

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Apoliana Frade Ferreira

**AVALIAÇÃO DO USO DE UM ALTERNADOR COM DESACOPLAMENTO
MECÂNICO INTELIGENTE APLICADO A UM MOTOR A COMBUSTÃO
INTERNA PARA REDUÇÃO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL**

Belo Horizonte

2023

Apoliana Frade Ferreira

**AVALIAÇÃO DO USO DE UM ALTERNADOR COM DESACOPLAMENTO
MECÂNICO INTELIGENTE APLICADO A UM MOTOR A COMBUSTÃO
INTERNA PARA REDUÇÃO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de Mestra em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Rogério J. Amorim, Ph.D.

Coorientador: Prof. Luís Carlos M. Sales, D.Sc.

Área de concentração: Sistemas Térmicos e Fluidos.

Belo Horizonte

2023

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

F383a Ferreira, Apoliana Frade
Avaliação do uso de um alternador com desacoplamento mecânico inteligente aplicado a um motor a combustão interna para redução de consumo de combustível / Apoliana Frade Ferreira. Belo Horizonte, 2023.
130 f. : il.

Orientador: Rogério Jorge Amorim
Coorientador: Luís Carlos Monteiro Sales
Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

1. Motores de combustão interna. 2. Combustíveis para motores - Consumo de energia. 3. Automóveis - Consumo de combustíveis. 4. Automóveis - Motores - Inovações tecnológicas. 5. Engenharia de combustão. 6. Meio ambiente - Conservação. I. Amorim, Rogério Jorge. II. Sales, Luís Carlos Monteiro. III. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

SIB FUC MINAS

CDU: 621.43

Apoliana Frade Ferreira

**AVALIAÇÃO DO USO DE UM ALTERNADOR COM DESACOPLAMENTO
MECÂNICO INTELIGENTE APLICADO A UM MOTOR A COMBUSTÃO
INTERNA PARA REDUÇÃO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de Mestra em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Sistemas Térmicos e Fluidos.

Prof. Rogério Jorge Amorim, Ph.D. – PUC Minas (Orientador)

Prof. Luís Carlos Monteiro Sales, D.Sc. – PUC Minas (Coorientador)

Prof. Sérgio de Moraes Hanriot, D.Sc. – PUC Minas (Banca Examinadora)

Prof. José Guilherme Coelho Baeta, D.Sc. – UFMG (Banca Examinadora)

Belo Horizonte, 24 de novembro de 2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pois "O Senhor é a minha força e o meu escudo; com todo o meu coração, confio nele. O Senhor me ajuda; por isso, o meu coração exulta de alegria, e eu canto hinos em seu louvor" (Salmo 28, 7).

Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Agradeço à Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais e a todos os colaboradores por contribuírem significativamente para o meu amadurecimento acadêmico e profissional.

Expresso minha gratidão ao Professor e amigo D.Sc. Luís Monteiro por me escolher para participar do projeto que originou este trabalho e que me orientou na escolha do tema.

Agradeço às empresas que colaboraram e permitiram a realização de testes, tais como a montadora Stellantis (Fiat Chrysler Automobiles Brasil LTDA), o Centro de Inovações e Tecnologia CIT-SENAI, a Schaeffler Brasil LTDA, a Valeo Sistemas Automotivos LTDA e a Marelli Sistemas Automotivos e Comércio Brasil LTDA.

Ao Professor, Orientador e amigo Ph.D. Rogério Jorge Amorim, que acompanhou e contribuiu de forma excepcional para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus colegas de trabalho e pesquisa, Lucas Leal e Alice Lins, pela amizade e toda a ajuda ao longo deste processo.

Aos meus pais, Antônio Caetano Ferreira e Luciene de Assis Frade Ferreira, que nunca mediram esforços para me ajudar, apoiar e incentivar em todas as áreas da minha vida.

À minha irmã e amiga Paloma Edwiges Frade Ferreira, por estar sempre ao meu lado em todos os momentos, incentivando, apoiando e sendo minha maior inspiração.

Ao meu namorado Nikolas Lemos e a toda a família por acreditarem no meu potencial e incentivarem o meu crescimento pessoal e profissional.

Agradeço também a todos os amigos, familiares e conhecidos que, de alguma forma, direta ou indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

“Investir em conhecimento rende sempre os melhores juros.”
(Benjamin Franklin)

RESUMO

Visando melhorar a qualidade do ar, o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) estabeleceu leis e adotou medidas para incentivar o desenvolvimento de tecnologias que contribuam para a redução das emissões de poluentes nos setores de transporte. O Programa Rota 2030 é um exemplo disso, incentivando a pesquisa e o desenvolvimento tecnológico no setor automotivo, visando produzir veículos que sigam as normas ambientais do CONAMA e do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE). Fabricantes de motores, autopeças, montadoras de veículos automotores e fabricantes de combustíveis trabalharam no desenvolvimento de tecnologias capazes de melhorar a eficiência energética e reduzir o consumo de combustível, observando as emissões de poluentes no meio ambiente. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo analisar numericamente e experimentalmente a influência de um alternador com acoplamento e desacoplamento elétrico e mecânico na eficiência energética e no consumo de combustível de um motor a combustão interna. A nova tecnologia consiste em um alternador que utiliza uma estratégia de acoplamento e desacoplamento eletromecânico, por meio de uma polia adaptada com uma embreagem eletromagnética, que atua de acordo com o estado de carga da bateria, condições de operação do motor, a velocidade do veículo, a rotação do motor e o nível de solicitação de torque pelo condutor do veículo. Foram realizadas simulações numéricas em 1D através do *software GoFast*[®] para calcular os efeitos da eficiência energética e do consumo de combustível em um veículo *flexfuel*. Para o procedimento experimental, realizou-se a confecção do protótipo e, posteriormente, utilizou-se o dinamômetro de chassi para a realização dos ensaios. Em relação à autonomia, em MJ/l, simulada numericamente para o ciclo de condução combinado, o alternador com desacoplamento eletromecânico inteligente demonstrou um aumento de 3,82% com o combustível E22 e de 5,06% com o E100. Já para o consumo energético simulado numericamente, medido em MJ/km, o veículo adaptado com o alternador de desacoplamento eletromecânico inteligente apresentou uma redução de 3,68% com o E22 e de 4,81% com o E100, para o ciclo de condução combinado. Para os resultados experimentais, a nova tecnologia aumentou em 3,72% na autonomia em km/l e reduziu de 3,46% no consumo energético em MJ/km, com o combustível E22, para o ciclo combinado. Os resultados obtidos foram promissores tanto para o procedimento numérico quanto para o experimental.

Palavras-chave: Motor a combustão interna; alternador; desacoplamento; consumo de combustível; eficiência energética.

ABSTRACT

In order to improve air quality, the National Council for the Environment (CONAMA) has established laws and adopted measures to encourage the development of technologies that contribute to the reduction of pollutant emissions in the transportation sector. The Rota 2030 Program is an example of this, incentivizing research and technological development in the automotive sector with the aim of producing vehicles that comply with the environmental standards set by CONAMA and the Program for the Control of Air Pollution from Motor Vehicles (PROCONVE). Engine manufacturers, auto parts companies, vehicle manufacturers, and fuel producers have worked on developing technologies capable of improving energy efficiency and reducing fuel consumption while considering environmental pollutant emissions. In this context, this study aims to analyze the influence of an alternator numerically and experimentally with electromechanical coupling and decoupling on the energy efficiency and fuel consumption of an internal combustion engine. The new technology involves an alternator that employs an electromechanical coupling and decoupling strategy using a pulley adapted with an electromagnetic clutch. This clutch operates based on the battery's state of charge, engine operating conditions, vehicle speed, engine rotation, and the driver's torque demand level. Numerical simulations in 1D were conducted using the GoFast® software to calculate the effects on energy efficiency and fuel consumption in a flex-fuel vehicle. For the experimental procedure, a prototype was fabricated, and subsequently, a chassis dynamometer was used to conduct the tests. Regarding the simulated numerical autonomy, measured in MJ/l, for the combined driving cycle, the intelligent electromechanical decoupling alternator demonstrated an increase of 3.82% with E22 fuel and 5.06% with E100. For the simulated numerical energy consumption, measured in MJ/km, the vehicle adapted with the intelligent electromechanical decoupling alternator registered a reduction of 3.68% with E22 and 4.81% with E100 for the combined driving cycle. As for the experimental results, the new technology increased autonomy by 3.72% in km/l and reduced energy consumption by 3.46% in MJ/km with E22 for the combined cycle. The results obtained were promising for both the numerical and experimental procedures.

Keywords: Internal combustion engine; alternator; decoupling; fuel consumption; energy efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Dispositivo de embreagem eletromagnética	33
Figura 2 - Embreagem Magneto-Reológica (MRC).....	36
Figura 3 – Comparação das fases PROCONVE L7 e PROCONVE L6 para os limites máximos de emissões de gases na atmosfera.	46
Figura 4 - Comparação das fases PROCONVE L7 e PROCONVE L6 para os limites máximos de emissões de MP na atmosfera.	47
Figura 5 – Comparação dos requisitos de emissões em Veículos Leves de Passageiros no Brasil, China, Estados Unidos e União Europeia.....	48
Figura 6 – Ciclo quatro tempos no motor Ciclo Otto	50
Figura 7 – Principais sensores e atuadores utilizados no sistema de gerenciamento e controle do motor a combustão interna	51
Figura 8 – Principais componentes da bateria	54
Figura 9 – Esquema de montagem do alternador automotivo	56
Figura 10 – Dínamo automotivo.....	58
Figura 11 – Configurações da embreagem eletromagnética conectada e desconectada	63
Figura 12 – Ciclo para medição de emissões do escapamento realizados no dinamômetro de chassi.	66
Figura 13 – Representação gráfica do do ciclo de condução urbano (FTP75).....	67
Figura 14 – Sequência para a realização dos ensaios de consumo de combustível.....	68
Figura 15 - Representação gráfica do do ciclo de condução de estrada (HWFET).....	69
Figura 16 – Gráfico <i>Boxplot</i>	75
Figura 17 – Dimensões do veículo	78
Figura 18 – Alternador com desacoplamento mecânico inteligente equipado com a embreagem eletromagnética.....	80
Figura 19 – Vista lateral do protótipo Alternador com Desacoplamento Mecânico Inteligente, utilizado na pesquisa.....	81
Figura 20 – Configuração do protótipo do Alternador com Desacoplamento Mecânico Inteligente	82
Figura 21 – representação da estratégia de acoplamento e desacoplamento da embreagem eletromagnética do alternador	84
Figura 22 – Esquema representativo do sistema de controle e coleta de dados do alternador com desacoplamento mecânico inteligente	86

Figura 23 – Representação esquemática do laboratório de Emissões e Consumo de Combustível	87
Figura 24 – Diagrama de cálculos.....	92
Figura 25 – Confeção do prototipo do alternador com desacoplamento mecânico inteligente	97
Figura 26 – Ciclo de condução FTP75.....	100
Figura 27 - Ciclo de condução HWFET	101
Figura 28 – Estado da carga da bateria	102
Figura 29 – Rotação do motor (Ciclo FTP75)	103
Figura 30 – Rotação do motor (Ciclo HWEFET).....	104
Figura 31 – Consumo de combustível para o veículo operando com o combustível E22 (Ciclo FTP75)	105
Figura 32 – Consumo de combustível para o veículo operando com o combustível E100 (Ciclo FTP75)	106
Figura 33 – Consumo de combustível para o veículo operando com o combustível E22 (Ciclo HWEFET).....	107
Figura 34 – Consumo de combustível para o veículo operando com o combustível E100 (Ciclo HWEFET).....	108
Figura 35 – mapa de consumo de combustível	109
Figura 36 – Consumo energético combinado das fases do ciclo urbano (MJ/km)	112
Figura 37 - Resultados percentuais para a autonomia em km/l	112
Figura 38 - Resultados percentuais para o consumo energético em MJ/km	113
Figura 39 – Estrutura Analítica do Projeto (EAP)	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo do estado da arte em Sensor Inteligente de Bateria	37
Tabela 2 – Resumo do estado da arte em Alternadores automotivos.....	37
Tabela 3 – Resumo do estado da arte em Alternadores Inteligentes	39
Tabela 4 – Resumo do estado da arte em Embreagens Eletromagnéticas.....	40
Tabela 5 – Especificação do motor a combustão interna	79
Tabela 6 – Características da embreagem eletromagnética.....	82
Tabela 7 – Características do alternador.....	83
Tabela 8 – Característica técnica do Dinamômetro de Chassi	89
Tabela 9 – Dados de entrada dos combustíveis	96
Tabela 10 – Configurações para a simulação numérica	96
Tabela 11 – Resultados percentuais do procedimento numérico	110
Tabela 12 – Comparação entre Resultados do Procedimento Numérico e Experimental, para o combustível E22	114

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1D	Unidimensional
A/F	<i>Air/Fuel</i> (Razão ar-combustível)
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Ah	Ampère-hora
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BCM	<i>Body control module</i>
BDC	<i>Bottom-dead-center</i>
C	Consumo de combustível
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CH ₄	Metano
CI	<i>Compression ignition</i>
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO _{2eq}	Dióxido de carbono equivalente
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CVS	<i>Constant volume sampler</i>
DLC-Si	<i>Diamond-Like Carbon with Silicon</i> (carbono tipo diamante com silício)
E100	Etanol hidratado
E22	Mistura de Gasolina-Etanol (mistura de 78% de gasolina pura e 22% de etanol anidro), também se utiliza a nomenclatura A22
EAP	Estrutura Analítica do Projeto
EC	<i>European commission</i>
ECM	<i>Engine control module</i>
ECU	<i>Engine control unit</i>
EMF	<i>Electromotive force</i>
<i>flex fuel</i>	Combustível flexível
FTP75	<i>Federal test procedure</i>
Gasool	Mistura de Gasolina-Etanol
GEE	Gases de Efeito Estufa
GSE	<i>Grand sport electric</i>
HC	Hidrocarbonetos
HEA	<i>High efficiency alternators</i>
HWFET	<i>Highway fuel economy test</i>
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBS	<i>Intelligent battery sensor</i>
INCA	<i>Integrated Calibration and Application Tool</i>
INOVAR-AUTO	Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores
IPI	Impostos sobre Produtos Industrializados
LIN	<i>Local interconnect network</i>
min	Minuto

MP	Material particulado
n.º	Número
N ₂	Dinitrogênio
N ₂ O	Óxido nitroso
NBR	Norma brasileira
NEDC	<i>New european driving cycle</i>
NMHC	Hidrocarbonetos não metano
NMOG	Gás orgânico não metano
NO _x	Óxidos de nitrogênio
NP	Normal de Produção
O ₂	Dioxigênio
O ₃	Ozônio
°C	Grau celsius
OMS	Organização Mundial de Saúde
PCI	Poder calorífico inferior
PMI	Ponto morto inferior
PMP	Princípio do Mínimo de Pontryagin
PMS	Ponto morto superior
PROÁCOOL	Programa Nacional do Álcool
PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
RCHO	Aldeídos totais
RD	Razão de Diluição
SI	<i>Spark Ignition engines</i>
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SO ₂	Dióxido de enxofre
SOC	<i>State of Charge</i>
SOF	<i>State of function</i>
SOH	<i>State of health</i>
<i>Start & Stop</i>	Iniciar e parar
TDC	<i>Top-dead-center</i>
THC	Hidrocarbonetos totais
VBA®	Visualbasic®

LISTA DE SÍMBOLOS

$\%V_{\text{ETOH}}$	Porcentagem de volume a 20 °C (-)
$\%V_{\text{gás}}$	Porcentagem do volume a 20 °C (-)
ac	Aclive ou declive (%)
$A_{\text{combinada}}$	Autonomia de combustível combinada (km/l)
$A_{\text{est.}}$	Autonomia de combustível calculada para o ciclo de condução em estrada (km/l)
A_{liquido}	Autonomia do veículo (km/l)
$A_{\text{urb.}}$	Autonomia de combustível calculada para o ciclo de condução urbano (km/l)
C	Consumo de combustível (km/l)
C_1	Consumos de combustíveis na fase transitória com partida a frio (l/100 km)
C_2	Consumos de combustíveis na fase estabilizada (l/100 km)
C_3	Consumos de combustíveis na fase transitória com partida a quente (l/100 km)
CE	Consumo energético convidado (MJ/km)
$CE_{\text{est.}}$	Cálculo do consumo energético para os ciclos de condução em estrada (MJ/km)
$CE_{\text{urb.}}$	Cálculo do consumo energético para os ciclos de condução urbano (MJ/km)
CH_{4d}	Concentração de CH_4 medida no balão de amostragem do ar de diluição (ppmc)
CH_{4e}	Concentração de CH_4 medida no balão de amostragem do gás de escape diluído (ppmc).
CH_{4M}	Massa de CH_4 (ppmc)
C_i	Consumo instantâneo do n-ésimo intervalo (l/h).
CO_{2e}	Concentração de CO_2 medida no balão de amostragem do gás de escape diluído (%)
CO_{2ES}	Porcentagem teórica de CO_2 no gás resultante de uma combustão em condições estequiométricas
CO_d	Concentração de CO medida no balão de amostragem do ar de diluição (ppm)
CO_e	Concentração de CO medida no balão de amostragem do gás de escape diluído (ppm)
CO_M	Massa de CO (g)
C_{urb}	Consumo de combustível urbano (l/100 km)
D_1	Distâncias percorridas durante os fase transitória com partida a frio (km)
D_2	Distâncias percorridas durante os fase estabilizada (km)
D_3	Distâncias percorridas durante os fase transitória com partida a quente (km)
d_{CH_4}	Densidade de massa do metano (g/m^3)
d_{CO}	Densidade de massa do monóxido de carbono (g/m^3)
D_E	Distância percorrida pelo veículo, medida durante a fase estabilizada (km)
d_{NO_2}	Densidade de massa dos óxidos de nitrogênio (g/m^3)
D_{TF}	Distância percorrida pelo veículo, medida durante a fase transitória com partida a frio (km)
d_{THC}	Densidade de massa dos hidrocarbonetos (g/m^3)
D_{TQ}	Distância percorrida pelo veículo (km)
f_0	Coeficiente do termo de ordem 0 da equação (N)

f_2	Coeficiente do termo de segunda ordem da equação (Ns^2/m^2)
Fr_{CH_4}	Fator de resposta do analisador de hidrocarbonetos para o metano (-)
F_{ru}	Fator de correção (-)
HC_e	Concentração de THC medida no balão de amostragem do gás de escapamento diluído (ppmc)
h_f	Cotas das altitudes do ponto final do trecho específico da estrada inclinada (m)
h_i	Cotas das altitudes do ponto inicial do trecho específico da estrada inclinada (m)
i_{cj}	Relação de transmissão da marcha inserida (-)
i_d	Relação de transmissão do diferencial (-)
m	Massa de prova do veículo (kg)
m_{CO}	Massa de CO emitida (g/km)
m_{CO_2}	Massa de CO ₂ emitida (g/km)
m_{THC}	Massa de THC emitida (g/km)
n_m	Rotação do motor (rpm)
NMHC_M	Massa de NMHC (g)
NO_{Xd}	Concentração de nox medida no balão de amostragem do ar de diluição (ppmc)
NO_{Xe}	Concentração de nox medida no balão de amostragem do gás de escapamento diluído (ppmc)
NO_{XM}	Massa de no _x (g)
p	Raio dinâmico do pneu (mm)
P_a	Potência resistiva de aclave (W)
P_{ac}	Potência resistiva (W)
P_{cd}	Potência resistiva de Aerodinâmica, Rolamento e de <i>Coast Down</i> (W)
P_i	Potência resistiva de inercia (W)
P_t	Potência total (W)
P_{V1}	Pressão na entrada do Venturi (kpa)
THC_d	Concentração de THC medida do ar de diluição (ppmc)
THC_e	Concentração de THC medida do gás de escapamento diluído (ppmc)
THC_M	Massa de THC (g)
T_{V1}	Temperatura na entrada do Venturi (°C)
v	Velocidade de translação do veículo (m/s)
V_{ed}	Volume de gás amostrado (m^3)
v_f	Velocidade final (m/s);
v_{fi}	Velocidade final do n-ésimo de intervalo (m/s);
v_i	Velocidade inicial (m/s);
V_{V1}	Volume total da amostra na entrada do Venturi (m^3)
Y_E	Emissões em massa de cada componente do gás emitido na fase estabilizada (g)
Y_{MP}	Emissões ponderada de cada componente do gás emitido (g)
Y_{TF}	Emissões em massa de cada componente do gás emitido na fase transitória com partida a frio (g)
Y_{TQ}	Emissões em massa de cada componente do gás emitido na fase transitória com partida a quente (g)

α	Ângulo de inclinação do aclone ou declive (°)
δ	Inércia de translação equivalente à de rotação
δ_e	Densidade energética do combustível (MJ/l)
Δt_i	Duração do n-ésimo intervalo (s);
Φ	Razão de equivalência (-)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	20
1.1 Definição do problema	20
1.2 Relevância	21
1.3 Justificativa	22
1.4 Objetivo	23
<i>1.4.1 Objetivos específicos</i>	<i>23</i>
1.5 Escopo do trabalho	24
 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	 25
2.1 Sistema elétrico do veículo para fornecimento de energia.....	25
<i>2.1.1 Sensor inteligente da bateria</i>	<i>26</i>
<i>2.1.2 Alternador automotivo.....</i>	<i>26</i>
<i>2.1.3 Tecnologias do alternador inteligente.....</i>	<i>29</i>
2.2 Embreagem eletromagnética	32
2.3 Resumo do estado da arte	37
 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	 42
3.1 Redução de emissões de poluentes por veículos automotores	42
<i>3.1.1 Conselho Nacional do Meio Ambiente</i>	<i>43</i>
<i>3.1.2 Programa Nacional de Controle de Poluição por Veículos Automotores</i>	<i>43</i>
<i>3.1.3 Programa Rota 2030</i>	<i>48</i>
3.2 Motor a combustão interna operando com o Ciclo Otto	49
3.3 Gerenciamento e controle dos motores a combustão interna.....	50
3.4 Baterias automotivas	52
<i>3.4.1 Sensor de bateria inteligente</i>	<i>54</i>
3.5 Alternador automotivo.....	55
<i>3.5.1 Componentes do alternador automotivo</i>	<i>56</i>
<i>3.5.2 Modelos de alternadores</i>	<i>57</i>
3.6 Combustíveis	58
<i>3.6.1 Gasolina</i>	<i>59</i>
<i>3.6.2 Etanol</i>	<i>59</i>
<i>3.6.3 Mistura ar-combustível.....</i>	<i>60</i>
<i>3.6.4 Reação de combustão da mistura ar-combustível.....</i>	<i>62</i>

3.7 Embreagem eletromagnética	62
3.8 Dinamômetro.....	64
3.9 Ensaio de emissões e consumo de combustíveis	65
3.9.1 Ciclo de condução.....	65
3.9.2 Cálculos dos resultados	69
3.9.2.1 Emissões de gases do escapamento	69
3.9.2.2 Consumo de combustível	73
3.9.2.3 Autonomia do veículo.....	74
3.9.2.4 Eficiência energética	74
3.10 Metodologia Boxplot	75
 4 METODOLOGIA	 77
4.1 Aparato e Parâmetros.....	77
4.1.1 Características do Veículo.....	77
4.1.1.1 Motor.....	78
4.1.1.2 Bateria automotiva	79
4.1.1.3 Alternador com Desacoplamento Mecânico Inteligente	79
4.1.1.3.1 Estratégia para o acoplamento e desacoplamento da embreagem eletromagnética..	83
4.1.1.4 Sistema de controle veicular	85
4.1.2 Equipamentos para o procedimento experimental	86
4.1.2.1 Laboratório.....	86
4.1.2.2 Dinamômetro	88
4.1.2.3 Combustível	89
4.1.3 Equipamentos para o procedimento numérico	89
4.1.3.1 Dispositivo	89
4.1.3.2 Software	90
4.2 Procedimento numérico.....	90
4.2.1 Consumo de combustível.....	91
4.2.2 Autonomia do veículo e eficiência energética	95
4.2.3 Dados de entrada para os combustíveis E22 e E100.....	95
4.2.4 Configuração das simulações	96
4.3 Procedimento experimental	96
4.3.1 Confeção do protótipo.....	96
4.3.2 Procedimento dos ensaios.....	97

4.3.2.1 Cálculos dos resultados	98
4.3.2.2 Tratamento de dados.....	98
5 RESULTADOS	99
5.1 Resultados numéricos.....	99
5.1.1 <i>Ciclo de condução urbano e em estrada</i>	99
5.1.2 <i>Estado de carga da bateria (SOC)</i>	101
5.1.3 <i>Rotação do motor</i>	102
5.1.4 <i>Consumo de combustível</i>	104
5.1.5 <i>Ação mecânica do alternador</i>	108
5.1.6 <i>Resultado final</i>	110
5.2 Resultados experimentais	111
5.3 Validação dos resultados.....	114
6 CONCLUSÕES.....	115
6.1 Sugestão para trabalhos futuros	116
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	117
APÊNDICE A – EAP	125
ANEXO A - PROCESSO DE PATENTE INPI N° INPI BR102015001454-6	127

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas e a poluição do ar atmosférico são problemas ambientais causados diretamente pelas emissões de gases no meio ambiente. Os gases provenientes da combustão, como o monóxido de carbono (CO) e o dióxido de carbono (CO₂), entre outros, ocorrem em diversos tipos de motores, destacando-se os veículos automotores a combustão interna, que impactam diretamente no efeito estufa. (MESQUITA *et al.*, 2017).

Com o incentivo à pesquisa e ao desenvolvimento tecnológico pelo Programa de Rota 2030, a indústria automotiva vem desempenhando um papel importante no objetivo de conter a emissões de poluentes atmosférico.

Para solucionar as consequências das emissões de gases no meio ambiente gerada pela combustão em motores de veículos automotores, estão sendo desenvolvidas tecnologias com grande potencial em conter as emissões de poluentes atmosféricos, bem como tecnologias relacionadas ao sistema elétrico do veículo para o fornecimento de energia, em específico, a tecnologia do alternador com alta eficiência com capacidade de redução de 0,5 a 2% nas emissões de CO₂. (KRAIL; SCHADE, 2010).

Por meio da redução de gases emitidos no meio ambiente, provenientes da combustão, busca-se diminuir o consumo de combustível e aumentar a eficiência energética dos veículos automotores, tornando-se os objetivos deste trabalho. Nesse sentido, serão apresentados a definição do problema, a relevância, os objetivos gerais e específicos, a justificação e o escopo do trabalho para o desenvolvimento da tecnologia do alternador com desacoplamento mecânico inteligente.

1.1 Definição do problema

O alternador, um componente essencial no sistema elétrico de um veículo, é responsável por gerar energia elétrica para recarregar a bateria e alimentar os dispositivos elétricos do veículo. Em veículos convencionais, o alternador é acoplado ao motor por meio de uma correia acionada pela polia do virabrequim. Enquanto o motor está em funcionamento, a rotação do alternador permanece contínua para atender às demandas elétricas do veículo. Isso significa que, o alternador permanece acoplado continuamente, independentemente da carga elétrica do veículo. Este acoplamento em veículos automotivos é um problema específico que resulta em impactos, como (MONTEIRO, 2020):

- a) Consumo de potência: quando o alternador está acoplado continuamente, cria-se um arrasto mecânico constante no motor, exigindo mais combustível para manter a rotação e superar essa resistência. Isso aumenta a carga sobre o motor, para manter a potência e a velocidade do veículo, o que, por sua vez, resulta em um aumento do consumo de combustível e, conseqüentemente, no aumento de emissões de gases no meio ambiente;
- b) Ciclo de trabalho ineficiente: em situações em que a bateria do veículo está completamente carregada, o acoplamento contínuo do alternador resulta em um ciclo de trabalho ineficiente, no qual não proporciona vantagens para o funcionamento do veículo.

1.2 Relevância

A necessidade de se desenvolver tecnologias capazes de reduzir o consumo de combustível e as emissões em veículos automotores é uma resposta à crescente preocupação com o meio ambiente, a economia e a saúde pública. O desenvolvimento contínuo e a adoção dessas tecnologias são essenciais para promover a sustentabilidade no setor de transporte e enfrentar os desafios ambientais e econômicos que o mundo enfrenta atualmente (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 1986).

Neste sentido, a tecnologia do alternador automotivo com acoplamento e desacoplamento eletromecânico, tem como principal vantagem a redução de consumo de combustível e de emissões de gases no meio ambiente. Ao desacoplar quando não é necessário gerar energia elétrica e alimentar a bateria do veículo, o alternador não absorverá a energia mecânica do virabrequim e, conseqüentemente, evita a geração de energia elétrica produzida a partir do campo eletromagnético do seu rotor, resultando em menor consumo de combustível e redução de emissões de gases no meio ambiente (SALES, 2015).

O modelo proposto por Monteiro (2020), descreve o alternador com desacoplamento eletromecânico inteligente, no qual foi construído um módulo de controle externo do veículo e um programa computacional para adaptar a estratégia de acoplamento e desacoplamento eletromecânico. Entretanto, para a tecnologia proposta neste trabalho, têm-se um novo protótipo de alternador com desacoplamento eletromecânico inteligente e a adaptação da estratégia dentro da Unidade de Controle Eletrônico (ECU) do veículo.

1.3 Justificativa

O efeito estufa está ligado a um fenômeno natural responsável por manter o planeta Terra habitável, bem como responsável por evitar a dissipação dos raios solares e manter o aquecimento de forma natural. Os gases de efeito estufa (GEE) são gases naturais presentes na atmosfera responsáveis pela formação do Efeito Estufa. Os principais GEE são: Dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), ozônio (O_3), entre outros. Deste modo, os gases não apresentam impactos negativos ao meio ambiente, pois são absorvidos por processos naturais. No entanto, devido às emissões exacerbadas de gases como o CO_2 , o efeito estufa amplia sua capacidade de reter calor e, conseqüentemente, ocorre o aquecimento anormal do planeta, definido como aquecimento global.

Os principais fatores responsáveis pelas emissões de GEE e, conseqüentemente, do aquecimento global são os processos de desmatamento, queimadas, depósitos irregulares de lixo e a queima de combustíveis fósseis. (CETESB, 2020).

A queima de combustíveis fósseis representa um dos maiores responsáveis pela poluição do ar devido às emissões acentuadas de gases poluentes de efeito estufa. Os combustíveis fósseis são o gás natural, carvão mineral, petróleo e seus derivados, como diesel e gasolina e são utilizados em indústrias, residências e transporte. No setor de transporte, os principais gases responsáveis por causarem a poluição do ar são (CETESB, 2020, p.17).:

- a) Monóxido de carbono (CO);
- b) Hidrocarbonetos não metano (NMHC);
- c) Óxidos de nitrogênio (NO_x);
- d) Dióxido de enxofre (SO_2);
- e) Aldeídos totais (RCHO);
- f) Material particulado (MP);
- g) Dióxido de carbono equivalente ($\text{CO}_{2\text{eq}}$): consiste nas emissões de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O).

Conforme Seddon *et al.* (2019), a poluição atmosférica é responsável pelos impactos negativos na saúde, no clima e na qualidade da água.

A organização mundial de saúde (OMS) afirma que, além dos danos ao meio ambiente, a exposição a poluição atmosférica pode causar inúmeras doenças e complicações à saúde e, conseqüentemente, seria responsável por aproximadamente sete milhões de mortes prematuras por ano no mundo. À vista disso, as emissões de gases na atmosfera têm se tornado uma preocupação crescente em todo o mundo (NAÇÕES UNIDAS DO BRASIL, 2021).

Por consequência, foram criados leis e meios que incentivam ao desenvolvimento tecnológico para reduzir, controlar e monitorar qualidade do ar. Enfatizando o setor de veículos automotores, o Programa Rota 2030 tem como objetivo incentivar a pesquisa e desenvolvimento tecnológico no setor automotivo, bem como a produção de veículos seguindo as normalizações do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) junto ao Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE).

1.4 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência da tecnologia do alternador com acoplamento e desacoplamento elétrico e mecânico na eficiência energética e consumo de combustível operando em um motor a combustão interna por meio de simulações numéricas e testes experimentais.

1.4.1 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, tem-se:

- a) Realizar a simulação numérica de um veículo utilizando um alternador convencional, designado também como Normal de Produção (NP), operando com os combustíveis gasolina e etanol, conforme especificado nas normas técnicas vigentes;
- b) Desenvolver um modelo numérico simplificado capaz de avaliar o acoplamento e o desacoplamento elétrico e mecânico inteligente do alternador, levando em consideração a autonomia e consumo energético, operando com os combustíveis etanol e gasolina, de acordo com as especificações técnicas das normas vigentes;
- c) Realizar testes experimentais, seguindo especificação das normas técnicas vigentes ABNT NBR 6601:2021 e ABNT NBR 7024:2017, em um veículo adaptado com o alternador NP e, posteriormente, adaptado com o protótipo do alternador integrado com a polia eletromagnética e a tecnologia de acoplamento e desacoplamento eletromecânico inteligente;
- d) Comparar e analisar os resultados de autonomia e consumo energético obtidos através das simulações numéricas e dos testes experimentais realizados no veículo NP e no veículo adaptado com a tecnologia do alternador com acoplamento e desacoplamento mecânico inteligente.

1.5 Escopo do trabalho

As etapas do presente trabalho foram subdivididas em 06 capítulos, de acordo com a seguinte forma:

- a) Capítulo 02: refere-se a revisão bibliográfica do trabalho, bem como a desenvolvimento de pesquisa do estado da arte em relação a métodos de simulação de motores e ao sistema elétrico do veículo para o fornecimento de energia, assim como as tecnologias desenvolvidas nos alternadores;
- b) Capítulo 03: refere-se à fundamentação teórica do trabalho, onde apresenta a conceituação dos temas fundamentais para o desenvolvimento do tema abordado;
- c) Capítulo 04: refere-se a metodologia para o desenvolvimento do presente trabalho, bem como os aparatos e procedimentos numéricos utilizados para a realização das simulações;
- d) Capítulo 05: refere-se aos resultados e análises realizadas após a coleta de dados obtidos durante e pós as simulações;
- e) Capítulo 06: refere-se as conclusões obtidas após as análises dos resultados, bem como observações realizadas durante o presente trabalho, cronograma utilizado para cumprimento dos prazos estimados e próximos passos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo foi realizada uma seleção de trabalhos pertinentes ao sistema elétrico do veículo para o fornecimento de energia, bem como sensores de bateria inteligente, estudos relacionados aos alternadores automotivos e alternadores inteligentes. Além disso, foram selecionados trabalhos relacionados às embreagens eletromagnéticas.

2.1 Sistema elétrico do veículo para fornecimento de energia

O sistema elétrico do veículo é composto por uma bateria, um alternador e consumidores de energia. A bateria tem como principal função armazenar energia e, posteriormente, se adaptar a todas as exigências do funcionamento pelas unidades de comando específicas do motor durante o funcionamento. O motor de partida (ou motor de arranque) efetua a partida no veículo utilizando-se da energia elétrica armazenada na bateria. Durante o funcionamento do motor, o alternador é responsável por fornecer corrente elétrica que, de acordo com o nível de tensão de bordo, é suficiente sob condições ideais para alimentar os consumidores e manter a bateria carregada suficientemente como um acumulador de energia. (BOSCH, 2005, p.960).

Segundo Krail e Schade (2010), a utilização de alternadores de alta eficiência ou, em inglês, *High Efficiency Alternators* (HEA), pode promover reduções de 0,5 a 2% de emissões de CO₂.

Conforme Sales *et al.* (2017a), o alternador é um dos principais componentes para o funcionamento dos motores a combustão interna e, conseqüentemente, do veículo. Logo, o alternador tem influência de aproximadamente 4 a 6% no consumo de combustível do veículo. Nesse contexto, estão sendo desenvolvidas diversas tecnologias para se aumentar a eficiência energética dos veículos e, conseqüentemente, reduzir o consumo de combustível e emissões de CO₂.

Sales *et al.* (2018) descrevem que, no gerenciamento de energia elétrica do veículo, surge a tecnologia do sensor inteligente de bateria ou, em inglês, *Intelligent Battery Sensor* (IBS) que tem como principal função monitorar os parâmetros da bateria, como corrente, tensão e temperatura da bateria. O HEA combinado com sensor IBS e um protocolo de comunicação de rede ou, em inglês, *Local Interconnect Network* (LIN) resultou na tecnologia do alternador inteligente.

2.1.1 Sensor inteligente da bateria

Sales *et al.* (2017a) descrevem que o IBS é um sensor que vem sendo utilizado nos veículos atuais, uma vez que permite a leitura e cálculos de parâmetros de entrada para os sistemas de controle veicular, principalmente aqueles que visam o incremento da eficiência energética. O IBS atua no gerenciamento de energia elétrica do veículo tendo como principal função monitorar os parâmetros da bateria, como corrente, tensão e temperatura da bateria.

Schneider, Liebhart e Endisch (2021) explicam que o Sistema de Gerenciamento de Bateria (IBS) tem estruturas que permitem que ele controle como a eletricidade flui dentro da bateria, o que é promissor para carros elétricos e novas tecnologias. Além disso, é fundamental para o gerenciamento da bateria entender como as células da bateria estão funcionando e os parâmetros do modelo, que geralmente são calculados observando o que está acontecendo em tempo real. No entanto, às vezes, as informações disponíveis não são suficientes para uma estimativa precisa. Eles apresentaram estratégias que usam atuadores (dispositivos que causam movimento ou ação) para melhorar a obtenção de informações do sistema e, assim, melhorar a precisão da análise. Os resultados mostram que as estratégias de comutação investigadas podem aumentar a precisão da estimativa dos estados da bateria e dos parâmetros em 4% a 30%, dependendo do parâmetro sendo medido. Além disso, espera-se que o impacto no envelhecimento das células seja insignificante, já que o aquecimento das células causado pelas operações de comutação é inferior a 1,5%.

2.1.2 Alternador automotivo

O estudo realizado por Životić-Kukolj e Soong (2013) utilizou análises de elementos finitos e experimentais para avaliar a influência das ranhuras do estator no desempenho de um alternador automotivo com ímã permanente interno. Os resultados obtidos foram comparados com *slots* (ranhuras) semifechados e abertos. Os resultados indicaram que o uso de *slots* de estator aberto reduziu a tensão de força eletromotriz traseira em 4% e à redução da indutância saturada do eixo em 13%. Isso ocorreu devido ao menor vazamento do *slot* do estator e, portanto, um aumento na corrente de curto-circuito. No entanto, a alteração da abertura do *slot* do estator não teve impacto significativo no torque total. Isso ocorreu porque a diminuição do contra-EMF (em inglês, *Electromotive Force*) e, portanto, do torque do ímã, foi compensada por uma redução na saturação e, portanto, um aumento no torque de relutância. Além disso, o aumento do entreferro (espaço entre rotor e o estator) efetivamente conectado às densidades de

fluxo harmônico do dente do estator e fez com que a perda de ferro por curto-circuito medida diminuísse em 21% em altas velocidades. A potência de saída em relação à velocidade e a eficiência em relação às características de velocidade melhoraram em altas velocidades. Em síntese, o estudo mostrou que a abertura do *slot* do estator pode afetar a tensão de força eletromotriz traseira e a indutância, mas não teve um impacto significativo no torque total. O aumento do entreferro ocorreu como perdas de ferro por curto-circuito em altas velocidades, mostrando a eficiência do circuito e a potência de saída.

Waldman *et al.* (2015) realizaram um estudo experimental no qual propuseram uma estratégia de gerenciamento de energia para o sistema elétrico veicular, visando reduzir o consumo de energia enquanto atende às demandas das cargas auxiliares. A estratégia de controle utilizou o *Princípio do Mínimo de Pontryagin* (PMP), que permitiu obter uma solução analítica ideal com informações completas sobre o ciclo de condução e o perfil de corrente de carga. A estratégia de controle PMP adaptável foi implementada em tempo real na Unidade de Controle do Motor (ECU) de prototipagem rápida. O algoritmo PMP comandou o ciclo de trabalho do alternador para diminuir o consumo de combustível do veículo, levando em conta as informações sobre o estado de carga da bateria e a energia consumida pelo alternador. A estratégia de controle proposta apresentou redução de aproximadamente 2,2% no consumo de combustível em comparação com o algoritmo de controle de linha de base (normal de produção), para dois diferentes perfis de corrente de condução e carga. Esses resultados indicam que a estratégia de gerenciamento de energia proposta é eficiente em reduzir o consumo de energia do sistema elétrico veicular, sem comprometer a demanda das cargas auxiliares.

O estudo experimental de Waldman *et al.* (2015) mostrou que a utilização do Princípio do Mínimo de Pontryagin (PMP) para o desenvolvimento de uma estratégia de gerenciamento de energia pode contribuir para a redução do consumo de combustível em veículos leves de passageiros. A estratégia de controle mostrou melhorias significativas na economia de combustível em comparação com o algoritmo de controle de linha de base, tornando-se uma opção viável para a indústria automotiva em termos de eficiência energética.

Puzakov (2019a) propõe um método que visa prever a quantidade estimada de tempo ou de operação que resta para um alternador automotivo antes que ele atinja o fim de sua vida útil ou antes que ocorra uma falha. Ele destaca a importância da temperatura ambiente e do tempo de operação como fatores significativos para a mudança na vida útil dos alternadores. Além disso, ele mostra que, à medida que o tempo passa, o efeito da temperatura fica menos significativo. O estudo evidencia que as condições extremas, mesmo com baixas rotações, podem levar à falha repentina dos alternadores. A previsão da vida residual dos alternadores

pode ser útil para o planejamento de manutenções preventivas, visando reduzir os custos com reparos inesperados e minimizar a indisponibilidade dos veículos.

O estudo apresentado por Khafizov *et al.* (2019) propõe uma solução técnica para aumentar a vida útil do motor e a eficiência do alternador automotivo. A solução consiste em substituir os ímãs permanentes do estator por eletromagnéticos, reduzindo o número de folgas e seus parâmetros geométricos. O princípio de funcionamento do alternador é baseado em uma bateria conectada à entrada do enrolamento do estator do sistema excitador da máquina. A corrente que circula pelo enrolamento forma um campo eletromagnético constante do estator do sistema excitador da máquina. Quando o eixo gira pelos enrolamentos do rotor, uma tensão de indução é formada neles. A tensão de indução é retificada por dois retificadores trifásicos e filtrada pelo filtro passa-alta “LC” em uma tensão constante. Essa tensão retificada é então aplicada ao enrolamento de excitação. Como o enrolamento de excitação está localizado em um eixo rotativo, é formado um campo eletromagnético constante rotativo, cujas linhas de campo cruzam o enrolamento estacionário do estator do sistema gerador, gerando a tensão alternada trifásica necessária do sistema gerador no enrolamento do estator. Com a substituição dos ímãs permanentes por eletromagnéticos, espera-se aumentar a vida útil do motor e a eficiência do alternador automotivo.

O estudo realizado por Puzakov (2019b) analisou as falhas em alternadores automotivos a partir do estado térmico, utilizando a temperatura como parâmetro de diagnóstico. As falhas nesses componentes são inevitáveis e podem levar à paralisação do processo de transporte. A utilização da temperatura como parâmetro de diagnóstico permite uma rápida identificação da natureza da falha, reduzindo o tempo de localização do problema e, consequentemente, diminuindo o tempo de inatividade dos veículos durante o reparo. Os resultados do estudo indicaram que o curto-circuito entre espiras da fase do estator foi a falha que apresentou o maior superaquecimento, enquanto a abertura do diodo retificador foi a que apresentou o menor superaquecimento. Esses resultados reforçam a relevância dessas falhas, uma vez que a abertura do diodo retificador pode resultar em subcarga da bateria do veículo, enquanto o curto-circuito entre espiras da fase do estator é acompanhado por um som característico e pode levar à mudança das cargas para alimentação a partir da bateria, devido à baixa tensão de saída do alternador. Em síntese, destaca-se a importância da utilização da temperatura como parâmetro de diagnóstico para a identificação rápida e eficiente das falhas em alternadores automotivos, permitindo uma solução mais ágil e reduzindo o tempo de inatividade dos veículos durante o reparo.

Puzakov (2020) realizou um experimento para avaliar e monitorar a carga do alternador automotivo durante a movimentação do veículo. Quando o motor está funcionando, o alternador gera corrente, que geralmente é suficiente dependendo dos parâmetros de tensão na rede de bordo (dependendo da velocidade do alternador e dos consumidores conectados), para fornecer aos consumidores e carregar a bateria. Entretanto, se o consumo de corrente na rede de bordo for superior à corrente do alternador, a bateria é descarregada. Em marcha lenta do motor, o alternador pode fornecer apenas uma parte de sua corrente nominal na relação de transmissão normal (virabrequim – alternador) de 1:2 a 1:3. A corrente nominal é dada como determinada a uma rotação do alternador de 6000 rpm. Os resultados mostraram que a corrente do alternador não permanece constante e varia em uma ampla faixa, dependendo da rotação do motor e do número e potência dos consumidores envolvidos. A intensidade média da corrente foi de 27,8 A, com momentos de carga baixa (7 A) e alta (47 A). O alternador tem maior eficiência na zona de rotações médias (1500 a 2500 rpm) e que a relação entre a rotação do rotor e a intensidade da corrente é o coeficiente de eficiência do alternador, que pode ser usado para avaliar a condição técnica do alternador automotivo. Em síntese, o estudo apresenta informações relevantes para se entender como o sistema elétrico do veículo funciona e como a carga é distribuída. Também pode ser útil para avaliar problemas elétricos do veículo, como bateria descarregada ou problemas no alternador.

2.1.3 Tecnologias do alternador inteligente

Montalto *et al.* (2011) realizaram um estudo experimental no qual propõem um emprego de um alternador inteligente para reduzir as emissões de CO₂ e melhorar o desempenho do motor através de uma estratégia de gestão para regular a tensão de regulação do alternador de forma a maximizar a sua eficiência com base nas condições do motor e do veículo. Em um sistema de controle de motor convencional, não é possível otimizar a eficiência energética do alternador devido a tensão ser constante. Em um sistema capaz de controlar a tensão do alternador, referido a tal alternador como “inteligente”, seria possível otimizar sua eficiência energética em função dos pontos de trabalho do veículo/motor. Para que ocorra a comunicação entre o alternador e a unidade de controle do motor, utilizou-se o módulo que se comunica usando o protocolo LIN, o módulo de controle do motor (do inglês, *Engine Control Module*, ou ECM), e um IBS, que fornece informações sobre o estado da bateria (do inglês, *State-Of-Charge*, ou SOC). Para a realização dos testes, utilizou-se o veículo *Lancia New Ypsilon* equipado com motor a gasolina turboalimentado *TwinAir* 0,9l e 85 HP (86,18 CV). Utilizaram

dois tipos de ciclos diferentes nos testes: o ciclo orientado pelo perfil padrão do novo ciclo de condução europeu (do inglês, *New European Driving Cycle*, ou NEDC) e o ciclo de homologação, que começa com a bateria completamente carregada ($SOC \geq 98\%$). Os resultados obtidos mostraram que ao utilizar a nova estratégia do alternador inteligente aumentou em 5% do tempo de vida da bateria, reduzindo o torque de atrito do motor e garantindo uma melhoria ainda maior no desempenho de condução do motor e, por fim, reduziu o consumo de combustível, assegurada pela redução de 2% de emissões de CO_2 .

Lakshminarasimhan e Athani (2013) realizaram um estudo experimental no qual descrevem e analisam um método de recuperação da energia elétrica e aumento da eficiência de conversão de combustível por meio de um mecanismo de controle do alternador inteligente. Eles descrevem o sistema de controle do alternador inteligente, sua implementação em um veículo demonstrador incluindo logicas de controle e as medições de energia recuperada e economia de combustível em diferentes condições de testes. O alternador inteligente é semelhante ao alternador convencional no aspecto da máquina elétrica. No entanto, o regulador de tensão atua de forma diferente. No sistema elétrico convencional, o alternador opera da mesma forma em todas as condições de funcionamento do veículo (como motor em marcha lenta, aceleração, desaceleração e frenagem do veículo) para gerar energia elétrica que alimenta as cargas e recarrega a bateria com uma tensão normal de cerca de 14,4 volts a uma temperatura de 25 °C. Porém, o alternador inteligente tem a capacidade de desligar e ligar eletricamente de acordo com uma estratégia definida, bem como alimentar a bateria e suprir as necessidades elétricas do veículo. As configurações do veículo utilizadas nos testes contaram com um veículo *hatchback* com um a um motor de 04 cilindros operando a gasolina. Utilizou-se um alternador inteligente com capacidade nominal de carga de 90 A. As estratégias definidas foram incorporadas à ECU. Através dos testes e análises, obteve-se uma melhoria percentual de eficiência de combustível de aproximadamente 3% a 7% dependendo do ciclo de acionamento e nível de cargas elétricas.

Sales *et al.* (2017a) avaliaram experimentalmente o consumo de energia e redução de CO_2 com aplicação combinada das tecnologias *Start & Stop* e do Alternador Inteligente. Os testes foram realizados no laboratório de emissões de acordo com as normas NBR6601 e ABNT NBR7024 (FTP75 + Estrada com o uso combinado para se comparar com a configuração base. Utilizou-se um veículo conceito equipado com motor *flex fuel* de 1,0 litros operando com gasolina e adaptado com o sistema *Start & Stop*, alternador inteligente e um sistema de controle. Como essas tecnologias dependem do estado de carga da bateria, instalou-se um sensor IBS (capacidade 60 Ampère-hora / Tensão de 12 Volts / corrente 450 Ampère) com a finalidade de

monitorar a rotação do motor, velocidade do veículo, estado de carga da bateria, temperatura do motor, tensão do alternador e ação do ventilador do radiador. Houve redução de emissão de CO₂ no ciclo urbano quando comparado à configuração base de 3,48% respectivamente, usando alternador inteligente. O consumo energético em MJ/km, obteve-se a redução de 3,60% no ciclo urbano e 2,22% com o ciclo combinado entre o ciclo urbano e em estrada, para a tecnologia do alternador inteligente.

Sales *et al.* (2017b) realizaram uma análise experimental de um alternador equipado com um sistema de desacoplamento mecânico do virabrequim do motor a combustão interna para avaliar a influência no consumo de energia e emissões de CO₂ em um veículo *flex fuel* utilizando como combustível a gasolina. O protótipo do alternador com desacoplamento mecânico foi projetado a partir de um alternador convencional de alta eficiência (de 12 a 14 Volts, de 85 a 150 Ampère) dotado de uma embreagem eletromagnética integrada em sua polia. Este novo sistema consiste em uma polia integrada a uma embreagem eletromagnética, no qual a embreagem desacopla ou acopla o eixo do alternador com o rotor ao eixo do virabrequim de do motor de combustão interna. A principal diferença em relação ao alternador inteligente é que, enquanto ele permite apenas o desacoplamento elétrico, o alternador com desacoplamento mecânico acopla e desacopla permitindo que o alternador seja completamente desativado, isto é, elétrica e mecanicamente. O desacoplamento é realizado de acordo com o estado de carga da bateria e as condições de operação do motor a combustão interna. Os resultados dos testes revelaram que houve uma diminuição de 3,09% nas emissões de CO₂ para o ciclo urbano, no uso de energia em MJ/km. No cenário de condução em estradas, a redução foi de 2,33% em MJ/km. Ao somar esses efeitos, obtemos uma redução de consumo energético em MJ/km de 2,81%.

Em estudo seguinte, Sales *et al.* (2018) utilizaram o mesmo aparato e metodologia para analisar experimentalmente a combinação das tecnologias *Start & Stop* e alternador com estratégias de desacoplamento mecânico. A estratégia de desacoplar mecanicamente e eletricamente o alternador permite a descarga completa do virabrequim. Na aplicação combinada entre as duas estratégias, obteve-se uma redução de 6,51% de CO₂ no ciclo urbano e 1,5% de CO₂ no ciclo estrada. As reduções de consumo de energia e combustível em MJ/km ficaram em torno de 7,55% no ciclo urbano, 0,72% no ciclo em estrada e 4,91% no ciclo combinado. O melhor resultado da combinação *Start & Stop* com o alternador de desacoplamento significa uma possibilidade interessante de aumentar a eficiência energética do veículo.

Monteiro (2020) realizou uma avaliação experimental de um veículo equipado com alternador com desacoplamento eletromecânico e sistema *Start & Stop*. Foram realizados ensaios experimentais de forma isolada e conjunta de três tecnologias automotivas:

- a) Tecnologia do sistema de alternador inteligente (com desacoplamento somente elétrico do alternador);
- b) Tecnologia do sistema *Start & Stop* que promove o desligamento automático do motor a combustão interna em paradas do veículo;
- c) Tecnologia do alternador com desacoplamento eletromecânico composto por uma polia integrada a uma embreagem eletromagnética (acoplamento e desacoplamento elétrico e mecânico a partir do estado de carga da bateria e regime de funcionamento ou operação do motor).

Para a realização dos ensaios experimentais, construiu-se um protótipo a partir de um alternador convencional. Este modelo é uma versão melhorada de um protótipo previamente proposto por Sales *et al.* (2018), e também está relacionado a uma patente registrada sob o número INPI BR102015001454-6 no Brasil.

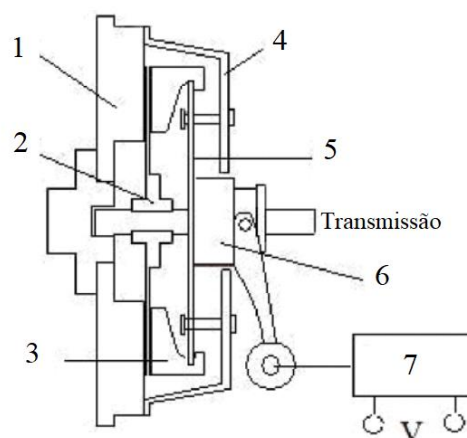
Através dos ensaios experimentais, verificou-se que a tecnologia do alternador com desacoplamento eletromecânico pode diminuir o consumo de energia em MJ/km em 4,71% no ciclo de condução urbano, em 1,28% na estrada e em 3,44% para o ciclo combinado (testes FTP-75 e Highway). Além disso, em relação às emissões de CO₂, observou-se uma redução de 4,73% no ciclo urbano e de até 1,28% na estrada.

2.2 Embreagem eletromagnética

Dragoş *et al.* (2012) propuseram um método de controle adaptativo de baixo custo dedicado ao controle de posição de sistemas de embreagem acionados eletromagneticamente. O algoritmo para o controle da posição da embreagem sugerido foi projetado por parâmetros adaptados às modificações dos pontos de operação visando garantir a melhoria no desempenho da embreagem eletromagnética ao acoplar/desacoplar. O dispositivo (Figura 1) é baseado em um sistema massa-mola-amortecedor acionado magneticamente. O modelo dos controladores para um controle eficaz do atuador durante as fases de conectar e desconectar ofereceram uma vantagem significativa no controle da embreagem para o sistema projetado para funcionar de forma eficiente e eficaz em suas operações, especificamente nas fases de conectar e desconectar a embreagem.

Em síntese, o projeto visa garantir que a embreagem eletromagnética possa realizar suas funções de forma eficiente, obtendo um desempenho otimizado ao acoplar e desacoplar, sem perdas significativas de energia ou eficácia durante esses processos.

Figura 1 – Dispositivo de embreagem eletromagnética



1	Volante	5	Mola do diafragma
2	Placas da embreagem	6	Rolamento
3	Placas de pressão	7	Subsistema de atuador eletromagnético
4	Tampa da embreagem		

Fonte: Adaptado do Dragoş et al. (2012)

Shin e Kim (2013) apresentam um sistema de embreagem eletromagnética usado em bombas d'água para controlar o resfriamento de motores a combustão interna. Este sistema foi projetado para lidar com situações em que a quantidade de líquido de resfriamento sendo bombeado é muito baixa ou muito alta. Quando o motor a combustão interna de um veículo é ligado, o sistema de resfriamento começa a funcionar para evitar que o motor esquente demais. No entanto, às vezes esse resfriamento é exagerado, o que desperdiça energia e pode causar mais poluição. Isso é especialmente problemático quando o motor está funcionando a altas velocidades, pois um resfriamento excessivo pode afetar negativamente a eficiência do motor.

Para resolver isso, os autores testaram dois tipos de bombas d'água: uma que reduz a rotação da bomba em 65% em comparação com uma bomba d'água comum e outra que pode ser completamente desativada através da embreagem eletromagnética. Os resultados dos testes mostraram que, o uso dessas bombas aumentou a economia de combustível em 1,7% e 4,0%, respectivamente, em comparação com o uso da bomba d'água convencional.

Kirchengast, Steinberger e Horn (2014) apresentaram uma ideia para controlar a posição de uma embreagem que é ativada por meio de um eletroímã. Normalmente, essa embreagem

fica aberta, e quando é necessário, o eletroímã a fecha. O objetivo do controle de posição é garantir que a parte móvel da embreagem se mova suavemente e evite colisões indesejadas quando os discos de fricção se conectam (quando a embreagem está totalmente fechada). O controlador de posição tem três tarefas principais: levar suavemente a parte móvel da embreagem até a posição de acoplamento, manter essa posição e, em seguida, retornar a parte móvel para a posição inicial. Para fazer isso, eles usaram um *software* chamado Matlab/Simulink para criar um programa de computador que controla a embreagem. Os resultados da simulação do algoritmo de controle de posição mostram que ele funciona bem em todo o movimento da embreagem, e isso é alcançado com um único conjunto de parâmetros do controlador.

ANDO *et al.* (2016) conduziram um estudo prático e numérico para melhorar o desempenho da superfície de fricção de uma embreagem eletromagnética usada em sistemas de acoplamento controlado eletronicamente. Eles fizeram isso aplicando um revestimento de carbono tipo diamante com silício, do inglês *Diamond-Like Carbon with Silicon* (DLC-Si), na superfície da embreagem.

O acoplamento eletrônico da embreagem é importante para controlar a vibração e evitar oscilações indesejadas (conhecidas como stick-slip). Essas oscilações ocorrem principalmente devido ao comportamento de fricção entre as superfícies da embreagem quando uma delas está se movendo em uma direção oposta à outra, conhecida como deslizamento negativo, o que pode causar variações no coeficiente de atrito. Para entender como a rugosidade e a forma da superfície afetam o atrito, eles realizaram testes de fricção, testes de deslizamento da embreagem e análises numéricas. Eles buscaram encontrar a melhor combinação de superfícies que reduzisse o coeficiente de atrito e minimizasse as perdas de velocidade, de acordo com os critérios de design para uma superfície de embreagem eletromagnética. (ANDO *et al.*, 2016).

A combinação que atendeu melhor a esses requisitos consistiu em uma placa externa da embreagem com um revestimento DLC-Si e uma rugosidade superficial de aproximadamente 3 a 4 μm , juntamente com uma placa interna, usada para o acoplamento, que tinha micro ranhuras com uma profundidade de cerca de 10 μm e um espaçamento de cerca de 100 μm . (ANDO *et al.*, 2016).

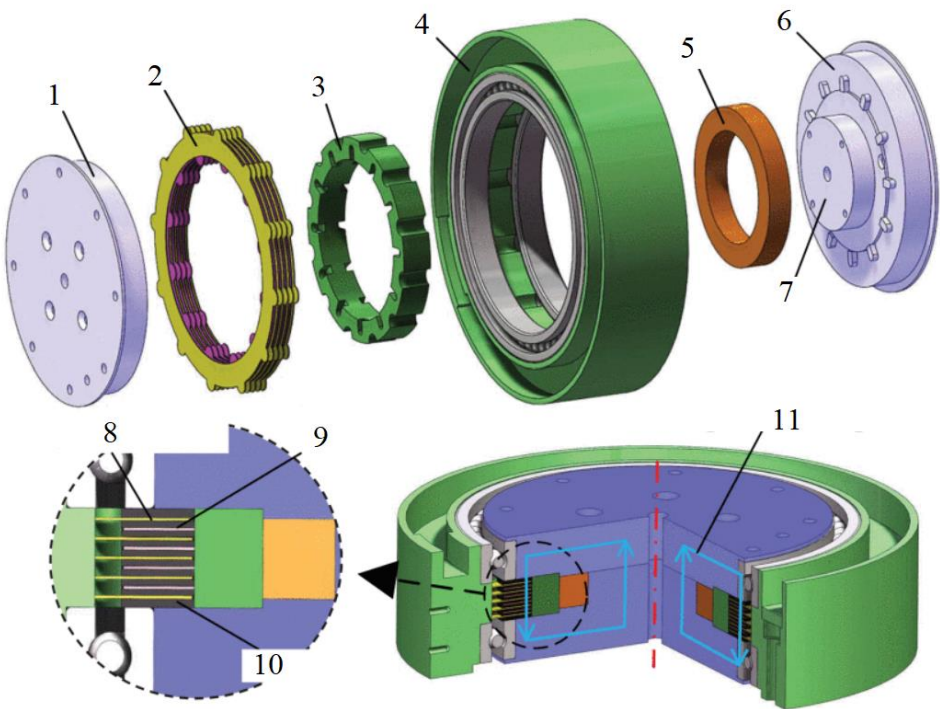
Yang e Gu (2020) realizaram uma análise dinâmica de uma embreagem eletromagnética biestável de ímã permanente para acionamento de motor da roda, utilizado em veículos elétricos. O objetivo foi reduzir o choque mecânico e a impulsão eletromagnética do sistema de acionamento do motor da roda. Construiu-se um modelo de simulação em Matlab com base no método dos elementos finitos e na equação matemática dinâmica, para analisar os desempenhos

estáticos e dinâmicos da embreagem. O dispositivo tem como princípio de funcionamento ímãs permanentes em ambos os lados, de tal modo que são dispostos com o campo magnético na direção oposta e aplicam uma força eletromagnética ao controle deslizante para mantê-lo em um estado estacionário; a corrente é aplicada nas bobinas quando o sinal de atuação é acionado, o campo magnético diminui de um lado e aumenta do outro lado, assim a direção da força aplicada no controle deslizante muda e o controle deslizante se move para o outro lado. Uma vez que a corrente é desligada, a embreagem entra novamente no estado estacionário. A embreagem biestável possui dois estados estáveis de “toque” e “desengate” sem nenhum consumo de energia, atendendo ao conceito de economia de energia dos veículos elétricos. Os resultados da análise mostram que a fonte de alimentação pulsada de descarga do capacitor é superior por sua estrutura simples, operação confiável (desligamento automático) e movimento suave.

Guangzeng e Yunjiang (2022) conduziram um estudo experimental sobre um tipo de embreagem especial chamada de Embreagem Magneto-Reológica, abreviada como MRC. Essa embreagem utiliza um fluido lubrificante especial chamado de Fluido Magneto-Reológico (MRF) entre os discos do estator e os discos do rotor. Ela é frequentemente usada em robótica, onde é crucial ter controle preciso sobre a quantidade de torque durante operações dinâmicas.

A Figura 2 mostra como a MRC é tipicamente estruturada. Ela consiste em várias partes, incluindo um rotor feito de ferro puro, um estator de alumínio, bobinas, um suporte de discos de alumínio e os próprios discos do estator e do rotor, que são feitos de ferro-silício e ficam imersos no MRF. O funcionamento desse dispositivo ocorre quando uma corrente elétrica é aplicada às bobinas. Isso cria campos magnéticos que afetam o MRF. Após alguns milissegundos, o MRF passa do estado líquido para o estado semi-sólido, dependendo da intensidade da corrente elétrica. Como resultado, os discos do estator e do rotor, que estão dentro do MRF, ficam ligados devido às forças magnéticas. Isso permite que a MRC forneça um torque de frenagem controlável ajustado pela corrente elétrica entre o estator e o rotor. (GUANGZENG; YUNJIANG, 2022).

Figura 2 - Embreagem Magneto-Reológica (MRC)



1	Rotor superior	7	Eixo
2	Discos	8	Discos do estator
3	Porta discos	9	Discos do rotor
4	Estator	10	MRF
5	Bobinas	11	Caminho do fluxo magético
6	Rotor inferior		

Fonte: Adaptado do Guangzeng e Yunjiang (2022).

Embora o estudo de Guangzeng e Yunjiang (2022) se concentre na Embreagem Magneto-Reológica, ele tem implicações significativas para a engenharia de embreagens eletromagnéticas que dependem do controle preciso de torque e fricção. A importância desse texto para o campo de embreagens eletromagnéticas é resumida da seguinte forma:

- a) Tecnologia avançada: A MRC é uma tecnologia avançada que utiliza campos magnéticos para controlar o acoplamento entre as partes móveis de uma embreagem. Isso oferece um nível de controle preciso e ajustável sobre o torque transmitido, importante em aplicações de alta precisão;
- b) Compreensão do funcionamento: O estudo descreve o funcionamento da MRC e como ela muda de um estado líquido para semi-sólido em resposta a campos magnéticos. Essa compreensão do funcionamento aplicada para melhorar o *design* e o desempenho de embreagens eletromagnéticas.

2.3 Resumo do estado da arte

Os trabalhos abordados no presente nos tópicos 2.1 e 2.2 estão resumidos posteriormente em função dos objetivos, métodos e resultados na Tabela 1, Tabela 2,

Tabela 3 e Tabela 4. No qual, a Tabela 1 apresenta os trabalhos referentes ao Sistema Inteligente de Bateria.

Tabela 1 – Resumo do estado da arte em Sensor Inteligente de Bateria

OBJETIVO	MÉTODO	RESULTADOS	AUTORES
Conceituar o sensor de bateria inteligente para monitorar os parâmetros da bateria, como corrente, tensão e temperatura da bateria	Procedimento experimental realizados em um laboratório de emissões e consumo de combustível	Promover a leitura e cálculos de parâmetros importantes para os sistemas de controle veicular para a utilização do alternador inteligente. (análise do conceitual)	Sales et al. (2017a)
Conceituar o sensor de bateria inteligente para obtenção de informações sobre o estado da bateria	Simulação e metodologia experimental	As estratégias de comutação investigadas aumentam a precisão da estimativa de estado e parâmetro em 4 a 30%.	Schneider, Liebhart, Endisch (2021)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Visando estudar diversas pesquisas e desenvolvimentos tecnológicos aplicados em alternadores automotivos, a Tabela 2 apresenta um resumo dos trabalhos realizados sobre o tema.

Tabela 2 – Resumo do estado da arte em Alternadores automotivos

OBJETIVO	MÉTODO	RESULTADOS	AUTORES
Avaliar a influência das ranhuras do estator no desempenho de um alternador automotivo com ímã permanente interno	Procedimento numérico e experimental	A abertura da ranhura do estator pode afetar a tensão de força eletromotriz traseira e a indutância, mas não teve um impacto significativo no torque total	Životić-Kukulj e Soong (2013)

Estratégia de gerenciamento de energia para o sistema elétrico veicular, visando reduzir o consumo de energia enquanto atende às demandas das cargas auxiliares	Procedimento experimental	Melhorias de aproximadamente 2,2% na economia de combustível	Waldman et al. (2015)
Método que visa prever a vida residual de alternadores	Procedimento numérico	As condições extremas, mesmo com baixas rotações, podem levar à falha repentina dos alternadores	Puzakov (2019a)
Solução técnica para aumentar a vida útil do motor e a eficiência do alternador automotivo	Estudo teórico	Aumento da vida útil do motor e a eficiência do alternador automotivo	Khafizov et al. (2019)
Analisar as falhas em alternadores automotivos a partir do estado térmico	Estudo numérico	O curto-circuito entre espiras da fase do estator foi a falha que apresentou o maior superaquecimento, enquanto a abertura do diodo retificador foi a que apresentou o menor superaquecimento	Puzakov (2019b)
Monitorar a carga do alternador automotivo durante a movimentação do veículo	Procedimento experimental	A corrente do alternador não permanece constante e varia em uma ampla faixa, dependendo da rotação do virabrequim do motor e do número e potência dos consumidores envolvidos.	Puzakov (2020)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para melhorar o desempenho dos alternadores automotivos e reduzir o consumo de combustível, existem algumas tecnologias disponíveis no mercado, dentre elas, o alternador inteligente que atua com um sistema que monitora a carga da bateria e ajusta a saída do alternador de acordo com a necessidade. Isso ajuda a reduzir o consumo de combustível, pois o alternador não precisa trabalhar continuamente para manter a carga da bateria. A

Tabela 3 é apresentado um resumo de alguns trabalhos e pesquisas relacionados ao tema.

Tabela 3 – Resumo do estado da arte em Alternadores Inteligentes

OBJETIVO	MÉTODO	RESULTADOS	AUTORES
Conceituar o sensor de bateria inteligente para monitorar os parâmetros da bateria, como corrente, tensão e temperatura da bateria	Procedimento experimental realizados em um laboratório de emissões e consumo de combustível	Promover a leitura e cálculos de parâmetros importantes para os sistemas de controle veicular para a utilização do alternador inteligente. (análise do conceitual)	Sales et al. (2017a)
Conceituar o sensor de bateria inteligente para obtenção de informações sobre o estado da bateria	Simulação e metodologia experimental	As estratégias de comutação investigadas aumentam a precisão da estimativa de estado e parâmetro em 4 a 30%.	Schneider, Liebhart, Endisch (2021)
Analisar a influência do alternador inteligente na redução de CO ₂ e na melhora do desempenho do motor.	Procedimento experimental	Melhoria do tempo de vida da bateria em 5%, redução do torque de atrito do motor garantindo uma melhoria no desempenho de condução do motor e, por fim, redução do consumo de combustível, assegurada pela redução de 2% de emissões de CO ₂	Montalto et al. (2011)
Analisar um método de recuperação da energia elétrica e melhoria da eficiência de combustível por meio do alternador inteligente	Procedimento experimental	Melhoria percentual de eficiência de combustível de 3% a 7%.	Lakshminarasimhan e Athani, (2013)
Analisar o efeito da aplicação combinada das tecnologias Start-Stop e do Alternador Inteligente para o consumo de combustível e redução de CO ₂	Procedimento experimental realizado em um laboratório de emissões e consumo de combustível	Na aplicação combinada das duas tecnologias obteve-se a redução de 5,87% de CO ₂ no ciclo urbano	Sales et al. (2017a)

Analisar a influência do alternador com desacoplamento mecânico consumo de energia e emissões de CO ₂	Procedimento experimental realizado realizados em um laboratório de emissões e consumo de combustível	No ciclo urbano obteve uma redução de 3,09% e no ciclo rodoviário 2,33%	Sales et al. (2017b)
Analisar a aplicação combinada das tecnologias Stop & Start e alternador com estratégias de desacoplamento Mecânico	Procedimento experimental realizado realizados em um laboratório de emissões e consumo de combustível	Na aplicação combinada das duas tecnologias obteve-se uma redução de 6,51% de CO ₂ no ciclo urbano	Sales et al. (2018)
Analisar a aplicação do alternador com desacoplamento eletromecânico para a redução de consumo de combustível e emissões de CO ₂	Procedimento experimental realizado realizados em um laboratório de emissões e consumo de combustível	Reduções de 2,17% a 4,68% no consumo energético e reduções nas emissões de CO ₂ para o ciclo urbano de 6,51% e 1,50% para o ciclo estrada	Monteiro (2020)

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 4 apresenta um resumo relacionado a algumas pesquisas e desenvolvimentos tecnológicos aplicadas em embreagens eletromagnéticas.

Tabela 4 – Resumo do estado da arte em Embreagens Eletromagnéticas

OBJETIVO	MÉTODO	RESULTADOS	AUTORES
Controle de posição de sistemas de embreagem acionados eletromagneticamente	Estudo numérico	Modelo proposto dos controladores para um controle eficaz do atuador durante as fases de conectar e desconectar	Dragoş et al. (2012)

Desenvolvimento de uma embreagem eletromagnética para controlar o sistema de arrefecimento de motores a combustão interna em situações em que o fluxo de refrigerante é baixo ou alto	Procedimento experimental	A aplicação da embreagem eletromagnética melhorou até 4% na economia de combustível	Shin e Kim (2013)
algoritmos de controle de posição para uma embreagem acionada eletromagneticamente	Procedimento numérico implementado e testado Software Matlab/Simulink	Rastreamento em toda a amplitude de movimento com um único conjunto de parâmetros do controlador	Kirchengast, Steinberger e Horn (2014)
Melhorar as características de atrito e desgaste da superfície deslizante da embreagem eletromagnética	Procedimento experimental e numérico	Melhoria nas características de coeficiente de atrito e velocidade de deslizamento	ANDO et al. (2016)
Reduzir o choque mecânico e a impulsão eletromagnética do sistema de acionamento do motor da roda	Procedimento numérico	Solução analítica com operação confiável (desligamento automático) e movimento suave da embreagem eletromagnética	Yang e Gu (2020)
Avaliar um modelo de embreagem sem atrito	Procedimento experimental	Promover o entendimento do modelo da Embreagem Magneto-Reológica	Guangzeng e Yunjiang (2022)

Fonte: Elaborado pelo autor.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo apresenta os fundamentos teóricos sobre a redução de emissões de poluentes por veículos automotores, bem como programas, normas e leis responsáveis por definir padrões e controlar as emissões de poluentes gerados pelos veículos equipados com motores a combustão interna. Além disso, apresenta conceitos e referenciais teóricos sobre os motores a combustão interna, sistemas elétricos para geração de energia do veículo, sistema de controle do motor e os principais combustíveis utilizados em motores do Ciclo Otto, além dos equipamentos e métodos utilizados para ensaios de emissões e consumo de combustíveis.

3.1 Redução de emissões de poluentes por veículos automotores

O projeto de Lei 8.723 de 28 de outubro de 1993 dispõe sobre a redução de emissões de poluentes por veículos automotores e dá outras providências como (BRASIL,1993):

O artigo 1º preceitua que:

“Como parte integrante da Política Nacional de Meio Ambiente, os fabricantes de motores e veículos automotores e os fabricantes de combustíveis ficam obrigados a tomar as providências necessárias para reduzir os níveis de emissão de monóxido de carbono, óxido de nitrogênio, hidrocarbonetos, álcoois, aldeídos, fuligem, material particulado e outros compostos poluentes nos veículos comercializados no País, enquadrando-se aos limites fixados nesta lei e respeitando, ainda, os prazos nela estabelecidos.” (BRASIL,1993, Lei 8.723).

E, o artigo 3º esclarece que:

“Os órgãos competentes para estabelecer procedimentos de ensaio, medição, certificação, licenciamento e avaliação dos níveis de emissão dos veículos, bem como todas as medidas complementares relativas ao controle de poluentes por veículos automotores, são o Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA e o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA, em consonância com o Programa Nacional de Controle de Poluição por Veículos Automotores – PROCONVE, respeitado o sistema metrológico em vigor no País.” (BRASIL,1993, Lei 8.723).

Segundos os Artigos 1º e 3º da Lei 8.723/1993, os fabricantes de motores e veículos automotores e os fabricantes de combustíveis são os principais responsáveis por tomar providências para redução de emissões de poluentes conforme os limites especificados pelos órgãos CONAMA e o IBAMA, em concordância com o programa PROCONVE.

3.1.1 Conselho Nacional do Meio Ambiente

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) consiste em um órgão que tem como “missão restrita ao regulamento de leis, bem como especificar como serão aplicadas, de modo eficaz, em melhor proteger o meio ambiente e os recursos naturais da República Federativa do Brasil.”. (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2012, p.9).

Em consequência ao aumento constante na frota de veículos automotores nos centros urbanos, o CONAMA reconheceu a necessidade de controlar as emissões de poluentes, devido à deterioração da qualidade do ar. Este controle iniciou na Resolução n.º18 de 1986, onde dispõe sobre a criação do Programa de Controle de Poluição do Ar por veículos Automotores – PROCONVE. (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 1986).

O CONAMA preceitua na Resolução n.º18 de 1986, que os veículos com motores a combustão interna como o ciclo Otto e Diesel são fontes de emissões evaporativas de combustível, bem como monóxido de carbono, hidrocarbonetos, óxidos de levedura, fuligem e aldeídos. Essas emissões ocorrem quando o combustível evapora no sistema de exaustão ou combustível do veículo. No entanto, a utilização de tecnologias adotadas e comprovadas pode ajudar a controlar as emissões e economizar combustível. Portanto, é importante haver um prazo para o domínio tecnológico de motores e veículos automotores novas às exigências de controle do comportamento (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 1986).

3.1.2 Programa Nacional de Controle de Poluição por Veículos Automotores

Em consequência ao aumento exacerbado de veículos, nos últimos anos, o órgão do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) constatou a necessidade em controlar as emissões de poluentes gerados nos centros urbanos, devido à deterioração da qualidade ambiental país. Logo, em 1986 o CONOMA publicou a Resolução n.º18, criando o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) que por sua vez pretende conter as emissões de poluentes atmosféricos e favorecer avanços tecnológicos para adaptação de veículos às novas exigências de controle da poluição (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 1986).

Para reduzir as emissões de poluentes, o PROCONVE definiu limites máximos de poluentes do ar emitidos por motores e veículos automotores novos e designou prazos e padrões legais de emissões admissível.

O Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), complementa que para cumprir todas as normas designadas, o PROCONVE deverá estabelecer e controlar limites de emissões de gases e poluentes por meio de fases criadas para cada categoria de veículos automotores. Os limites estabelecidos pelas fases designadas pelo PROCONVE, são atualizadas periodicamente para reduzir gradativamente as emissões de gases e poluentes na atmosfera (IBAMA, 2021).

Ressalta-se que, o PROCONVE estabelece padrões para diferentes categorias de veículos. As categorias são classificadas como Veículos Leves e Veículos Pesados. À vista disso, os limites máximos estabelecidos são controlados por meio de fases, conforme descrito a seguir (BRASIL, 2018):

- a) Veículos Leves: consistem em veículos automotores para passageiros e comerciais leves e suas fases são designadas como “L”, sendo que a primeira fase PROCONVE L1 entrou em vigor em 1989 e atualmente encontra-se na fase PROCONVE L7, conforme descrita na Resolução CONAMA n.º492/2018;
- b) Veículos Pesados: consistem em veículos automotores pesados e suas fases são designadas como “P”, sendo que a primeira fase PROCONVE P1 entrou em vigor em 1989 e atualmente encontra-se na fase PROCONVE P8, conforme descrita na Resolução CONAMA n.º490/2018.

Para a categoria de veículos automotores de passageiros e comerciais leves, a fase PROCONVE L7, designada pelo CONAMA Resolução n.º492/2018 e implementada em janeiro de 2022, especifica no Capítulo XIII art. 1º, a nova classificação de Veículos Leves como:

“§ 1º Veículo leve de passageiros: veículo automotor com massa total máxima de até 3.856 kg e massa em ordem de marcha de até 2.720 kg, projetado para o transporte de passageiros e que não tenha mais de 8 (oito) assentos, além do assento do motorista, e veículos de carga não abrangidos pelo §2º deste artigo. § 2º Veículo leve comercial: veículo automotor, não derivado de veículo leve de passageiros, com massa total máxima autorizada de até 3.856 kg, massa em ordem de marcha até 2.720 kg, projetado para: I - o transporte de carga útil maior que 1000 kg; ou II - o transporte de passageiros que tenha mais que 8 assentos, além do assento do motorista; ”. (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2018).

A fase PROCONVE L7 visa estipular novos limites máximos de emissões de poluentes por categoria de veículos, seguindo uma abordagem semelhante as fases anteriores do programa PROCONVE. Os limites máximos de emissões de escapamento separados são estabelecidos para veículos automotores para passageiros e comerciais leves e, no caso de certos poluentes, limites separados são estabelecidos para veículos equipados com Motores de

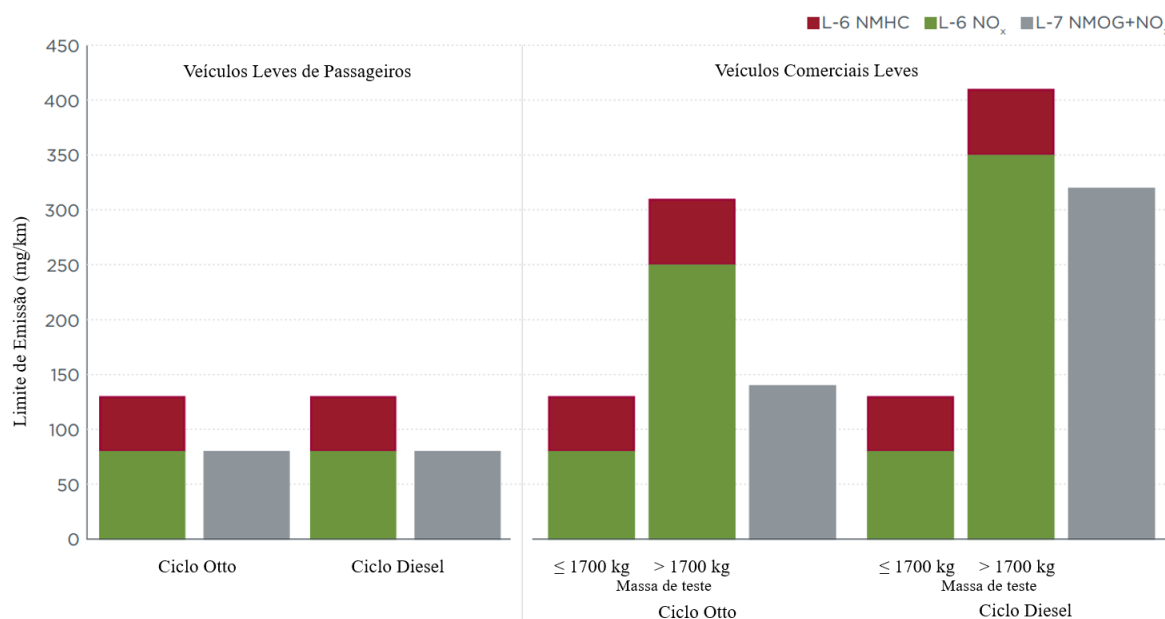
Combustão Interna, os quais são tipicamente veículos a gasolina e/ou etanol, e para veículos com motores a diesel.

Os principais pontos determinados pela fase PROCONVE L7 são descritos a seguir (ICCT, 2020):

- a) Nova classificação de Veículos Leves;
- b) Determinação de limites de emissões combinado de Gás Orgânico Não Metano (NMOG) mais Óxidos de Nitrogênio (NO_x) – $\text{NMOG} + \text{NO}_x$ –, incluindo disposições para considerar o potencial de formação de ozônio das emissões de NMOG durante os testes de certificação do veículo;
- c) Determinação de limites de emissões de material particulado (MP) para motores de combustão interna;
- d) Redução do limite de emissões evaporativas;
- e) Introdução de limites de emissões de reabastecimento para veículos movidos a gasolina ou etanol, a ser fabricados entre 2023 e 2025;
- f) Extensão da vida útil do veículo;
- g) Introdução de requisitos de relatórios e testes de emissões em condução real.

As normas do PROCONVE L7 preservam um limite de aldeído separado para veículos equipados com motores a combustão interna e introduzem um limite combinado de $\text{NMOG} + \text{NO}_x$ para substituir os limites separados de hidrocarbonetos não metano (NMHC) e NO_x usados nas fases anteriores do PROCONVE. A Figura 3 compara os limites da fase atual PROCONVE L7 ($\text{NMOG} + \text{NO}_x$) com os limites da fase anterior PROCONVE L6 (NMHC e NO_x). Para os Veículos Comerciais Leves, os padrões da fase PROCONVE L6, o peso de teste é definido como o peso de circulação do veículo mais 136 kg. Os padrões da fase PROCONVE L6 são definidos separadamente para Veículos Comerciais Leves com massa de teste ≤ 1700 kg e com massa de teste > 1700 kg. A massa de teste consiste na massa de circulação do veículo mais 136 kg. (ICCT, 2020).

Figura 3 – Comparação das fases PROCONVE L7 e PROCONVE L6 para os limites máximos de emissões de gases na atmosfera.

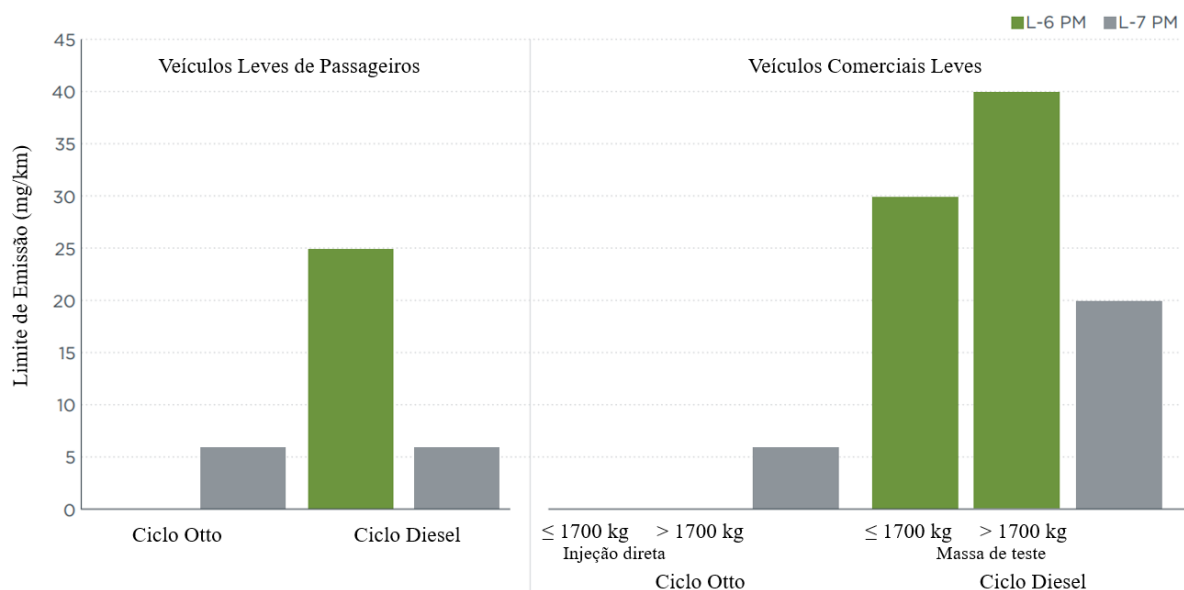


Fonte: Adaptado de ICCT (2020).

Observa-se na Figura 3 que os Veículos Leves de Passageiros apresentam limite de 80 mg/km para a fase PROCONVE L7 (NMOG+NO_x) equivalente ao limite da fase PROCONVE L6 (NO_x) e aproximadamente 40% menor que a soma dos limites da fase PROCONVE L6 (NMHC e NO_x). Para os Veículos Comerciais Leves, os limites de emissões da fase PROCONVE L7 para veículos com motor Ciclo Diesel são reduzidos em uma quantidade relativamente pequena em relação aos níveis da fase PROCONVE L6. Essa categoria de veículos com motor Ciclo Otto enfrentam um maior aperto dos limites de emissão, tanto em termos relativos como absolutos (ICCT, 2020, p. 4).

A nova fase do PROCONVE L7, integrou limites máximos para emissões de Material Particulado (MP) de 6 mg/km para a categoria de Veículos de Passageiros e Comerciais Leves com motor Ciclo Otto, pois não havia regulamentações nas fases anteriores; e novos limites para Veículos de Passageiros e Comerciais Leves com motor Ciclo Diesel. A Figura 4 representa a comparação entre a nova fase do PROCONVE L7 e a fase anterior PROCONVE L6 para os limites de emissões de MP. Através da comparação entre as fases, observa-se que para os Veículos Comerciais Leves com motor Ciclo Diesel a fase PROCONVE L7 reduziu em uma quantidade considerável nos padrões regulamentados, apresentando-se aproximadamente redução de 33% e 50% em relação a fase PROCONVE L6. (ICCT, 2020, p. 5).

Figura 4 - Comparação das fases PROCONVE L7 e PROCONVE L6 para os limites máximos de emissões de MP na atmosfera.



Fonte: Adaptado de ICCT (2020).

A próxima fase a ser regulamentada no Brasil consiste na fase PROCONVE L8, designada pelo CONAMA Resolução n.º492/2018, que se implementará em janeiro de 2025, tendo como objetivo introduzir uma abordagem regulatória de média corporativa, bem como os fabricantes de veículos serão obrigados a cumprir os limites de emissões média da frota definidos para toda a frota de veículos. Esses limites de emissões média corporativa são definidos separadamente para Veículos de Passageiros e Comerciais Leves e aumentarão em rigor à medida que os padrões da fase PROCONVE L8 forem implementados entre 2025 e 2029 para Veículos Leves de Passageiros e entre 2025 e 2031 para Veículos Comerciais Leves. (ICCT, 2020, p. 2).

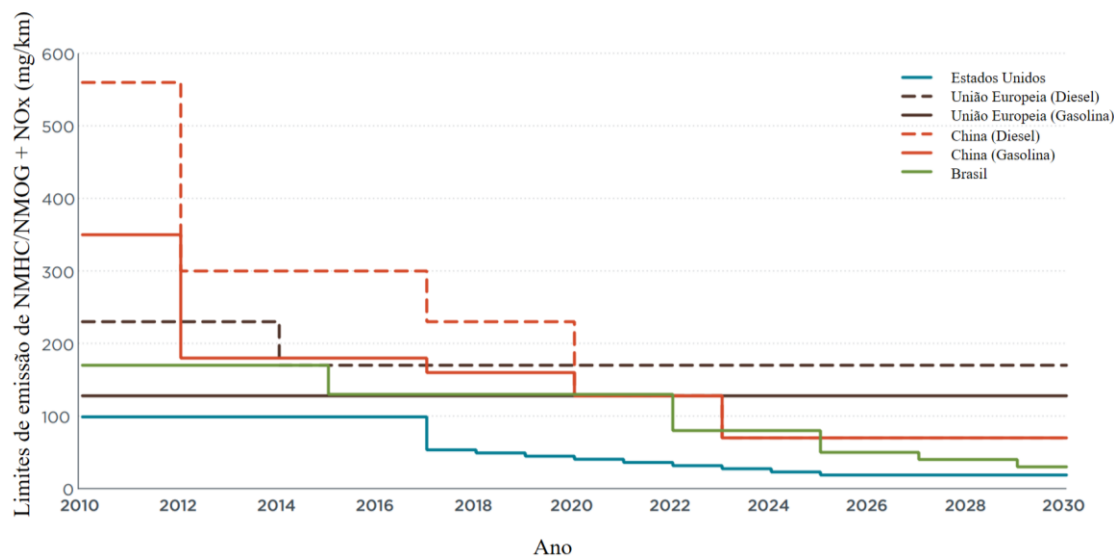
Para a certificação dos veículos, o CONAMA Resolução n.º492/2018 determina que os ensaios de emissões de poluentes das “[...] fases PROCONVE L7 e PROCONVE L8 deveram seguir as Normas ABNT NBR 12026/2016, ABNT NBR 15598/2016, ABNT NBR 6601/2012, ABNT NBR 16567/2016, ou normas técnicas brasileiras referenciadas pelo IBAMA.”. (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2018).

As medições das emissões em tráfego real estão estabelecidas pelo CONAMA na Resolução n.º492/2018 que determina que, a partir da fase PROCONVE L7, os fabricantes serão obrigados a medir e relatar a economia de combustível e as emissões de Monóxido de Carbono, Óxidos de Nitrogênio, Hidrocarbonetos Totais, Metano, Hidrocarbonetos Não Metano e Dióxido de Carbono. As exigências estabelecidas adicionam também que os ensaios deverão

ser realizados conforme as normas europeias EC 2016/427 e EC 2016/646 e para esses requisitos adicionam um teste em estrada para complementar os testes de laboratório durante o processo de homologação do veículo (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2018).

Em relação aos requisitos internacionais, a Figura 5 mostra a comparação entre o nível de desenvolvimento dos programas regulatórios para os limites máximos de emissões evaporativas entre o Brasil, China, Estados Unidos e União Europeia. Logo, pode-se observar que os limites máximos estabelecidos pelas fases PROCONVE L7 e PROCONVE L8 no Brasil são mais restritivos do que os limites incluídos nos regulamentos da fase Euro 6 da União Europeia e das fases 6a e 6b da China, embora diferentes ciclos de teste sejam usados nessas regiões. Em ambos os países, espera-se que o controle das emissões de gases evaporativos seja significativamente melhorado e aproximado ao nível alcançado nas fases Tier 2 e Tier 3 dos Estados Unidos (ICCT, 2020, p. 9-10).

Figura 5 – Comparação dos requisitos de emissões em Veículos Leves de Passageiros no Brasil, China, Estados Unidos e União Europeia.



Fonte: Adaptado de ICCT (2020, p.10).

3.1.3 Programa Rota 2030

O Programa Rota 2030 consiste em uma linha estratégica criada pelo Governo Federal através da Lei n.º 13.755 de 10 de dezembro de 2018 e tem como principal objetivo apoiar o desenvolvimento e inovação tecnológica, a proteção ao meio ambiente, a eficiência energética e a qualidade de automóveis. (BRASIL, 2018).

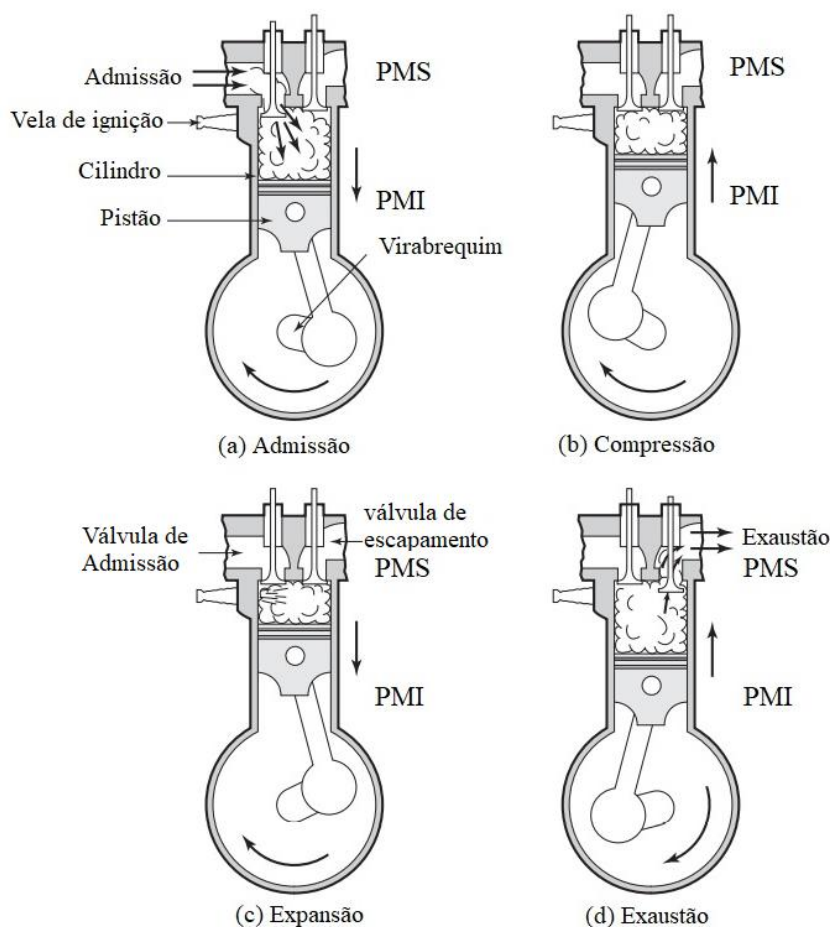
As diretrizes do Programa Rota 2030 são semelhantes ao Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores (INOVAR-AUTO) com incentivos tributários como créditos presumidos de Impostos sobre Produtos Industrializados (IPI) onde estão direcionados a novos investimentos ao desenvolvimento e inovações tecnológicas de veículos e autopeças. Ambos os programas priorizam o atendimento aos requisitos estipulados a eficiência energética dos veículos automotores. As montadoras e autopeças adotam medidas para reduzir o consumo de combustível e, conseqüentemente, de emissões de CO₂ e, assim, produzem veículos mais econômicos em cada categoria de veículos automotores. (GOVERNO FEDERAL, 2020).

3.2 Motor a combustão interna operando com o Ciclo Otto

Os motores de Ciclo Otto, também conhecidos como motores de Ignição por Centelha ou, em inglês, Spark Ignition engines (SI), são caracterizados por sua combustão a volume constante em um ciclo ideal. Esses motores SI empregam um componente elétrico denominada vela de ignição, que gera uma descarga elétrica de alta tensão. Essa descarga possibilita a ignição da mistura ar-combustível na câmara de combustão, dando início ao processo de combustão nos motores. (PULKRABEK, 2003).

Conforme Ferguson e Kirkpatrick (2016), O motor do Ciclo Otto, utilizado em veículos automotores, pode ser configurado para operar em ciclos de dois ou quatro tempos. Em configurações de quatro tempos, conforme representado na Figura 6, o processo de combustão ocorre em quatro fases distintas: admissão, compressão, combustão/expansão e exaustão. Este ciclo mais complexo oferece uma melhor eficiência energética e desempenho em comparação com motores de dois tempos.

Figura 6 – Ciclo quatro tempos no motor Ciclo Otto



Fonte: Adaptado do Ferguson e Kirkpatrick (2016).

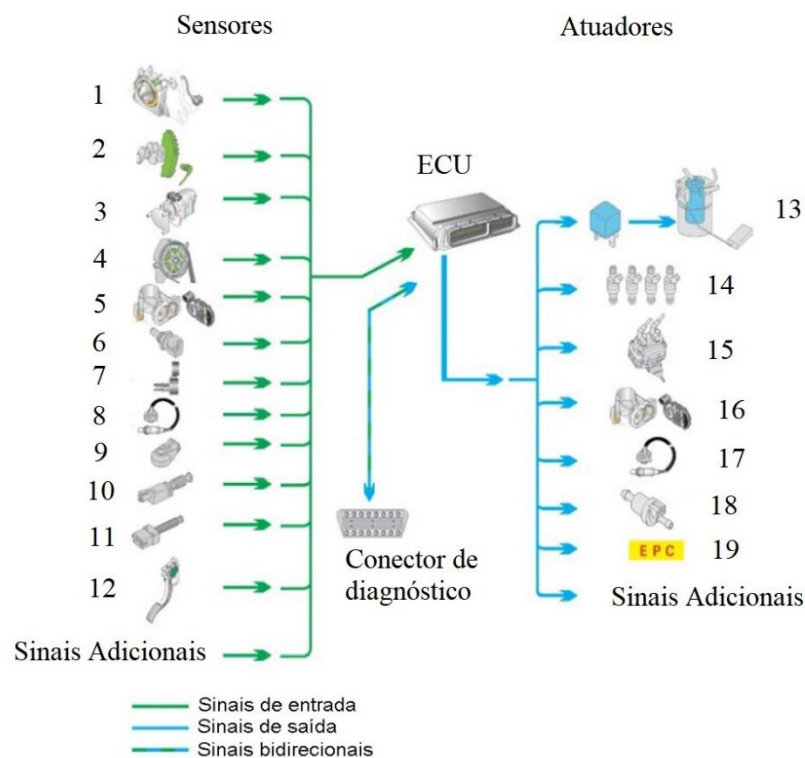
Em contraste, os motores de dois tempos realizam o ciclo completo de admissão, compressão, combustão e exaustão em apenas duas corridas do pistão. Embora sejam mais simples e geralmente mais leves, os motores de dois tempos tendem a ser menos eficientes em termos de consumo de combustível e emissões. A escolha entre configurações de dois ou quatro tempos depende das necessidades específicas de aplicação e das características desejadas para o motor.

3.3 Gerenciamento e controle dos motores a combustão interna

Em consequência dos avanços tecnológicos, foram desenvolvidos diversos sistemas para o gerenciamento do motor a combustão interna, sendo o mais atual o sistema digital que integra os controladores de injeção e ignição em um único módulo de controle eletrônico, denominado Unidade de Controle Eletrônico (do inglês, *Electronic Control Unit* ou ECU). (DIAS, 2015, p. 39).

Conforme Milhor (2002), a ECU é responsável por receber e processar os sinais dos sensores, onde são indicadas as condições de funcionamento do motor. Posteriormente, sinais de comando são enviados para os atuadores, de modo que o motor a combustão interna realize as operações de acordo o mapeamento estabelecido em ensaios experimentais realizados em dinamômetros. A Figura 7 exemplifica os principais sensores e atuadores presentes para o gerenciamento eletrônico do motor a combustão interna.

Figura 7 – Principais sensores e atuadores utilizados no sistema de gerenciamento e controle do motor a combustão interna



1	Fase	11	Interruptor Embreagem
2	Rotação	12	Pedal Eletrônico
3	Sinal de Ignição (L15)	13	Relê Controle de Bomba de Combustível
4	Carga do Alternador	14	Válvulas Injetoras
5	Posição Angular Válvula Borboleta	15	Bobina de Ignição
6	Temperatura da Água	16	Motor Elétrico Válvula Borboleta
7	Pressão Coletor	17	Válvula EGR
8	Sonda Lambda	18	Válvula de Purga do Canister
9	Detonação	19	Luz Indicadora de Avarias
10	Interruptor Freio		

Fonte: Adaptado do Dias (2015).

Dias (2015) conceitua que as principais funções do ECU são realizar os controles da injeção de combustível, da ignição, da marcha lenta, da válvula borboleta eletrônica, do sistema de arrefecimento do motor e da recirculação dos gases de exaustão.

3.4 Baterias automotivas

Conforme Robert Bosch (2017), a bateria fundamenta-se em um dispositivo eletroquímico visando transformar a energia química em energia elétrica. Durante o funcionamento do veículo, as baterias realizam o armazenamento químico de energia. Posteriormente, libera-a como energia elétrica para dar partida no motor a combustão e, após desligado, para alimentar os componentes elétricos. Ademais, a bateria automotiva absorve os picos de energia e evita danos no sistema elétrico do veículo.

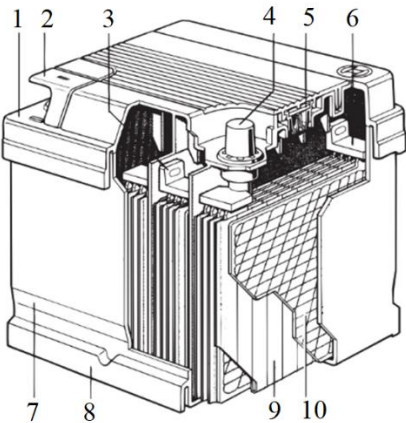
Os parâmetros de desempenho das baterias são (BOSCH, 2017):

- a) Tensão da célula: diferença entre os potenciais gerados entre as placas positivas e negativas no eletrólito. Esses potenciais dependem dos componentes das placas e de sua concentração;
- b) Tensão nominal: resulta na multiplicação das tensões das células individuais pelo número de células conectadas em série;
- c) Tensão de Circuito Aberto: consiste na Tensão da bateria sem carga;
- d) Capacidade Disponível: consiste na quantidade de potência elétrica que a bateria consegue fornecer em condições específicas, onde é representada em corrente e do tempo (Ampère-hora, Ah). Como a capacidade não é um parâmetro fixo, ela depende dos seguintes fatores:
 - Nível da corrente de descarga;
 - Densidade e temperatura do eletrólito;
 - Descarga em função do tempo;
 - Idade da bateria;
 - Manuseio em movimento ou manuseio estática;
 - Corrente de descarga: quanto maior a corrente de descarga, menor a capacidade disponível.
- e) Capacidade Nominal: consiste em uma medida para a energia poder ser armazenada por uma nova bateria, que depende da quantidade do material ativo usado na bateria e da densidade do eletrólito;

- f) Desempenho de Partida a Frio: consiste na medida da capacidade de partida, visto que representa a drenagem de corrente em temperaturas baixas.
- g) Capacidade de Reserva: corresponde no período em que a bateria automotiva consegue operar os acessórios elétricos primordiais caso o alternador do veículo falhar;
- h) Autodescarga: consiste em um processo que ocorre em todas as baterias com ácido, estejam elas em processo de uso ou de armazenamento. Os processos químicos ocorrem mesmo que nenhum consumidor esteja ligado à bateria, como um circuito elétrico fechado. Contudo, quanto mais tempo a bateria permanecer no estado descarregado, os cristais de sulfato de chumbo se dissolverão de forma que dificilmente poderão ser transformados de volta em dióxido de chumbo ou chumbo puro e, conseqüentemente, a bateria automotiva sofre influência negativa em seu desempenho e na vida útil. A autodescarga depende, em especial, dos seguintes fatores:
 - Temperatura: influencia diretamente nos processos químicos na bateria chumbo-ácido. Portanto, quanto maior a temperatura, mais rápido serão os processos químicos e, conseqüentemente, maior a taxa de autodescarga;
 - Idade da bateria: influencia diretamente no tempo de vida útil da bateria. Portanto, quanto mais velha, maior será sua taxa de autodescarga;
 - Umidade: a alta umidade é responsável por aumentar a taxa de autodescarga da bateria.

Segundo Monteiro (2020, p. 39), os veículos utilizados atualmente contam com baterias de chumbo-ácido composta por seis células de 2 Volts em série, totalizando 12 Volts. E, os principais componentes de uma bateria ácido-chumbo estão esquematizados conforme Figura 8.

Figura 8 – Principais componentes da bateria



1	Tampa da caixa	6	Conector das placas
2	Cobertura de proteção dos pólos terminais	7	Caixa da bateria
3	Conector direto das células	8	Barra de fixação
4	Pólos terminais	9	Placas positivas envelopadas em separadores de filme
5	Massa fundida	10	Placas negativas

Fonte: Adaptado do BOSCH, 2005.

3.4.1 Sensor de bateria inteligente

O *Intelligent Battery Sensor* (IBS) consiste em um sensor integrado na bateria automotiva visando analisa continuamente, de maneira precisa, a condição das baterias convencionais de ácido-chumbo de 12 Volts e fornecer informações sobre os parâmetros de funcionamento, bem como o estado de carga, capacidade de energia e estado de saúde (envelhecimento). Por consequência, o sensor melhora a capacidade de diagnóstico do automóvel e ajudaria a aumentar a vida útil da bateria entre 10 a 20% por meio de uma estratégia de carregamento melhorada (CONTINENTAL AUTOMÓVEIS, 2022).

Segundo BOSCH (2022), os parâmetros de funcionamento podem ser descritos da seguinte forma:

- a) Estado da carga ou, em inglês, *State of Charge* (SOC): responsável por indicar a energia disponível;
- b) Estado de Função ou Energia, do inglês *State of function* (SOF): responsável por prever a influência do perfil de carga na cursa de tensão;
- c) Estado de Saúde ou, em inglês, *State of health* (SOH): responsável por fornece informação para o desenvolvimento dos cálculos dos efeitos do envelhecimento da

bateria automotiva e suas influências na capacidade de armazenamento de energia e potência de saída.

3.5 Alternador automotivo

Conforme Bosch (2019), o alternador automotivo é responsável por converter a energia mecânica (cinética) em energia elétrica para suprir todo o sistema elétrico do veículo, bem como a bateria automotiva e componentes elétricos.

Conforme Bosch (2005), em consequência de os componentes elétricos do veículo utilizarem energia elétrica em forma de corrente contínua (CC), o alternador que produz energia elétrica em forma de corrente alternada (CA), por meio de eletromagnetismo, utiliza um conjunto retificador e um regulador eletrônico acoplados em sua estrutura visando retificar a tensão alternada trifásica.

Segundo Bosch (2005), o alternador automotivo deve seguir os principais requisitos:

- a) Suprir todos os componentes elétricos do veículo;
- b) Suprir a carga e recarga da bateria;
- c) Resistência a vibrações, altas temperatura, umidade e sujeira;
- d) Dimensões favoráveis a montagem e desmontagem;
- e) Possuir longa durabilidade;
- f) Possuir alta eficiência;
- g) Funcionar com baixo ruído.

Os principais fatores que influenciam no funcionamento do alternador automotivo são (BOSCH, 2005, p. 974):

- a) Rotação: o aumento do rendimento do alternador é proporcional à rotação. À vista disso, tem-se como finalidade alcançar elevada transmissão entre o eixo do motor e o alternador. Em geral, utiliza-se a relação de transmissão de 1:2 a 1:3 para veículos de leves e 1:5 para veículos com a finalidade comercial. Devido à alta rotação, o alternador se submete aos seguintes fatores limitadores:
 - Elevadas forças centrífugas;
 - Aumento do ruído do alternador;
 - Redução da eficiência;
 - Desgaste dos componentes do alternador e, assim, reduzindo sua vida útil.
- b) Temperatura: a montagem do motor e seus componentes geram perdas durante o funcionamento do veículo em elevadas rotações e na transformação de energia, de forma

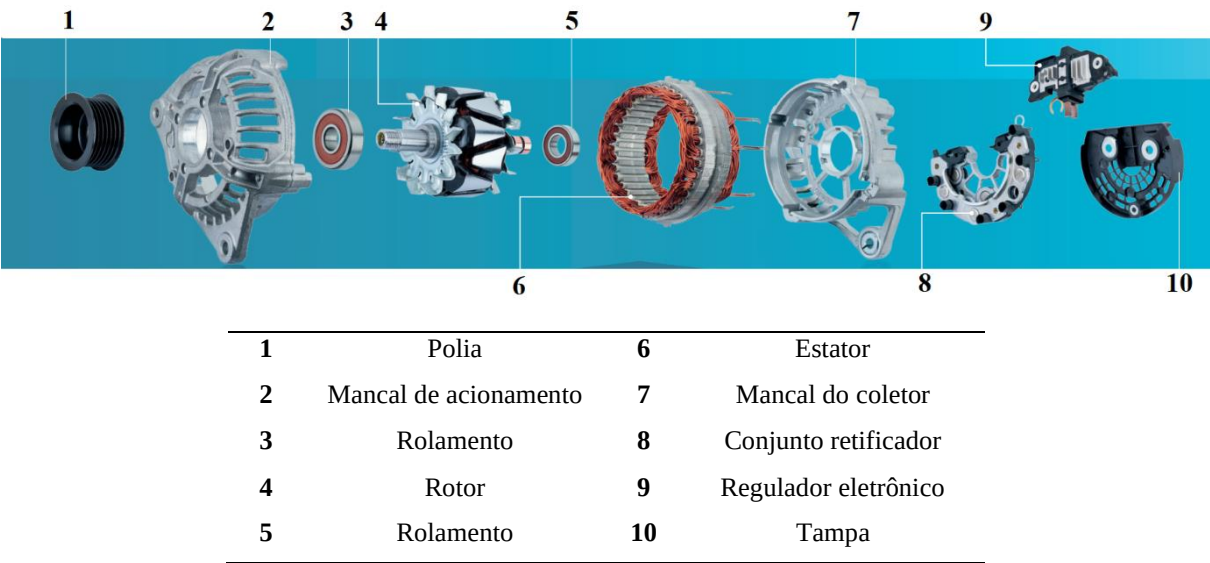
que contribuem para o aumento da temperatura do alternador. Em consequência disso, torna-se essencial realizar o dimensionamento do sistema de refrigeração do motor, de modo que reduza a temperatura dos componentes do alternador;

- c) Influências externas: a montagem do alternador no motor a combustão interna gera elevadas cargas mecânicas e, conseqüentemente, as condições de montagem podem propiciar no alternador elevadas vibrações e acelerações de oscilações. À vista disso, é essencial impedir aplicações de forças excessivas nos componentes de fixação, de forma que evitem ressonâncias críticas.

3.5.1 Componentes do alternador automotivo

Os alternadores automotivos mais utilizados em veículos leves são compostos, basicamente, por: uma polia, mancais, rolamentos, rotor, estator, conjunto retificador, regulador eletrônico e da tampa de proteção, conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Esquema de montagem do alternador automotivo



Fonte: Adaptado do BOSCH, 2019.

O funcionamento dos componentes do alternador é descrito a seguir (BOSCH, 2019):

- a) Polia: utilizada para transmitir o torque do Motor a combustão interna para o eixo do rotor por uma correia. É essencial que a correia esteja tensionada de tal forma que se garanta o desempenho do alternador, bem como suporte as variações do torque do motor sem prejudicar o abastecimento de energia para o sistema elétrico do veículo;
- b) Mancais: responsáveis por acoplar e proteger o sistema interno do alternador. Os mancais são compostos pelo mancal de acionamento e do coletor, onde são encaixados

por parafusos. Ademais, possuem geometrias que possibilitam melhorar a refrigeração do sistema interno do alternador;

- c) Rolamentos: através do seu movimento de rolamento, permite que o alternador atinja altas rotações e auxiliam na redução de ruídos, aquecimento e desgaste dos componentes;
- d) Rotor: responsável por iniciar o processo de produção de energia elétrica. O rotor é formado por uma bobina de cobre agrupada em um eixo de aço e por um par de garras polares;
- e) Estator: é responsável por produzir a corrente elétrica. O estator consiste em uma bobina com fios em cobre fixados sobre um núcleo em aço. A corrente elétrica é induzida pelo campo magnético através do rotor, agindo nos fios do estator e, assim, realizando a inversão contínua da corrente produzida;
- f) Conjunto retificador: responsável por transformar corrente e tensão alternadas em contínuas;
- g) Regulador eletrônico: responsável por monitorar e regular a tensão do alternador, de forma que adapte aos níveis de tensão e corrente, garantindo, assim, condições ideais para o desempenho do alternador. Para se evitar que o sistema seja danificado, é essencial que a produção de corrente valide com o sistema elétrico do alternador;
- h) Tampa: composto de um material plástico e tem como principal função vedar o sistema interno do alternador.

3.5.2 Modelos de alternadores

Um dos primeiros geradores de energia elétrica para os veículos foram os dínamos, conforme representado na Figura 10. Durante as evoluções tecnológicas, os dínamos foram substituídos completamente pelos alternadores de polos tipo garra devido sua baixa eficiência e, subsequentemente, foram desenvolvidos novos modelos de alternadores, conforme descritos a seguir (BOSCH, 2005):

Figura 10 – Dínamo automotivo



Fonte: IVANENKO, 2017.

- a) Alternador de polos tipo garra: consiste em um equipamento gerador de corrente alternada, que devido aos avanços tecnológicos substituíram os antigos dínamos. A potência de ambos é igual, porém o alternador de polos tipo garra é mais econômico e possui metade do peso do dínamo. Uma das características do alternador de polos tipo garra é a ventoinha extra responsável pela ventilação axial de um fluxo único;
- b) Alternador compacto (resfriados a ar): utiliza-se um método de ventilação, no qual conta com duas ventoinhas internas, no qual são responsáveis por aspirar o ar de refrigeração e expulsar na área do cabeçote de enrolamento do estator, no mancal de acionamento e no mancal do coletor. À vista disso, têm-se as principais vantagens:
 - Elevada eficiência devido à possibilidade de alcançar maiores velocidades;
 - Menores emissões de ruídos;
 - Maior durabilidade.
- c) Alternador de polos individuais: possui polos magnéticos individuais, no qual possibilita um comprimento maior do estator (comparado com o alternador de polos tipo garra) permitindo, assim, adquirir maior potência e menores rotações máximas.

3.6 Combustíveis

O petróleo bruto é uma das principais fontes de energia no mundo, onde o setor de transporte corresponde cerca de aproximadamente 95% de seu consumo. Para o setor de transporte, em específico em motores de combustão interna, destacam-se a gasolina e o diesel como principais combustíveis produzidos a partir do petróleo bruto. (HEYWOOD, 2018).

Durante a crise do petróleo na década de 70, os países foram obrigados a investirem em novas alternativas para minimizar a dependência do petróleo. No Brasil foi criado o Programa Nacional do Álcool (PROÁCOOL), visando incentivar a produção de combustíveis alternativos

e redução de emissões de GEE gerados pelos combustíveis derivados do petróleo. Diante disso, o Etanol é um dos combustíveis alternativos mais utilizados em motores de Ignição por Centelha ou, em inglês, *Spark Ignition* (SI). Ele consiste em um biocombustível que pode ser fabricado a partir da cana-de-açúcar, milho, mandioca, beterraba, trigo, dentre outras fontes renováveis. No Brasil, utiliza-se a cana-de-açúcar como principal matéria-prima para o Etanol. (COSTA; SODRÉ, 2011).

3.6.1 Gasolina

A gasolina é uma mistura de hidrocarbonetos produzidos a partir do petróleo bruto e é o principal combustível utilizado nos motores que operam com o ciclo Otto. O petróleo bruto é a principal matéria-prima utilizada para produzir diversos combustíveis para o setor de transporte (PULKRABEK, 2003). Por ser um combustível derivado do petróleo bruto, consiste em uma mistura de hidrocarbonetos leves como parafinas, naftenos, olefinas, aromáticos. Para os motores que operam com o Ciclo Otto, as propriedades mais críticas da gasolina são sua volatilidade e sua resistência à autoignição (ou detonação) durante a última parte do processo de combustão. A volatilidade de uma gasolina é caracterizada por sua curva de destilação, a fração de volume evaporada à pressão atmosférica em função da temperatura (HEYWOOD, 2018, p.110).

Para melhorar as propriedades dos combustíveis e reduzir as emissões de gases na atmosfera, foram desenvolvidos biocombustíveis como aditivos. Assim, a gasolina pode conter diversos teores de Etanol Anidro em sua composição. As características físico-químicas da mistura Gasolina-Etanol (também conhecida como Gasolina Brasileira ou Gasool) variam, sendo uma das formulações comuns aquela com 22% de Etanol Anidro e 78% de gasolina (E22 ou A22), conforme estabelecido pelas normativas brasileiras de ensaios de emissões e consumo de combustíveis. Os percentuais podem ser alterados ao longo do tempo, sendo importante consultar as regulamentações vigentes para obter informações atualizadas sobre a composição da gasolina brasileira (COSTA; SODRÉ, 2011).

3.6.2 Etanol

O etanol consiste em um biocombustível derivado do processo fermentativo de biomassa renovável, desenvolvido para ser utilizado em motores de combustão interna. Seu componente principal é o etanol, o qual é apresentado em duas formas especificadas: etanol

anidro combustível e etanol hidratado combustível (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2022):

- a) Etanol anidro (EAC): sendo utilizado como aditivo antidetonante da gasolina;
- b) Etanol hidratado (EHR): utilizado como combustível alternativo para motores operando no ciclo Otto.

Conforme Costa e Sodré (2010), para a mesma quantidade de ar, é necessária uma quantidade maior de etanol hidratado para se produzir uma mistura estequiométrica em comparação com a gasolina. Como os motores modernos de ignição por centelha são configurados para trabalhar com misturas levemente ricas, o uso de etanol hidratado resulta em maior consumo de combustível. Apesar de seu poder calorífico inferior (PCI) ser menor que o da gasolina, o AF menor do etanol permite que uma quantidade de energia similar seja admitida no motor por ciclo, não causando prejuízo em relação ao torque e à potência disponíveis.

Ademais, o etanol hidratado tem um índice de octanas maior do que a gasolina brasileira. Isso permite o uso de razões de compressão mais altas, melhorando assim o desempenho do motor. Um motor de combustível flexível [*flexfuel*] apresenta uma razão de compressão alta para operação a gasolina e moderada a baixa quando abastecida com etanol. A detonação no motor é evitada quando a gasolina é usada através da aplicação de um ponto de ignição mais retardado. Como o calor de vaporização da gasolina é menor, obtém-se melhor partida a frio e dirigibilidade durante o período de aquecimento para a mistura em comparação ao etanol hidratado.

Devido ao etanol ser mais reativo que os combustíveis de hidrocarbonetos, como a gasolina, sua estrutura molecular apresenta uma fração polar devido ao radical hidroxila e uma fração apolar em sua cadeia carbônica. Isso explica por que o etanol pode ser dissolvido tanto na gasolina quanto na água (COSTA; SODRÉ, 2011).

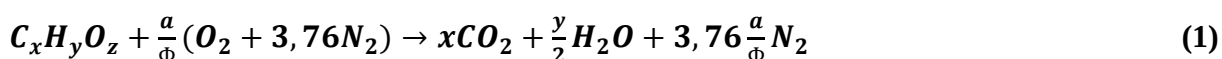
3.6.3 Mistura ar-combustível

A estequiometria consiste no estudo das quantidades envolvidas em um processo químico, bem como na relação da quantidade de ar e combustível. Logo, “A quantidade estequiométrica de oxidante [ar] é simplesmente a quantidade necessária para queimar completamente certa quantidade de combustível.” (TURNS, 2013, ed.3, p.22).

Para definir se a mistura de ar-combustível consiste em uma mistura rica, pobre ou estequiométrica, utiliza-se a definição da razão de equivalência (Φ), conforme descrita posteriormente:

- a) Mistura pobre ($\Phi < 1$): quando a mistura ar-combustível possui maior quantidade de ar do que combustível, diante disso a mistura é dita pobre de combustível;
- a) Mistura rica ($\Phi > 1$): quando a mistura ar-combustível possui maior quantidade de combustível do que de ar, e nesse caso mistura é dita rica em combustível;
- b) Mistura estequiométrica ($\Phi = 1$): quando a mistura possui a mesma proporção de ar e combustível, logo diz-se que é uma mistura perfeita ou, simplesmente, estequiométrica.

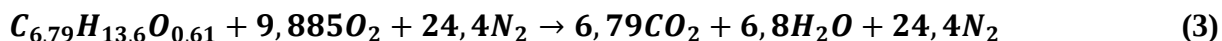
Ainda segundo Turns (2013), a composição para o ar corresponde em 21% de dióxigênio (O_2) e 79% de dinitrogênio (N_2) (por volume). Logo, a relação estequiométrica para uma mistura entre o ar e o combustível hidrocarboneto é expressa através do balanço atômico, conforme representada na Equação 1.



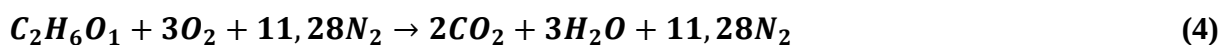
Onde, a variável “a” é descrita através da Equação 2.

$$a = x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2} \quad (2)$$

O balanceamento químico da reação de combustão do combustível E22 utilizando a composição química é descrita na Equação 3, onde se considerou combustão completa de uma mistura estequiométrica ($\Phi = 1$). (COSTA; SODRÉ, 2011).



De forma análoga, o balanceamento químico da reação de combustão utilizando a composição química do E100 é descrita pela Equação 4. (COSTA; SODRÉ, 2011).



Para as reações descritas nas Equações 1, 3 e 4, o processo de combustão completa resulta somente em CO_2 , H_2O e N_2 como produtos.

A razão de equivalência (Φ) para a mistura ar-combustível, A/F (do inglês *Air/Fuel ratio*), é determinada através da Equação 5. (TURNS, 2013, ed.3, p.23).

$$\Phi = \frac{A/F}{(A/F)_{est.}} = \frac{m_a}{(m_a)_{est.}} \quad (5)$$

Em que, a variável m_a consiste na massa do ar.

3.6.4 Reação de combustão da mistura ar-combustível

Conforme Turns (2013), a combustão é responsável por converter a energia armazenada em ligações químicas para energia térmica.

Nos motores que operam com o Ciclo Otto, o processo de combustão inicia-se com o processo de ignição e desenvolvimento da chama, em que é considerado o consumo dos primeiros 5 a 10% da mistura ar-combustível. Após esse processo, inicia-se a propagação da chama, na qual ocorre o consumo de 80 a 90% da mistura ar-combustível e, conseqüentemente, ocorre o aumento da pressão e o desenvolvimento do trabalho útil produzido em um ciclo do motor. Posteriormente, a pressão diminui rapidamente durante a queima dos últimos 5 a 10% da mistura ar-combustível e, assim, causando o término da combustão. O processo de combustão pode ser dividido em três grandes regiões (PULKRABEK, 2003, p.230):

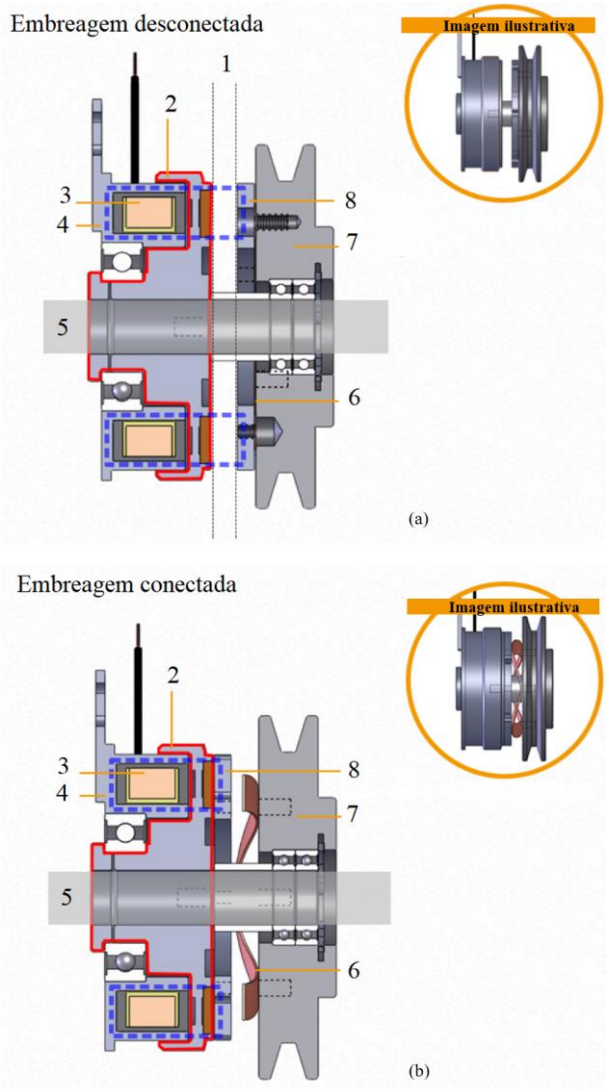
- a) Ignição e desenvolvimento da chama;
- b) Propagação da chama;
- c) Finalização da chama.

3.7 Embreagem eletromagnética

As embreagens eletromagnéticas consistem em dispositivos que controlam a potência e o movimento rotativo por meio de uma força eletromagnética gerada por bobinas energizadas, de tal modo que conectam e desconectam conforme a necessidade durante a operação. Os principais componentes e a configuração da embreagem acoplada e desacoplada estão ilustrados na Figura 11. (MIKI PULLEY, 2022).

As embreagens eletromagnéticas operam por meio de acionamento elétrico, porém transmitem torque mecanicamente. O princípio de funcionamento da embreagem eletromagnética inicia-se após a ativação do circuito elétrico da unidade energizar a bobina, a corrente elétrica que atravessa gera um campo magnético, de tal forma que o fluxo magnético supera a distância entre a armadura e o campo, onde a atração magnética puxa a armadura em direção ao rotor e, conseqüentemente, fazendo o contato entre as partes (MIKI PULLEY, 2022).

Figura 11 – Configurações da embreagem eletromagnética conectada e desconectada



a Embreagem Eletromagnética Desacoplada			
b Embreagem Eletromagnética Acoplada			
1	Distância entre a armadura e o rotor	5	Haste
2	Rotor	6	Feixe de mola
3	Bobina	7	Polia
4	Estator	8	Armadura

Fonte: Adaptado do Miki Pulley, 2022a.

O acoplamento, desacoplamento e a ciclagem da embreagem eletromagnética ocorrem conforme descrito a seguir (OGURA, 2022):

- a) Acoplamento: para ocorrer o acoplamento, a tensão/corrente é aplicada à bobina, de tal modo que, ela se torna um eletroímã e produz um fluxo magnético. O fluxo gerado é transferido para o rotor da embreagem que, conseqüentemente, torna-se magnetizada e

atrai a armadura. Por consequente, a armadura é puxada contra o rotor e, assim, conectando as partes;

- b) Desacoplamento: após interromper a tensão/corrente aplicada na bobina, a armadura é desmagnetizada e, consequentemente, desconectada do rotor e tornando-a livre para girar livre com a haste. Geralmente, as embreagens eletromagnéticas possuem feixes de molas que permitem que as armaduras possuem uma distância do rotor quando desacoplado;
- c) Ciclagem: corresponde no processo cíclico de conectar e desconectar a embreagem eletromagnética, de tal maneira em que é obtida ligando e desligando a tensão/corrente da bobina conforme estratégia definida para sua aplicação.

As embreagens eletromagnéticas são utilizadas em diversos seguimentos, sendo um deles o setor automotivo, no qual são empregadas em alguns componentes como, por exemplo, em compressores de ar-condicionado. O acoplamento e desacoplamento da embreagem eletromagnética do compressor de ar-condicionado inicia e/ou desativa seu funcionamento quando o condutor do veículo automotivo aciona o interruptor do ar-condicionado, seguindo o princípio de funcionamento conforme explicado anteriormente. (OLIVEIRA, 2021).

3.8 Dinamômetro

Dinamômetros são instrumentos de medição empregados para avaliar a força, o torque ou a potência gerada por uma máquina ou sistema. Existem diversos tipos de dinamômetros, cada um projetado para medir uma grandeza específica, incluindo Dinamômetros de Torque, Dinamômetros de Potência, Dinamômetros de Chassi, Dinamômetros Hidráulicos e Dinamômetros Elétricos (FERGUSON; KIRKPATRICK, 2016).

O dinamômetro de chassi, também conhecido como dinamômetro de rolo, é um equipamento versátil usado para testar todos os componentes de um veículo simultaneamente. O veículo é colocado em uma plataforma de testes de modo que suas rodas motrizes fiquem em contato com rolos. Isso simula o movimento real do veículo em uma estrada. Uma grande vantagem desse tipo de equipamento é que ele pode substituir os testes em estradas, que são mais demorados e caros, especialmente se ocorrer algum problema ou acidente durante os testes (FERGUSON; KIRKPATRICK, 2016).

As principais funções e usos de um dinamômetro de chassi, são (CEZAR, 2012):

- a) Medição de potência, torque e consumo: utilizado para avaliar o desempenho do veículo em diferentes situações, como aceleração, retomada e velocidade máxima;

- b) Avaliação de emissões: são usados para medir as emissões de poluentes dos veículos, ajudando a garantir que eles estejam em conformidade com os regulamentos ambientais.
- c) Testes de economia de combustível: permitem avaliar o consumo de combustível do veículo em condições controladas, utilizado para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes em termos de combustível.
- d) Testes de durabilidade: os veículos são submetidos a testes de durabilidade em dinamômetros de chassi para simular condições reais de condução e avaliar o desgaste e a resistência dos componentes do veículo.
- e) Simulação de condições de estrada: permitem simular diferentes condições de estrada, como subidas, descidas e curvas, para avaliar o comportamento do veículo em situações diversas.
- f) Desenvolvimento e ajuste de calibrações: utilizado para desenvolver e ajustar as calibrações do motor e da transmissão, garantindo um funcionamento em diferentes cenários de condução.

3.9 Ensaios de emissões e consumo de combustíveis

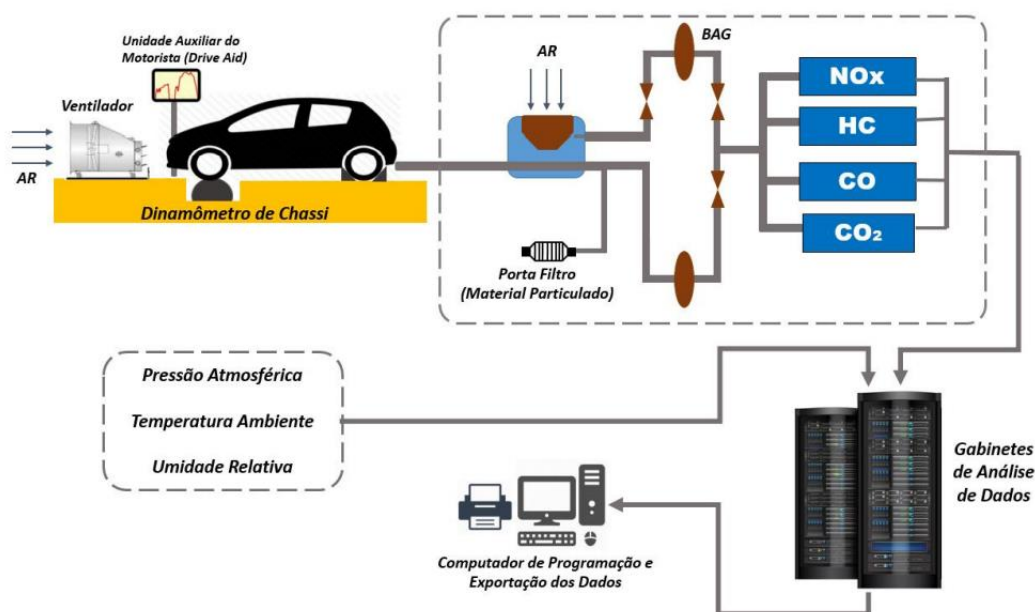
3.9.1 Ciclo de condução

Segundo Basshuysen e Schäfer (2004), utilizam-se dinamômetros de chassi para realizar os ensaios de consumo de combustíveis e de emissões de gases do escapamento do veículo sob condições de certificação, de tal forma que é essencial que o equipamento corresponda com as leis vigentes, bem como para a execução dos testes é primordial que o dinamômetro de chassi esteja calibrado para o respectivo veículo, que as salas de testes estejam em condições específicas para partida a frio e que possua os dispositivos altamente sensíveis para realizar as medições de emissões de escape.

Os ensaios de emissões e consumo de combustível realizados em veículos de passageiros leves são realizados conforme especificado pela ABNT NBR 6601 (Veículos rodoviários automotores leves – Determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e material particulado no gás de escapamento) e/ou o ciclo de condução em estrada, especificado na ABNT NBR 7024 (Veículos rodoviários automotores leves — Medição do consumo de combustível — Método de ensaio).

A Figura 12 ilustra a montagem de um dinamômetro de chassi para medição do consumo de combustível e emissões do escapamento do veículo.

Figura 12 – Ciclo para medição de emissões do escapamento realizados no dinamômetro de chassi.



Fonte: Monteiro, 2020.

O consumo de combustível é estipulado através do ciclo de condução urbano e de estrada, em que é “[...] determinado pelo balanço de carbono em que se consideram quantitativamente as emissões dos gases CO, HC e CO₂, sendo que se predomina a emissão desse último gás dentre os produtos da combustão [...]” (MONTEIRO, 2020, p. 91).

Neste contexto, os ensaios para se determinar o consumo de combustível e emissões de gases poluentes do escapamento de veículos leves, operando através dos ciclos de condução urbano, são realizados por meio de “dois ciclos, sendo um com partida a frio e o outro com partida a quente, em intervalo de 10 min ± 1 min entre eles” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021, p. 21).

A Figura 13 descreve graficamente o ciclo de condução FTP75 (*Federal Test Procedure*) em um perfil de velocidade em relação ao tempo usado para analisar os resultados do ensaio de emissões e consumo de combustível de veículos leves, de tal forma que simule o veículo em um percurso médio no ciclo de condução urbano e as regras gerais utilizadas para a execução dos ciclos são descritas de acordo com a ABNT NBR 6601:2021:

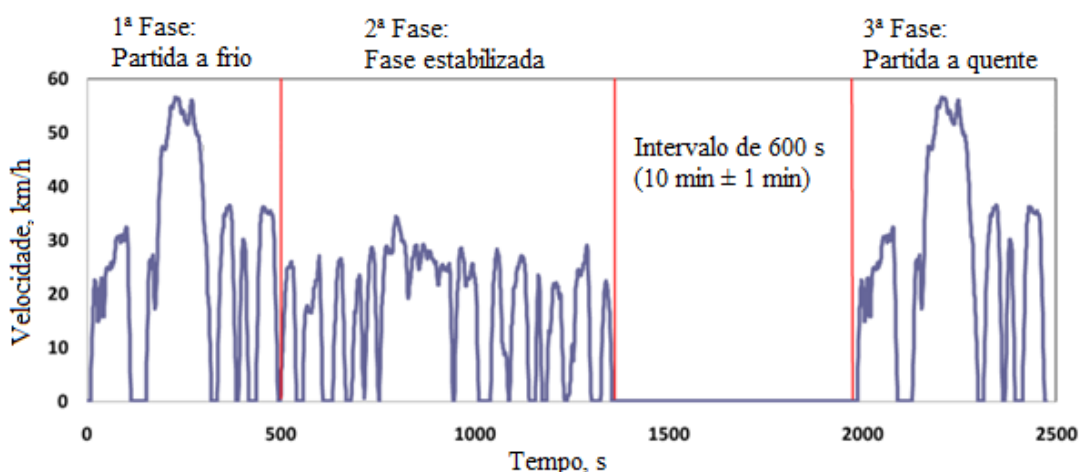
- a. Partida a frio: é realizado em duas etapas, conforme descritas a seguir:
 - 1ª fase (“transitória” de partida a frio): ocorrendo entre 0 e 505 segundos à temperatura ambiente, de tal forma que finalize no final da desaceleração;
 - 2ª fase (“estabilizada”): ocorre entre 506 e 1372 segundos do ciclo, de tal forma que finalize no desligamento do motor e, assim, finalizando o ciclo de ensaio;

b. Partida a quente: realizada em duas etapas, conforme descrita a seguir:

- 3ª fase (“transitória” de partida a quente): o ciclo possui duração de 505 segundos, de tal forma que finalize no final da desaceleração;
- 4ª fase (“estabilizada”): semelhante à segunda fase do ciclo de partida a frio, de tal forma que se utiliza os valores obtidos anteriormente na 2ª fase (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021).

“O resultado de emissões é a média ponderada dos ciclos das fases [partida a frio e a quente]”, onde são analisados e expressos em gramas por quilômetro (g/km). A distância total percorrida durante o ensaio é de 17,7 km, com velocidade média de 34,12 km/h e velocidade máxima de 91,25 km/h (DIAS, 2017, p. 29).

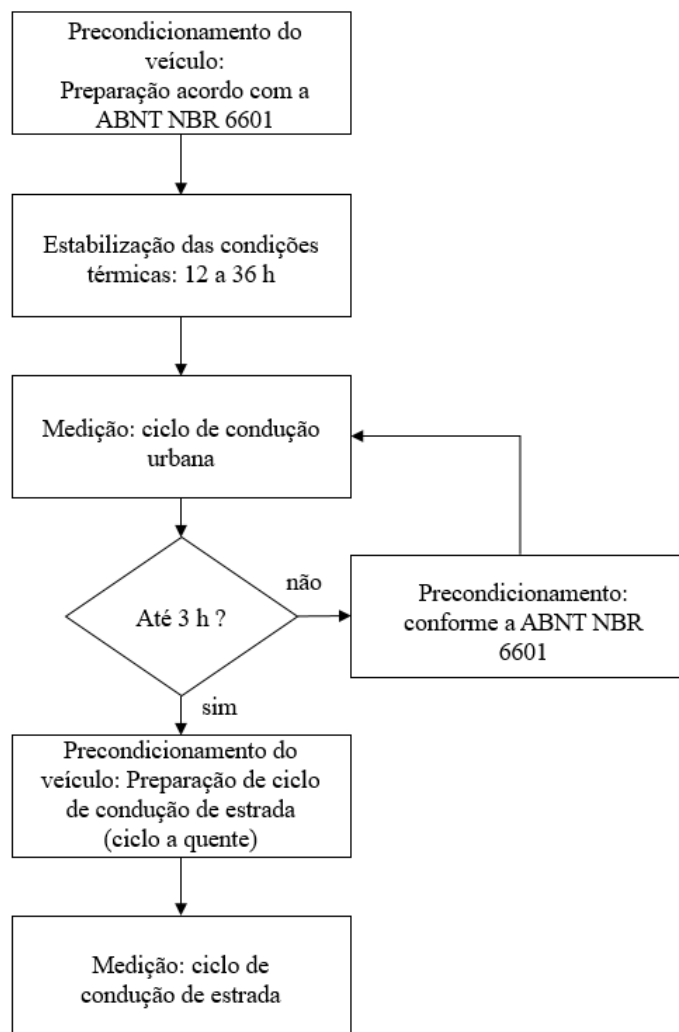
Figura 13 – Representação grafica do do ciclo de condução urbano (FTP75)



Fonte: Adaptado do Karavalakis *et al.*, 2013.

Para a execução do ensaio do ciclo em condução urbano, é essencial que o veículo esteja posicionado horizontalmente, com as rodas dianteiras sobre o dinamômetro de chassi, seguindo o ciclo de condução composto pela 1ª fase e pela 2ª fase, totalizando um percurso de aproximadamente 12,1 km. O abastecimento de combustível no veículo ensaiado deve seguir a norma vigente ABNT NBR 8689. Para iniciar os ensaios de emissões e consumo de combustíveis, o veículo deve permanecer com o motor desligado por período de 12 a 36 horas a uma temperatura nas faixas de 20 a 30 °C (temperatura ambiente) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021).

A Figura 14 descreve a sequência que se deve seguir para a realização dos ensaios de consumo de combustível operando no ciclo de condução urbano e, posteriormente, o ciclo de condução em estrada conforme especificado pela ABNT NBR 7024:2017.

Figura 14 – Sequência para a realização dos ensaios de consumo de combustível

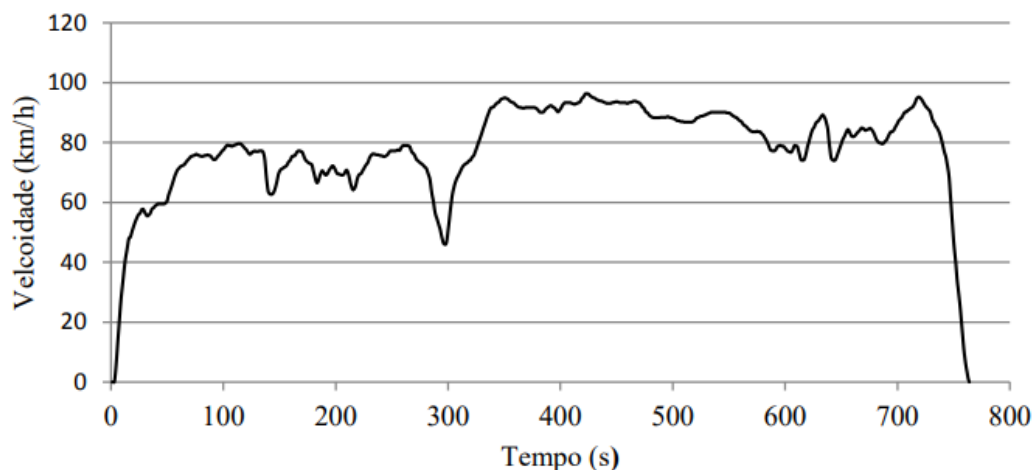
Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7024, 2017.

Os resultados de consumo de combustível são adquiridos através da norma vigente ABNT NBR 6601 e, posteriormente, através da norma vigente ABNT NBR 7024. Os ensaios são realizados seguindo a sequência apresentada na Figura 14, na qual o procedimento utilizado inicia-se com a preparação do veículo e a realização do ensaio do ciclo em condução urbana, conforme descrito anteriormente. Após os ensaios do ciclo de condução urbana, o veículo deve permanecer estático por pelo menos 3 horas a uma temperatura nas faixas de 20 a 30 °C para realizar a preparação do veículo e iniciar o ensaio do ciclo de condução em estrada. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017).

A Figura 15 descreve graficamente o ciclo de condução *Highway Fuel Economy Test* (HWFET) em um perfil de velocidade em relação ao tempo usado analisar os resultados dos ensaios de consumo de combustível de veículos leves no ciclo de condução de estrada, de tal forma que as regras gerais utilizadas para a certificação do ensaio são de acordo com a ABNT

NBR 7024:2017. O período de execução do ensaio é de 765 segundos a uma velocidade média de 77,7 km/h e com uma distância total de 16,45 km. (DIAS, 2017, p. 30).

Figura 15 - Representação grafica do do ciclo de condução de estrada (HWFET)



Fonte: Adaptado do Dias, 2017.

3.9.2 Cálculos dos resultados

Os cálculos necessários, após a coleta de dados dos ensaios operados no dinamômetro de chassi em veículos leves utilizando o ciclo de condução urbano, são especificados na ABNT NBR 6601. Para o ciclo de condução em estrada, os cálculos necessários são especificados na ABNT NBR 7024. Nos próximos sub tópicos, serão descritos os cálculos essenciais para a determinação quantitativa de consumo de combustível e emissões de gases do escapamento do veículo.

3.9.2.1 Emissões de gases do escapamento

De acordo com a ABNT NBR 6601:2021, para calcular as emissões de poluentes de um veículo, o processo começa medindo a quantidade de gás amostrado coletado nas condições de entrada do equipamento de Amostragem de Volume Constante, chamado de *Constant Volume Sampler* (CVS), durante o teste realizado no ciclo condução urbana. Depois, são feitas as medições das concentrações dos gases presentes na amostra coletada. Esse procedimento ajuda a avaliar as emissões de poluentes dos veículos durante o ciclo de condução em áreas urbanas de forma precisa e padronizada.

O volume de gás amostrado (V_{ed}), expresso em metros cúbicos (m^3), conforme descrito na Equação 6, é medido para cada fase do ciclo FTP75, ou seja, fase transitória de partida a

frio, fase estabilizada e fase transitória de partida a quente e corrigido para a condição padrão de temperatura e pressão (293,15 K e 101,325 Kpa) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021, p. 35).

$$V_{ed} = \frac{P_{V1} * V_{V1} * 293,15}{101,325 * (T_{V1} + 273,15)} \quad (6)$$

Em que:

P_{V1} : pressão na entrada do Venturi, em quilopascal (kPa);

V_{V1} : volume total da amostra na entrada do Venturi sem correção, em metros cúbicos (m^3);

T_{V1} : temperatura na entrada do Venturi, em graus Celsius ($^{\circ}C$).

Durante os ciclos de condução urbano, os gases são coletados pelo CVS e diluídos em ar ambiente e, posteriormente, calcula-se a Razão de Diluição (RD), conforme descrito na Equação 7 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021, p. 36).

$$RD = \frac{CO_{2ES}}{CO_{2e} + (HC_e + CO_e) * 10^{-4}} \quad (7)$$

Onde:

CO_{2ES} : consiste na porcentagem teórica de CO_2 no gás resultante de uma combustão em condições estequiométricas, de tal forma que se adota o valor de 13,4 para veículos a gasolina, etanol e suas misturas e diesel (%);

CO_{2e} : compreende na concentração de CO_2 medida no balão de amostragem do gás de escapamento diluído, expressa em porcentagem (%);

HC_e : consiste na concentração de Hidrocarbonetos Totais, do inglês *Total HydroCarbon* (THC) medida no balão de amostragem do gás de escapamento diluído, expressa em partes por milhão de carbono (ppmC);

CO_e : concentração de CO medida no balão de amostragem do gás de escapamento diluído, medido em partes por milhão (ppm).

As massas dos gases emitidos pelos veículos são calculadas, em gramas (g), através das Equações 8 a 13 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021, p. 36):

- a) A massa de THC (THC_M), em gramas (g) é calculada pela da Equação 8:

$$THC_M = V_{ed} * d_{THC} * \left[THC_e - THC_d * \left(1 - \frac{1}{RD} \right) \right] * 10^{-6} \quad (8)$$

Em que:

d_{THC} : densidade de massa dos hidrocarbonetos, igual a 576,8 g/m³, com temperatura medida nas faixas de 85 a 293,15 K e pressão de 101,325 kPa;

THC_e : concentração de THC medida do gás de escapamento diluído, medido em partes por milhão de carbono (ppmC);

THC_d : representa a concentração de THC medida do ar de diluição, expressa em partes por milhão de carbono (ppmC).

b) A massa de CH₄ (CH_{4M}), em gramas (g), é calculada através da Equação 9:

$$CH_{4M} = V_{ed} * d_{CH4} * \left[CH_{4e} - CH_{4d} * \left(1 - \frac{1}{RD} \right) \right] * 10^{-6} \quad (9)$$

Em que:

d_{CH4} : consiste na densidade de massa do metano, igual a 667,1 g/m³ a uma temperatura de 293,15 K e pressão de 101,325 kPa;

CH_{4e} : consiste na concentração de CH₄ medida no balão de amostragem do gás de escapamento diluído, expressa em partes por milhão de carbono (ppmC);

CH_{4d} : consiste na concentração de CH₄ medida no balão de amostragem do ar de diluição, expressa em partes por milhão de carbono (ppmC).

c) A massa de NMHC (NMHC_M), em gramas (g), é calculada através da Equação 10:

$$NMHC_M = V_{ed} * d_{THC} * \left\{ \left[THC_e - THC_d * \left(1 - \frac{1}{RD} \right) \right] - Fr_{CH4} [CH_{4e} - CH_{4d} * \left(1 - \frac{1}{RD} \right)] \right\} \quad (10)$$

Em que:

Fr_{CH4} : consiste no fator de resposta do analisador de hidrocarbonetos para o metano.

d) A massa de NO_x (NO_{xM}), em gramas (g), é calculada através da Equação 11:

$$NO_{xM} = V_{ed} * d_{NO2} * F_u * \left[NO_{xe} - NO_{xd} * \left(1 - \frac{1}{RD} \right) \right] * 10^{-6} \quad (11)$$

Em que:

d_{NO2} : densidade de massa dos óxidos de nitrogênio, igual a 1913 g/m³, na forma de NO₂ (temperatura de 293,15 K e pressão de 101,325 kPa);

F_u : consiste no fator de correção de umidade;

NO_{xe} : consiste na concentração de NO_x medida no balão de amostragem do gás de escapamento diluído, expressa em partes por milhão (ppm);

NO_{xd} : consiste na concentração de NOx medida no balão de amostragem do ar de diluição, expressa em partes por milhão (ppm);

e) A massa de CO (CO_M), em gramas (g), é calculada através da Equação 12:

$$CO_M = V_{ed} * d_{CO} * \left[CO_e - CO_d * \left(1 - \frac{1}{RD} \right) \right] * 10^{-6} \quad (12)$$

Em que:

d_{CO} : consiste na densidade de massa do monóxido de carbono, igual a 1164 g/m³ a uma temperatura de 293,15 K e pressão de 101,325 kPa;

CO_d : concentração de CO medida no balão de amostragem do ar de diluição, medido em partes por milhão (ppm).

Por fim, o resultado das emissões ponderado de cada componente do gás emitido (Y_{MP}), expresso em gramas por quilômetros (g/km), é calculado através das somas ponderadas da massa total dos gases emitidos do veículo e a distância percorrida durante cada ciclo de condução urbano, ou seja, fase transitória de partida a frio, fase estabilizada e fase transitória de partida a quente, conforme descrito na Equação 13. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021, p. 38).

$$Y_{MP} = 0,43 * \left(\frac{Y_{TF} + Y_E}{D_{TF} + D_E} \right) + 0,57 * \left(\frac{Y_E + Y_{TQ}}{D_E + D_{TQ}} \right) \quad (13)$$

Em que:

Y_{TF} : representa as emissões em massa de cada componente do gás emitido na fase transitória com partida a frio (1ª fase), em gramas (g);

Y_E : representa as emissões em massa de cada componente do gás emitido na fase estabilizada (2ª fase), expressa em gramas (g);

Y_{TQ} : representa as emissões em massa de cada componente do gás emitido na fase transitória com partida a quente (3ª fase), expressa em gramas (g);

D_{TF} : distância percorrida pelo veículo, medida durante a fase transitória com partida a frio (1ª fase), expressa em quilômetros (km);

D_E : representa a distância percorrida pelo veículo, medida durante a fase estabilizada (2ª fase), expressa em quilômetros (km);

D_{TQ} : representa a distância percorrida pelo veículo, medida durante a fase transitória com partida a quente (3ª fase), expressa em quilômetros (km).

3.9.2.2 Consumo de combustível

De acordo com a ABNT NBR 7024:2017, para os veículos movidos a gasolina, etanol ou misturas de gasolina-etanol, o consumo de combustível (C), expresso em litros por cem quilômetros (l/100 km), pode ser calculado através do método de balanço de carbono, no qual utilizam-se as massas de THC, CO e CO₂ emitidos pelo motor do veículo durante o ciclo de condução urbano e estrada. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017, p. 6).

$$C = \frac{[(0,8656 \cdot m_{THC}) + (0,4288 \cdot m_{CO}) + (0,2729 \cdot m_{CO_2})]}{(6,4487 \cdot \%V_{gás}) + (4,1102 \cdot \%V_{ETOH})} * 100 \quad (14)$$

Em que:

m_{THC} : massa de THC emitida, expressa em gramas por quilômetro (g/km);

m_{CO} : massa de CO emitida, expressa em gramas por quilômetro (g/km);

m_{CO_2} : massa de CO₂ emitida, expressa em gramas por quilômetro (g/km);

$\%V_{gás}$: consiste na porcentagem do volume a 20 °C, de gasolina no combustível utilizado, expressa em porcentagem (%);

$\%V_{ETOH}$: consiste na porcentagem de volume a 20 °C, de etanol no combustível utilizado, descontada a porcentagem de água, expressa em porcentagem (%).

- a) Consumo de combustível urbano ($C_{urb.}$): através do ensaio de emissões e consumo de combustível realizados conforme ABNT NBR 6601:2021, os gases emitidos pelo escapamento do veículo são coletados e analisados, durante a operação do veículo, de tal forma que os consumos de combustíveis são calculados através da média ponderada para os três ciclos de condução urbano (FTP75), conforme descrito na Equação 15:

$$C_{urb.} = 0,43 * \frac{C_1 \cdot D_1 + C_2 \cdot D_2}{D_1 + D_2} + 0,57 * \frac{C_3 \cdot D_3 + C_2 \cdot D_2}{D_3 + D_2} \quad (15)$$

Em que:

C_1 , C_2 e C_3 : consistem nos consumos de combustíveis, calculados através da Equação 14, para as fases transitória com partida a frio (1ª fase), estabilizada (2ª fase) e transitória com partida a quente (3ª fase), expresso em litros por cem quilômetros (l/100 km);

D_1 , D_2 e D_3 : consiste nas Distâncias percorridas durante as fases transitórias com partida a frio (1ª fase), estabilizada (2ª fase) e transitória com partida a quente (3ª fase), expressa em quilômetros (km);

- b) Consumo de combustível em estrada: através do ensaio de consumo de combustível realizado conforme a ABNT NBR 7024:2017, consideram-se as massas de THC, CO e

CO₂ emitidas; e a distância efetivamente percorrida durante o ciclo de condução de estrada, de tal forma que o combustível em estrada é determinado através da Equação 14, descrita anteriormente.

3.9.2.3 Autonomia do veículo

A autonomia do veículo ($A_{líquido}$) é descrita como a distância, em quilômetros (km), percorrida pelo veículo com um litro (1 l) de combustível e seu valor é calculado através da Equação 16, para cada valor de consumo de combustível (urbano, de estrada ou combinado). (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017, p. 8).

$$A_{líquido} = \frac{100}{c} \quad (16)$$

Para os veículos movidos a gasolina, etanol ou misturas de gasolina-etanol, a autonomia de combustível combinada ($A_{combinada}$), expressa em quilômetro por litro (km/l), é determinada através da média ponderada das autonomies de combustível urbano e em estrada (definidas na Equação 16) na proporção de 55% e 45%, conforme descrita na Equação 17 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017, p. 8).

$$A_{combinada} = \frac{1}{\frac{0,55}{A_{urb.}} + \frac{0,45}{A_{est.}}} \quad (17)$$

Em que:

$A_{urb.}$: consiste na autonomia de combustível calculada para o ciclo de condução urbano através da Equação 16, expressa em quilômetro por litro (km/l);

$A_{est.}$: consiste na autonomia de combustível calculada para o ciclo de condução em estrada através da Equação 16, expressa em quilômetro por litro (km/l).

3.9.2.4 Eficiência energética

Segunda a ABNT NBR 7024:2017, o consumo energético combinado para os veículos automotores é calculado pelo consumo energético para os ciclos de condução urbano ($CE_{urb.}$) e condução em estrada ($CE_{est.}$), expressos em megajoules por quilômetro (MJ/km), e descrito nas Equações 18 e 19 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017, p. 9).

$$CE_{urb.} = \frac{\delta_e}{A_{urb.}} \quad (18)$$

$$CE_{est.} = \frac{\delta_e}{A_{est.}} \quad (19)$$

Em que:

δ_e : consiste na densidade energética do combustível, expressa em megajoules por litro (MJ/l), ou seja, a densidade para a mistura gasolina-etanol E22 (misturada com 22% de etanol anidro) é igual à 28,99 MJ/l e a densidade para o álcool etílico hidratado E100 é igual a 20,09 MJ/l.

Continuamente, o consumo energético combinado (CE), expressos em megajoules por quilômetro (MJ/km), é determinado pela Equação 20 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017, p. 10).:

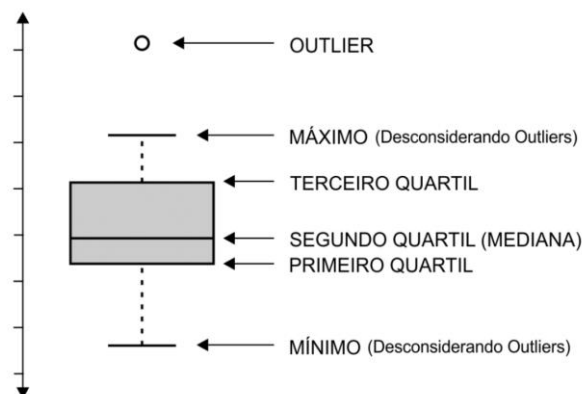
$$CE = CE_{urb.} * 0,55 + CE_{est.} * 0,45 \quad (20)$$

Tem-se, portanto, que quanto maior o valor da autonomia de combustível (km/l), menor será o consumo energético convidado (MJ/km). De modo consequente, quanto menor o consumo energético convidado, maior será a eficiência energética.

3.10 Metodologia *Boxplot*

A ferramenta gráfica *Boxplot* tem como princípio realizar análises exploratórias e comparativas de variáveis quantitativas. O método fornece diversas medidas estatísticas, bem como mínimo, máximo, primeiro quartil, segundo quartil (mediano), terceiro quartil e valores discrepantes (*outliers*) dos dados, conforme ilustrado na Figura 16. (ICMC JÚNIOR, 2021).

Figura 16 – Gráfico *Boxplot*



Fonte: Adaptado do ICMC JÚNIOR, 2022.

Os quartis são definidos, basicamente, como um determinado conjunto de dados, nos quais são representados por três percentis, sendo o primeiro quartil (Q1) definido como o limite inferior, representando 25% dos valores inferiores do conjunto de dados; o segundo quartil (Q2) corresponde como a mediana do conjunto de dados; e o terceiro quartil (Q3) é definido por 75% dos valores inferiores do conjunto de dados das amostras. (STATPLACE, 2022).

Os quartis são divididos em 4 grupos, e cada grupos de valores de dados corresponde as divisões da caixa do diagrama, sendo definido como Grupo 01 corresponde ao limite inferior até Q1; o Grupo 02 corresponde aos valores de Q1 a Q2, sendo representado por 50% dos valores do conjunto de dados; Grupo 03 corresponde aos valores de Q2 a Q3, sendo representado por 75% dos valores do conjunto de dados; e, por último, o Grupo 04 corresponde ao limite superior após Q3. (ICMC JÚNIOR, 2021).

A ferramenta gráfica do diagrama *Boxplot* é caracterizada iterativamente através de análises visuais, de tal modo que possibilitou maior entendimento e praticidade nas análises dos conjuntos de dados e sendo essencial para a caracterização da dispersão (tamanho da caixa), simetria (linha da mediana localizada no centro da caixa), caudas (tracejados ou linhas que conectam a caixa até o ponto mínimo/máximo) e os *outliers* (valores discrepantes).

4 METODOLOGIA

Neste capítulo, será apresentada a metodologia para a execução do trabalho, bem como os aparatos, parâmetros, procedimentos numéricos e procedimentos experimentais. O projeto de pesquisa utilizou para a simulação numérica o *software* GoFast® e o procedimento experimental foi realizado em um dinamômetro de chassi.

Para melhor organização da metodologia e gerenciamento do trabalho, utilizou-se o organograma para simplificar a Estrutura Analítica do Projeto (EAP), apresentado no APÊNDICE A, visando controlar os prazos de cada atividade, bem como o desenvolvimento inicial do trabalho, levantamento de referências bibliográficas, levantamento da fundamentação teórica, metodologia, análise dos resultados, conclusões e, por fim, previsões para apresentação da qualificação e defesa da dissertação.

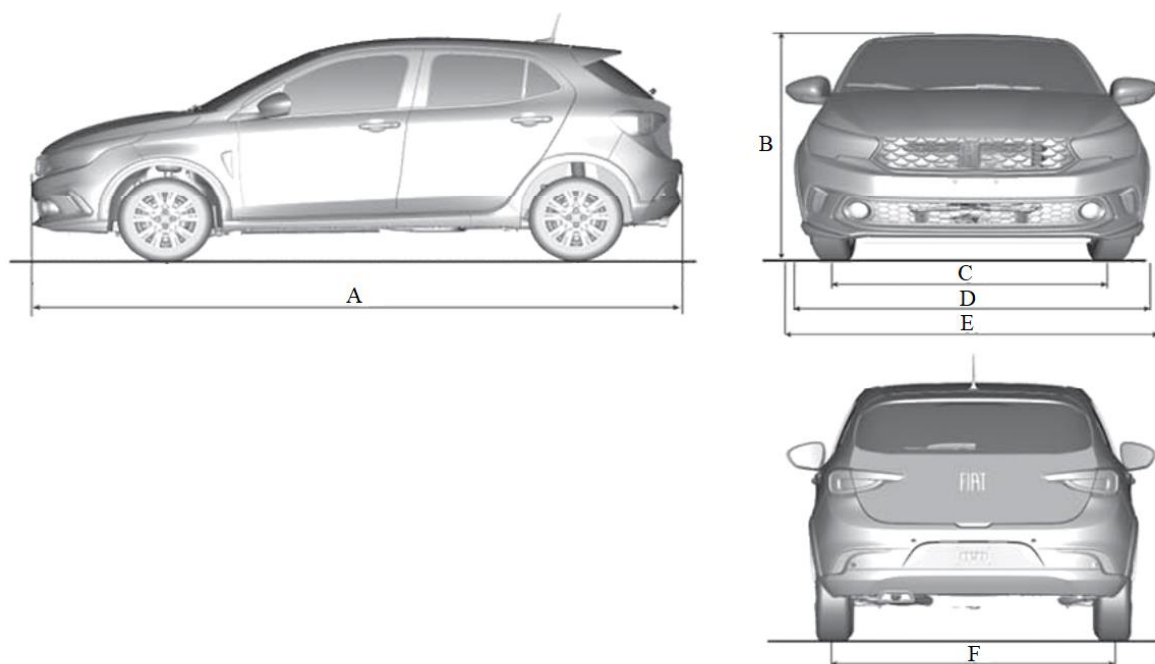
4.1 Aparato e Parâmetros

Para a execução do presente trabalho, são descritos nos próximos subtópicos os equipamentos e parâmetros utilizados para a execução dos procedimentos numéricos e experimental, bem como as características do veículo e seus componentes e os materiais para a instrumentação e simulação.

4.1.1 Características do Veículo

O veículo utilizado como base é o modelo *Argo Hatchback*, ano 2023/2023, equipado com um motor da linha *Firefly*, 1,0 litros e três cilindros, fabricado pela montadora Fiat Chrysler Automóveis Brasil do grupo Stellantis. O veículo possui tração dianteira e câmbio manual, contendo cinco marchas à frente e marcha ré com sincronizadores que possibilita o engate rápido das marchas. Além disso, a massa do veículo equivale a 1074 kg, sendo consideradas as ferramentas e os acessórios, a roda de reserva e com abastecimento.

A Figura 17 ilustra a vista frontal, lateral e traseira do veículo e suas respectivas dimensões.

Figura 17 – Dimensões do veículo

A	3998 mm	D	1724 mm
B	1503 mm	E	1962 mm
C	1465 mm	F	1500 mm

Fonte: Adaptado da FIAT (2022).

Os componentes adaptados ao veículo são mostrados para a execução dos ensaios experimentais e numéricos, bem como as características do motor a combustão interna, a bateria automotiva em conjunto da tecnologia IBS, as características do protótipo do alternador com desacoplamento mecânico inteligente juntamente com a estratégia de acoplamento e desacoplamento eletromecânico, o sistema de controle veicular e, por fim, os combustíveis utilizados.

4.1.1.1 Motor

O veículo utilizado é adaptado com um motor a combustão interna, o qual opera com motor do ciclo Otto, da linha FIAT *Firefly*, com 1,0 litros, 02 válvulas por cilindro e tecnologia *flexfuel* capaz de abastecimento de diversos tipos de combustíveis, como a gasolina brasileira pura, mistura de gasolina com etanol hidratado em qualquer concentração ou somente etanol hidratado.

Os dados gerais do motor a combustão interna, operando com o ciclo Otto, estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Especificação do motor a combustão interna

Dados Gerais	Gasolina-Etanol (E22)	Etanol Hidratado (E100)
Ciclo	OTTO	OTTO
Número de Cilindros	03	03
Número de válvulas por cilindro	02	02
Diâmetro e curso do pistão (mm)	70 x 86,5	70 x 86,5
Cilindrada total (cm ³)	999,0	999,0
Razão volumétrica de compressão	13,2:1	13,2:1
Potência máxima (ABNT) (cv)	72,0	79,0
Frequência de giro de Potência máxima (rpm)	6000	6000
Torque máximo (ABNT) (Nm)	99,0	106
Frequência de giro de Torque máximo (rpm)	3250	3500

Fonte: Adaptado da FIAT, 2022.

4.1.1.2 Bateria automotiva

A bateria automotiva, para o sistema elétrico do veículo, foi adaptada com o Sensor de Bateria Inteligente (IBS), conforme descrito anteriormente no tópico 3.4.1, para fornecer informações sobre os parâmetros de funcionamento da bateria.

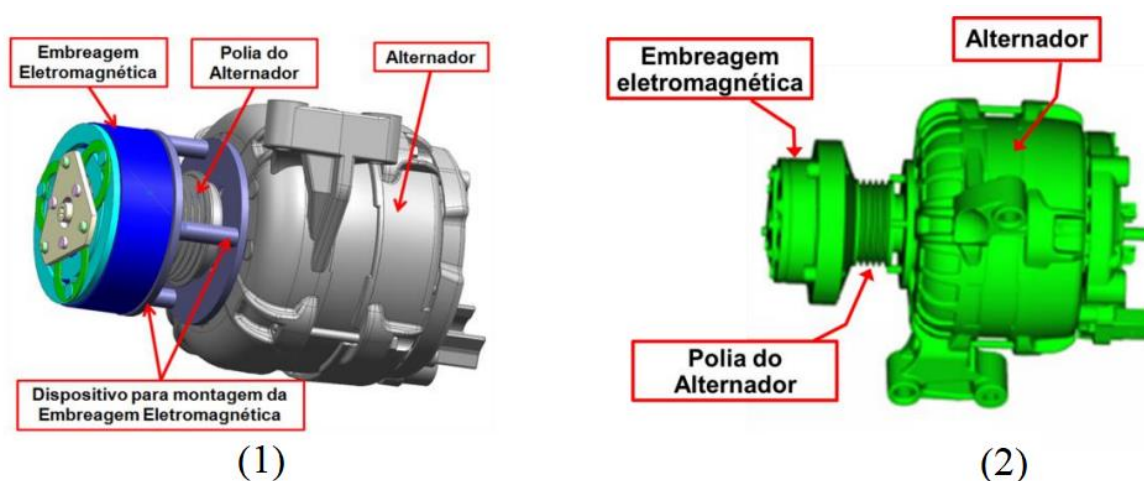
A bateria automotiva utilizada tem as principais características: capacidade de 12 Volts e 50 Ampére-hora.

4.1.1.3 Alternador com Desacoplamento Mecânico Inteligente

O protótipo do alternador com acoplamento e desacoplamento mecânico inteligente foi desenvolvido a partir de um alternador convencional equipado com um novo sistema de polia. Utilizou-se uma polia integrada a uma embreagem eletromagnética, de tal forma que o acoplamento e o desacoplamento atuem de acordo com o estado da carga da bateria e das condições de operação do motor a combustão interna. Diferentemente do alternador inteligente, que permite ser desativado somente eletricamente, o alternador com desacoplamento mecânico inteligente, utilizado neste trabalho, é desativado totalmente de forma elétrica e mecânica. O protótipo desenvolvido no presente trabalho, consiste em uma nova versão dos Alternadores com Desacoplamento Eletromecânicos (ADE) descrito pelo Processo de Patente n.º INPI BR102015001454-6 (SALES, 2015) – conforme representado ANEXO A –, Patente n.º US 10.247.265 (SALES, 2019a), Patente N° EP 15777859.8 (SALES, 2019b) e pelo modelo proposto pelo Luís Gustavo de Carvalho Monteiro (2020).

A Figura 18 mostra os detalhes da geometria de duas versões anteriores do alternador com desacoplamento mecânico inteligente. Vê-se que ambos possuem uma polia equipada a uma embreagem eletromagnética. A primeira versão do protótipo, a embreagem eletromagnética é conectada ao dispositivo haste, responsável pela sua montagem na polia e alternador. Para facilitar a manutenção do conjunto alternador e montagem da correia na polia, o segundo protótipo desenvolvido removeu as hastes conectadas a embreagem eletromagnética e tornou-a mais compacta e evoluída.

Figura 18 – Alternador com desacoplamento mecânico inteligente equipado com a embreagem eletromagnética



Versões dos alternadores

- 1 Primeiro protótipo do alternador com desacoplamento mecânico inteligente, desenvolvido pelo Sales (2015)
- 2 Segundo protótipo do alternador com desacoplamento mecânico inteligente, desenvolvido pelo Monteiro (2020)

Fonte: Adaptado do Monteiro, 2020.

O novo alternador visa melhorar ainda mais a eficiência energética dos veículos, através de uma estratégia atuando em uma polia adaptada com um modelo de embreagem eletromagnética, permitindo o acoplamento e desacoplamento mecânico e elétrico. De tal forma, tem-se como objetivo melhorar as condições de atrito e perdas durante o acoplamento e desacoplamento e, conseqüentemente, melhorar a economia de combustível e redução de emissões. Além disso, novo protótipo visa adquirir maior confiabilidade, de maneira que possibilite sua industrialização.

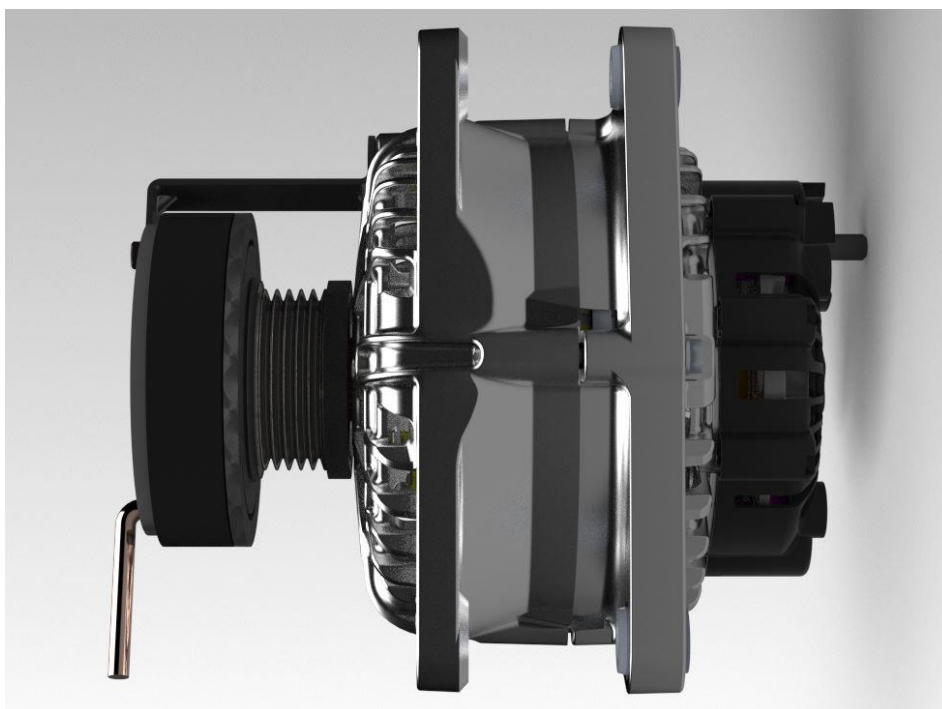
As Figura 19 e Figura 20 apresentam as vistas laterais e as configurações do novo protótipo do alternador com desacoplamento mecânico inteligente equipado com a polia integrada à embreagem eletromagnética. Comparando-o com os protótipos anteriores (Figura 18), a nova versão apresentou modificações em sua geometria, como a adição de um dispositivo

anti-rotação, de forma que auxilie a embreagem eletromagnética a interromper sua rotação e, assim, contribuir com o desacoplamento mecânico. A nova versão possui novas tecnologias na embreagem eletromagnética capazes de reduzir o impacto e melhorar as condições de atritos durante o acoplamento e desacoplamento eletromecânico.

As principais melhorias na máquina elétrica (alternador) da nova versão do protótipo são:

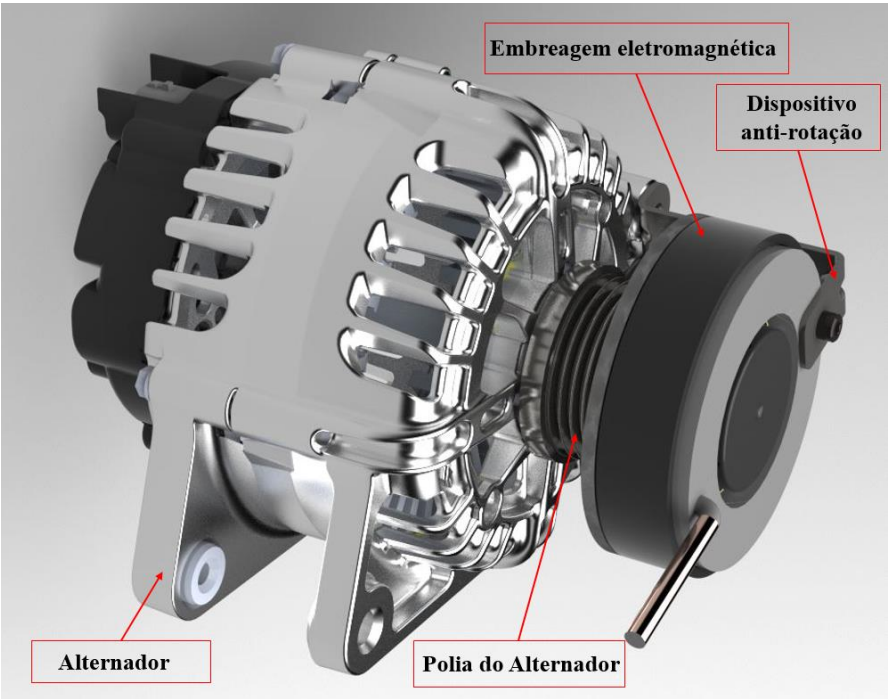
- a) Mancal dianteiro e traseiro: foi desenvolvido de um novo conjunto de mancais mais robustos para atender a polia adaptada a embreagem eletromagnética;
- b) Eixo do alternador: os eixos utilizados nas versões anteriores, consistiam em eixos convencionais alongados a partir de processos de fabricação. Porém, para a nova versão foi desenvolvido um novo eixo capaz de conectar o alternador à polia e embreagem eletromagnética.

Figura 19 – Vista lateral do protótipo Alternador com Desacoplamento Mecânico Inteligente, utilizado na pesquisa.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 20 – Configuração do protótipo do Alternador com Desacoplamento Mecânico Inteligente



Fonte: Elaborado pela autora.

As especificações da embreagem eletromagnética são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Características da embreagem eletromagnética

	Dados da embreagem eletromagnética
Diâmetro da embreagem eletromagnética (milímetros)	98,8 mm
Largura da polia (milímetros)	22,2 mm
Tensão de alimentação (Volts)	12 V

Fonte: Dados do projeto.

O protótipo do alternador utilizado no presente trabalho consiste em uma máquina elétrica desenvolvida a partir de um alternador convencional, conforme as características técnicas descritas na Tabela 7.

Tabela 7 – Características do alternador

	Dados do alternador
Fabricante	Valeo Sistemas Automotivos LTDA.
Corrente Nominal (Ampère)	120 A – 150 A
Razão de transmissão (eixo do motor-alternador)	2,54
Velocidade (rotação por minuto)	18000 rpm máx. (20000 rpm em pequenos períodos)
Diâmetro da Polia (milímetros)	59 mm
Direção de rotação	Sentido horário

Fonte: Dados do projeto.

4.1.1.3.1 Estratégia para o acoplamento e desacoplamento da embreagem eletromagnética

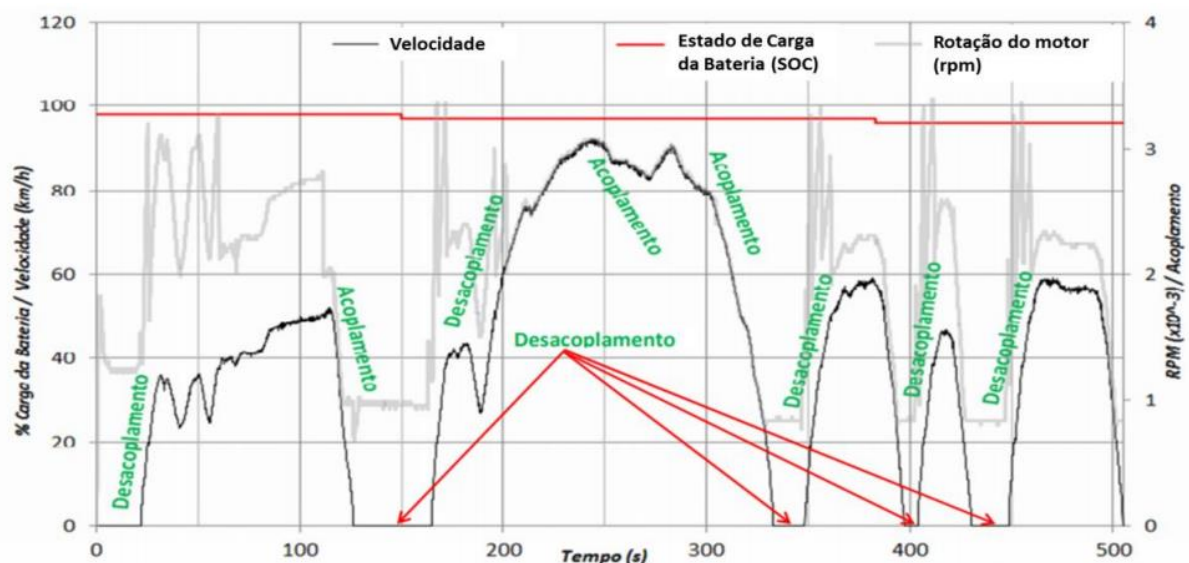
A estratégia de acoplamento e desacoplamento eletromecânico seguiu conforme processos de Patente n.º INPI BR102015001454-6 (SALES, 2015), Patente n.º US 10.247.265 (SALES, 2019a) e a Patente n.º EP 15777859.8 (SALES, 2019b), na qual descrevem um sistema e método para acoplar e desacoplar elétrica e mecanicamente o alternador automotivo em função das condições de funcionamento da bateria automotiva.

A estratégia utilizada conta com um sistema que verifica inicialmente o estado inicial da bateria e das condições de operação do motor a combustão interna e, posteriormente, compara os dados pré-estabelecidos e, por fim, permite o acoplamento e/ou desacoplamento da embreagem eletromagnética integrada ao alternador. A estratégia atua em função do estado de carga da bateria, condições de velocidade do veículo, rotação do motor a combustão interna e o nível de solicitação no torque do motor realizado pelo condutor do veículo através do pedal de aceleração.

Conforme as estratégias contempladas nos processos de patente n.º INPI BR102015001454-6 (SALES, 2015), Patente n.º US 10.247.265 (SALES, 2019a) e a Patente n.º EP 15777859.8 (SALES, 2019b), o desacoplamento ocorre com o nível de carga da bateria pré-estabelecidos durante as acelerações e, também, durante os regimes de rotação quando o veículo se encontra ligado em aceleração mínima, em outras palavras, com o câmbio no ponto morto (marcha lenta). Dessa forma, o alternador não absorverá a energia mecânica do virabrequim e, conseqüentemente, evita a geração de energia elétrica produzida a partir do campo eletromagnético do seu rotor.

A Figura 21 descreve graficamente a estratégia de funcionamento do alternador mecânico inteligente em função da velocidade do veículo, estado de carga da bateria (SOC) e rotação do motor a combustão interna.

Figura 21 – representação da estratégia de acoplamento e desacoplamento da embreagem eletromagnética do alternador



Fonte: Adaptado do Monteiro(2020).

Conforme apresentado na Figura 21, o desacoplamento eletromecânico ocorre durante as condições de aceleração do veículo, em marcha lenta (acelerações mínimas) e quando o estado de carga da bateria estiver acima de 75%. Por outro lado, o acoplamento eletromecânico ocorre durante a condição de desaceleração do veículo e quando o estado de carga da bateria está abaixo de 75%.

Para que ocorra o desacoplamento, destaca-se a importância de que o estado de carga da bateria esteja acima de 75%. Consequentemente, para porcentuais menores a esse limite inferior, o alternador se encontrará acoplado, mesmo em acelerações, de forma que priorize o carregamento da bateria (MONTEIRO, 2020, p. 86).

Durante a desaceleração, o sistema avalia a sequência de dados referentes à rotação do motor por um período de 1,0 segundo antes de acoplar a embreagem. Se as características confirmam a desaceleração, a embreagem acopla o alternador mecanicamente e, somente após 2,0 segundos, é permitida a liberação da energia elétrica para a bateria (acoplamento elétrico). Esse defasamento entre os acoplamentos mecânico e elétrico pretende minimizar o impacto mecânico sobre o conjunto de motor e transmissão.

No caso do desacoplamento, o mesmo tipo de análise é realizado, mas durante 5,0 segundos para os dados de estado de carga da bateria, rotação do motor e velocidade do veículo. O desacoplamento elétrico ocorre antes do mecânico, com um defasamento de 0,5 segundos. Esses valores foram determinados experimentalmente visando reduzir a percepção de possíveis

impactos mecânicos de acoplamento no conjunto motopropulsor do veículo, melhorando a sua dirigibilidade (MONTEIRO, 2020).

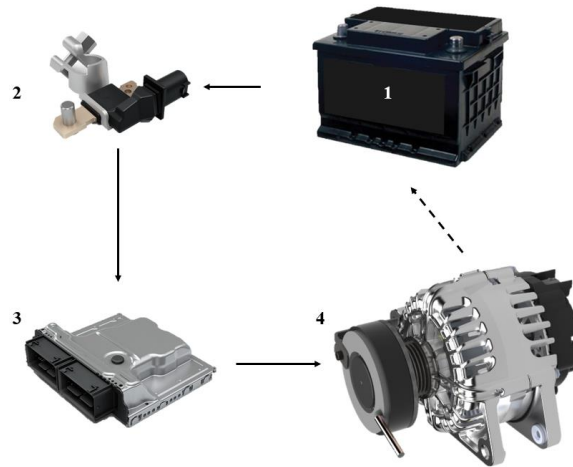
Essa estratégia funcional visa melhorar a dirigibilidade do veículo, reduzindo a percepção de impactos mecânicos. Além disso, o acoplamento e desacoplamento do alternador é feito de maneira inteligente, considerando a rotação do motor e o estado de carga da bateria, o que pode contribuir para uma melhor gestão da energia elétrica do veículo.

4.1.1.4 Sistema de controle veicular

Diferente do modelo proposto pelo Monteiro (2020), no qual foi construído um módulo de controle externo do veículo e um programa computacional para adaptar a estratégia de acoplamento e desacoplamento eletromecânico no alternador, o novo sistema de controle e coleta de dados foi implementado dentro da ECU. A partir dos dados recebidos pelos sensores, bem como função do estado de carga da bateria (IBS), condições de velocidade do veículo, rotação do motor a combustão interna e o nível de solicitação no torque do motor realizado pelo condutor do veículo através do pedal de aceleração, o ECU comanda o acoplamento e/ou desacoplamento do alternador em função dos parâmetros definidos na estratégia (descritos anteriormente no tópico 4.1.1.3.1).

Conforme esquematizado na Figura 22, o IBS é integrado à bateria, de modo que forneça as informações referente ao estado de carga da bateria ao ECU que, posteriormente, comanda o acoplamento e/ou desacoplamento elétrico e mecânico do alternador.

Figura 22 – Esquema representativo do sistema de controle e coleta de dados do alternador com desacoplamento mecânico inteligente



1	Bateria automotiva
2	Sensor de Bateria Inteligente (IBS)
3	Unidade de Controle Eletrônico (do inglês, <i>Electronic Control Unit</i> ou ECU)
4	Alternador com Desacoplamento Mecânico Inteligente

Fonte: Elaborado pela autora.

4.1.2 Equipamentos para o procedimento experimental

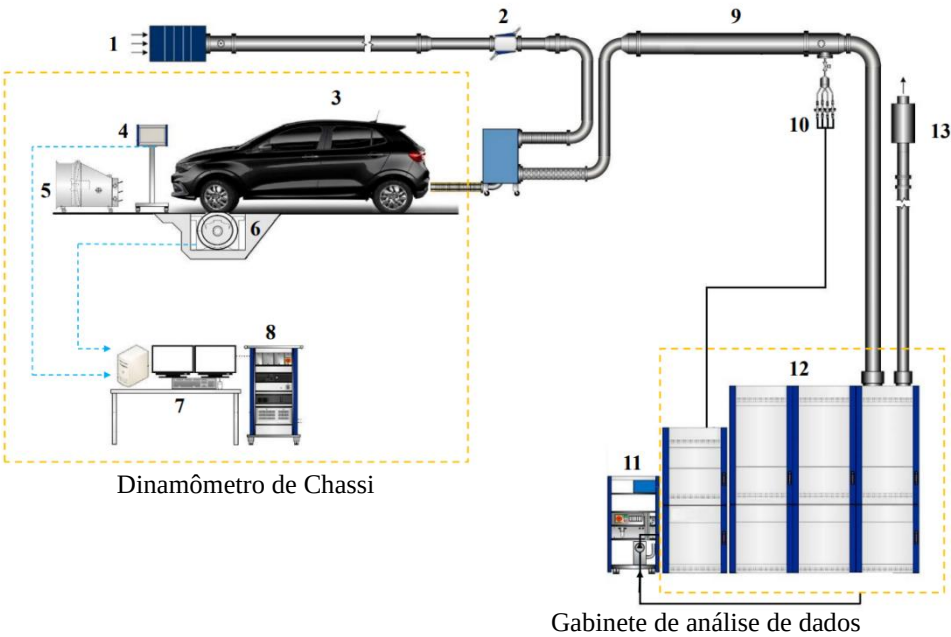
As características do laboratório e dinamômetros utilizados para a execução dos procedimentos experimentais são apresentadas.

4.1.2.1 Laboratório

Os procedimentos experimentais foram realizados no Laboratório de Emissões Veiculares da montadora Fiat Chrysler Automóveis localizada na planta de Betim-Minas Gerais e as configurações dos testes, seguiram as normativas da ABNT NBR 7024:2017 e ABNT NBR 6601:2021.

Figura 23 ilustra esquematicamente os respectivos equipamentos montados no laboratório de emissões e consumo de combustível.

Figura 23 – Representação esquemática do laboratório de Emissões e Consumo de Combustível



1	Entrada de ar	8	Cabide da Automação e Inversor
2	Sistema de medição de ar diluído	9	Duto de diluição (duto de CVS)
3	Veículo Argo Drive 1.0 l	10	Válvula de controle de fluxo
4	Monitor do motorista	11	Sistema de medição de exaustão
5	Ventilador	12	Gabinete de análise de dados
6	Rolos do dinamômetro de chassi (2x1)	13	Descarga dos gases
7	Computador para processamento de dados e para o controle do dinamômetro de chassi		

Fonte: Adaptado do BOSMAL (2023).

Os equipamentos utilizados no Laboratório, conforme as especificações das normativas ABNT NBR 7024:2017 e ABNT NBR 6601:2021, são:

- a) Dinamômetro de chassi (descrito posteriormente no tópico 4.1.2.2): composto por um conjunto de dispositivos, como:
- Veículo: veículo teste utilizado para estudo, conforme descrito anteriormente no tópico 4.1.1;
 - Rolos do dinamômetro: rolos simples de dois eixos com tração dianteira (2X1);
 - Ventilador: responsável pelo resfriamento do motor;
 - Computador: responsável pelo processamento de dados e para o controle do dinamômetro de chassi;
 - Gabinete de automação e inversor de frequência: controlar o funcionamento do dinamômetro de chassi e demais componentes.

b) Gabinete de análise de dados: composto por um conjunto de equipamentos para amostragem e análise do consumo de combustível e de gases emitidos pelo escape do veículo (diluídos e não diluídos), como:

- Amostrador de Volume Constante (CVS): responsável por medir as massas das substâncias emitidas pelo sistema de exaustão do veículo. Os gases emitidos são coletados, diluídos e analisados, continuamente, durante os ensaios, com o objetivo de medir o volume total da mistura de gás de escapamento e ar ambiente. Para isso, o CVS conta com balões (ou do inglês, “bags”) de coleta de amostras para o ar ambiente e para os gases emitidos pelo sistema de exaustão.
- Sistema de medição de exaustão: equipamento com um sistema analítico capaz de obter os resultados através da medição de gases de exaustão coletados e processados pelo CVS.

4.1.2.2 Dinamômetro

Para a execução dos procedimentos experimentais, utilizou-se o Dinamômetro de Chassi cujas características técnicas estão apresentadas na Tabela 8. O dinamômetro utilizado inclui um dispositivo de calibração para o sistema preciso de medição de força de tração, um ventilador para o acionamento e uma superfície de rolo de metal especial para simular condições realistas de carga na estrada. O controlador de dinamômetro de chassi fornece a função de controle fundamental para modos de teste transitórios e monitora o veículo. Em síntese, o posicionamento do veículo nos roletes do Dinamômetro de Chassi reproduziu o efeito dinâmico do movimento equivalente linear veicular, simulando as condições de tráfego urbano e em estrada, conforme especificações das normativas ABNT NBR 7024:2017 e ABNT NBR 6601:2021.

Os parâmetros para a determinação da resistência ao deslocamento por desaceleração livre em pista de rolamento e simulação em dinamômetro utilizando as técnicas de *coastdown* seguiram a normativa ABNT NBR 10312:2019.

Tabela 8 – Característica técnica do Dinamômetro de Chassi

	Dados
Fabricante	AVL – Zöllner
Modelo	ROADSIM NVH 2x1 - Light Truck™
Força de tração nominal no modo motor (por eixo)	8717 N @ velocidade $\leq$ 112 km/h
Potência nominal no modo motor (por eixo)	271 kW @ velocidade $\geq$ 112 km/h
Máxima Velocidade	270 km/h
Diâmetro de Rolo	1910 mm
Máxima carga do eixo	3000 kg
Faixa de massa inercial simulada	450 kg – 5400 kg
Tolerância da medição da força de tração	$\pm$ 0,15% da escala completa
Faixa de Velocidade Operacional	$\pm$ 0,02km/h

Fonte: Adaptado da AVL (2020).

4.1.2.3 Combustível

Os combustíveis utilizados na simulação seguem as especificações e proporções determinadas na ABNT NBR 8689:2012 e a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) para ensaios em veículos rodoviários automotores leves. Em vista disso, utilizou-se para a simulação numérica os combustíveis E22 (mistura constituída de 78% de gasolina pura e 22% de etanol anidro) e E100 (biocombustível etanol hidratado), com composições físico-químicas anteriormente descritas no tópico 3.6. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012).

4.1.3 Equipamentos para o procedimento numérico

As características do dispositivo e *software* utilizados para a execução da simulação numérica são apresentadas neste item.

4.1.3.1 Dispositivo

O computador utilizado para efetivar as simulações numéricas está instalado no Laboratório de pesquisa e tecnologia do Centro de Inovações e Tecnologia (CIT-SENAI), e suas características técnicas estão descritas a seguir:

- Marca: DATEN Computadores;
- Sistema Operacional: Windows® 8.1 Pro;
- Processador: AMD® A8-7600 com Radeon™ R7, 10 Compute Cores 4C+6G 3,10 GHz, com 08 GB de RAM.

4.1.3.2 Software

Os cálculos de consumo de combustível e emissões de CO₂ foram realizados no *software GoFast*[®] utilizado na simulação numérica. O *software* foi desenvolvido pela montadora Fiat Chrysler Automóveis, com o objetivo de realizar cálculos de desempenho, consumo, emissões e outros, de tal forma que realize numerosas simulações simultâneas e, para isso, conta com uma interface desenvolvida na linguagem VisualBasic[®] (VBA[®]) em execução no Microsoft Excel[®] e o *software* MATLAB[®]. Além do mais, para a instalação do *software GoFast*[®] e execução da simulação numérica, tem-se como principais requisitos o Microsoft Excel[®] e o *software* MATLAB[®].

4.2 Procedimento numérico

Conforme descrito no tópico 4.1.3.2, foram realizadas simulações numéricas no *software GoFast*[®] para calcular os efeitos da eficiência energética e do consumo de combustível de um motor a combustão interna, ao aplicar a tecnologia do alternador com desacoplamento eletromecânico. O *software* utilizado trabalha com matemática 1D, ou seja, considera apenas uma dimensão de movimento na direção longitudinal do veículo. Além disso, utiliza a dinâmica veicular para modelar como o veículo responde às forças externas aplicadas durante o movimento, permitindo calcular o desempenho, consumo de combustível, emissões e outros fatores.

Na simulação 1D, os componentes essenciais para a realização dos cálculos de consumo de combustível, são:

- a) Especificação do motor: o modelo de motor é usado para simular como o motor responde às preferências de mistura e desaceleração. Ele leva em consideração fatores como a curva de torque do motor, eficiência e outras características;
- b) Modelo de transmissão: a transmissão influencia diretamente o consumo de combustível ao transferir a potência gerada pelo motor para as rodas do veículo. O modelo de transmissão ajuda a entender como as diferentes marchas e relações de transmissão mudaram o consumo;
- c) Resistência ao rolamento: a resistência ao rolamento é uma força que se opõe ao movimento do veículo e é causada pela fricção entre os pneus e a superfície da estrada. Essa força consome parte da energia do motor, afetando o consumo de combustível;
- d) Resistência aerodinâmica: a resistência aerodinâmica é outra força que afeta o consumo de combustível. Ela é causada pelo atrito do veículo com o ar à medida que ele se

desloca. Quanto maior a área frontal e a velocidade do veículo, maior será essa resistência;

- e) Inércia: a inércia está relacionada à massa do veículo e sua resposta às mudanças de aceleração e desaceleração. Ela influencia a quantidade de combustível necessária para superar essa inércia durante o movimento.

Ao combinar todos esses elementos na simulação 1D, tem-se o consumo de combustível do veículo em diferentes condições de direção, como aproximação, desaceleração, velocidade constante ou parada. Isso permite otimizar o projeto do veículo, a calibração do motor e a transmissão para obter um melhor desempenho e eficiência no consumo de combustível (MARTINS, 2011).

Conforme Lins (2023), o *software* utiliza um método de cálculo reverso. Isso significa que os dados de entrada são impostos pelo ciclo de condução, e as forças aplicadas nas rodas são alternadas e processadas de forma inversa, através do trem de força, até que se chega à fonte primária de energia, como o consumo de combustível.

O método de simulação da dinâmica longitudinal envolve os seguintes passos no *software* (MARTINS, 2011):

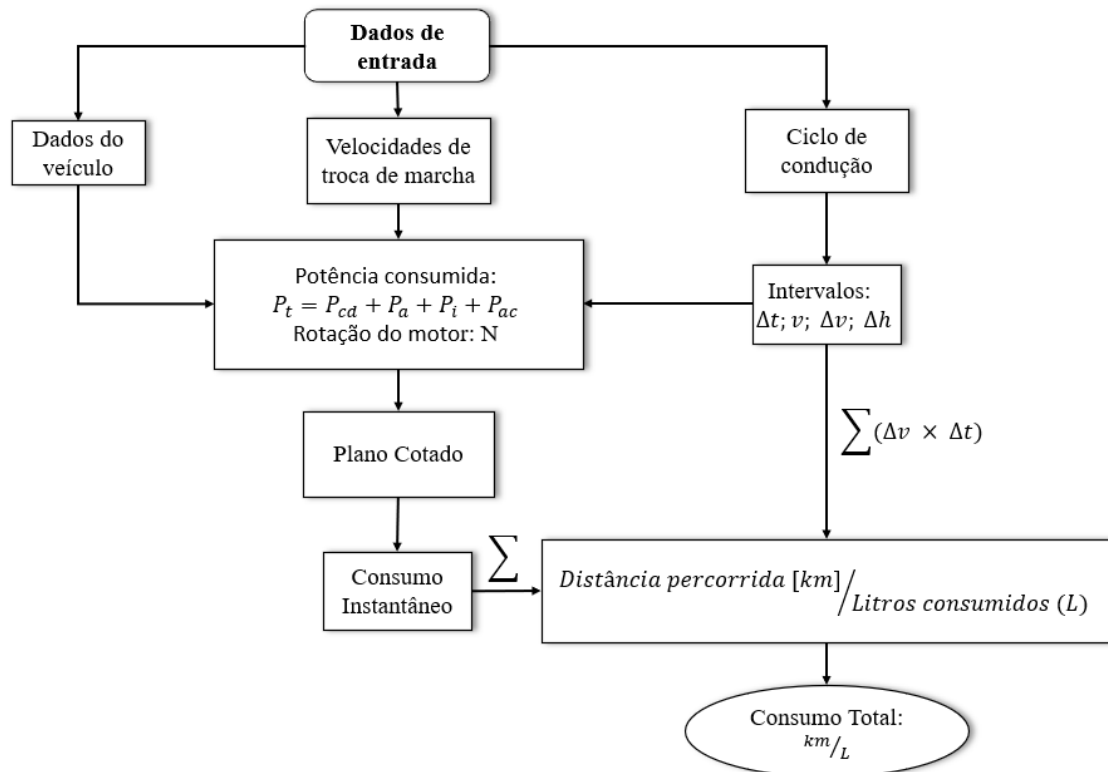
- 1º) Calcula-se a força necessária para o veículo, considerando a aceleração e as forças de resistência causadas pelo ciclo de condução;
- 2º) A força é então relacionada com a potência e/ou torque para as rodas, bem como as velocidades requeridas;
- 3º) A potência ou torque requeridos para movimentar o veículo a uma velocidade específica são transmitidos através do sistema motopropulsor. Esse sistema abrange a caixa de transmissão, juntas e diferencial, e a fonte principal de energia mecânica, que pode ser um motor a combustão interna;
- 4º) Para motores a combustão interna, são utilizados dados como o mapa de consumo de combustível e a curva de potência e torque para calcular as respostas do sistema motopropulsor e, por consequência, do veículo como um todo.

4.2.1 Consumo de combustível

Conforme Martins (2011), o diagrama do cálculo, apresentado na Figura 24, descreve que para cada momento do ciclo de condução e velocidade, calculam-se a potência consumida e o tempo em que essa potência é necessária. Com base na potência, é possível determinar o consumo instantâneo e o consumo total através da integração da taxa de consumo de

combustível ao longo do tempo. Os tempos gastos para mudar a velocidade do veículo são obtidos somando (ou integrando) os intervalos de tempo necessários para cada aumento de velocidade, levando em conta a potência líquida disponível nas rodas.

Figura 24 – Diagrama de cálculos



Fonte: Adaptado do Martins (2011).

Os dados de entrada (*inputs*) do veículo exigidos pelo *software* são (MARTINS, 2011):

- Massa efetiva do veículo (kg): considere a massa em ordem de marcha acrescida das massas do operador, instrumentação e massa equivalente à inércia de rotação do veículo (estimada em 3% da massa real do veículo, conforme a norma ABNT NBR 10312);
- Relações de transmissão da caixa de marchas (i_{cj}) e do diferencial (i_d);
- Desenvolvimento dinâmico dos pneus (mm), ou seja, o raio dinâmico do pneu;
- Velocidades de troca de marcha (km/h);
- Valores de *coast down*, representados por f_0 (N) e f_2 (N/(m/s)²);
- Curva de potência do motor, que mostra a relação entre a potência e o torque do motor;
- Plano cotado do motor, que apresenta a relação entre o consumo de combustível e a potência e torque do motor;
- Curva de potência resistiva dos motores (por exemplo: ar-condicionado e direção hidráulica), que representa a potência adicional exigida por esses dispositivos;

- i) Condições de temperatura ambiente (°C) e pressão atmosférica [mbar] durante a prova.

Os resultados do consumo de combustível do veículo foram calculados durante a simulação no *software* através do ciclo de condução, no qual tem-se algumas etapas que envolvem uma série de dados e parâmetros do veículo em questão e do próprio ciclo condução, sendo (MARTINS, 2011):

- a) Determinação da marcha selecionada: para cada intervalo do ciclo de condução, é calculada a marcha adequada com base na velocidade inicial do veículo. Essa seleção de marcha é influenciada pela velocidade necessária para a troca de marcha, conforme indicada pelo usuário;
- b) Cálculo da rotação do motor: com a marcha selecionada, prossegue-se para o cálculo da rotação do motor em cada intervalo do ciclo de condução, apresentada através da Equação 21. Esse cálculo leva em consideração diversos fatores, como a relação de transmissão escolhida, a relação de transmissão diferencial, o raio dinâmico do pneu e a velocidade inicial do veículo:

$$n_m = \frac{100}{60} * \frac{v}{p * i_{cj} * i_d} \quad (21)$$

Em que:

n_m : rotação do motor (rpm);

v : velocidade de translação do veículo (m/s);

p : raio dinâmico do pneu (mm);

i_{cj} : relação de transmissão da marcha inserida;

i_d : relação de transmissão do diferencial.

- c) A Potência resistiva de Aerodinâmica, Rolamento e *Coast Down*, para a velocidade inicial de um trecho específico é calculada usando uma combinação de fatores relacionados à resistência do veículo durante a condução, conforme descrito na Equação 22:

$$P_{cd} = (f_0 + f_2 * v^2) * v \quad (22)$$

Em que:

P_{cd} : potência resistiva de Aerodinâmica, Rolamento e de *Coast Down* (W);

f_0 : coeficiente do termo de ordem 0 da equação (N);

f_2 : coeficiente do termo de segunda ordem da equação (Ns²/m²);

- d) A potência resistiva de aclave, para pequenos ângulos, é calculada levando em consideração o grau de inclinação presente no intervalo do ciclo de condução. Essa

inclinação é determinada a partir das altitudes inicial e final do intervalo. Quanto maior a diferença de altitude entre esses pontos, maior será a força resistiva de aclave que o veículo terá que superar durante a condução. A potência resistiva de aclave é calculada através das Equações 23 e 24:

$$ac = \tan \alpha = \frac{\text{altura}}{\text{distância}} = \frac{(h_f - h_i)}{v \cdot \Delta t} \quad (23)$$

$$P_a = (m * 9,81 * \sin(\tan^{-1}(ac))) * v \quad (24)$$

Em que:

ac : aclave ou declive (%);

α : ângulo de inclinação do aclave ou declive (°);

P_a : potência resistiva de aclave (W);

h_i : cotas das altitudes do ponto inicial do trecho específico da estrada inclinada (m);

h_f : cotas das altitudes do ponto final do trecho específico da estrada inclinada (m);

m : massa de prova do veículo (kg).

- e) A potência resistiva de inércia é obtida a partir da aceleração do intervalo do ciclo de condução, a qual é determinada pelas velocidades inicial e final desse intervalo. Além disso, a contribuição da inércia de translação é equivalente à inércia de rotação, e esse cálculo pode ser realizado usando as Equações 25, 26 e 27.

$$a = \frac{(v_f - v_i)}{\Delta t} \quad (25)$$

$$\delta = 0,004 + 0,05 * i_{cj}^2 \quad (26)$$

$$P_i = m * a * (1 + \delta) * v \quad (27)$$

Em que:

P_i : potência resistiva de inércia (W);

v_i : velocidade inicial (m/s);

v_f : velocidade final (m/s);

δ : inércia de translação equivalente à de rotação.

- f) A Potência resistiva (P_{ac}), em W, dos acessórios é determinada através da interpolação da rotação do motor na curva de rotação do motor em relação à potência requerida pelo acessório. Em outras palavras, é feita uma estimativa da potência necessária para acionar os acessórios do veículo com base na rotação do motor e na relação entre a curva de potência do motor e a potência demandada pelos acessórios. Isso nos permite

compreender a quantidade de energia que os acessórios do veículo consomem e como eles afetam o desempenho geral do motor;

- g) Com todas as potências resistivas calculadas, podemos obter a potência total por meio da seguinte Equação 28:

$$P_t = P_{cd} + P_a + P_i + P_{ac} \quad (28)$$

- h) Com a rotação do motor e a potência resistiva total do intervalo do ciclo de condução, é possível calcular o consumo instantâneo por meio de uma interpolação no plano cotado. Intervalos onde o veículo está desacelerando ou em declive, resultando em potência resistiva negativa, são ignorados, pois o sistema de injeção de combustível é desligado nessas situações. Para os intervalos em que o veículo está parado ($v = 0 \text{ m/s}$) ou em marcha lenta, o consumo instantâneo é obtido interpolando os dados no plano cotado. Com esses cálculos, usando a Equação 29, é possível obter o consumo de combustível do veículo ao longo do ciclo de condução desejado. Essa equação considera todos os intervalos relevantes do ciclo de condução e permite estimar o desempenho do veículo em termos de consumo de combustível.

$$C = \frac{\sum_{i=0}^n \frac{v_{fi} * \Delta t_i}{1000}}{\sum_{i=0}^n C_i * \frac{\Delta t_i}{3600}} \quad (29)$$

Em que:

C : consumo de combustível (km/l);

n : número de intervalos do ciclo de condução;

v_{fi} : velocidade final do n -ésimo de intervalo (m/s);

Δt_i : duração do n -ésimo intervalo (s);

C_i : consumo instantâneo do n -ésimo intervalo (l/h).

4.2.2 Autonomia do veículo e eficiência energética

Os cálculos realizados através da simulação para determinar a autonomia e eficiência energética do veículo seguiram conforme o descrito nos tópicos 3.9.2.3 e 3.9.2.4.

4.2.3 Dados de entrada para os combustíveis E22 e E100

As propriedades do combustível para a simulação numérica, bem como a densidade energética, a densidade de combustível e ao Poder Calorífico Inferior (PCI) de um combustível,

no qual consiste na quantidade de calor liberada quando uma quantidade específica de combustível é queimada, levando em consideração o calor necessário para vaporizar a água presente nos produtos de combustão, são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Dados de entrada dos combustíveis

Combustível	E22	E100
PCI (MJ/kg)	38,92	24,80
Densidade do combustível (MJ/l)	0,745	0,810
Densidade energética (MJ/l)	28,99	20,09

Fonte: Elaborada pela autora.

4.2.4 Configuração das simulações

Foram realizadas simulações em duas configurações, conforme descrito na Tabela 10, com o objetivo de comparar o desempenho do veículo quando operado com o alternador convencional e o alternador com desacoplamento eletromecânico inteligente.

Tabela 10 – Configurações para a simulação numérica

Configuração	Característica	Combustível
1	Veículo NP	Alternador convencional
		E22
2	Veículo adaptado ao alternador com o desacoplamento eletromecânico inteligente	Alternador acoplado com a embreagem eletromagnética
		E100

Fonte: Elaborada pela autora.

4.3 Procedimento experimental

No presente tópico serão apresentados os métodos para a realização do procedimento experimental, bem como os cálculos e o procedimento utilizado.

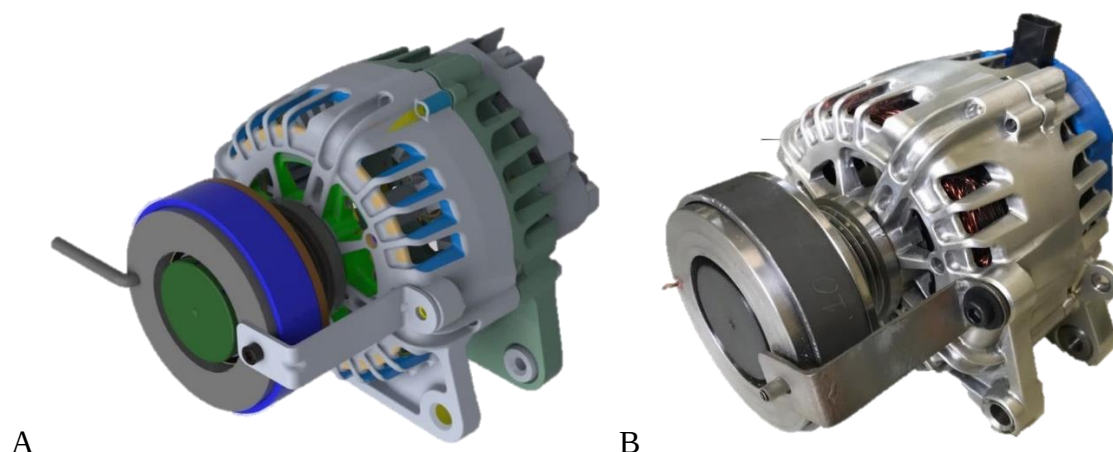
4.3.1 Confecção do protótipo

A confecção do protótipo seguiu conforme a conceituação desenvolvida e apresentada no tópico 4.1.1.3, no qual tem-se uma embreagem eletromagnética integrada a uma polia que permite melhorar as condições de atrito e perdas durante o acoplamento e/ou desacoplamento elétrico e mecânico do alternador. À vista disso, realizou-se todas as aquisições necessárias de

matéria-prima e, posteriormente, a montagem mecânica do conjunto alternador e polia eletromagnética.

A Figura 25 compara a versão conceitual e o protótipo final do alternador com desacoplamento mecânico inteligente.

Figura 25 – Confeção do prototipo do alternador com desacoplamento mecânico inteligente



- | | |
|----------|---|
| A | Conceituação do protótipo (alternador com a embreagem eletromagnética) |
| B | Protótipo final do projeto montado (alternador com embreagem eletromagnética) |

Fonte: Elaborado pela autora.

4.3.2 Procedimento dos ensaios

No presente trabalho, os ensaios foram controlados no Laboratório de Emissões Veiculares, conforme descrito anteriormente no tópico 4.1.2.1. Utilizou-se o dinamômetro de chassi, como apresentado no tópico 4.1.2.2, seguindo as normas vigentes ABNT NBR 7024:2017, ABNT NBR 6601:2021 e ABNT NBR 10312:2019.

Os ensaios experimentais seguiram as mesmas configurações, descritas na Tabela 10, adotadas nos procedimentos numéricos. Realizou-se o procedimento para o veículo operando com o alternador NP e, posteriormente, para o veículo com o alternador adaptado com a embreagem eletromagnética operando com a estratégia de acoplamento e desacoplamento elétrico e mecânico.

À vista disso, deve-se destacar que, realizou-se três ensaios para cada configuração, visando obter uma repetitividade de 0,05, com o objetivo de alcançar maior precisão nos resultados experimentais e confiabilidade nos procedimentos adotados. Através da repetição dos ensaios experimentais, pode-se verificar a consistência dos resultados e identificar qualquer variação sistemática ou inconsistência. Salienta-se também que se utilizou do cálculo de

incerteza expandida para se fornecer uma estimativa mais abrangente da incerteza dos resultados, levando-se em conta a incerteza padrão e a confiabilidade desejada. Para os cálculos da incerteza expandida utilizou-se a distribuição *t-student* para infinitos graus de liberdade e nível de confiança de 95%, originando-se no fator de abrangência K equivalente à 2.

4.3.2.1 Cálculos dos resultados

Os resultados dos ensaios de emissões e consumo de combustíveis foram calculados de acordo com as normas técnicas ABNT NBR 6601:2021 e ABNT NBR 7024:2017, conforme descritas anteriormente no tópico 3.9.2.

4.3.2.2 Tratamento de dados

Para a análise dos resultados utilizou-se como método de tratamento de dados a ferramenta gráfica de diagrama de caixa, ou também conhecido como *Boxplot*, conforme descrito no tópico 3.10.

5 RESULTADOS

No presente capítulo, são apresentados os resultados e as análises obtidas a partir dos procedimentos numéricos e experimentais realizados. Além disso, são realizadas comparações entre os resultados numéricos e experimentais, com o objetivo de verificar a concordância entre as duas abordagens e avaliar a precisão dos modelos numéricos utilizados.

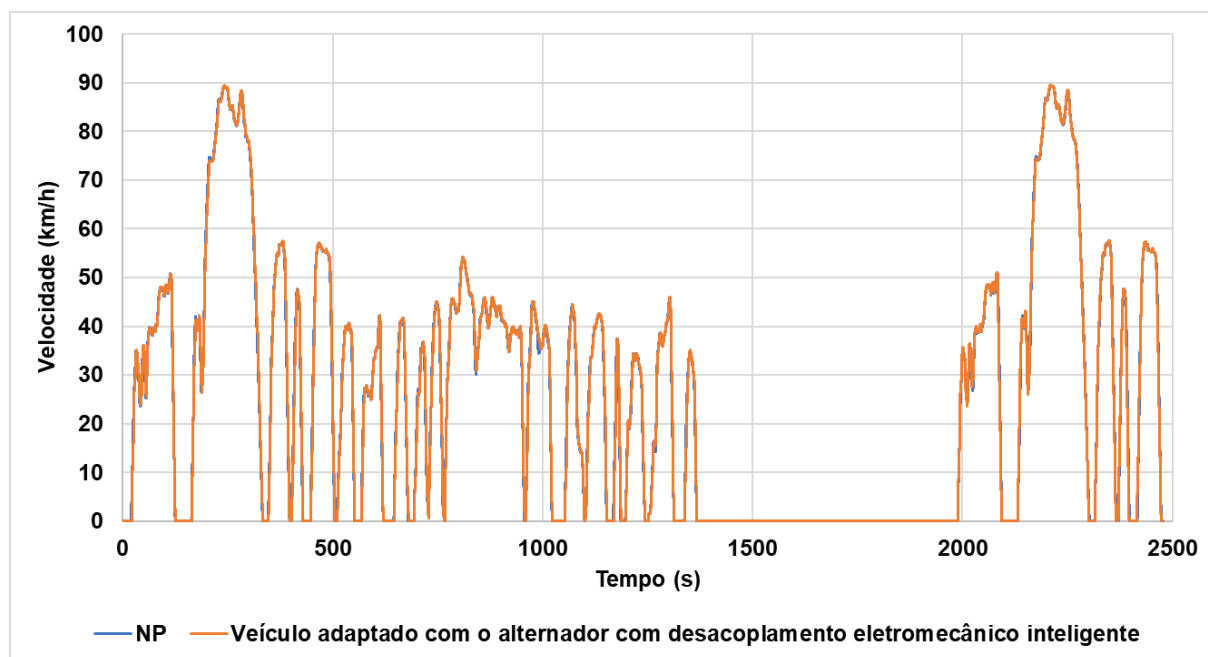
5.1 Resultados numéricos

Os resultados obtidos pelo *software* por meio da simulação numérica para o consumo de combustível do veículo serão apresentados graficamente nos próximos tópicos, seguindo a metodologia descrita no tópico 4.2. Além disso, são disponibilizados o mapa de condução para a execução das simulações, os ciclos de condução FTP75 e HWFET, e os resultados referentes ao estado de carga da bateria (SOC), rotação do motor, o consumo de combustível ao longo do ciclo (instantâneo) e a ação mecânica do alternador.

Adicionalmente aos resultados gráficos, também serão apresentados os valores percentuais relativos ao consumo de combustível e à eficiência energética.

5.1.1 Ciclo de condução urbano e em estrada

Os ciclos de condução simulados numericamente para os combustíveis E22 e E100 estão representados graficamente nas Figura 26 e Figura 27, tanto para o veículo NP quanto para o veículo adaptado com o alternador de desacoplamento eletromecânico. Tanto o ciclo de condução urbano quanto o de estrada seguiram conforme o ciclo especificado pela norma.

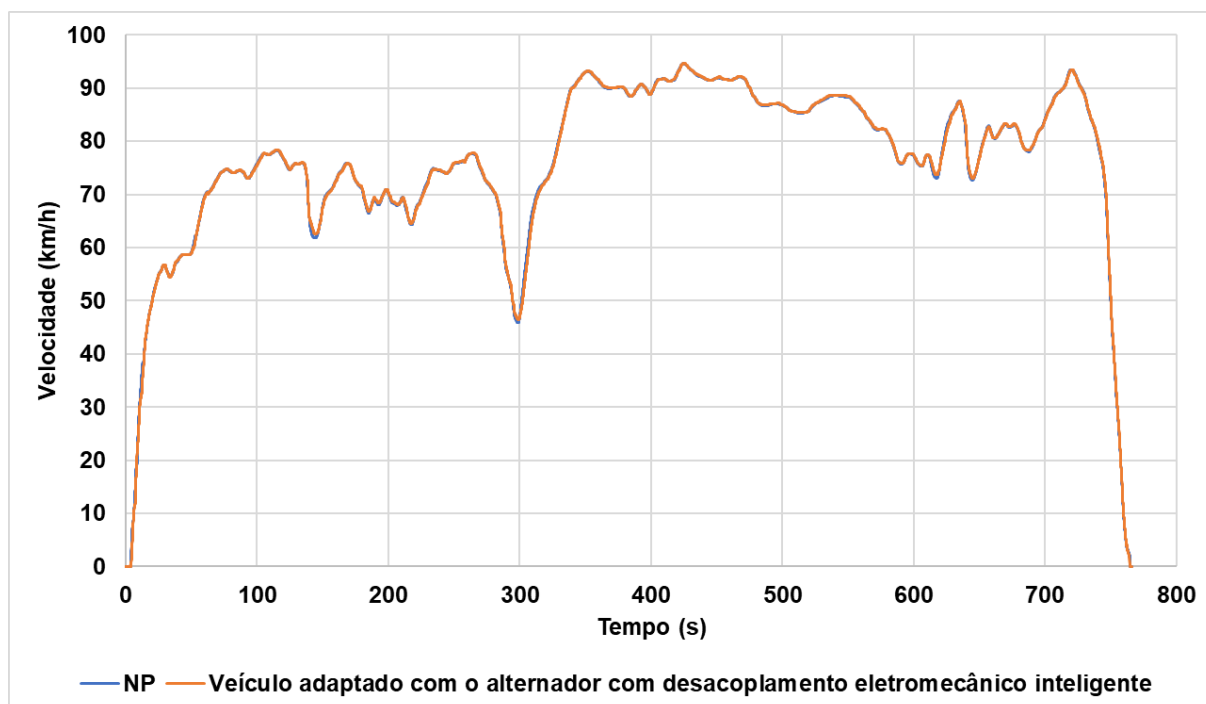
Figura 26 – Ciclo de condução FTP75

Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 26 descreve o comportamento do veículo NP e do veículo adaptado com o alternador de desacoplamento eletromecânico ao longo do ciclo FTP75. Conforme mencionado no tópico 3.9.1, a quarta fase do ciclo FTP75 é semelhante à segunda fase do ciclo de condução urbana. Por essa razão, os resultados da segunda fase do ciclo de condução urbana foram repetidos nas análises, representando assim os resultados da quarta fase. No entanto, os resultados da quarta fase não foram incluídos no gráfico devido à duplicação de dados.

O ciclo de condução em estrada é representado graficamente na Figura 27, para o veículo NP e para veículo adaptado com o alternador de desacoplamento eletromecânico.

Figura 27 - Ciclo de condução HWFET

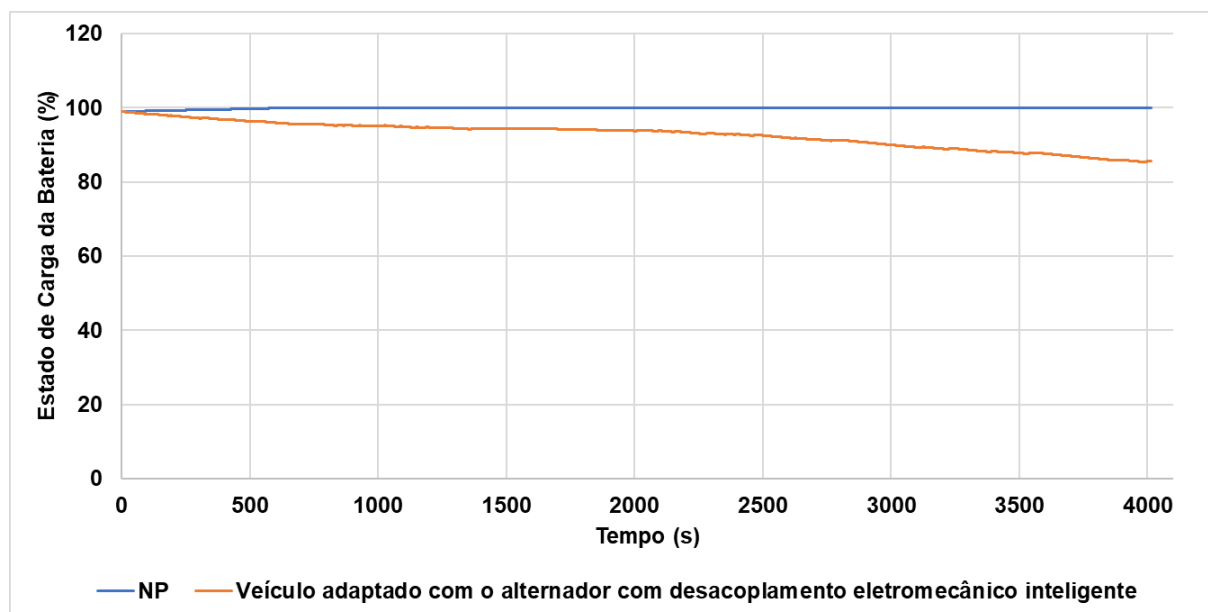


Fonte: Elaborado pela autora.

Pelas Figura 26 e Figura 27, é possível observar o comportamento do veículo durante os ciclos de condução urbano e em estrada, através do perfil de velocidade *versus* tempo, simulados numericamente, no qual se tem a velocidade do veículo NP e do veículo adaptado com o alternador com desacoplamento eletromecânico. Fica evidente nas figuras que o comportamento do veículo converge com o comportamento teórico dos ciclos de condução estabelecidos nas normas vigentes ABNT NBR 6601:2021e ABNT NBR 7024:2017.

5.1.2 Estado de carga da bateria (SOC)

O estado de carga da bateria durante os ciclos FTP75 e HWFET, simulados numericamente, é apresentado graficamente na Figura 28. Essa figura retrata a configuração tanto do veículo NP quanto do veículo adaptado com o alternador de desacoplamento eletromecânico. O gráfico para o ciclo de condução urbana e em estrada mantêm-se consistentes, com os veículos operando utilizando os combustíveis E22 e E100.

Figura 28 – Estado da carga da bateria

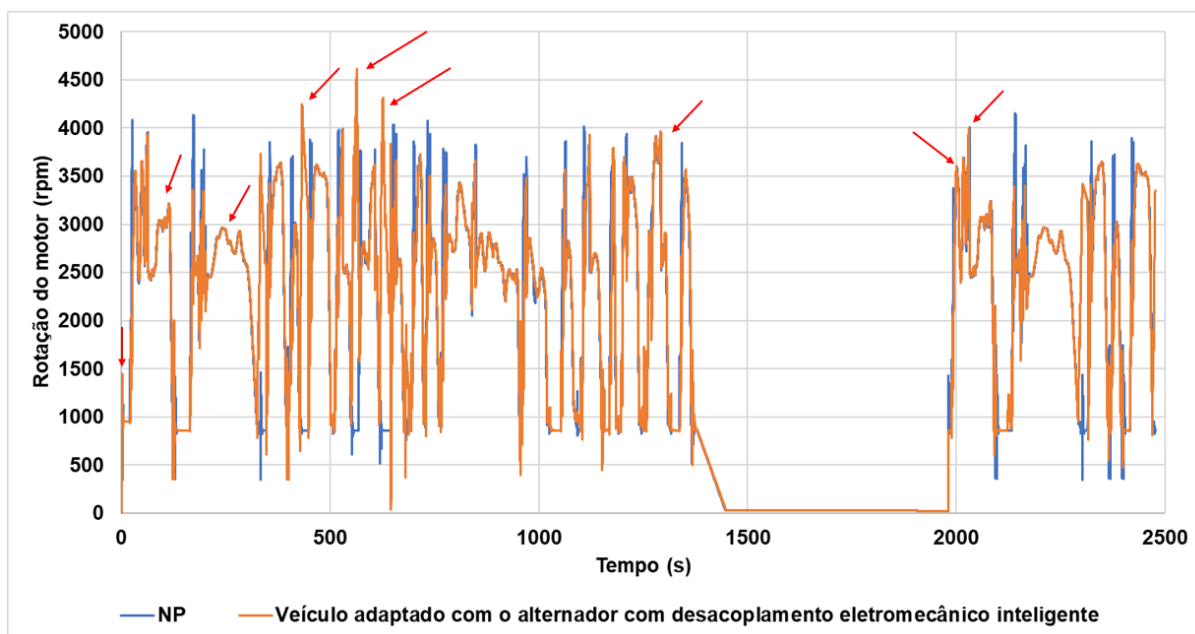
Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 28 permite a comparação do comportamento do estado de carga da bateria ao longo do tempo. O estado de carga da bateria do veículo NP permanece inalterado, com o estado de carga (SOC) da bateria em 100%, ao longo de todo o ciclo, graças à ação contínua do alternador convencional de produção. Em contraste, para o veículo adaptado com o alternador de desacoplamento eletromecânico, o SOC da bateria diminui durante o ciclo de condução, porém mantém-se acima de 75% ao longo de todo o percurso do ciclo FTP75 e HWEFET.

5.1.3 Rotação do motor

A representação gráfica da Figura 29 e da Figura 30, simuladas numericamente, ilustram a variação da rotação do motor ao longo do tempo durante os ciclos de condução urbano e em estrada, tanto para o veículo NP quanto para o veículo adaptado ao alternador com desacoplamento eletromecânico inteligente, utilizando o combustível E22. O comportamento gráfico é análogo a operação com o combustível E100, quando comparada à operação com o combustível E22.

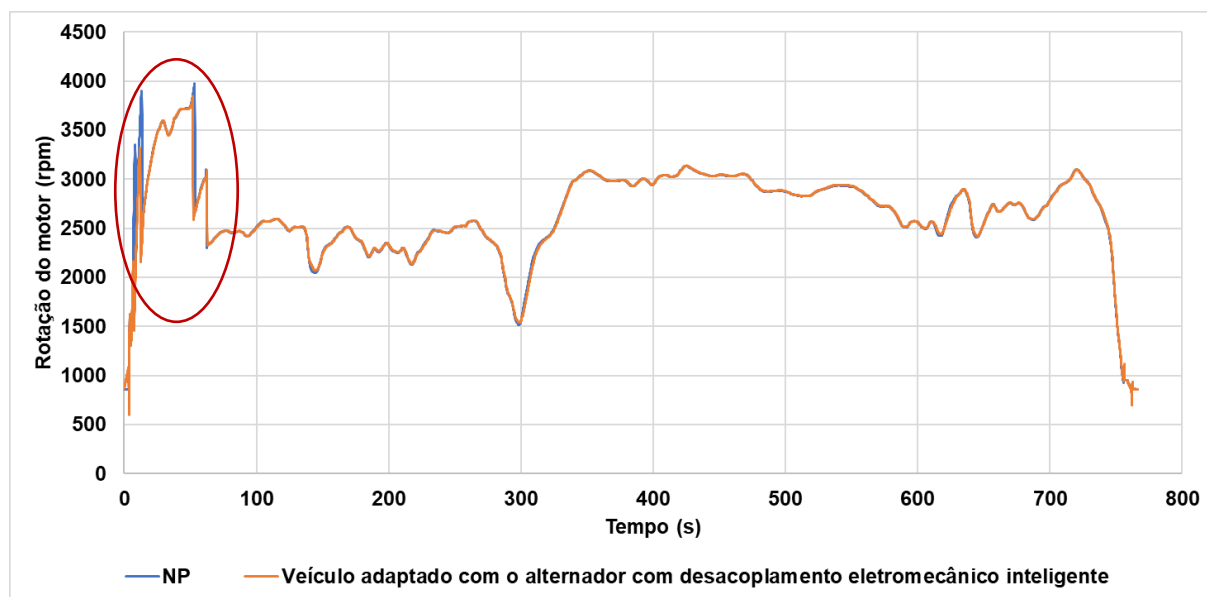
Figura 29 – Rotação do motor (Ciclo FTP75)



Fonte: Elaborado pela autora.

No ciclo de condução FTP75, conforme ilustrado na Figura 29, nota-se que, no caso do veículo adaptado ao alternador com desacoplamento eletromecânico inteligente, tem-se um aumento na rotação em determinados momentos (vide setas no gráfico). Isso é resultado da redução do torque mecânico no motor durante os períodos em que o alternador está desacoplado. Essa variação acontece devido ao fato de que o torque mecânico está associado à força responsável por movimentar o motor e, consequentemente, as rodas do veículo. Em outras palavras, quando a carga sobre o motor é diminuída, o motor encontra menos resistência para girar, com consequente aumento na rotação.

Em resumo, a relação entre a carga sobre o motor e sua rotação é inversamente proporcional. Menos carga significa menos resistência, o que leva a uma rotação mais elevada do motor. Esse conceito é fundamental para entender o comportamento dinâmico dos motores em diferentes situações de operação.

Figura 30 – Rotação do motor (Ciclo HWEFET)

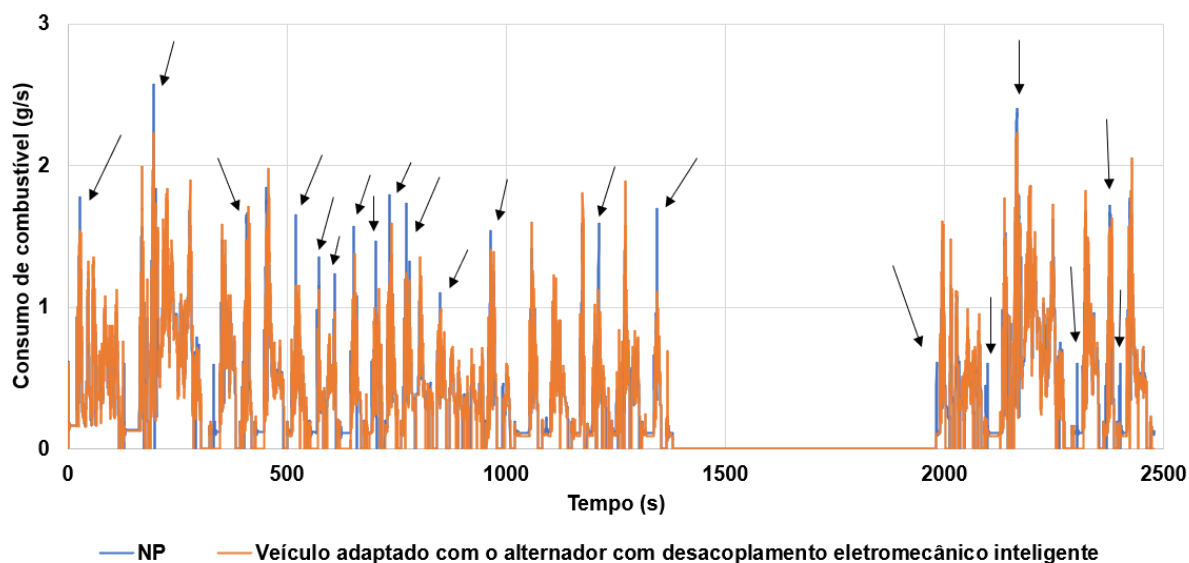
Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 30, foi observado que o comportamento gráfico da rotação do motor durante o ciclo de condução HWEFET apresentou uma discrepância maior entre o veículo NP e o veículo adaptado com o alternador com desacoplamento eletromecânico inteligente durante o início do ciclo de condução (elipse em vermelho). No caso do veículo adaptado com o alternador com desacoplamento eletromecânico inteligente, a rotação é inferior apenas no início do ciclo, o que apresenta que o alternador se encontra acoplado nesse período. Ao contrário do ciclo FTP75, as rotações apresentaram um comportamento mais convergente com o veículo NP durante o ciclo de condução HWEFET. Isso se deve à presença de períodos menores de desacoplamento do alternador.

5.1.4 Consumo de combustível

O consumo de combustível instantâneo ao longo do ciclo de condução FTP75, simulado numericamente, é apresentado graficamente na Figura 31 e na Figura 32 para os veículos operando com os combustíveis E22 e E100.

Figura 31 – Consumo de combustível para o veículo operando com o combustível E22 (Ciclo FTP75)

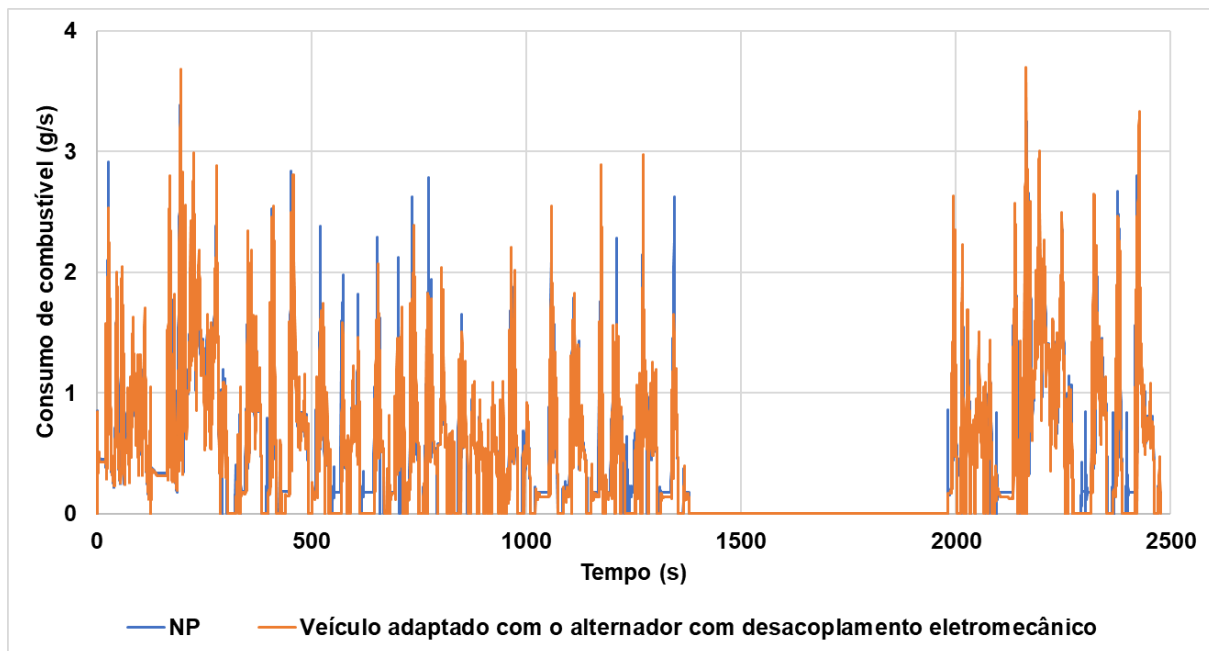


Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 31, tem-se o consumo de combustível instantâneo ao longo do ciclo de condução urbano para os veículos utilizando o combustível E22, tanto para o veículo NP quanto para o veículo adaptado com o alternador com desacoplamento eletromecânico inteligente. Observa-se que o veículo NP apresenta maior consumo de combustível em alguns períodos (vide setas no gráfico), ao longo do ciclo de condução quando comparado ao veículo adaptado com o alternador com desacoplamento eletromecânico inteligente.

Na Figura 32, são representados os veículos operando com o combustível E100 durante o ciclo de condução urbana. Observa-se um consumo de combustível instantâneo mais elevado nos veículos que utilizam E100, em comparação com o combustível E22 (Figura 31). Essa diferença ocorre devido ao fato de que o E100 possui o A/F (razão ar-combustível) e o PCI menor do que o E22, o que implica necessitar de uma maior quantidade de combustível para se obter uma mistura estequiométrica ao mesmo tempo que contém menos energia por unidade de massa.

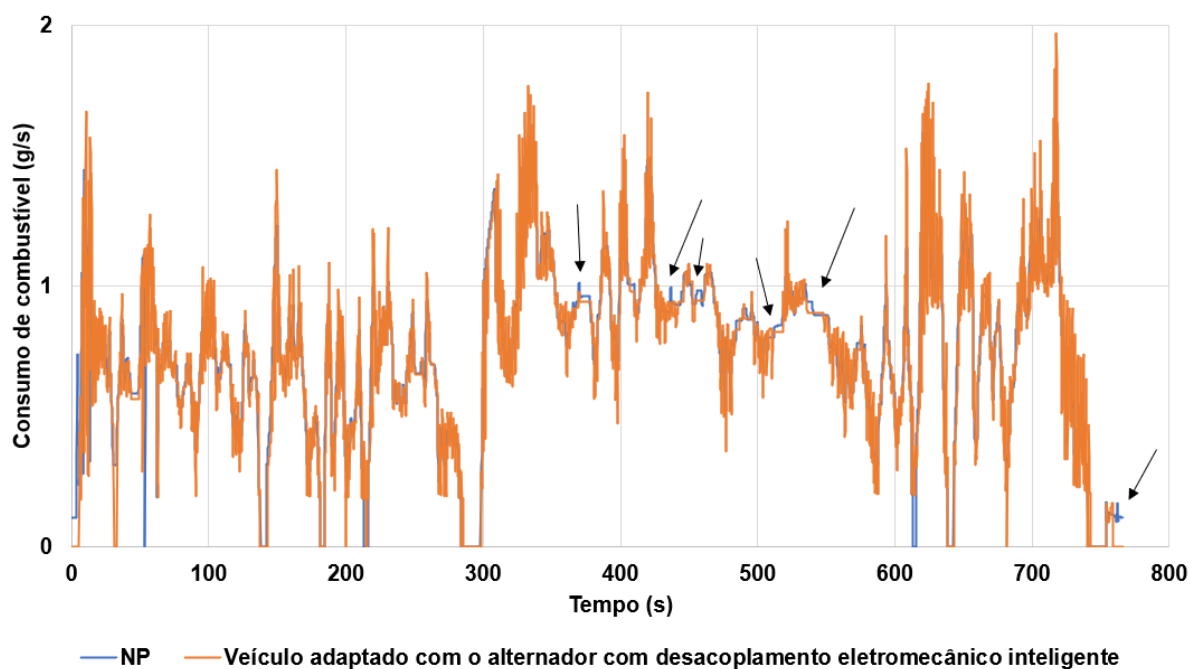
Figura 32 – Consumo de combustível para o veículo operando com o combustível E100 (Ciclo FTP75)



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 33 e a Figura 34 apresentam graficamente o consumo de combustível instantâneo durante o ciclo de condução HWFET para os veículos operando com os combustíveis E22 e E100.

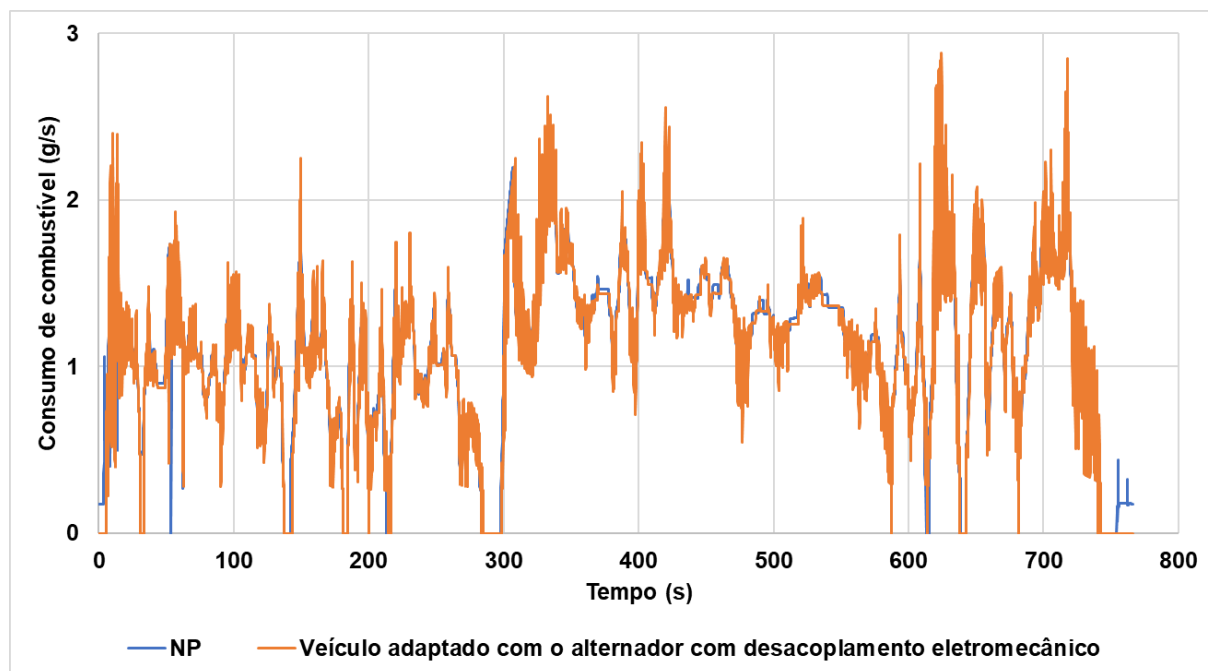
Figura 33 – Consumo de combustível para o veículo operando com o combustível E22 (Ciclo HWEFET)



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 33 mostra o consumo de combustível durante a condução em estradas para veículos que usam o combustível E22. É perceptível que, para o ciclo em estrada, não há diferença notáveis no consumo de combustível para o veículo NP e para o veículo adaptado com o alternador com desacoplamento eletromecânico inteligente. Entretanto, em pequenos intervalos de tempo durante o trajeto em estrada, o veículo adaptado com o alternador de desacoplamento eletromecânico inteligente apresentou menor consumo de combustível em comparação com o veículo NP.

Figura 34 – Consumo de combustível para o veículo operando com o combustível E100 (Ciclo HWEFET)

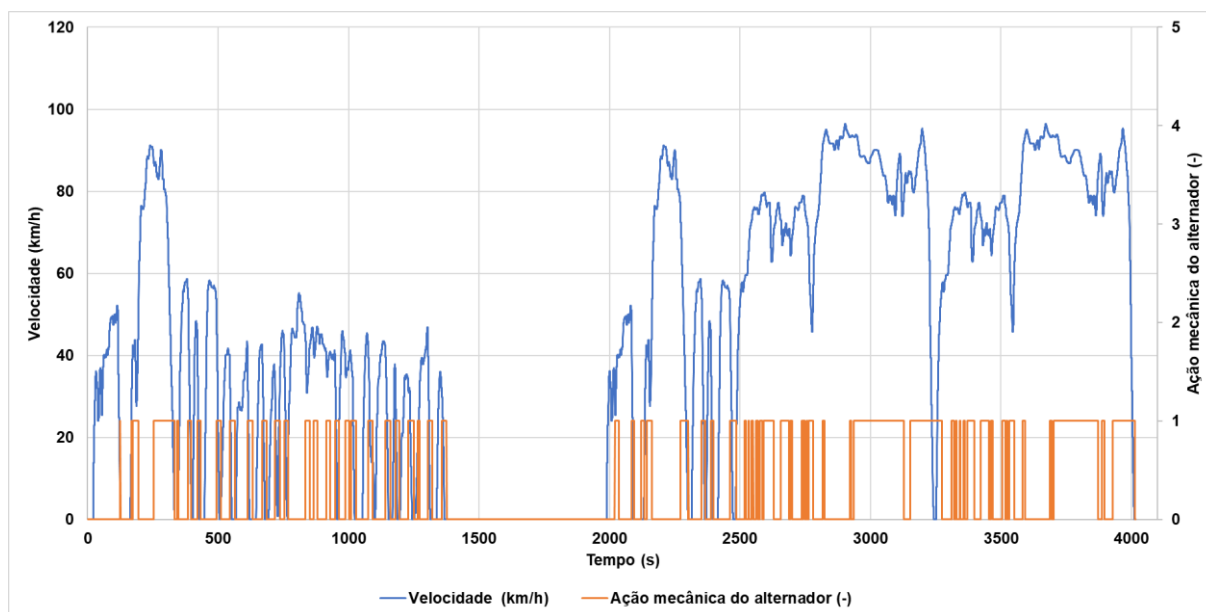


Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 34, observou-se que, de maneira análoga ao ciclo FTP75, no ciclo de condução HWEFET, o consumo de combustível instantâneo é maior para os veículos operando com o combustível E100 em comparação ao combustível E22, devido aos menores valores de A/F e PCI. No entanto, durante o ciclo HWEFET, as diferenças no consumo de combustível entre o veículo NP e o veículo equipado com o alternador de desacoplamento eletromecânico inteligente são menos notáveis quando comparadas ao ciclo de condução FTP75. Isso ocorre devido a uma menor demanda do veículo, menor frequência de trocas de marcha e velocidades mais constantes, entre outros fatores.

5.1.5 Ação mecânica do alternador

A representação gráfica na Figura 35 descreve o mapa de consumo de combustível utilizado na simular numericamente para os ciclos de condução urbano e estrada é apresentado no *software*. Nesse contexto, são consideradas as ações mecânicas de acoplamento e desacoplamento do alternador durante os ciclos de condução.

Figura 35 – mapa de consumo de combustível

Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 35, é ilustrado o ciclo de condução urbano e em estrada. Nesta representação, estão plotadas a velocidade do veículo em km/h e as ações de acoplamento e desacoplamento mecânico do alternador inteligente. A introdução das operações de acoplamento e desacoplamento mecânico do alternador foi integrada com base na retirada do torque gerado pelo alternador no motor, simulando assim o desligamento mecânico do alternador. As ações de acoplamento e desacoplamento seguiram conforme a estratégia definida no tópico 4.1.1.3.1.

De acordo com a Figura 35, a ação mecânica do alternador varia de 0 a 1 ao longo do ciclo de condução. Nesse contexto, o valor 0 indica que o alternador está desacoplado mecanicamente, enquanto o valor 1 indica seu acoplamento. Durante o período em que o alternador está desacoplado mecanicamente tem-se a retirada de torque mecânico do motor, levando a uma representação da ação mecânica do alternador como 0. Por outro lado, quando não há retirada de torque mecânico do motor, o alternador está acoplado mecanicamente, resultando em uma ação mecânica de 1.

Na simulação numérica, a estratégia de acoplamento e desacoplamento elétrico e mecânico foi realizada simultaneamente, diferentemente do procedimento experimental, descrito no tópico 4.1.1.3.1. O intuito da defasagem entre o acoplamento mecânico e elétrico é apenas reduzir o impacto mecânico sobre o conjunto de motor e transmissão. Como essa percepção de impactos no sistema de transmissão não é avaliada na simulação numérica, ela não apresenta influência no resultado final.

5.1.6 Resultado final

Devido a questões contratuais com a empresa Stellantis South America (Fiat Chrysler Automobiles Brasil LTDA), os resultados serão apresentados em forma de percentuais para comparar os dados obtidos relativos à autonomia do veículo e a eficiência energética por meio das simulações numéricas. Com base nisso, a Tabela 11 apresenta os resultados como uma comparação percentual entre o veículo NP e o veículo adaptado com o alternador de desacoplamento eletromecânico inteligente, para os combustíveis E22 e E100.

Tabela 11 – Resultados percentuais do procedimento numérico

	Parâmetro	E22	E100
Autonomia (km/l)	Ciclo Urbano	4,72%	6,69%
	Ciclo Estrada	2,43%	2,60%
	Ciclo Combinado	3,82%	5,06%
Consumo energético (MJ/km)	Ciclo Urbano	-4,51%	-6,27%
	Ciclo Estrada	-2,37%	-2,54%
	Ciclo Combinado	-3,68%	-4,81%

Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme apresentado na Tabela 11, o veículo adaptado com o alternador com desacoplamento eletromecânico inteligente apresentou um aumento na autonomia, em km/l. Para o ciclo urbano, foi registrado um aumento de 4,72% com o uso do combustível E22 e de 6,69% com o combustível E100. Já no para o ciclo de condução em estrada, a autonomia apresentou um acréscimo de 2,43% com o E22 e de 2,60% com o E100. Em síntese, o aumento combinado entre os dois ciclos de condução foi de 3,82% na autonomia para o combustível E22 e de 5,06% para o E100.

Para o consumo energético, em MJ/km, o veículo adaptado com o alternador com desacoplamento eletromecânico inteligente apresentou uma redução de 4,51% para o combustível E22 e 6,67% para o combustível E100 durante o ciclo de condução urbano. Contudo, para o ciclo de condução em estrada, o veículo obteve uma redução de 2,37% com o E22 e 2,54% com o E100. De forma geral, o ciclo combinado entre os dois ciclos de condução foi de 3,68% no consumo energético para o E22 e 4,81% para o E100.

O ciclo de condução em estrada apresenta uma influência percentual menor em comparação ao ciclo de condução urbana, em relação ao consumo de combustível. Isso se deve ao fato de que, no ciclo de condução urbano, o foco está nas paradas frequentes, acelerações e desacelerações características do trânsito citadino. Dessa maneira, o alternador tende a

apresentar maior atividade de acoplamento e desacoplamento, o que resulta em uma redução mais significativa no consumo de combustível em termos percentuais.

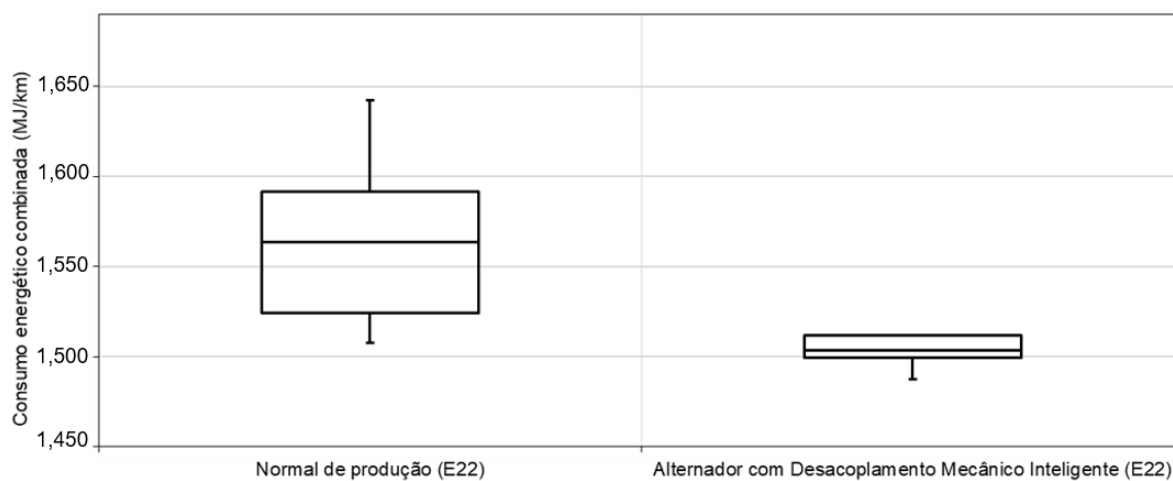
Por outro lado, o ciclo de condução em estrada retrata as condições de direção em vias de alta velocidade, em que o veículo mantém velocidades mais constantes e elevadas. Em virtude disso, ocorre uma menor frequência de ação de acoplamento e desacoplamento do alternador. Consequentemente, o percentual de redução no consumo de combustível é menor em comparação ao ciclo urbano.

5.2 Resultados experimentais

De forma análoga ao procedimento numérico, primeiramente realizaram-se os ensaios experimentais para a configuração do veículo em condição normal de produção, no qual o veículo opera com o alternador convencional e, posteriormente, adaptado com o alternador com desacoplamento eletromecânico inteligente, seguindo a sequência de operações descrita na Tabela 10.

Conforme descrito no tópico 3.9.2, o resultado dos cálculos para o consumo de combustível é expresso em litros por cem quilômetros (l/100 km), no qual é calculado através do método de balanço de carbono, emitidos pelo motor do veículo durante o ciclo de condução urbano (FTP75) e estrada (HWFET). Posteriormente, calculou-se a autonomia de combustível combinada, expressa em quilômetro por litro (km/l), no qual é determinada através da média ponderada das autonomies de combustível durante o ciclo de condução FTP75 e HWFET. Por fim, tem-se a eficiência energética combinada, na qual se calculou através do consumo energético para os ciclos de condução FTP75 e HWFET, expresso em megajoules por quilômetro (MJ/km).

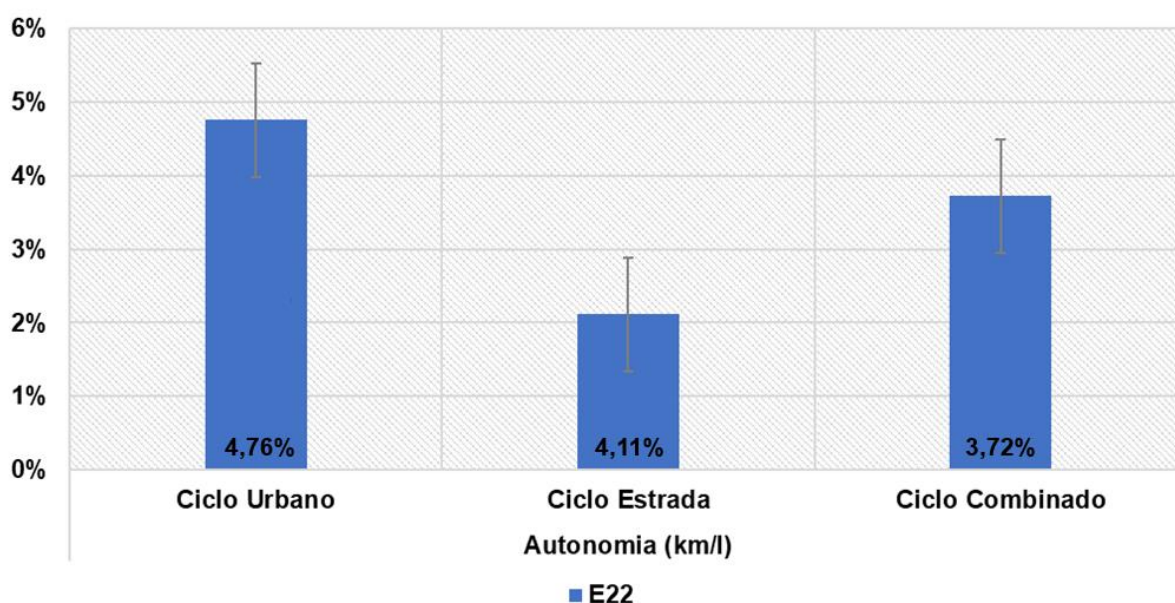
A Figura 36 ilustra graficamente o resultado do consumo energético (MJ/km) dos veículos operando com os combustíveis E22. Os resultados foram obtidos por meio de três ensaios para cada configuração descrita na Tabela 10, garantindo assim resultados consistentes e próximos entre si. A repetitividade máxima alcançada foi de 0,05 (adimensional) para o consumo energético combinado. Além disso, foi empregado um fator de abrangência igual a 2 (adimensional), que define um intervalo de confiança aproximado de 95%.

Figura 36 – Consumo energético combinado das fases do ciclo urbano (MJ/km)

Fonte: Elaborado pela autora.

Vale ressaltar que quanto menor o consumo energético, maior será a eficiência energética do veículo. Na Figura 36, observou-se que o veículo adaptado com o alternador com desacoplamento eletromecânico inteligente apresentou maior eficiência energética quando comparado ao veículo NP.

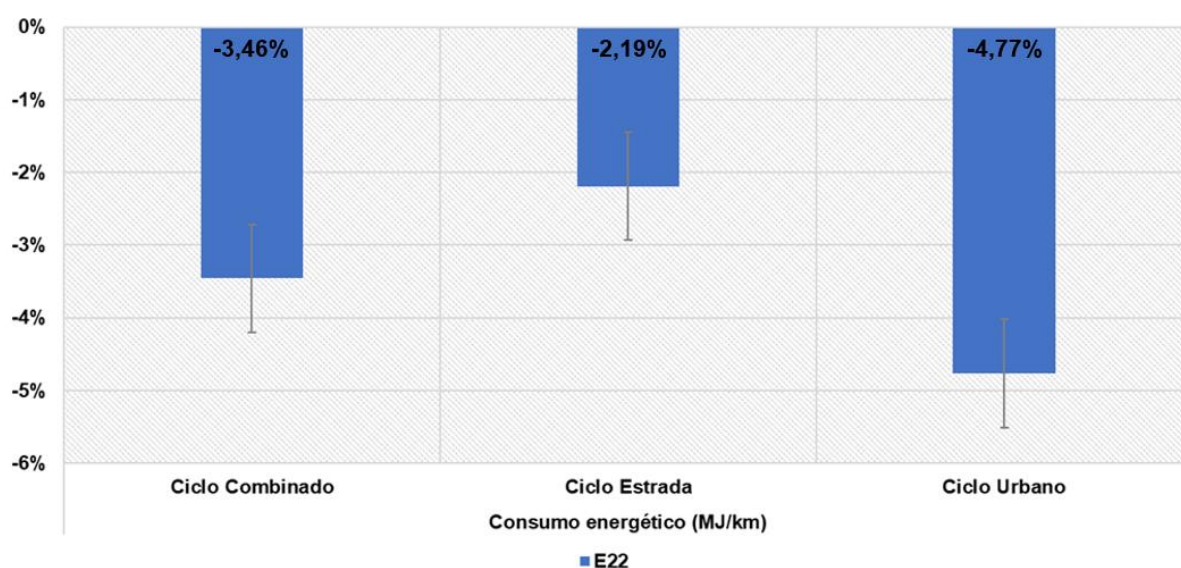
As Figura 37 e Figura 38 apresentam graficamente, em percentual, os resultados da comparação entre o veículo NP e o veículo adaptado com o alternador com desacoplamento eletromecânico inteligente, operando com o combustível E22.

Figura 37 - Resultados percentuais para a autonomia em km/l

Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 37, tem-se os resultados percentuais para a autonomia, em km/l. O veículo adaptado com o alternador com desacoplamento eletromecânico inteligente apresentou um aumento na autonomia de 4,78% com o combustível E22 durante o ciclo de condução urbano. Para o ciclo de condução em estrada, houve um aumento de 2,11% com E22. Ao considerar a combinação dos dois ciclos de condução, a autonomia aumentou em 3,72% com o uso do combustível E22.

Figura 38 - Resultados percentuais para o consumo energético em MJ/km



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 38 estão representados os resultados em percentual para o consumo de energia, medido em MJ/km. Os resultados demonstraram uma diminuição no consumo energético de 4,77% ao usar o combustível E22 durante o ciclo de condução urbana. No ciclo de estrada, quando operado com o combustível E22, observou-se uma redução no consumo de energético de 2,19%. Ao considerar o consumo de energético combinado dos dois ciclos de condução, com o uso do combustível E22, registrou-se uma redução de 3,46%.

De forma análoga ao citado na simulação numérica, o ciclo de condução em estrada descreve as condições de direção em vias de alta velocidade, resultando em velocidades mais constantes. Isso leva a menos atividade do alternador, resultando em uma redução menor no consumo de combustível em comparação ao ciclo urbano.

5.3 Validação dos resultados

Na Tabela 12, são apresentados os erros de cálculo ao se comparar os resultados obtidos por meio do procedimento numérico com os resultados experimentais. O erro é expresso tanto em termos de erro absoluto como de erro relativo para avaliar a precisão das estimativas numéricas em relação às observações experimentais.

Tabela 12 – Comparação entre Resultados do Procedimento Numérico e Experimental, para o combustível E22

	Parâmetro	Erro Relativo	Erro Absoluto
Autonomia (km/l)	Ciclo Combinado	2,59%	0,019
Consumo energético (MJ/km)	Ciclo Combinado	6,32%	0,004

Fonte: Elaborado pela autora.

Foram realizadas comparações entre os resultados numéricos e experimentais no contexto do ciclo combinado entre os diferentes ciclos de condução. As simulações revelaram um erro relativo de 2,59% para a autonomia e 6,32% para o consumo energético. Além disso, o erro absoluto para o ciclo combinado foi calculado em 0,019 para a autonomia, em km/l, e 0,004 para o consumo energético, em MJ/km.

Os resultados sugerem que o procedimento numérico utilizado tem uma boa capacidade de prever o desempenho do veículo no ciclo combinado, em termos de autonomia e consumo energético. No entanto, observa-se que, embora os erros sejam relativamente baixos, ainda existem variações entre os resultados numéricos e experimentais. Essas variações podem ser atribuídas a diversas razões, que incluem incertezas nas condições de teste, configurações do modelo e fatores, bem como aerodinâmica, peso, tamanho do motor, coeficiente de arrasto, características dos pneus e rodas, além de outras fontes de influência.

6 CONCLUSÕES

No presente capítulo, serão apresentadas as conclusões a fim de avaliar a influência da tecnologia do alternador com acoplamento e desacoplamento eletromecânico na eficiência energética e consumo de combustível. Por fim, serão apresentadas sugestões para futuras pesquisas.

Para avaliar o impacto da tecnologia do alternador com acoplamento e desacoplamento eletromecânico, foram realizados procedimentos tanto numéricos quanto experimentais. No âmbito do procedimento numérico, foram realizadas simulações 1D utilizando o *software GoFast*[®] para o veículo norma de produção e para o veículo adaptado com o alternador com desacoplamento eletromecânico inteligente, ambos operando com os combustíveis E22 e E100.

Para o procedimento experimental, inicialmente foi construído o protótipo e, em seguida, foram realizados os testes no dinamômetro de chassi, seguindo as normas vigentes. Os ensaios foram conduzidos em dois tipos de veículos: um veículo de produção padrão equipado com um alternador convencional e outro veículo adaptado com um alternador que possuía uma embreagem eletromagnética capaz de se acoplar e desacoplar de forma eletromecânica. Os testes ocorreram no Laboratório de Emissões Veiculares da Fiat Chrysler Automóveis, localizado na planta de Betim, Minas Gerais. Devido a circunstâncias adversas, os ensaios foram realizados apenas com o uso do combustível E22.

No que se refere à autonomia simulada numericamente em km/l, o Alternador com Desacoplamento Eletromecânico apresentou um aumento de 3,82% com o combustível E22 e de 5,06% com o E100, quando considerado o ciclo de condução combinado que engloba tanto o urbano quanto o em estrada. Já nos ensaios experimentais, a autonomia em km/l apresentou um aumento de 3,72% com o combustível E22 quando considerado o conjunto dos dois ciclos de condução.

No que diz respeito ao consumo energético simulado numericamente, medido em MJ/km, o veículo adaptado com o alternador de desacoplamento eletromecânico inteligente registrou uma redução de 3,68% com o E22 e de 4,81% com o E100, quando considerado o ciclo de condução combinado que inclui tanto o urbano quanto o de estrada. Nos ensaios experimentais, ao se levar em conta o consumo energético combinado para ambos os ciclos de condução urbano e de estrada, com o uso do combustível E22, foi observada uma redução de 3,46%.

Em síntese, este estudo destacou os efeitos da instalação de um alternador com embreagem eletromagnética em um veículo *flex-fuel*. Embora os ensaios experimentais tenham

sido realizados apenas com o combustível E22, devido a circunstâncias adversas, os resultados obtidos foram promissores para esta pesquisa. Os resultados indicam que o procedimento numérico utilizado demonstra boa capacidade na previsão do desempenho do veículo, considerando aspectos como a autonomia e o consumo energético. As simulações revelaram um erro relativo, para o ciclo de condução combinado, de 2,59% para a autonomia, expresso em km/l, e 6,32% para o consumo energético, medido em MJ/km. Além disso, as modificações necessárias no veículo para a instalação do alternador com desacoplamento eletromecânico inteligente foram mínimas, e os benefícios em termos de autonomia e consumo energético foram comprovados por meio dos resultados obtidos neste estudo.

6.1 Sugestão para trabalhos futuros

Para os próximos passos para o presente trabalho, sugere-se:

- a) Analisar as emissões de CO₂, CO, HC e NO_x, por meio de ensaios experimentais e numéricos;
- b) Realizar os procedimentos experimentais para o veículo com o combustível etanol;
- c) Realizar uma análise comparativa entre o alternador com acoplamento eletromecânico e o *Belt-driven Starter Generator* (BSG) com o objetivo de avaliar o consumo de energia e a autonomia do veículo. Além disso, analisar e comparar a viabilidade econômica das tecnologias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Resolução ANP nº 907, de 18 de novembro de 2022. Dispõe sobre as especificações do etanol combustível e suas regras de comercialização em todo o território nacional. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 23 nov. 2022. Seção 1, p. 1-10.

ANDO, Junji *et al.* ***Improvement in Mixed Lubrication Characteristics of Electromagnetic Clutch Coated with DLC-Si Film by Controlling Surface Roughness and Providing Micro-Groove.*** [Japão]: Japanese Society of Tribologists – Tribology Online, 2016, vol. 11, p. 13-23, ISSN 1881-2198. DOI: <https://doi.org/10.2474/trol.11.13>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6601:** Veículos rodoviários automotores leves – Determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e material particulado no gás de escape. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7024:** Veículos rodoviários automotores leves – Medição do consumo de combustível — Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8689:** Veículos rodoviários automotores leves – Combustíveis para ensaios – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10312:** Veículos rodoviários automotores leves – Determinação da resistência ao deslocamento por desaceleração livre em pista de rolamento e simulação em dinamômetro. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

AVL. **Dinamômetro de chassi AVL ROADSIM NVH 2x1 LIGHT TRUCK™.** Disponível em: <https://www.avl.com/-/avl-roadsim-nvh-2x1-light-truck-chassis-dynamometer#>. Acesso em: 31 out. 2022.

BASSHUYSEN, Richard Van; SCHÄFER, Fred. ***Internal Combustion Engine.*** Warrendale, EUA: SAE International, 2004.

BRASIL. **Lei 13.755, de 10 de dezembro de 2018.** Estabelece requisitos obrigatórios para a comercialização de veículos no Brasil; institui o Programa Rota 2030 - Mobilidade e Logística; dispõe sobre o regime tributário de autopeças não produzidas; e altera as Leis nº 9.440, de 14 de março de 1997, 12.546, de 14 de dezembro de 2011, 10.865, de 30 de abril de 2004, 9.826, de 23 de agosto de 1999, 10.637, de 30 de dezembro de 2002, 8.383, de 30 de dezembro de 1991, e 8.989, de 24 de fevereiro de 1995, e o Decreto-Lei nº 288, de 28 de fevereiro de 1967. Brasília, DF: Presidência da República, [2018]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2018/Lei/L13755.htm. Acesso em: 01 de abr. 2021.

BRASIL. **Lei 8.723, de 28 de outubro de 1993**. Dispõe sobre a redução de emissão de poluentes por veículos automotores e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, [1993]. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l8723.htm. Acesso em: 22 set. 2021.

BOSCH, Robert. **Alternadores, motores de partida e principais componentes**. Campinas, SP: Robert Bosch LTDA, 2019. Disponível em: https://www.boschaftermarket.com/xrm/media/images/country_specific/br/downloads_19/pdf_9/catlogo_rm_completo_2019.pdf. Acesso em: 01 ago. 2022.

BOSCH, Robert. **Electronic battery sensor**. [Estados Unidos]: Bosch Mobility Solutions, 2022. Disponível em: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/solutions/sensors/electronic-battery-sensor/>. Acesso em: 19 ago. 2022.

BOSCH, Robert. **Manual de Baterias Bosch**. São Paulo: Robert Bosch LTDA, 2017.

BOSH, Robert. **Manual de tecnologia automotiva**. Tradução da 25. ed. alemã. São Paulo: Blucher, 2005. Recuso online ISBN 978821215523.

BOSCH, Robert. **Máxima potência para o sistema Start/Stop**. Madrid, Espanha: BOSCH Automotive Aftermarket, 2012. Disponível em: https://www.boschaftermarket.com/xrm/media/images/country_specific/pt/services_14/downloads_12/pdf_7/starstop_pt.pdf. Acesso em: 01 ago. 2022.

BOSMAL. **Modal analysis of diluted and undiluted exhaust**. Bielsko-Biała (Polônia): Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Automotivo BOSMAL Ltd, 2023. Disponível em: https://www.bosmal.eu/285-modal_analysis_of_diluted_and_undiluted_exhaust. Acesso em: 14 fev. 2023.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Emissões Veiculares no estado de São Paulo 2019** [recurso eletrônico]. São Paulo, SP: CETESB, 2020. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2020/11/Relatorio-Emissoes-Veiculares-no-Estado-de-Sao-Paulo-2019.pdf>. Acesso em: 06 mar. 2022.

CEZAR, Gustavo Vianna. **Desenvolvimento de uma Bancada de Testes para Motores a Combustão Interna**. Rio de Janeiro, RJ: Dissertação de mestrado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2012. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/37900/37900.PDF>. Acesso em: 08 set. 2022.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (BRASIL). **Resoluções do CONAMA: Resoluções vigentes publicadas entre setembro de 1984 e janeiro de 2012**. Brasília: MMA – Ministério do Meio Ambiente, p. 1126, 2012. Disponível em: http://www.mpggo.mp.br/portal/arquivos/2016/07/08/09_47_15_666_LivroConama.pdf. Acesso em: 15 fev. 2022.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (BRASIL). Resolução CONAMA nº18/1986, de 6 de maio de 1986. Dispõe sobre a criação do Programa de Controle de Poluição do Ar por veículos Automotores – PROCONVE. **Diário Oficial da União**: Seção 1, Brasília, DF, p. 8792-8795, 17 jun. 1986. Disponível em: http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=41. Acesso em: 16 nov. 2021.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (BRASIL). Resolução CONAMA nº492/2018, de 24 de dezembro de 2018. Estabelece as Fases PROCONVE L7 e PROCONVE L8 de exigências do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE para veículos automotores leves novos de uso rodoviário, altera a Resolução CONAMA nº 15/1995 e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: Seção 1, Brasília, DF, n. 246, p. 141, 20 dez. 2018. Disponível em: https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/56643907/do1-2018-12-24-resolucao-n-492-de-20-de-dezembro-de-2018-56643731. Acesso em: 16 jun. 2021.

CONTINENTAL AUTOMÓVEIS. **Intelligent Battery Sensor**. [Estados Unidos]: Continental the future in motion, 2022. Disponível em: <https://www.continental-automotive.com/en-gl/Trucks-Buses/Vehicle-Chassis-Body/Advanced-Sensors/Intelligent-Battery-Sensor>. Acesso em: 19 ago. 2022.

COSTA, R. C.; SODRÉ, J. R. **Compression ratio effects on an ethanol / gasoline fuelled engine performance**. [Brasil]: Applied Thermal Engineering – Elsevier, 2011, v. 31, n. 2–3, p. 278–283, ISSN: 1359-4311. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2010.09.007.

COSTA, R. C.; SODRÉ, J. R. **Hydrous ethanol vs. gasoline-ethanol blend: Engine performance and emissions**. [Brasil]: Fuel Journal – Elsevier, 2010, v. 89, n. 2, p. 287–293, ISSN: 0016-2361. DOI: 10.1016/j.fuel.2009.06.017.

DIAS, Iolanda de Lourdes Gonçalves. **Análise experimental da influência do ar condicionado automotivo nas emissões e no consumo de combustível em veículos leves considerando o ciclo urbano (ftp-75)**. Belo Horizonte, MG: Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2017.

DIAS, Bruno Martins de Alcântara. **Unidade microcontroladora para gerenciamento eletrônico de um Motor a combustão interna ciclo Otto**. São Paulo, SP: Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), 2015.

DRAGOŞ, Claudia A. *at al.* **Adaptive control solutions for the position control of electromagnetic actuated clutch systems**. Madri, Espanha: IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2012, p. 81-86. DOI: 10.1109/IVS.2012.6232207.

FERGUSON, Colin R.; KIRKPATRICK, Allan T. **Internal Combustion Engines: Applied Thermosciences**. 2. ed. p.546. New York: J. Wiley, 2016.

FIAT – FCA FIAT CHRYSLER AUTOMOVEIS BRASIL LTDA. **Argo: Manual de uso e Manutenção**. Betim, MG: FCA FIAT Chrysler Automóveis Brasil LTDA, 2020. Disponível em: <https://servicos.fiat.com.br/manuais.html>. Acesso em: 20 set. 2022.

GOVERNO FEDERAL (Brasil). **Programa Rota 2030 - Mobilidade e Logística**. [Brasil]: gov.br, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/produtividade-e-comercio-exterior/pt-br/assuntos/competitividade-industrial/setor-automotivo/rota-2030-mobilidade-e-logistica>. Acesso em: 20 fev. 2022.

GUANGZENG, Chen; YUNJIANG. Lou. ***Recurrent-Neural-Network-Based Rate-Dependent Hysteresis Modeling and Feedforward Torque Control of the Magnetorheological Clutch***. [Estados Unidos]: IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022, vol. 27, pp. 2875-2886. DOI: 10.1109/TMECH.2021.3121498.

HEYWOOD, John B. ***Internal Combustion Engine Fundamentals***. 2. ed. p.1056. New York, Estados Unidos: McGraw-Hill Education, 2018.

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Ministério do Meio Ambiente. **Programa de controle de emissões veiculares (PROCONVE)**. [Brasil]: IBAMA – MMA, 2021. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/emissoes/veiculos-automotores/programa-de-controle-de-emissoes-veiculares-proconve>. Acesso em: 16 nov. 2021.

ICCT – The International Council On Clean Transportation. ***Brazil PROCONVE L-7 and L-8 emission standards for lightduty vehicles***. São Paulo, SP: ICCT, 2020. Disponível em: https://theicct.org/sites/default/files/publications/Brazil_L7L8_policy_update_01302020.pdf. Acesso em: 12 mar. 2022.

ICMC JÚNIOR. **Como interpretar um boxplot?**. São Carlos, SP: ICMC JÚNIOR, 2021. Disponível em: https://icmcjunior.com.br/como-interpretar-um-grafico-boxplot/?gclid=Cj0KCQiAm5ycBhCXARIsAPldzoUbRat1z1-lrF4W5ok09QAUXLXpBHnU7WSTvCSSbwuLgNNXOg8vWi8aAqopEALw_wcB. Acesso em: 30 nov. 2022.

IVANENKO, Fernando. **O que é um gerador de carro**. [Brasil]: Mãos ao Auto, 2017. Disponível em: <https://www.maosaoauto.com.br/2017/09/o-que-e-um-gerador-de-carro/>. Acesso em: 13 fev. 2022.

LAKSHMINARASIMHAN, Venkatnarayanan; ATHANI, Gopal. ***“An Intelligent Alternator Control Mechanism for Energy Recuperation and Fuel Efficiency Improvement.”***. [Estados Unidos]: SAE International Journal of Alternative Powertrains, vol. 2, no. 1, pp. 217–25, 2013. DOI: <https://doi.org/10.4271/2013-01-1750>.

LINS, Alice Furtado. ***Integration of a belt-starter generator in a flex fuel Vehicle***. Belo Horizonte: Dissertação de mestrado - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas), 2023.

MARTINS, Amanda Alves. **Análise da eficiência energética dos sistemas stop-start e gerador solar fotovoltaico em um veículo leve**. Belo Horizonte, MG: Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-Minas), 2016.

MARTINS, Bruno Felipe Lucas. **Desenvolvimento e validação de um software para cálculo de consumo de combustível e desempenho em veículos automotores**. Florianópolis: Projeto de pesquisa para especialização em Engenharia Automotiva com ênfase em *Powertrain* – Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2011.

MESQUITA, Mateus. *et al.* **Deteção de CO e CO₂ emitidos por um motor a gasolina de ciclo Otto**. In: Revista Perspectivas Online: Exatas & Engenharia, v.7, n.18, p.15–21, ISSN: 2236-885X (Online). Rio de Janeiro, RJ: POEE, 2017. DOI: <https://doi.org/10.25242/885X71820171193>. Disponível em: https://ojs3.perspectivasonline.com.br/exatas_e_engenharia. Acesso em: 25 fev. 2022.

MILHOR, Carlos Eduardo. **Sistema de desenvolvimento para controle eletrônico dos motores a combustão interna ciclo Otto**. São Paulo, SP: Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (USP), 2002. DOI: 10.11606/D.18.2002.tde-12032003-092253.

MIKI PULLEY. **What Are Electromagnetic Clutches and Electromagnetic Brakes?**. [Japão]: Miki Pulley, 2022. Disponível em: <https://www.mikipulley.co.jp/EN/Products/ElectromagneticClutchesAndBrakes/about.html>. Acesso em: 20 out. 2022.

MONTALTO, Iolanda *et al.* **“Intelligent Alternator Employment To Reduce Co₂ Emission and to Improve Engine Performance.”**. [Estados Unidos]: SAE International Journal of Alternative Powertrains, 2011, vol. 1, no. 1, pp. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.4271/2011-01-2444>.

MONTEIRO, Luís Gustavo de Carvalho. **Avaliação experimental de um veículo equipado com alternador com desacoplamento eletromecânico e sistema stop-start**. Belo Horizonte: Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2020.

NAÇÕES UNIDAS DO BRASIL. **Novas diretrizes da OMS sobre qualidade do ar reduzir valores seguros para poluição**. [Brasil]: Nações Unidas do Brasil, 23 set. 2021. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/145721-novas-diretrizes-da-oms-sobre-qualidade-do-ar-reduzem-valores-seguros-para-poluicao>. Acesso em: 25 fev. 2022.

OGURA – OGURA INDUSTRIAL CORPORATION. **How Industrial Clutches and Brakes Work**. Nova Jersey, EUA: OGURA, 2022. Disponível em: https://ogura-clutch.com/electromagnetic_clutch.php. Acesso em: 20 out. 2022.

OLIVEIRA, Antônio Gaspar de. **A embreagem eletromagnética do compressor do ar condicionado não funciona - testes e troca**. São Paulo: Jornal Oficina Brasil, 2021. Disponível em: <https://www.oficinabrasil.com.br/noticia/tecnicas/a-embreagem-eletromagnetica-do-compressor-do-ar-condicionado-nao-funciona-testes-e-troca>. Acesso em: 21 out. 2022.

PULKRABEK, Willard W. **Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine**. 2^{en} ed., XXIII, p. 478. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003.

PUZAKOV, Av. ***Instrumental monitoring of the load of the automotive alternator during the movement of the vehicle***. Sibéria, Rússia: Journal of Physics – Conference Series, 2020, vol. 1582. DOI: 10.1088/1742-6596/1582/1/012072.

PUZAKOV, Av. ***Model of residual resource of automotive alternators***. Irkutsk, Rússia: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering – International Conference on Innovations in Automotive and Aerospace Engineering, 2019a, vol. 636. DOI: 10.1088/1757-899X/632/1/012047.

PUZAKOV, Andrey. ***Diagnosing of automotive alternators on thermal state***. Orenburg, Federação Rússia: MATEC Web of Conferences 298 – International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Mechanical Engineering and Materials Science (ICMTMTE-2019), 2019b. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929800005>

KARAVALLAKIS, George *et al.* ***Criteria Emissions, Particle Number Emissions, Size Distributions, and Black Carbon Measurements from PFI Gasoline Vehicles Fuelled with Different Ethanol and Butanol Blends***. California, EUA: SAE International, 2013. Doi: <https://doi.org/10.4271/2013-01-1147>.

KHAFIZOV, A. *et al.* ***The design of automotive alternator with high efficiency***. Kazan, Rússia: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering – International Scientific-Technical Conference on Innovative Engineering Technologies, Equipment and Materials (ISTC-IETEM-2018), 2019, vol. 570. DOI: 10.1088/1757-899X/570/1/012051.

KIRCHENGAST, M.; STEINBERGER, M.; HORN, M. ***Modeling and feedback linearization based control of an electromagnetic clutch actuator***. Juan Les Antibes, França: IEEE Conference on Control Applications (CCA), 2014, p. 59-64. DOI: 10.1109/CCA.2014.6981329.

KRAIL, M.; SCHADE, W. ***Technologies and incentives to reduce CO₂ emissions from passenger cars***. GHG-TrasnporD Workshop 3. Berlin, Alemanha: Berlin Seminar in Energy and Climate (BSEC), 2010.

SALES, Luís Carlos Monteiro *et al.*, ***"Comparison of energy consumption and CO₂ reduction with combined application of the Start & Stop and intelligent alternator in a flex fuel vehicle"***. [Estados Unidos]: SAE International Journal of Alternative Powertrains, 2017a. Documento Técnico SAE 2017-36-0115. DOI: <https://doi.org/10.4271/2017-36-0115>.

SALES, Luís Carlos Monteiro *et al.*, ***"Evaluation of the influence of an alternator with mechanical decoupling on energy consumption and CO₂ emission in a flex fuel vehicle"***. [Estados Unidos]: SAE International Journal of Alternative Powertrains, 2017b. Documento Técnico SAE 2017-36-0116. DOI: <https://doi.org/10.4271/2017-36-0116>.

SALES, Luís Carlos Monteiro *et al.*, ***"Experimental comparative analysis of the combined Stop & Start and alternator with mechanical decoupling strategies"***. [Estados Unidos]: SAE Technical Paper 2018-36-0341, 2018. Doi: <https://doi.org/10.4271/2018-36-0341>.

SALES, Luís Carlos Monteiro. Patente INPI N° BR102015001454-6 (Brasil), Fiat Automóveis S.A., **Sistema e método para o acoplamento e/ou desacoplamento eletromecânico seletivos de alternador automotivo**. 2015.

SALES, Luís Carlos Monteiro. Patente N° US 10.247.265 (EUA), FCA Fiat Chrysler Automobiles Brasil Ltda. **System and method for selective electromechanical coupling and/or uncoupling of automotive alternator**. 2019.

SALES, Luís Carlos Monteiro. Patente N° EP 15777859.8 (Europa), FCA Fiat Chrysler Automobiles Brasil Ltda. **System and method for selective electromechanical coupling and/or uncoupling of automotive alternator**. 2019.

SALMO. *In: A BÍBLIA: tradução ecumênica*. São Paulo: Paulinas, 2022.

SCHNEIDER, Dominik; LIEBHART, Bernhard; ENDISCH, Christian. **Active state and parameter estimation as part of intelligent battery systems**. Ingolstadt, Alemanha: Journal of Energy Storage, 2021, v. 39. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102638>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X21003625>. Acesso em: 04 ago. 2022.

SEDDON, Jessica *et al.* **5 impactos pouco conhecidos da poluição do ar**. Tradução de *World Resources Institute (WRI Insights)*. *In: WRI Brasil*. [Brasil]: WRI, 5 jan. 2019. Disponível em: <https://wribrasil.org.br/pt/blog/2019/06/5-impactos-pouco-conhecidos-da-poluicao-do-ar-atmosferica#:~:text=Respirar%20ar%20polu%C3%ADdo%20n%C3%A3o%20afeta,al%C3%A9m%20de%20causar%20mortes%20prematuras.&text=A%20inala%C3%A7%C3%A3o%20de%20fuligem%20ou,doen%C3%A7as%20como%20asma%20e%20c%C3%A2ncer>. Acesso em: 25 fev. 2022.

SHIN, Yoon Hyuk; KIM, Sung Chul. **Use of electromagnetic clutch water pumps in vehicle engine cooling systems to reduce fuel consumption**. [S. l.]: Energy Journal – Elsevier, 2013, vol. 57, p. 624-631, ISSN 0360-5442, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.04.073>.

STATPLACE. **Boxplot: Como interpretar?**. [Brasil]: Statplace, 2022. Disponível em: <https://statplace.com.br/blog/como-interpretar-um-boxplot/#:~:text=O%20boxplot%20ou%20diagrama%20de,%C3%A9%20uma%20disposi%C3%A7%C3%A3o%20gr%C3%A1fica%20comparativa>. Acesso em: 30 nov. 2022.

TURNER, Stephen R. **Introdução a combustão conceitos e aplicações**. 3. ed. Porto Alegre: AMGH Editora LTDA, 2013.

WALDMAN, Colin *et al.* **A model-based supervisory energy management strategy for a 12V vehicle electrical system**. Ohio, Estados Unidos: Control Engineering Practice - Elsevier, 2015, vol. 44, p. 20-30, ISSN 0967-0661. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2015.05.011>.

YANG, Fan; GU, Chenglin. **Power Supply System Design and Dynamic Analysis of a Permanent Magnet Bistable Electromagnetic Clutch for Wheel Motor Drive**. [S. l.]: Editora IEEE, 2020, vol. 8, p. 218161-218169. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3041896.

ŽIVOTIĆ-KUKOLJ, V.; SOONG, W.L. *Effect of open stator slots on the performance of an interior permanent magnet automotive alternator*. [S. l.]: IET Electric Power Applications, 2013, p. 295-302. DOI: 10.1049/iet-epa.2012.0105

APÊNDICE A – EAP

Para melhor organização da metodologia, foi desenvolvido um organograma para simplificar a Estrutura Analítica do Projeto (EAP), de tal maneira que suas etapas foram subdivididas em 06 (seis) macroentregas, cujo marco representa o objetivo de cada estágio de execução – conforme representado de forma resumido na Figura 39. São estas etapas então descritas da seguinte forma:

- a) *Start* – Desenvolvimento inicial do trabalho: compreende nas atividades de determinação do tema, motivação e objetivos, na elaboração do cronograma, no treinamento inicial no *software* utilizado para desenvolvimento das simulações numéricas;
- b) Referências bibliográficas: compreende nas atividades de pesquisa e levantamento de referências relacionados a tecnologias aplicadas nos alternadores automotivos;
- c) Fundamentação teórica: compreende nas atividades de pesquisa e levantamento de referências teóricas, bem como a redução de emissões de poluentes por veículos automotores (motivação), assuntos relacionados a motores de combustão interna, baterias automotivas, alternadores, combustão e combustíveis, dinamômetros, ensaios de emissões veiculares e ensaios de consumo de combustíveis;
- d) Metodologia: compreende na execução do presente trabalho, bem como explicando de forma detalhada os parâmetros e métodos utilizados para a realização da simulação numérica e o procedimento experimental e, por fim, as análises estatísticas.
- e) Resultados: corresponde na atividade de compilar os resultados, descrevê-los e analisá-los;
- f) Conclusão: consiste no fechamento do trabalho, bem como a junção dos fatos obtidos ao longo do trabalho e os métodos necessários para concluir os objetivos planejado;

Figura 39 – Estrutura Analítica do Projeto (EAP)

Fonte: Elaborado pelo autor.

ANEXO A - PROCESSO DE PATENTE INPI Nº INPI BR102015001454-6

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL
MINISTÉRIO DA ECONOMIA
INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL

CARTA PATENTE Nº BR 102015001454-6

O INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL concede a presente PATENTE DE INVENÇÃO, que outorga ao seu titular a propriedade da invenção caracterizada neste título, em todo o território nacional, garantindo os direitos dela decorrentes, previstos na legislação em vigor.

(21) Número do Depósito: BR 102015001454-6

(22) Data do Depósito: 22/01/2015

(43) Data da Publicação Nacional: 02/08/2016

(51) Classificação Internacional: F16D 3/00.

(54) Título: SISTEMA E MÉTODO PARA O ACOPLAMENTO E/OU DESACOPLAMENTO ELETROMECAÂNICO SELETIVOS DE ALTERNADOR AUTOMOTIVO

(73) Titular: FIAT AUTOMÓVEIS LTDA, Indústria Automobilística. CGC/CPF: 16701716000156. Endereço: Avenida Contorno, 3455, PAULO CAMILO, BETIM, MG, BRASIL(BR), 32669-900

(72) Inventor: LUÍZ CARLOS MONTEIRO SALES.

Prazo de Validade: 20 (vinte) anos contados a partir de 22/01/2015, observadas as condições legais

Expedida em: 28/06/2022

Assinado digitalmente por:

Liane Elizabeth Caldeira Lage

Diretora de Patentes, Programas de Computador e Topografias de Circuitos Integrados



Resumo

Sistema e método para o acoplamento e/ou o desacoplamento eletromecânico seletivos de alternador automotivo

É descrito um sistema, e um respectivo método, para realizar o acoplamento e o desacoplamento seletivos de um alternador (1) em relação a polia (6) do virabrequim (7) de um motor. O alternador é mantido acoplado ou desacoplado em função da carga detectada na bateria (20), enquanto que tanto o acoplamento quanto o desacoplamento são realizados em duas etapas distintas e defasadas no tempo, uma prevendo o acoplamento ou desacoplamento elétrico e outra prevendo o acoplamento ou desacoplamento mecânico.

Fig 01

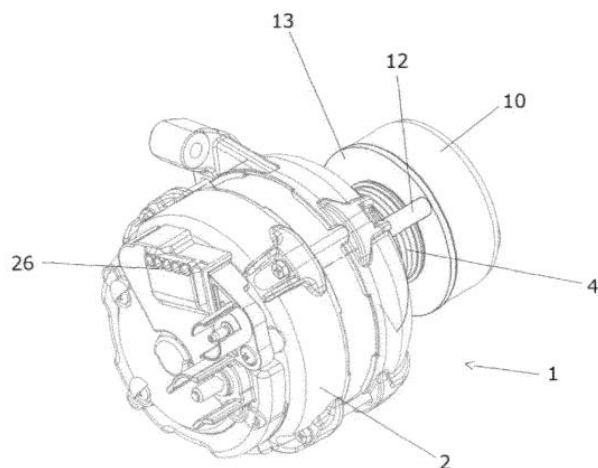
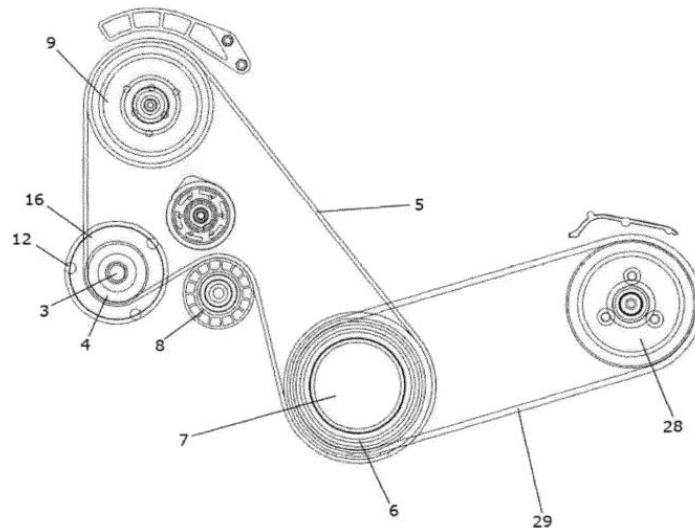


Fig 02

Fig 03

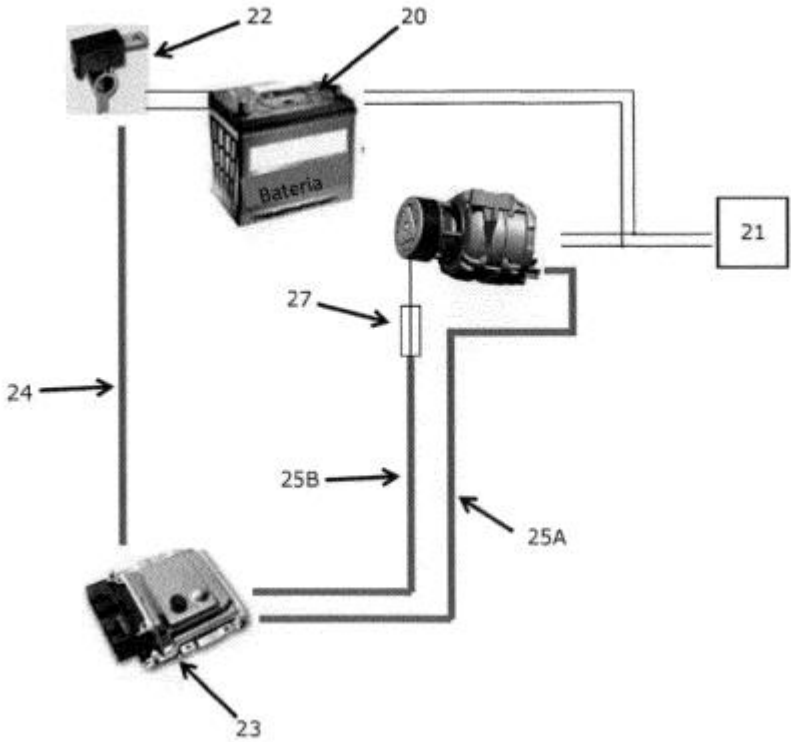
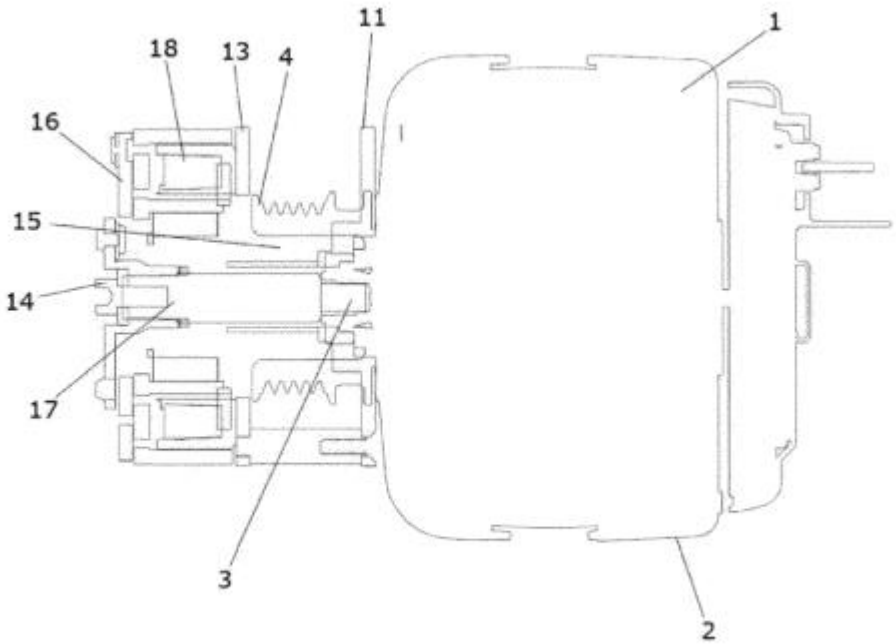


Fig 04

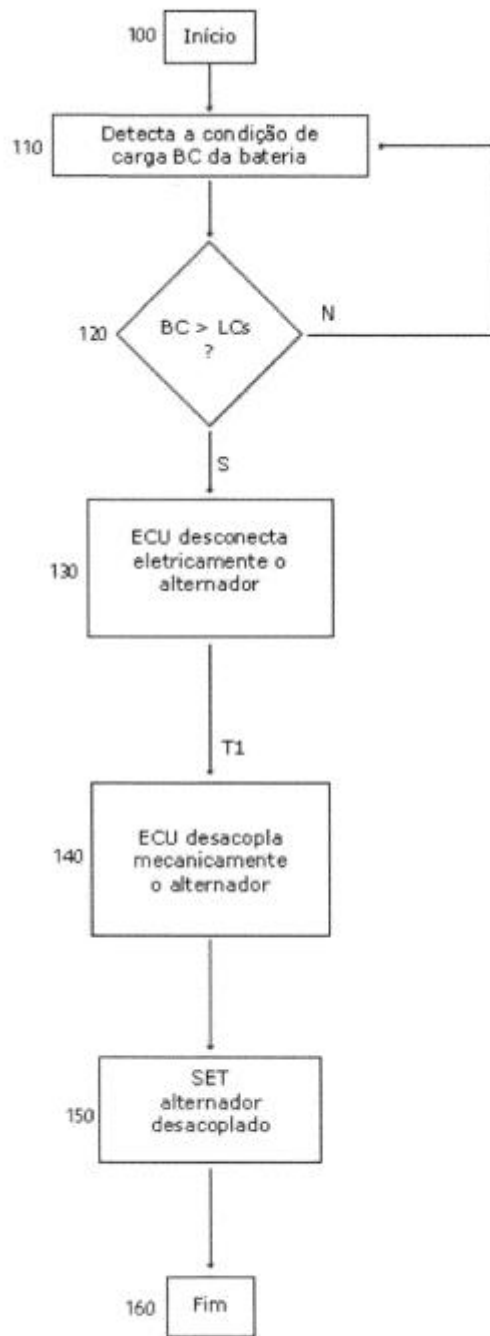


Fig 5A

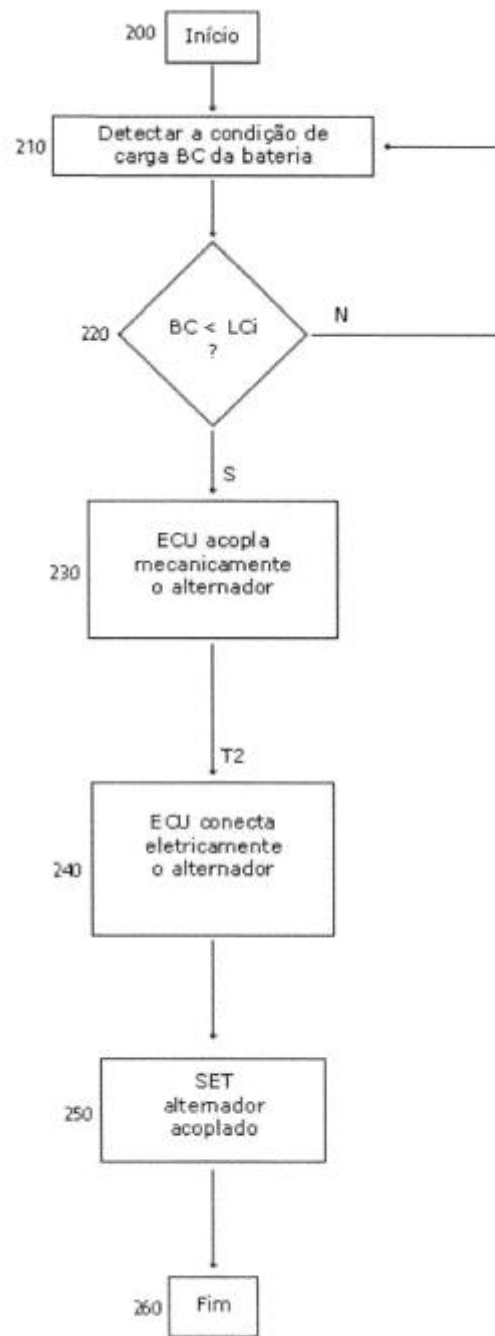


Fig 5B