brasileiro de Etiquetagem**. 2021. [Urlhttps://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/conheca-o-programa](https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/conheca-o-programa). Citado na página 6.
- INMETRO. **PORTARIA Nº 169, DE 3 DE MAIO DE 2023**. 2023. [Urlhttps://www.gov.br/produtividade-e-comercio-exterior/pt-br/assuntos/competitividade-industrial/setor-automotivo/rota-2030-mobilidade-e-logistica](https://www.gov.br/produtividade-e-comercio-exterior/pt-br/assuntos/competitividade-industrial/setor-automotivo/rota-2030-mobilidade-e-logistica). Citado na página 1.
- KALOKO, S. B. S.; PURNOMO, M. H. Design and development of small electric vehicle using matlab/simulink. **International Journal of Computer Applications**, 2011. Citado na página 27.
- KESLER, O. B. S.; TUMBEK, M. Design and implementation of a regenerative mode electric vehicle test platform for engineering education. **MDPI**, 2022. Citado na página 24.
- KIYAKLI, H. S. A. O. **Modeling of an Electric Vehicle with MATLAB/Simulink**. [S.l.]: *International Journal of Automotive Science And Technology*, 2018. Citado na página 26.

KONDO CHIAKI YAMAURA, Y. S. H. K. H. Effectiveness of phase correction when evaluating the efficiency of high-efficiency motor drives. **HIOKI E.E. CORPORATION**, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.

MOHD, M. H. T.; AZIZ, W. A. Mathematical modeling and simulation of an electric vehicle. **Journal of Mechanical Engineering and Sciences (JMES)**, 2022. Citado na página 21.

NACIONAL, I. Resolução nº 492. **conama.mma.gov.br/?option=com_sisconamatask = arquivo.downloadid = 7671(Pag)(ibama.gov.br)**, 2018. Citado na página 4.

NELSON, R. Engineers push to make the world greener and extend battery life. **EE-Evaluation Engineering**, p. VOL 6, 2017. Citado na página 17.

REPÚBLICA, P. D. **DECRETO N° 9.557**. 2018. Url <https://www.planalto.gov.br/ccivil03/ato2015-2018/2018/Decreto/D9557.htm>. Citado na página 4.

ROHAN, F. A. A.; KIM, S. H. Design of fuzzy logic tuned pid controller for electric vehicle based on ipmsm using flux-weakening. **The Korean Institute of Electrical Engineers**, 2017. Citado na página 16.

SENATRAN. **Emitir Certificado de Adequação à Legislação de Trânsito**. 2023. Url <https://www.gov.br/pt-br/servicos/emitir-certificado-de-adequacao-a-legislacao-de-transito-cat>. Citado na página 4.

SILVA, H. D. da. **Precisão, Exatidão, e a Terminologia das Medições**. 1997. Url <https://www.fc.unesp.br/jhdsilva/PrecisaoeTerminologiadeMedicoes.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 19.

UNIÃO, D. O. da. **Portaria nº 2.202-SEI, de 28 de dezembro de 2018**. [S.l.]: Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços/Gabinete do Ministro, 2018. Citado na página 6.